RELATÓRIO QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

FECHAMENTO DE CICLO
(25/01/2019 a 30/09/2022)

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

CODIFICAÇÃO ARCADIS (1.03.03.50435-QM-RT-0022-Rev.1)

VALE S.A.

DEZEMBRO DE 2022

Isenção de Responsabilidade

Elaboradores	**Áreas**	**Data da Elaboração**
Aline Amaral	Geóloga	
Caique Cabral	Geológo, MSc	20/10/2022
Gabriela Rodrigues Barroso	Engenheira Ambiental e Sanitarista, MSc	
Igor de Camargo Moreira	Geológo, MSc	
Kátia Maria Mellito	Geóloga, MSc	
Larissa Faria	Engenheira Ambiental	
Leonardo Silva	Engenheiro Ambiental	
Ludmila Lage	Estatística	
Viviane Ramos de Carvalho	Engenheira Ambiental, MSc	
Filipe Lima Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc	
Verificadores	**Áreas**	**Data da Verificação**
Filipe Lima Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc	29/12/2022
Kátia Maria Mellito	Geóloga, MSc	

Aprovador
Diego Marcondes

ESTE DOCUMENTO É DE USO RESTRITO E CONFIDENCIAL. QUALQUER REPRODUÇÃO NÃO AUTORIZADA NÃO GARANTIRÁ SUA VERACIDADE.

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

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
Diego Marcondes	Gerente do projeto	diego.marcondes@arcadis.com
	Engenheiro Ambiental	
Nayana Ortmann	Responsável Técnico	CREA/ MG: 188818/D
	Líder do Projeto	nayana.ortmann@arcadis.com
Aline Amaral	Geóloga	aline.amaral@arcadis.com
Caique Cabral	Geológo, 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
Kátia M. Mellito	Geóloga, MSc	katia.mellito@arcadis.com
Larissa Faria	Engenheira Ambiental	larissa.faria@arcadis.com
Leonardo Silva	Engenheiro Ambiental	leonardo.silva@arcadis.com
Ludmila Lage	Estatística	ludmila.lage@arcadis.com
Gabriela Rodrigues Barroso	Eng. Ambiental e Sanitarista, MSc	gabriela.barroso@arcadis.com
Viviane Ramos de Carvalho	Engenheira Ambiental, MSc	viviane.carvalho@arcadis.com

Sumário executivo

O período de estiagem de 2022 foi marcado por reverberar os efeitos do período chuvoso de 2021/2022, o qual apresentou volumes pluviométricos notadamente elevados, (Arcadis, 2022b), induzindo a bacia do rio Paraopeba a condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal fluvial. Os valores dos níveis/vazões para a estiagem de 2022 foram, assim, superiores aos demais anos, em decorrência das chuvas que antecederam este período, principalmente entre os meses de abril a junho/2022, seguido de um decréscimo já esperado nos meses seguintes, indicando um possível retorno às condições naturais da bacia para o período. Dessa maneira, mesmo que os períodos de estiagem sejam normalmente caracterizados pelo arrefecimento natural das precipitações, o retardamento do período de recessão hidrológica em função de chuvas antecedentes pode configurar potencial fator de influência a alterações de qualidade da água.

Considerando os resultados do monitoramento ao longo de todos os períodos de estiagem, as concentrações dos parâmetros majoritários na fração total em água superficial foram mais elevadas nas regiões mais afetadas pelo rompimento (Ferro-Carvão, 1A e 1B), com atenuações para os trechos de jusante. Já para a fração dissolvida, os elementos Ferro e Alumínio apresentaram comportamento similar, com concentrações mais elevadas ao longo das regiões do rio Paraopeba em relação à região do ribeirão Ferro-Carvão, indicando que a disponibilização dessas frações está predominante no rio Paraopeba. Temporalmente, para as regiões mais afetadas no rio Paraopeba, os teores dos parâmetros na fração total, foram, em geral, mais elevados no período de estiagem/2019. Entretanto no período mais recente, estiagem/2022, os resultados dos analitos avaliados se elevaram, superando, por vezes, os resultados do ano de 2019. Nas demais regiões, destacando-se a 2B e a 2C, sob influência do reservatório de Retiro Baixo, os resultados foram mais elevados no período de estiagem/2022, principalmente ao se comparar com o período de estiagem/2021. Tal fato pode estar atrelado, como já destacado, à influência do período chuvoso anterior, chuva 2021/2022, que apresentou volumes pluviométricos notadamente elevados. Já para Ferro e Alumínio dissolvido, houve aumento sucessivo das concentrações entre os períodos de estiagem nas regiões, inclusive em Montante. Enquanto para a fração dissolvida de Manganês, notou-se redução gradual no eixo longitudinal do rio Paraopeba e ao longo dos períodos de estiagem.

O aumento das concentrações dos parâmetros de qualidade da água superficial no período de estiagem/2022 refletiu em maiores percentuais de violação aos limites legais, sobretudo em relação ao período de estiagem/2021 e à condição do *baseline* sazonal. 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* ao longo das regiões, destacando-se a influência de contribuições sanitárias. Demais parâmetros, incluindo físico-químicos, em geral, apresentaram apenas violações pontuais. Além disso, ressalta-se que, para os parâmetros traço, não houve violações nas regiões 1A a 2A. Nas regiões do ribeirão Ferro-Carvão e Montante ocorreram violações pontuais apenas para Chumbo total, destacando-se a ocorrência de inconformidades também na condição pré-rompimento e em trecho não afetado

pelo rompimento. Já na região 2B, foram identificadas violações pontuais para Cádmio total e Zinco total, sem persistência de valores elevados destes analitos ao longo do tempo. Na região 2C, violação pontual ocorreu para Cobre dissolvido.

Nos pontos de monitoramento próximos a trechos de captação de água para consumo humano (PT-02, PT-43 e PT-49), os maiores percentuais de violação foram mantidos para os parâmetros majoritários, destacando-se Manganês total, Ferro e Alumínio dissolvidos. Percentuais mais elevados também foram registrados para *E. coli* e, de forma mais pontual, para outros parâmetros físico-químicos. Para os parâmetros traço, não houve registro de violações.

Em sedimentos, as maiores concentrações de metais, principalmente Manganês, Ferro, Arsênio, Cobre e Níquel, foram identificadas da região do ribeirão Ferro-Carvão até a Região 1B (áreas em que houve maior influência do rejeito). Na 2B (reservatório de Retiro Baixo, ambiente favorável à deposição de sedimentos) também ocorreram maiores concentrações, com destaque para Alumínio, Arsênio, Cromo, Chumbo, Cobre e Níquel. As concentrações dos metais avaliados nos sedimentos, ao longo dos períodos de estiagem, têm mantido comportamento geral de manutenção/equilíbrio. Em alguns locais de retenção hidráulica como no Ferro-Carvão, percebeu-se uma tendência de aumento para alguns elementos. Contudo, reforça-se que na estiagem/2022 o aumento das concentrações de metais em alguns trechos, pode estar relacionado à influência das precipitações antecedentes, chuva 2021/2022, com deságue do rio ainda reverberando no período de estiagem.

Em termos de distribuição granulométrica, notou-se predominância de sedimentos mais finos em todas as regiões da bacia para o início do período de estiagem/2019, o que pode estar relacionada ao rompimento das barragens B1, B4 e B4A, resultando em um acúmulo dos rejeitos, principalmente nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B. Para os anos subsequentes (2020 a 2022), 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 e na região da UHE Retiro Baixo). 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), P e traço (Ni, Cu, As e Pb), comum a esses trechos ao longo do período analisado.

Ao se considerar os valores orientadores para a qualidade dos sedimentos, no período de estiagem/2022, 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. Neste período, Manganês e Alumínio ultrapassaram os valores de referência de Vicq (2015) e Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Fósforo e Níquel ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 (VOR 1). Em relação ao valor orientador do nível 2, ocorreram desvios para Arsênio nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C; Cromo nas regiões 1B e 2B; Níquel nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B.

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 a estiagem de 2022, 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 natural. Possivelmente, as chuvas intensas de 2021/2022 refletiram e afetaram a região, com 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.

A análise integrada mostrou baixa associação entre os metais em água superficial e sedimentos para a estiagem/2022. 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 em águas se atenuaram com a dissipação das chuvas, redução do nível de água e da turbidez. Já os sedimentos mostraram aumento nos analitos até a região 1B em 2019, seguidos de redução até a estiagem/2022. Somente os trechos com retenção hidráulica, como o trecho Ferro-Carvão e 2B, mostraram incremento das concentrações de metais, semimetais e P em decorrência do acúmulo de sedimentos finos. Isso confirmou o indicativo de redução das concentrações dos principais metais associados à assinatura química do rejeito ao longo do tempo e do espaço e a dissipação da turbidez causada com o rompimento da barragem. Na estiagem de 2022, 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.

Índice

Sumário executivo **3**
1. Introdução **22**
2. Contextualização da evolução da qualidade da água superficial e dos sedimentos **24**
3. Premissas gerais **34**
3.1. Recorte dos Dados 34
3.2. Caracterização da Área de Estudo 34
3.3. Caracterização do Rejeito 35
3.4. Campanhas de Monitoramento 35
3.5. Baselines 36
3.6. Limites de Quantificação (LQ) 37
3.7. Avaliação QAQC 38
3.8. Situação da pluma original 38
3.9. Padrões de qualidade 39
4. Caracterização hidrológica **42**
4.1. Contextualização 42
4.2. Rio Paraopeba 44
4.3. Ribeirão Ferro-Carvão 59
5. Alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de estiagem tendo em vista o *baseline* (sazonal) do corpo hídrico **63**
5.1. Objetivo 63
5.2. Metodologia 63
5.2.1. Estatística descritiva e inferencial 63
5.2.2. Análise de tendência temporal 65
5.2.3. Mapas temáticos - *baseline* 69
5.3. Resultados e discussão 69
5.3.1. Estatística descritiva e inferencial 71
5.3.1.1. Manganês total e dissolvido 71
5.3.1.2. Ferro total e dissolvido 79
5.3.1.3. Alumínio total e dissolvido 85
5.3.1.4. Turbidez 91
5.3.1.5. Fósforo total e dissolvido 95
5.3.2. Análise de tendência temporal 103
5.3.2.1. Manganês total e dissolvido 105

5.3.2.2. Ferro total e dissolvido 105
5.3.2.3. Alumínio total e dissolvido 106
5.3.2.4. Turbidez 107
5.3.2.5. Fósforo total e dissolvido 107
5.3.3. Mapas temáticos - *baseline* 108
5.4. Considerações 113
6. Evolução das violações aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba 116
6.1. Objetivo 116
6.2. Metodologia 116
6.3. Resultados e discussão 116
6.3.1. Mapas temáticos - VMP 125
6.4. Considerações 130
7. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba nas imediações das captações de água para consumo humano de acordo com as alterações sazonais 131
7.1. Objetivo 131
7.2. Metodologia 131
7.3. Resultados e discussão 133
7.3.1. Município de Brumadinho - Captação COPASA 133
7.3.2. Município de Pará de Minas - Captação Concessionária Águas de Pará de Minas 138
7.3.3. Município de Paraopeba – Captação COPASA 143
7.4. Considerações 148
8. Comportamento dos rios tributários ao longo dos diferentes períodos sazonais 149
8.1. Objetivo 149
8.2. Metodologia 149
8.3. Resultados e discussão 151
8.3.1. Ribeirão Sarzedo (TT-02) 151
8.3.2. Rio Betim (TT-01) 160
8.3.3. Ribeirão das Abóboras (TT-05) 168
8.3.4. Ribeirão dos Gomes (CE-01) 177
8.4. Considerações 187
9. Qualidade da água no reservatório de Retiro Baixo e no trecho de jusante na bacia do rio Paraopeba 189
9.1. Objetivo 189
9.2. Metodologia 189
9.3. Resultados e discussão 190

9.3.1. Acompanhamento da hidrodinâmica vertical do reservatório de Retiro Baixo 190
9.3.2. Comportamento da qualidade da água a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo nos diferentes períodos sazonais 195
9.4. Considerações 201
10. Qualidade da água nas regiões do reservatório de Três Marias (região 2D) e no trecho a jusante (região 3) 203
10.1. Objetivo 203
10.2. Metodologia 203
10.3. Resultados e discussão 203
10.3.1. Comportamento da qualidade da água nos diferentes períodos sazonais 204
10.4. Considerações 212
11. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba de acordo com os dados telemétricos 213
11.1. Objetivo 213
11.2. Metodologia 213
11.3. Resultados e discussão 217
11.4. Considerações 231
12. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos de estiagem até 2022 232
12.1. Objetivo 232
12.2. Metodologia 232
12.2.1. Método da Estatística descritiva e inferencial 232
12.2.2. Análise de tendência temporal 233
12.3. Resultados e discussão 235
12.3.1. Análise de cluster 235
12.3.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial 236
12.3.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann Kendall 284
12.4. Considerações 292
13. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba 294
13.1. Objetivo 294
13.2. Metodologia 294
13.3. Resultados 294
13.4. Considerações 303
14. Evolução das concentrações dos metais em relação aos valores orientadores do CONAMA 454/12 e Vicq (2015) nos sedimentos nos períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2022 ao longo do rio Paraopeba 305

14.1. Objetivo 305
14.2. Metodologia 305
14.3. Resultados e discussão 305
14.4. Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temático 319
14.5. Considerações 334
15. Qualidade dos sedimentos nas regiões do reservatório de Três Marias (região 2D) e no trecho a jusante (região 3) 336
15.1. Objetivo 336
15.2. Metodologia 336
15.3. Resultados e discussão 336
15.3.1. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais 337
15.3.2. Comportamento da qualidade de sedimentos nos diferentes períodos sazonais 344
15.3.3. Evolução das concentrações em relação aos valores orientadores da CONAMA 454/2012 e Vicq (2015) ao longo do tempo 356
15.4. Considerações 358
16. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Aplicação dos índices químicos composicionais 360
16.1. Objetivo 360
16.2. Metodologia 360
16.3. Análise dos resultados 363
16.4. Considerações 379
17. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais 380
17.1. Objetivo 380
17.2. Metodologia 380
17.3. Resultados e discussão 381
17.4. Considerações 418
18. Referencial Bibliográfico 420

Lista de Figuras

Figura 4.1-1 Estações fluviométricas utilizadas para caracterização das vazões. 42

Figura 4.1-2 Isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba - período 1942 – 2018. 44

Figura 4.2-1 Estações fluviométricas. 53

Figura 4.3-1 Localização das estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI, Tejuco e Alberto Flores. 59

Figura 5.2.2-1 Série temporal de Manganês total (avaliação cronológica dos dados brutos). ... 67

Figura 5.2.2-2: Série temporal de manganês total (avaliação por ordem de coleta dos dados brutos) 67

Figura 5.2.2-3: Série temporal de manganês total (avaliação cronológica e por ordem de coleta dos dados medianos mensais) 68

Figura 5.3-1:Dendograma da análise de Cluster para a matriz água superficial. 70

Figura 5.3.3-1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com os máximos do *baseline*. 109

Figura 5.3.3-2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com os máximos do *baseline*. 110

Figura 5.3.3-3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com os máximos do *baseline*. 111

Figura 5.3.3-4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com os máximos do *baseline*. 112

Figura 5.3.3-5: Mapa de comparação dos teores máximos de Fósforo total com os máximos do *baseline*. 113

Figura 6.3.1-1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP. .. 126

Figura 6.3.1-2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP. 127

Figura 6.3.1-3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP.. 128

Figura 6.3.1-4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP. 129

Figura 7.2-1: Localização dos pontos de Captação no Diagrama Unifilar. 132

Figura 11.2-1 Diagrama unifilar das estações telemétricas juntamente com os pontos de monitoramento de qualidade de água. 216

Figura 14.4-1: Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 321

Figura 14.4-2: Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 322

Figura 14.4-3: Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 324

Figura 14.4-4: Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 325

Figura 14.4-5: Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 327

Figura 14.4-6: Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 328

Figura 14.4-7: Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 330

Figura 14.4-8: Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 332

Figura 14.4-9 Evolução do Cádmio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 334

Figura 16.2-1: Identificação da composição mineralógica e química predominante do rejeito da barragem B1, porcentagem de ocorrência de Al_2O_3, Fe_2O_3 e SiO_2 nos rejeitos e sedimentos naturais.. 360

Figura 16.2-2: Boxplot de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis e Vale (2020). 361

Figura 16.3-1: Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019..... 364

Figura 16.3-2 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2019..... 365

Figura 16.3-3 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020 366

Figura 16.3-4 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem de 2020 367

Figura 16.3-5 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021 368

Figura 16.3-6 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2021..... 369

Figura 16.3-7 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2021/2022. 370

Figura 16.3-8 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2022..... 371

Figura 116.3-9 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-02 373

Figura 16.3-10 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-14 374

Figura 16.3-11 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-15. 375

Figura 16.3-12 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-49 376

Figura 16.3-13 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-55 377

Figura 16.3-14 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-20..... 378

Figura 16.3-15 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-21..... 378

Gráfico 17.3-1a: Evolução das concentrações máximas de manganês em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do manganês, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022. 385

Lista de Gráficos

Gráfico 4.2-1 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação Belo Vale. 46

Gráfico 4.2-2 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação Alberto Flores. 47

Gráfico 4.2-3 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação Ponte Nova do Paraopeba. 48

Gráfico 4.2-4 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação UHE Retiro Baixo Montante. 49

Gráfico 4.2-5 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação UHE Retiro Baixo Jusante. 50

Gráfico 4.2-6 Operação da UHE Retiro Baixo nos periodos de estiagens. 52

Gráfico 4.2-7 Variação de nível na estiagem nas estações Fluviométricas do rio Paraopeba. .. 52

Gráfico 4.2-8 Total precipitado mensal (mm) para as estações Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, Retiro Baixo Montante e Retiro Baixo Jusante e médias mensais históricas de precipitações da estação de referência. 54

Gráfico 4.2-9 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem (abril a setembro/2019), (abril a setembro/2020), (abril a setembro/2021) e (abril a setembro/2022). 58

Gráfico 4.3-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem (abril a setembro/2020), estiagem (abril a setembro/2021) e estiagem (abril a setembro/2022). 60

Gráfico 4.3-2 Total precipitado mensal (mm) para as estações B-VI, Córrego Feijão, Tejuco e AUT-MD e médias mensais históricas de precipitações. 61

Gráfico 5.3.1.1-1: *Boxplot* Manganês total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala fixa. 72

Gráfico 5.3.1.2-1: *Boxplot* Ferro total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala fixa. 80

Gráfico 5.3.1.3-1: *Boxplot* Alumínio total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa. 86

Gráfico 5.3.1.4-1: *Boxplot* Turbidez para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa. 92

Gráfico 5.3.1.5-1: *Boxplot* Fósforo total para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa. 96

Gráfico 5.3.1.5-2: *Boxplot* Fósforo total para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável. 96

Gráfico 7.3.1-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados no ponto do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.... 135

Gráfico 7.3.2-1:Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 140

Gráfico 7.3.3-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 145

Gráfico 8.3.1-1: Percentuais de violações nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no TT02 (ribeirão Sarzedo) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba. 151

Gráfico 8.3.1-2: *Boxplots* - TT02. 157

Gráfico 8.3.2-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no TT01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba..... 160

Gráfico 8.3.2-2: *Boxplots*- TT01. 166

Gráfico 8.3.3-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no TT05 (ribeirão Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba 169

Gráfico 8.3.3-2: *Boxplots* - TT05. 175

Gráfico 8.3.4-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no CE01 (ribeirão do Gomes) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba. 178

Gráfico 8.3.4-2: *Boxplots*- CE-01..... 184

Gráfico 9.3.1-1: Diagrama da variação da Temperatura (°C) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02. 191

Gráfico 9.3.1-2: Diagrama da variação de Oxigênio dissolvido (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02. 191

Gráfico 9.3.1-3: Diagrama da variação de Manganês total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02..... 192

Gráfico 9.3.1-4: Diagrama da variação de Ferro total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02. 192

Gráfico 9.3.1-5: Diagrama da variação de Alumínio total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02..... 193

Gráfico 9.3.1-6: Variação da resistência térmica relativa no ponto RB-02, na UHE Retiro Baixo, no período de estiagem 2022..... 193

Gráfico 9.3.1-7: Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período de estiagem/2022. 194

Gráfico 9.3.2-1: Boxplot dos resultados de Al dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.. 196

Gráfico 9.3.2-2: *Boxplot* dos resultados de Fe dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.. 197

Gráfico 9.3.2-3: *Boxplot* dos resultados de Mn total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar..... 198

Gráfico 9.3.2-4: *Boxplot* dos resultados de Turbidez dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar..... 199

Gráfico 9.3.2-5: *Boxplot* dos resultados de Pb total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar..... 200

Gráfico 9.3.2-6: *Boxplot* dos resultados de P total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar..... 201

Gráfico 10.3.1-1 Boxplot dos resultados de Alumínio Dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3). 205

Gráfico 10.3.1-2 Boxplot dos resultados de Ferro Dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3)..... 206

Gráfico 10.3.1-3 Boxplot dos resultados de Manganês total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3)..... 207

Gráfico 10.3.1-4 Boxplot dos resultados de Turbidez dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3)..... 208

Gráfico 10.3.1-5 Boxplot dos resultados de Fósforo total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3)..... 209

Gráfico 10.3.1-6 Boxplot dos resultados de Zinco total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3)..... 211

Gráfico 11.3-1 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. 220

Gráfico 11.3-2 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. 221

Gráfico 11.3-3: 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. 222

Gráfico 11.3-4: 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. 223

Gráfico 11.3-5: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 226

Gráfico 11.3-6: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 227

Gráfico 11.3-7: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 228

Gráfico 11.3-8: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 229

Gráfico 12.3.2-1: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 241

Gráfico 12.3.2-2: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável. 241

Gráfico 12.3.2-3: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 245

Gráfico 12.3.2-4: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável. 245

Gráfico 12.3.2-5: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 250

Gráfico 12.3.2-6: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável. 250

Gráfico 12.3.2-7: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável. 277

Gráfico 13.3-1: Variação granulométrica no período de abril/2019 a setembro/2019 299

Gráfico 13.3-2: Variação granulométrica no período de abril/2020 a setembro/2020 300

Gráfico 13.3-3: Variação granulométrica no período de abril/2021 a setembro/2021. 301

Gráfico 15.3.1-1 ação granulométrica no período de abril/2019 a setembro/2019. 340

Gráfico 15.3.1-2 Variação granulométrica no período de abril/2020 a setembro/2020. 341

Gráfico 15.3.1-3 Variação granulométrica no período de abril/2021 a setembro/2021. 342

Gráfico 15.3.1-4 Variação granulométrica no período de abril/2022 a setembro/2022 343

Lista de Tabelas

Tabela 3.1-1 Tabela resumo das alterações dos planos de monitoramento PME 22

Tabela 3.5-1 Regiões e pontos analisados frente às violações aos limites legais 37

Tabela 3.8-1 Datas da passagem da Pluma de turbidez. 39

Tabela 4.1-1 VAZÕES MÉDIAS MENSAIS, Q7,10, Q95 E QMLT (M^3/S) NA CALHA PRINCIPAL DO RIO PARAOPEBA, REFERENTES AO PERÍODO 1938 A 2018. 43

Tabela 5.3.1.1-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Manganês total. 73

Tabela 5.3.1.1-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês total em cada região. 73

Tabela 5.3.1.1-3: Comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Manganês dissolvido. 75

Tabela 5.3.1.1-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês dissolvido em cada região. 75

Tabela 5.3.1.2-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Ferro total. 81

Tabela 5.3.1.2-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro total em cada região. 81

Tabela 5.3.1.2-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Ferro dissolvido. 83

Tabela 5.3.1.2-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro dissolvido em cada região. 83

Tabela 5.3.1.3-1:Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Alumínio total. 87

Tabela 5.3.1.3-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio total em cada região. 87

Tabela 5.3.1.3-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem 2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Alumínio dissolvido. 89

Tabela 5.3.1.3-4:Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio dissolvido em cada região. 89

Tabela 5.3.1.4-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro turbidez. 93

Tabela 5.3.1.4-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro turbidez em cada região. 93

Tabela 5.3.1.5-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Fósforo total. 97

Tabela 5.3.1.5-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região. 97

Tabela 5.3.2-1: Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série completa de dados (todos os períodos sazonais, desde 25/01/2019 até 30/09/2022) – medianas mensais. 104

Tabela 5.3.2-2: Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de estiagem (períodos de estiagem/2019, 2020, 2021, 2022) – medianas mensais. 104

Tabela 6.3-1: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Montante. 117

Tabela 6.3-2: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Ferro Carvão. 117

Tabela 6.3-3: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 1A. 117

Tabela 6.3-4: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 1B. 117

Tabela 6.3-5: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 2A. 117

Tabela 6.3-6: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 2B. 117

Tabela 6.3-7: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 2C. 117

Tabela 6.3-8:Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco no período de Estiagem/2022 119

Tabela 7.3.1-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.... 135

Tabela 7.3.2-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 140

Tabela 7.3.3-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.... 145

Tabela 8.2-1: Tributários e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba. 150

Tabela 8.3.1-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-05/PT-03) - Ribeirão Sarzedo..... 159

Tabela 8.3.2-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim. 168

Tabela 8.3.3-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras.... 177

Tabela 8.3.4-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes..... 186

Tabela 10.3.1-1 Comparação temporal do parâmetro Alumínio dissolvido ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022 205

Tabela 10.3.1-2 Comparação temporal do parâmetro Ferro dissolvido ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022..... 206

Tabela 10.3.1-3 Comparação temporal do parâmetro Manganês total ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022..... 207

Tabela 10.3.1-4 Comparação temporal do parâmetro Turbidez ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022. 208

Tabela 10.3.1-5 Comparação temporal do parâmetro Fósforo Total ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022..... 210

Tabela 10.3.1-6 Comparação temporal do parâmetro Zinco total ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022..... 211

Tabela 10.3.1-7 Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco na estiagem/2022. 212

Tabela 11.2-1: Faixas mínima e máxima dos parâmetros para classificação dos dados inconsistentes como inválidos. 214

Tabela 11.2-2: Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão. 215

Tabela 11.3-1: Resultados de R^2 para as relações de turbidez com a fração dissolvida dos metais. 218

Tabela 11.3-2: Resultados de R^2 das relações de turbidez com as frações totais dos metais traçadores. 218

Tabela 12.3.2-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Manganês. 242

Tabela 12.3.2-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês em cada região. 242

Tabela 12.3.2-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Ferro. 246

Tabela 12.3.2-164: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Arsênio em cada região. 274

Tabela 12.3.2-185: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cromo em cada região. 278

Tabela 14.3-1: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 1 da CONAMA 454/12, ou dos valores propostos por Vicq (2015), para a estiagem 2022. 307

Tabela 14.3-2: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da CONAMA 454/12 para a estiagem 2022. 308

Tabela 14.14.3-3 Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para a estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 entre as regiões de Montante e 1A. 310

Tabela 14.14.3-4 Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para a estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 entre as regiões de Montante e 1A. 311

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

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 20, 21, 22, 23 e 24 (Anexo I) do referido plano, cuja execução vem ocorrendo desde a data de 25/01/2019 e o plano é atualizado conforme necessidades específicas. Na **Tabela 1-1,** a seguir, é apresentado resumo das principais alterações por

Tabela 3.1-1 Tabela resumo das alterações dos planos de monitoramento PME

Resumo das revisões/alinhamentos dos planos de monitoramento		
Versão	**Revisão/Alinhamento**	**Data**
24	▪ 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
23	▪ Suspensão da amostragem da matriz sedimento para o ponto CE-02 devido as dificuldades encontradas para encontrar sedimento representativo no local, em razão as características do rio naquele trecho, conforme acordado na Sessão Técnica-AECOM realizada no dia 29/06/2022. Destaca-se que foram feitas várias tentativas de coleta em locais diferentes ao entorno do ponto na busca das amostras, porém sem sucesso. ▪ Atualização das coordenadas dos pontos TT-01, PT-15, PT-53, PT-25/JTM-01 e PT-13.	30/06/2022
22	▪ Inclusão do quadro de revisão e alinhamentos; ▪ Errata da frequência do PT-20, alteração de semanal para quinzenal para a matriz sedimentos, conforme relatório Avaliação Redes de Monitoramento. ▪ Alteração da frequência dos pontos PT-02, PT-09, PT-13, PT-14 e PT-48 para a matriz água superficial de quinzenal para semanal.	20/05/2022
21	▪ Alteração da frequência do monitoramento de para o período de estiagem, baseado relatório Avaliação Redes de Monitoramento.	20/04/2022

Resumo das revisões/alinhamentos dos planos de monitoramento		
Versão	**Revisão/Alinhamento**	**Data**
20	▪ Exclusão dos pontos de monitoramento PT-33, PT-34, PT-35, PT-36, PT-37, PT-38, PT-39, PT-40, PT-41, PT-42, PT-44, PT-45 e PT-46. ▪ Atualização das coordenadas alternativas de amostragem de água superficial, na Tabela 1 (PME v.20); ▪ Atualização das coordenadas alternativas de amostragem de sedimento, na Tabela 2 (PME v.20).	18/03/2022

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 setembro/2022, com foco nos períodos de estiagem. Ademais, visa por meio de diversos formatos de apresentação dos resultados, a interpretação e a proposição de hipóteses sobre a influência do rompimento das barragens B1, B4 e B4-A e dos fatores externos sobre as alterações específicas na qualidade da água e sedimentos.

Ademais, cabe informar que encontra-se no Anexo IX do supracitado relatório, os resultados do cálculo dos indicadores, referentes ao período de estiagem de 2022, conforme disposto no PME (PL-A_P-1, versão integrada) - 9. Acompanhamento e Avaliação, emitido no âmbito do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba (2022), em atendimento à solicitação do IGAM/GEMOQ na NT nº 9/FEAM/GERAI/2022, no item nº 66.

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 das barragens, foi observado um aumento intermitente dos teores de Fósforo (água e sedimento) nas regiões Ferro-Carvão até 1B e em 2B, para a matriz sedimentos, conforme discutido em Arcadis (2022c). Tais teores sofreram redução a partir do período de estiagem/2019, principalmente para água superficial, com variações ao longo dos diferentes períodos sazonais avaliados. O projeto *Entire* (2022), através de modelagem de Fósforo em água superficial, indicou relação das concentrações com o rejeito. Entretanto, o estudo *Geoenviron* (2019) apontou a presença de baixos conteúdos de Fósforo no rejeito, assim como o estudo de Arcadis (2020c) sobre a caracterização geológica dos testemunhos coletados no rio Paraopeba.

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 das barragens, no presente relatório, foi realizada complementarmente uma avaliação espaço-temporal para este parâmetro, tanto para a matriz água superficial quanto para sedimentos.

Vale destacar que, previamente à chegada da pluma, ocorriam concentrações mais abundantes de Manganês total e Ferro total presentes nas regiões Montante até a Região 2A. À medida que a pluma de turbidez com os materiais em suspensão provenientes do rompimento da barragem se deslocou 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.

A partir do mencionado mês, as concentrações dos principais elementos traçadores, 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* no 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 (Igam) assumido para cada trecho fluvial.

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 para os meses de janeiro e fevereiro/2020, resultando em aumentos das concentrações dos parâmetros de qualidade das águas superficiais.

A bacia hidrográfica e a extensão do leito do rio Paraopeba como um todo, estiveram, assim, submetidas entre outubro/2019 e março/2020 a uma condição de chuvas e vazões em uma ordem de grandeza superior ao período chuvoso anterior, que compreendeu o período crítico e emergencial (janeiro a março/2019). Essa condição hidrológica mais severa implicou em alterações de qualidade da água que não apenas estiveram associadas aos rejeitos depositados na calha do rio, e mais evidentes nos trechos próximos à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, mas também aos arrastes hidráulicos (escoamento superficial) de materiais da área de drenagem da bacia como um todo, uma vez que se perceberam alterações com padrões similares, inclusive, no trecho de montante e não afetado pelo rompimento.

Ao 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.

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.

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, houve nova fase de dissipação de materiais em suspensão e consequente redução nas concentrações de

Manganês total, Ferro total e Alumínio total em relação ao mesmo período de 2020. 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 alcançaram a bacia do Paraopeba e promoveram solubilização de fases minerais. Os teores de turbidez e dos elementos traço foram predominantemente reduzidos e dissipados neste período.

O período de chuvas 2021/2022, por sua vez, foi marcado 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 às precipitações que ocorreram principalmente no mês de janeiro/2022 que atingiram um patamar maior que nos períodos chuvosos anteriores nas estações do Alto e Médio Paraopeba. De maneira geral, as precipitações de janeiro/2022, além terem sido intensas, aparentemente foram mais duradouras quando comparadas com o evento chuvoso de 2020 (de curta duração), para o qual estimou-se um período de recorrência (TR) em torno de 40 anos para a chuva de 24 horas de duração. Para 2022, o referido evento pluviométrico, ocorrido especialmente entre os dias 07/01 e 13/01, quando discretizado para três dias de duração, atingiu um TR equivalente a 1000 anos. Apesar dessa condição pluviométrica, no que diz respeito à qualidade da água, não foram observados comportamentos muito distintos dos já indicados 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 comparado aos períodos chuvosos dos anos anteriores.

Já o período de estiagem de 2022, objeto principal do presente documento, foi marcado por um novo estágio de diminuição da pluviometria, com redução dos níveis de água e escoamento superficial tardios para a bacia. 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, da mesma forma, mostraram aumento considerável dos valores em relação à estiagem de 2021. O aumento das concentrações dos parâmetros e dos teores de Turbidez pode estar relacionado a influência das intensas precipitações do período chuvoso antecedente. Dessa maneira, no período de estiagem seguinte ainda foram reverberadas, em parte, as condições de elevação dos níveis e vazões na bacia, retardando a fase de recessão hidrológica. Com isso, o aporte e carreamento de materiais para o sistema nas chuvas de 2021/2022 ainda se mantiveram mais elevados no leito do rio Paraopeba, principalmente relacionadas às frações em suspensão, atrelados, assim, aos níveis elevados e às maiores velocidades de fluxo persistentes ainda neste período. As frações dissolvidas de ferro e

alumínio, em geral, mostraram concentrações mais elevadas nas regiões do rio Paraopeba, bem como entre os períodos sucessivos de estiagem.

Contudo, esse comportamento de elevação das concentrações de Ferro e Alumínio dissolvido entre os períodos sazonais ocorre 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. Já o Fósforo total, de modo geral, mostrou proximidade ou aumento dos valores em relação à estiagem de 2021, tanto na região de Montante quanto nas impactadas pelo rompimento, o que pode indicar contribuição do período chuvoso anterior e o aporte por outras fontes. Para Fósforo dissolvido, os resultados foram menos variáveis ao longo dos períodos, com indicativo de concentrações mais reduzidas. Os teores dos elementos traço se mantiveram similares 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 às chuvas intensas de 2021/2022.

Vale destacar que, embora se verifiquem comportamentos hidrológicos (pluviométricos e fluviométricos) distintos na bacia do rio Paraopeba, especialmente entre os períodos chuvosos analisados até então, não se pode necessariamente esperar perfeita linearidade de comportamento da qualidade da água do rio Paraopeba. A bacia, seus processos e os respectivos efeitos são dinâmicos e podem ser, inclusive, cumulativos no tempo. Para o rio Paraopeba, de forma sintética e considerando-se apenas os períodos sazonais chuvosos, pode-se assumir que este foi submetido a quatro condições, especificamente no trecho a jusante do rompimento:

- Condição 1 - Período chuvoso/2019 (janeiro a março): rompimento/despejo de rejeitos no rio + condições de baixa pluviosidade;
- Condição 2 - Período chuvoso/2019-2020 (outubro/2019 a março/2020): sem rompimento + condição histórica/crítica de chuvas;
- Condição 3 - Período chuvoso/2020-2021 (outubro/2020 e março/2021): sem rompimento + condição intermediária de pluviosidade;
- Condição 4 - Período chuvoso/2021-2022 (outubro/2021 e março/2022): sem rompimento + condição histórica/crítica de chuvas.

As estiagens, por outro lado, embora apresentem naturalmente o arrefecimento das precipitações no ano hidrológico, são períodos nos quais as condições do período chuvoso antecedente podem reverberar proporcionalmente seus efeitos por algum tempo, mantendo-se ainda mais elevados os níveis/vazões dos cursos hídricos. Com isso, tendo em vista a correlação entre o comportamento das variáveis hidrológicas e os principais marcadores, pode-se verificar ainda teores relativamente mais elevados dos analitos, tal como foi mais marcante nas estiagens de 2020 e 2022.

Verifica-se que a bacia e, especificamente, o rio Paraopeba passaram por condições hidrologicamente 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 puderam ser efetivamente observadas em maiores detalhes ao longo do período monitorado.

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 1A e da Região 1B (trechos mais afetados), à medida que se atinge os trechos fluviais mais distais (regiões 2A e 2B), nota-se comportamento com padrões mais próximos à condição bacinal, inclusive, em comparação com o trecho de montante não impactado.

Já em relação à evolução dos sedimentos ao longo dos ciclos hidrológicos pós-rompimento, constatou-se que as concentrações dos parâmetros avaliados foram mais elevadas na chuva de 2019 quando comparadas com as chuvas de 2019/2020 e chuvas 2020/2021 para Mn, Fe, Pb, Ni, Cu, demonstrando que no período de chuva de 2019 houve uma maior quantidade de materiais transportados por arraste e/ou suspensão e depositados, principalmente, nas regiões 1A e 1B (até PT-15), em decorrência da contribuição do rejeito oriundo do rompimento das barragens B1, B4 e B4-A. No período de chuvas de 2019 e, principalmente, avaliando os dados de manganês, constatou-se que os materiais foram transportados em suspensão até o PT-55, fato também verificado com a aplicação dos índices químicos composicionais.

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. Nas regiões 2B e 2C, não se observaram aumentos na estiagem de 2019. Importante destacar que todos esses elementos estavam presentes na bacia antes mesmo do rompimento das barragens B1, B4 e B4-A e já haviam sido mapeados pela CPRM em seus estudos nos tributários da bacia do rio Paraopeba no período de 2008 a 2009, sendo as maiores concentrações identificadas entre as regiões 1B e início da 2A 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 Bambui e granitóides *sin a tardi* tectônicos, bem como rochas granitóides do Complexo Belo Horizonte, além dos solos, que possuem alumínio em sua composição e, ao serem intemperizados/erodidos podem liberar partículas físicas e ou substâncias químicas em solução contendo alumínio e estes se depositarem nos sedimentos.

Nas chuvas de 2019/2020, o aumento das vazões e nível de água do rio ressuspendeu os sedimentos, mas houve redução nas concentrações das frações totais de Mn e Fe em relação ao período chuvoso/2019. Níquel e cobre, que são elementos traço nos sedimentos da bacia e no rejeito, também reduziram. Chumbo apresentou aumento nas concentrações até a região 2B. 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 gráficos dos índices químicos composicionais IRS 1 e IRS 2 mostraram redução em toda a bacia neste mesmo período, como verificado no relatório de Fechamento de Ciclo sobre a qualidade da água e sedimentos, de abril/2021. Apesar das amostras localizadas entre a confluência do Ferro-Carvão com o rio Paraopeba até a região 1B apresentarem redução nas concentrações de metais, elas ainda mantiveram a característica química composicional de rejeito, enquanto após o PT-15, a característica do sedimento foi classificada como natural.

Ao se compararem os resultados dos sedimentos das estações de estiagem de 2019 com os resultados da estiagem de 2020, 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 o Ferro e Alumínio, aumentaram em toda a bacia nesta comparação. O Níquel, Cobre, Arsênio e Chumbo tiveram aumentos pontuais, 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 em que predominam os sedimentos mais arenosos.

O ciclo de chuvas de 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 granulometria 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 das barragens B1, B4 e B4-A.

As análises identificadas nos metais em sedimentos, mostraram que, de fato, o Manganês foi o principal traçador para avanço dos rejeitos ao longo do rio Paraopeba e que, as maiores concentrações de metais provenientes do rejeito das barragens B1, B4 e B4A ocorreu no primeiro período chuvoso entre fevereiro e abril de 2019 e início da estiagem de 2019. A análise dos dados indicou que a sedimentação transcorreu em razão do transporte por arraste de sedimentos densos bastante evidenciado nos primeiros trechos do rio Paraopeba até o ponto PT-15 (Relatório de Fechamento de ciclo, de setembro/2020 e de abril/2021; Arcadis, 2021a). Entretanto, as partículas que estavam em suspensão foram transportadas até PT-55 neste período chuvoso de 2019, indicando aumento na concentração do Manganês. À medida que o tempo passou, constatou-se redução espacial de materiais com Manganês na calha do rio Paraopeba, sendo que, desde as chuvas 2019/2020, a presença dessa característica se manteve nas regiões do Ferro-Carvão, 1A e 1B, até o PT-15 somente.

Com a retomada do período de estiagem/2021 e redução das vazões e níveis de água dos rios, que reduz o arraste de materiais ao longo da bacia e proporciona a dissipação e deposição de materiais em suspensão, percebeu-se, de forma geral, redução nas concentrações dos metais entre os períodos de estiagem em relação aos períodos anteriores. Em relação aos elementos prioritários Manganês se verificou redução entre as estiagens de 2020 com 2021; para Ferro houve redução nas regiões mais ou parcialmente afetadas e para Alumínio não se observou variações nas regiões do Ferro-Carvão e na 1A, enquanto para os demais parâmetros traço, a predominância foi de manutenção ou redução das concentrações.

Como já apontado, o ciclo de chuvas de 2021/2022 foi marcado pela ocorrência de volumes pluviométricos elevados, quando comparado aos anteriores, principalmente no mês de janeiro/2022, apesar dessa ocorrência, no que diz respeito à qualidade dos sedimentos, não mostrar comportamentos diferentes dos já observados nos períodos de chuva anteriores.

Já na estiagem de 2022, que sucedeu o referido período de precipitações intensas, houve redução das vazões e níveis de água dos rios de forma mais tardia, com nova diminuição no arraste, dissipação e deposição de materiais em suspensão ao longo da bacia. Percebeu-se,

de forma geral, diminuição nas concentrações dos metais em relação aos períodos de estiagem anteriores, com exceção da região do ribeirão Ferro-Carvão que mostrou aumento na concentração de metais, enquanto a região 1B mostrou diminuição, o que indica as diferentes condições sedimentológicas associadas à bacia do rio Paraopeba. Em relação aos elementos prioritários entre as estiagens de 2021 com 2022: o Manganês mostrou aumento, enquanto Ferro, redução entre as regiões Ferro-Carvão e 1B; já o Alumínio, apresentou manutenção dos teores na região Ferro-Carvão e leve redução até região 1B. A região Montante mostrou características similares, com redução de Fe e Al, e manutenção dos valores de Mn em comparação à estiagem/2021, além de concentrações elevadas para alguns elementos traço (As, Cu e Cr). Já o Fósforo, 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.

Apesar do rompimento das barragens com o impacto da pluma de rejeitos, as concentrações dos metais na estiagem/2022 foram condicionadas mais a fatores outros associados à bacia, como a dinâmica fluvial (vazão, escoamento, erosão) e locais de acúmulo de sedimentos finos e, por consequência, de metais. O aumento das concentrações de metais pode estar relacionado à influência das precipitações antecedentes, principalmente a de 2021/2022, com deságue mais intenso do rio persistente ainda, em parte, no 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. A Região 2B, do reservatório de Retiro Baixo, caracterizado por um ambiente mais lêntico, mostrou dissipação e aumento nas concentrações de metais. 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, influenciando a dinâmica fluvial e sedimentológica do rio Paraopeba.

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 trimestral da qualidade da água superficial e sedimentos de outubro/novembro/dezembro (01/10/2019 a 31/12/2019), de janeiro de 2020;
- Relatório Semanal 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 março/2022 Atendimento aos Autos de Fiscalização n° 61.250/2019, 64.499/2019 e 61.255/2019;
- Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno- Relatórios mensais (junho/2019 a outubro/2022). PMQS-Três Marias. Atendimento ao Ofício n° 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 (julho/2022 a novembro/2022);
- 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 30/09/2022) 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 especificas 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 30/09/2022 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 30/09/2022, destaca-se que no Anexo III 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 estiagem 2019: entre os meses de abril a setembro/2019;
- Período de estiagem 2020: entre os meses de abril a setembro/2020;
- Período de estiagem 2021: entre os meses de abril a setembro/2021;
- Período de estiagem 2022: entre os meses de abril a setembro/2022.

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 (BHRP) 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 escopo de monitoramento é preconizado por um plano, que se atualiza à medida que surgem eventuais adequações no escopo. Atualmente, o plano de monitoramento - PME encontra-se na versão 25 (Anexo I), destaca-se, entretanto, que o corte dos dados avaliados na estiagem/2022 seguiu os planos de Monitoramento versão 20 a versão 24.

Na versão 24 são feitos pequenos ajustes em relação a versão 23, como: 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).

No dia 30/03/2022, o IGAM emitiu o Memorando IGAM/GEMOQ n. 55/2022 em resposta a Carta CEXT_0394 (nº SEI 44175372), da Vale, que propôs alteração da frequência do monitoramento para o período de estiagem, baseado no referido relatório Avaliação Redes de Monitoramento. O IGAM concordou com a proposição da mudança de frequência de amostragem, com exceção dos pontos de monitoramento, para matriz água superficial, PT-15, PT-55, PT-20, PT-21, PT-28, CE-01 e CE-02, que mantiveram a frequência diária de monitoramento tal qual vinha sendo aplicada no PME revisão 20, visto que se aguardara manifestação da Agência Nacional de Águas, quanto a proposição de alteração de frequência nestes locais e não houve resposta até o fim do período de estiagem. Destaca-se ainda que para os pontos PT-02, PT-09, PT-13, PT-14 e PT-48 foi solicitado pela AECOM manutenção da frequência semanal ao invés de quinzenal formalizada através do relatório de auditoria Nº 60622935-ACM-DM-ZZ-RP-PM-002. A alteração das frequências se deu em 19/04/2022 e, assim, o início de abril/2022 ainda apresentou frequência mais recorrente de coleta em um período marcado com chuvas intensas. Esta condição pode justificar o fato de alguns pontos apresentarem resultados mais elevados para alguns parâmetros neste período.

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) 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-AS, 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
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; T M40/M01	PT-23; PT-29
3	SF054	PT-25, PT-27; PT-32

*Elaboração: Arcadis, 2022. *Os dados de monitoramento do ponto PT-13 utilizados nesta análise descarta os resultados 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 *baseline*	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

Elaboração: Arcadis, 2022.

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.

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.

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 3.8-1 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 3.8-1 Datas da passagem da Pluma de turbidez.

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

Elaboração: Arcadis, 2022.

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

- Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005- Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes;
- Resolução CNRH n.º 91, de 05 de novembro de 2008- Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos;
- Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995- Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba;
- 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;

- 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.

Foram consideradas as subdivisões em três trechos de enquadramentos para as respectivas classes, conforme a DN COPAM n° 14 de 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.

Destaca-se que, conforme já descrito no item 3.5, para o presente relatório, foi dado foco aos tributários rio Betim, ribeirão Sarzedo, ribeirão Grande (ribeirão das Abóboras) e ribeirão dos Gomes, uma vez que não foi constatada influência significativa da maior parte dos tributários nas avaliações realizadas e discutidas no documento intitulado Relatório de Fechamento de Ciclo (Arcadis, 2019). Assim, especificamente para os tributários analisados, foram consideradas as seguintes classes de enquadramento:

- Classe 1 - ribeirão dos Gomes, monitorado pelo ponto CE-01 e rio Pardo TT-08;
- Classe 2 - 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, monitorado pelo ponto TT-01.

Como não há uma classificação para avaliar a qualidade química de sedimentos de corrente, utilizou-se como referência a Resolução CONAMA 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 454/12 para 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 454/12 e neste caso, foi utilizada a referência de Vicq (2015). Esta referência é utilizada pelo Igam nos relatórios técnicos informativos sobre a qualidade dos sedimentos no rio Paraopeba.

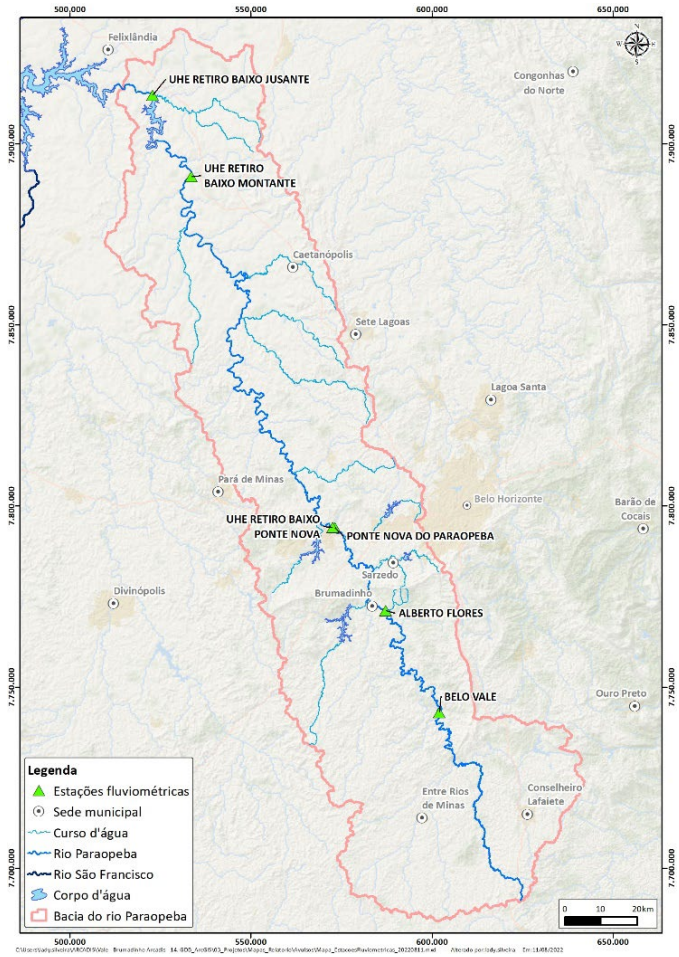
4. Caracterização hidrológica

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 eventualmente detectadas foram destacadas.

Na Figura 4.1.1 é apresentada a localização das estações utilizadas na bacia do rio Paraopeba.

Figura 4.1-1 Estações fluviométricas utilizadas para caracterização das vazões.



Elaboração: Arcadis, 2019.

Na Tabela 4.1-1, 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_{mlt}, Q_{95} e $Q_{7,10}$ nas estações fluviométricas compreendendo dados do período de 1938 a 2018.

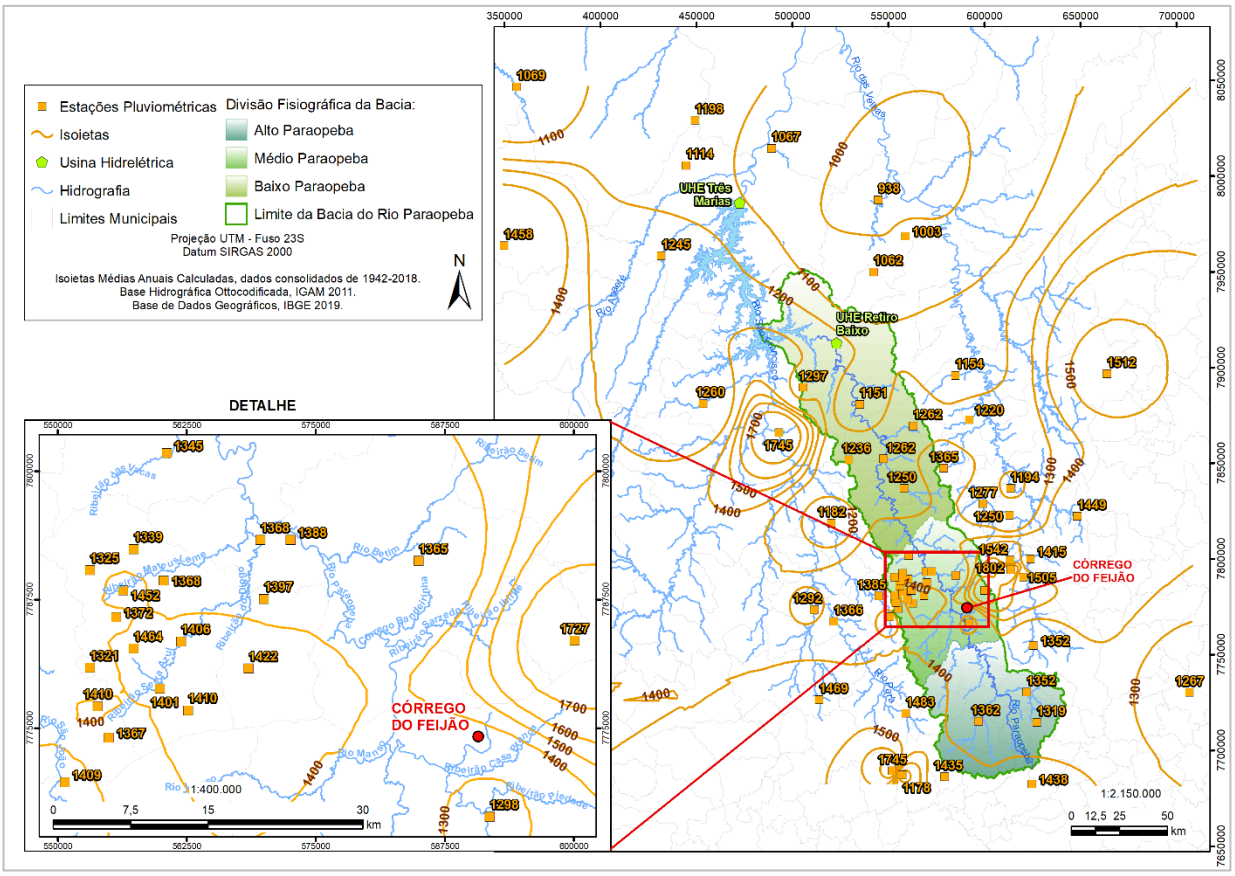
Tabela 4.1-1 VAZÕES MÉDIAS MENSAIS, Q7,10, Q95 E QMLT (M³/S) NA CALHA PRINCIPAL DO RIO PARAOPEBA, REFERENTES AO PERÍODO 1938 A 2018.

Região bacia	Código	Nome	$Q_{7,10}$	Q_{95}	Q_{mlt}	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	17,290	12,22	10,48	7,36	5,46	4,57	3,86	3,34	3,58	4,47	7,25	12,35
	40700002	Jeceaba	9,40	12,80	43,03	75,400	81,30	69,74	46,33	32,08	27,81	22,48	19,36	18,67	22,29	33,73	69,01
	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
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
	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
	40800001	Ponte Nova do Paraopeba	17,43	24,29	83,45	172,47	143,70	123,97	84,15	60,79	50,86	43,10	36,53	36,52	46,09	74,65	132,41
Baixo rio Paraopeba	40850000	Ponte da 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

Fonte: ANA, 2019.

Da mesma forma, na Figura 4.1.2, podem ser observadas as isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba (período 1942 – 2018). Verifica-se, assim, que as regiões fisiográficas Alto e Médio Paraopeba apresentam totais anuais médios similares, variando entre 1.700 e 1.300 mm. Na região fisiográfica Baixo Paraopeba, as precipitações totais anuais médias são inferiores em relação às demais regiões, variando 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).

Para uma melhor compreensão das condições de chuva e vazões ao longo do trecho de interesse do rio Paraopeba, foram definidos, para o presente documento, quatro períodos sazonais chuvosos, considerando-se as seguintes condições:

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

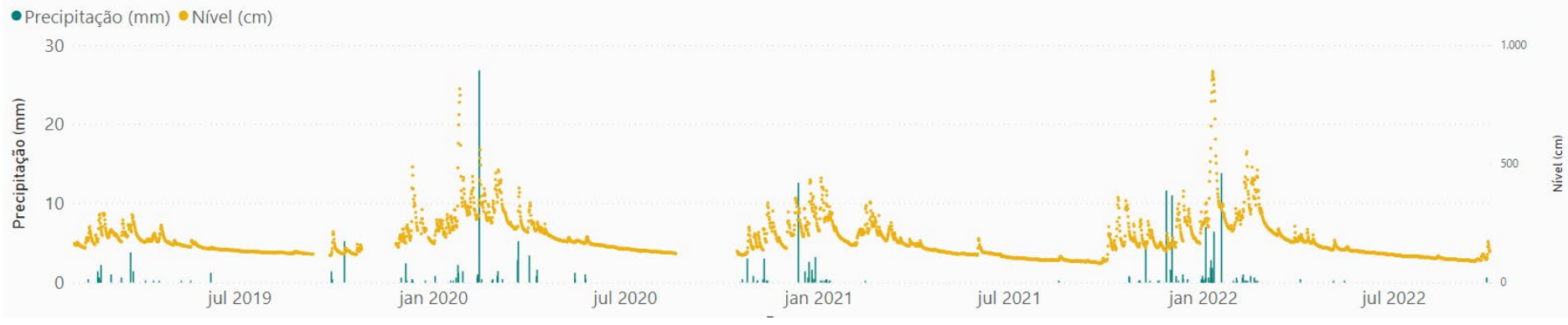
4.2. Rio Paraopeba

Os dados de pluviometria (hietogramas) e nível (cotagramas) foram obtidos das estações hidrométricas localizadas no rio Paraopeba, a saber: Belo Vale, Alberto Flores, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante. Todas as estações apresentam dados telemétricos e representativos espacialmente da bacia do rio Paraopeba, desde os trechos mais proximais ao rompimento até trecho a jusante do

reservatório da UHE Retiro Baixo, cujos resultados podem ser visualizados no Gráfico 4.2-1 a Gráfico 4.2-5.

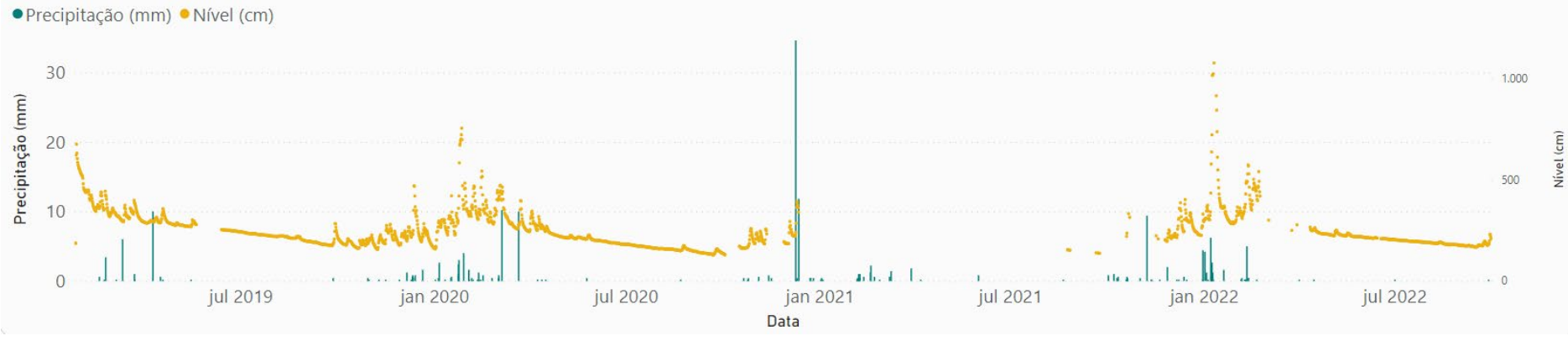
Os cotagramas a seguir apresentados têm a função específica de evidenciar a notada variação das condições hidrológicas do rio Paraopeba ao longo dos períodos sazonais em análise. Cabe ressaltar que os resultados das vazões monitoradas não foram incluídos nos gráficos, dadas as inconsistências e falhas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

Gráfico 4.2-1 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação Belo Vale.



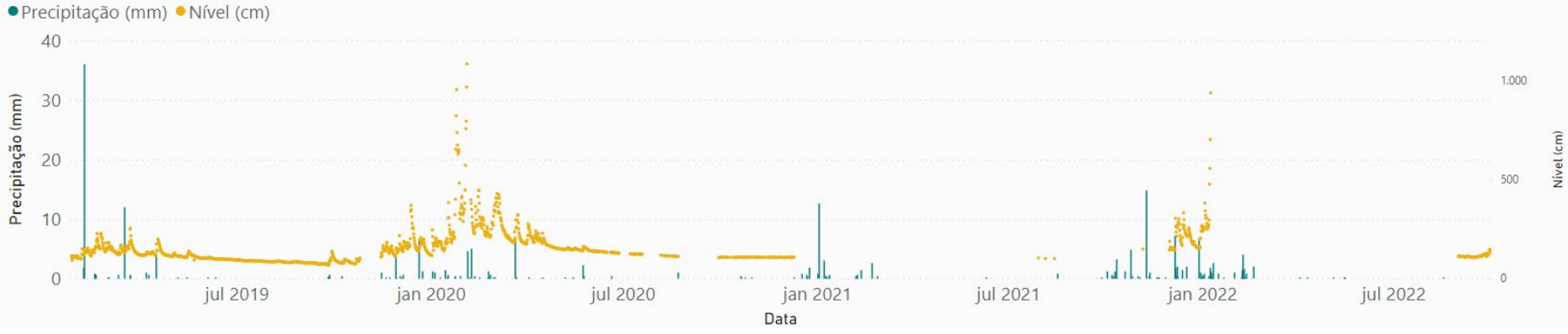
Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.2-2 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação Alberto Flores.



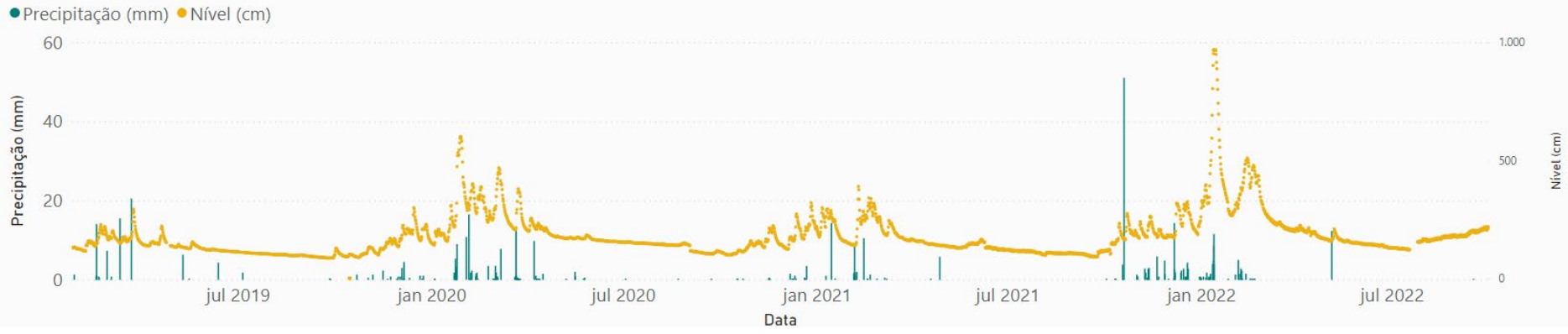
Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.2-3 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação Ponte Nova do Paraopeba.



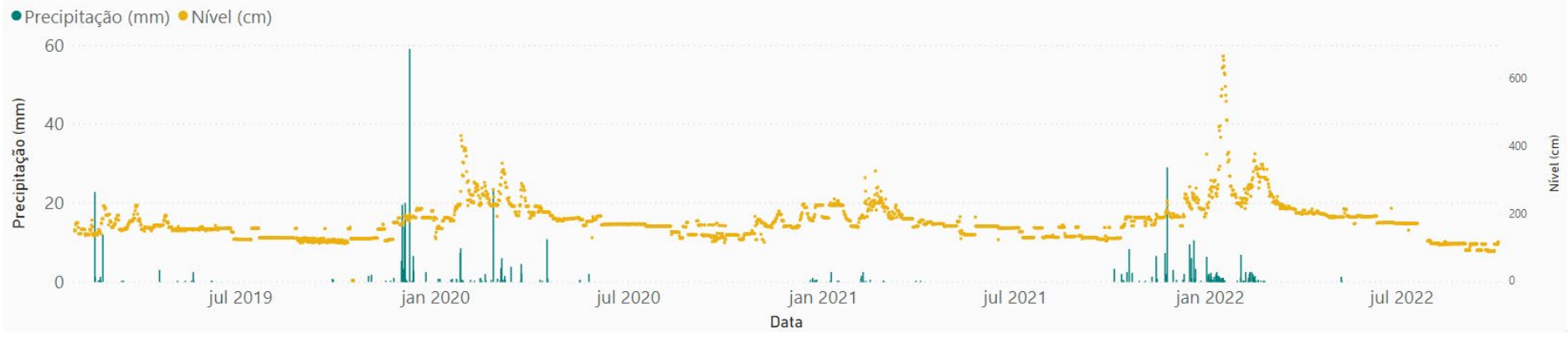
Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br). Nota: os resultados de nível dessa estação ficaram sem transmissão entre os dias 08/01/2022 e 17/08/2022.

Gráfico 4.2-4 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação UHE Retiro Baixo Montante.



Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.2-5 Chuvas e nível do período de 25/janeiro (2019) a 30/setembro (2022) na estação UHE Retiro Baixo Jusante.



Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

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 nível da água. Enquanto, nos períodos de estiagem, as precipitações que ocorrem pontualmente, e com baixos valores, dificilmente causam consequências perceptíveis nos corpos hídricos, tendo em vista o potencial de abstração inicial da bacia.

Assim sendo, nota-se, de maneira geral que há uma redução a partir dos meses de março e abril, estendendo até o fim de setembro, quando se inicia a transição para o período chuvoso, com registros pluviométricos mais expressivos e consequente aumento das cotas do curso d'água. Pontualmente, ao longo dos períodos de estiagem são observadas chuvas que não são capazes de alterar o nível/vazão do rio de forma significativa, caracterizando, assim, um estágio de recessão hidrológica na bacia. De maneira geral, as precipitações de janeiro de 2022, além terem sido intensas, aparentemente foram mais duradouras quando comparadas com o evento chuvoso de 2020 (de curta duração), para o qual estimou-se um período de recorrência (TR) em torno de 40 anos para a chuva de 24 horas de duração. Para 2022, o referido evento pluviométrico, ocorrido especialmente entre os dias 07/01 e 13/01, quando discretizado para três dias de duração, atingiu um TR equivalente a 1000 anos. Da mesma forma, é possível perceber que as chuvas no período 2021/2022 vem ocorrendo em maior monta desde o mês de outubro/2021 (mais chuvoso dos últimos onze anos).

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. Dessa maneira, cabe destacar que o período chuvoso de 2021/2022 apresentou volumes pluviométricos notadamente elevados, (Arcadis, 2022), reverberando para o período de estiagem imediatamente seguinte com a bacia ainda em condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal fluvial.

Além disso, no que diz respeito aos níveis do rio Paraopeba pode-se considerar que a operação da Usina de Retiro Baixo (Gráfico 4.2-6), localizada na porção final do rio Paraopeba, é o reflexo do comportamento hidrológico da bacia, tendo em vista as oscilações das vazões que adentram o reservatório e, assim, influenciarão os volumes retidos para a geração de energia. Nesse contexto, é possível verificar que, nos períodos de estiagem (2020 e 2022) que sucederam períodos chuvosos mais significativos (2019/2020 e 2021/2022), os dados mensais de vazões vertidas e turbinadas no barramento foram notadamente mais elevados. Com destaque para a estiagem de 2022 que, comparativamente à 2020, por exemplo, apresentou vazões defluentes mais elevadas ao longo de todo o período, especialmente para os meses iniciais de abril e maio.

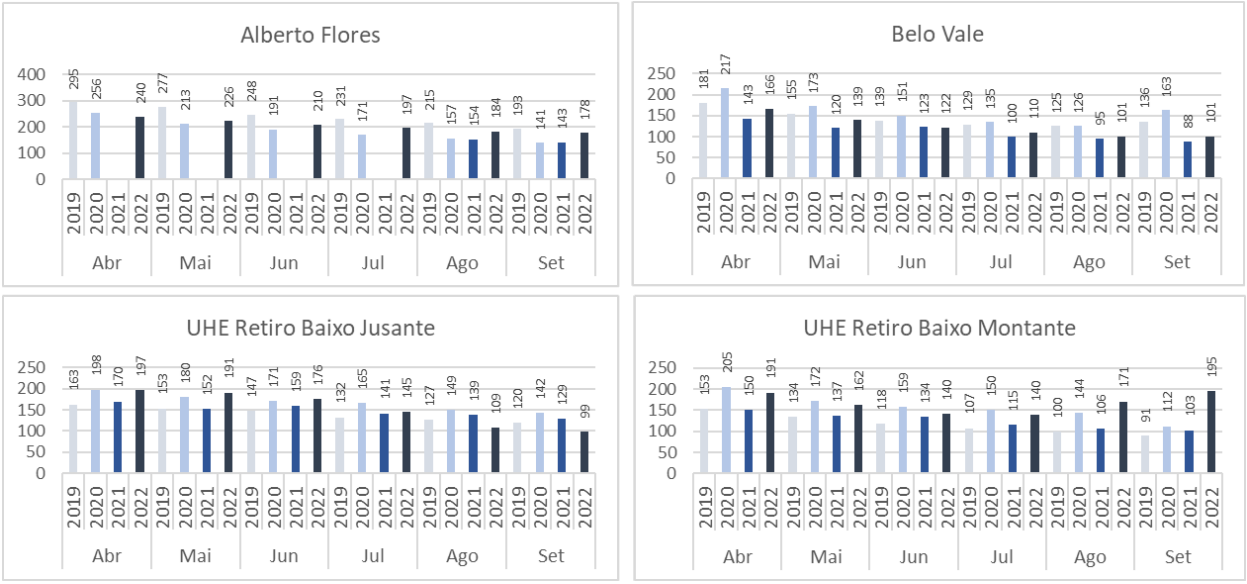
Assim, é possível verificar influência das chuvas antecedentes reverberando no comportamento hidrológico da estiagem seguinte, com reflexo nos níveis/vazões e velocidades do corpo hídrico, o que implicaria na alteração da qualidade da água a partir do material/sedimentos em transporte no canal fluvial. Por fim, de forma geral, para 2020 e 2022,

no período de estiagem, os valores dos níveis foram superiores aos demais anos, em decorrência das chuvas que antecederam este período. Destacam-se níveis mais altos nos primeiros meses de estiagem de abril a junho/2022, seguido de um decréscimo já esperado nos meses seguintes, indicando um possível retorno das condições naturais da bacia para o período (Gráfico 4.2-7).

Gráfico 4.2-6 Operação da UHE Retiro Baixo nos periodos de estiagens.

Fonte: SAR,2022.

Gráfico 4.2-7 Variação de nível na estiagem nas estações Fluviométricas do rio Paraopeba.



Fonte: ANA, 2022.

Em caráter mais específico, os totais precipitados acumulados mensais (mm) desde 2019 das estações pluviométricas utilizadas ao longo do rio Paraopeba (Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, Retiro Baixo Montante e Retiro baixo Jusante) foram comparados às médias mensais históricas (1941 a 2019) de medições convencionais de precipitações (mm) reportadas pelas estações Melo Franco e Ponte Nova do Paraopeba de acordo com a localização mais próximas das estações de análise (Gráfico 4.2-8).

Na Figura 4.2-1, podem ser visualizadas as localizações das estações utilizadas ao longo do rio Paraopeba.

Figura 4.2-1 Estações fluviométricas.

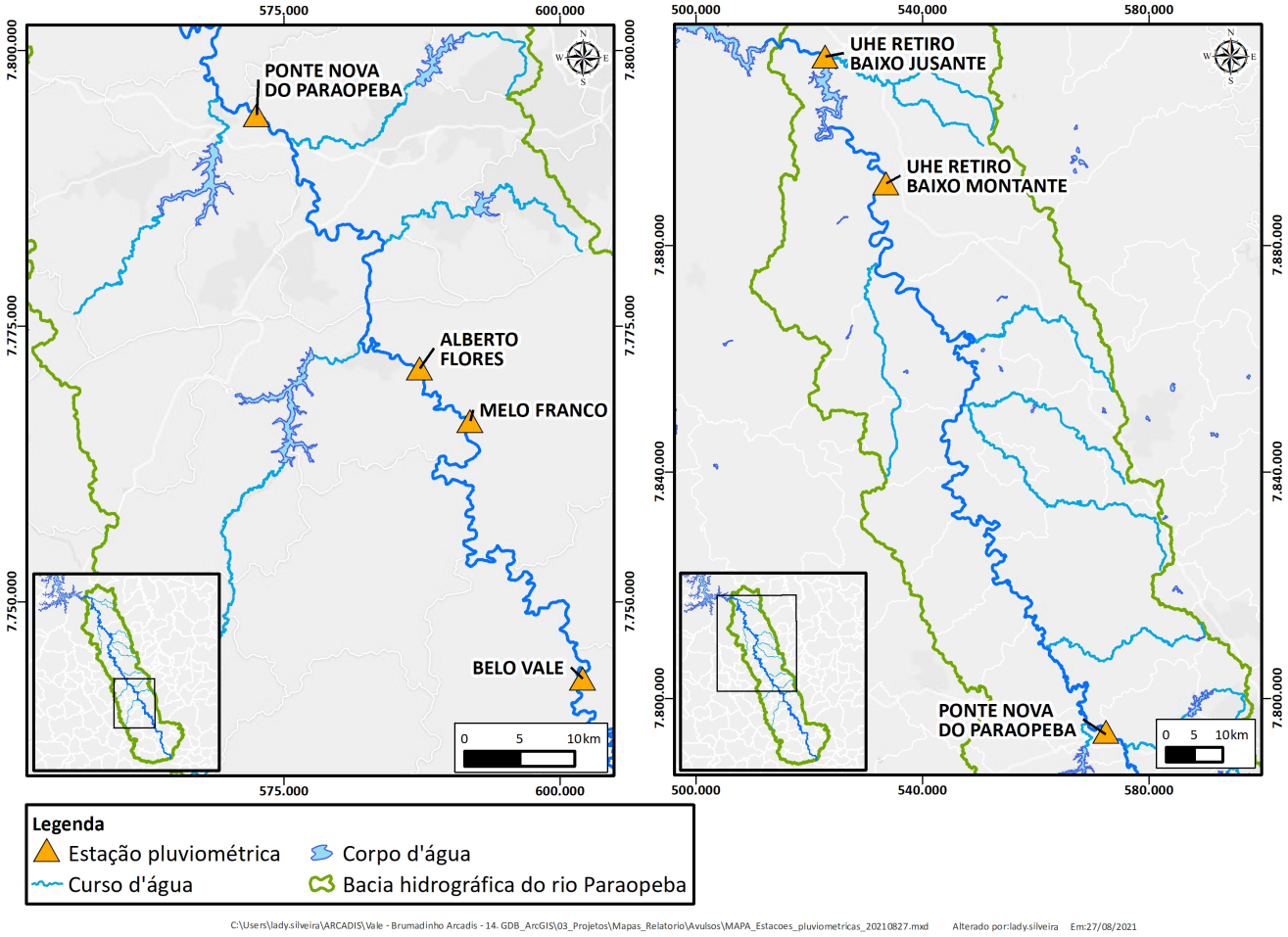
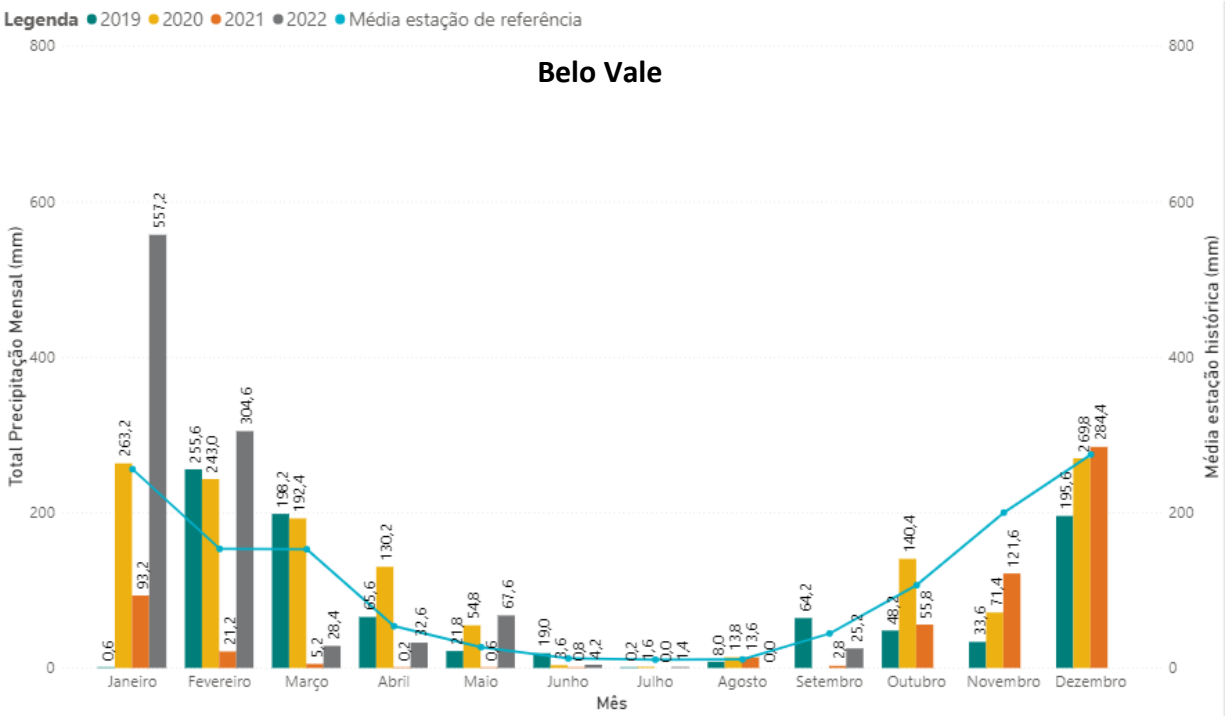
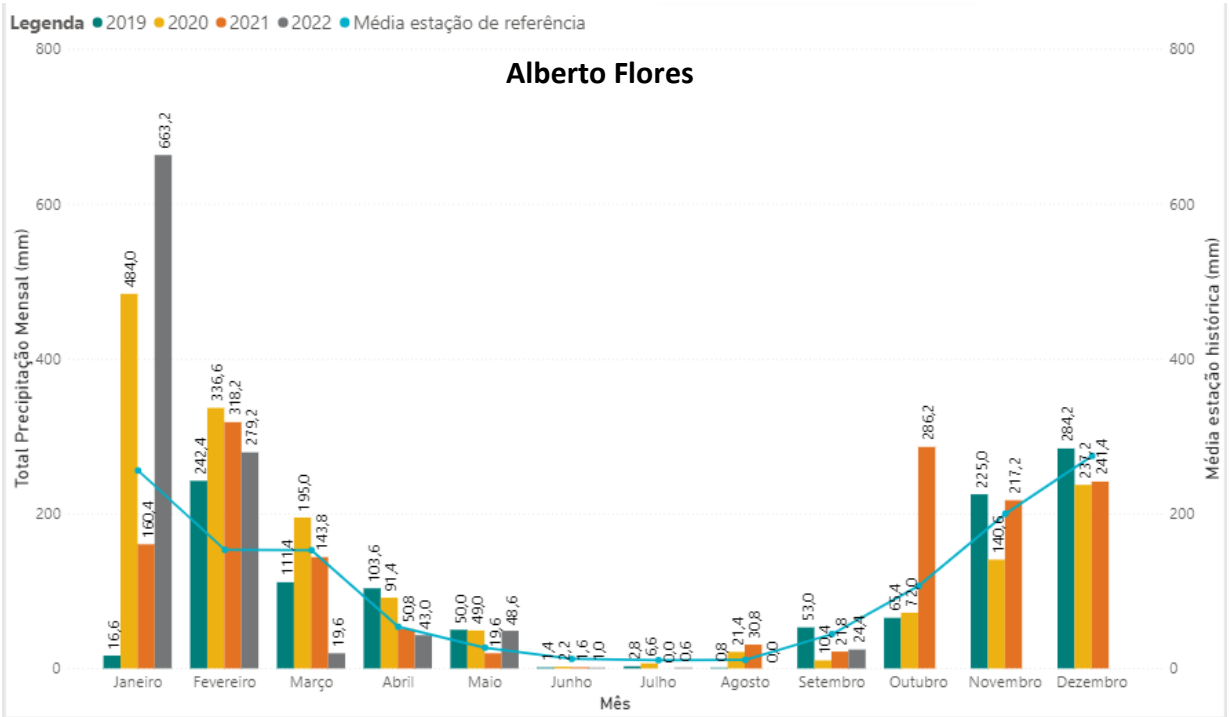
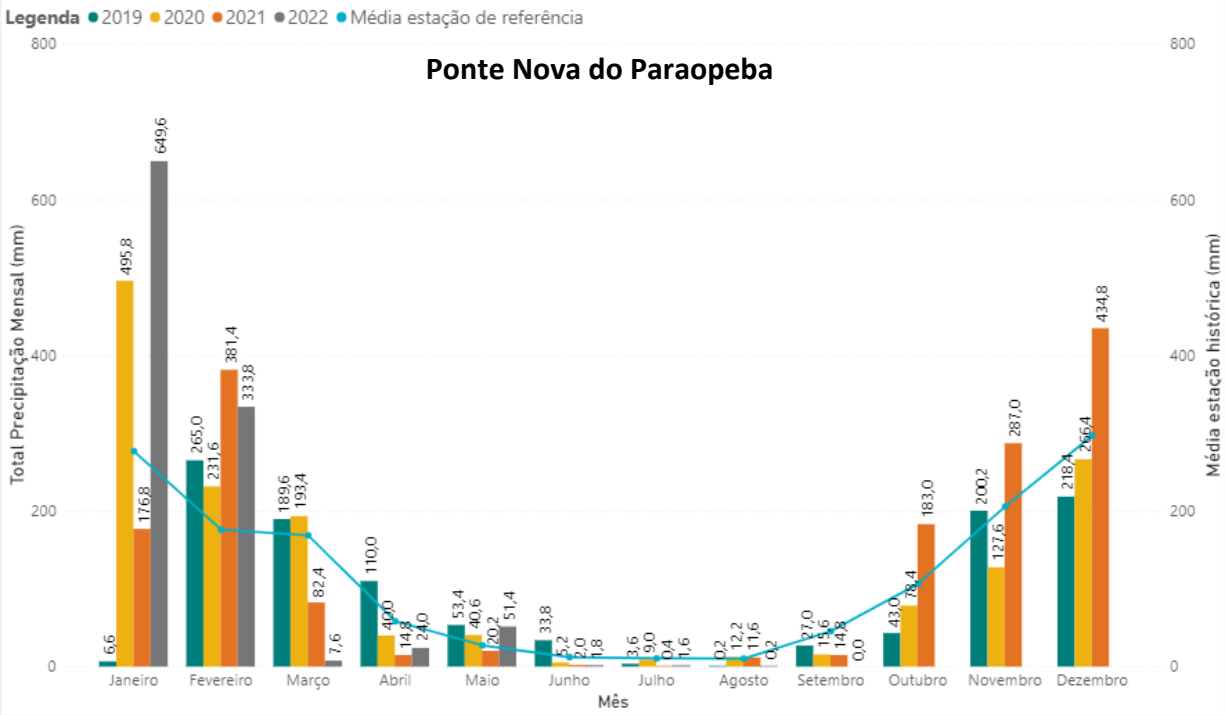
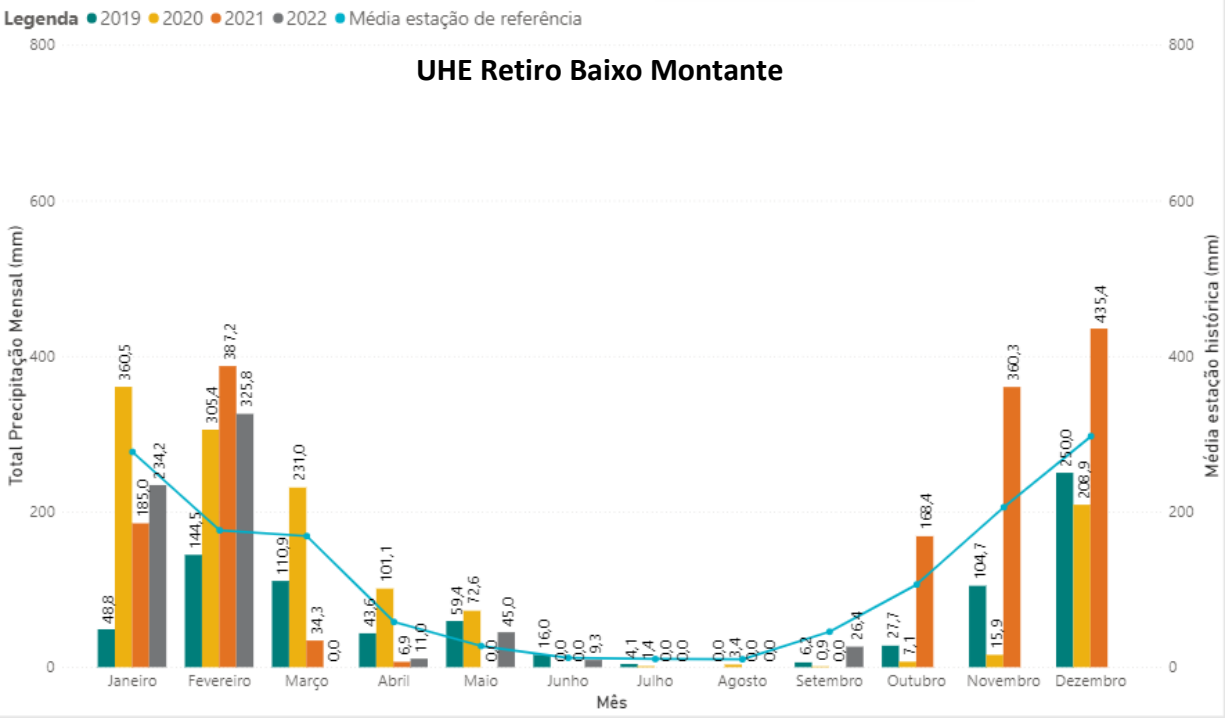


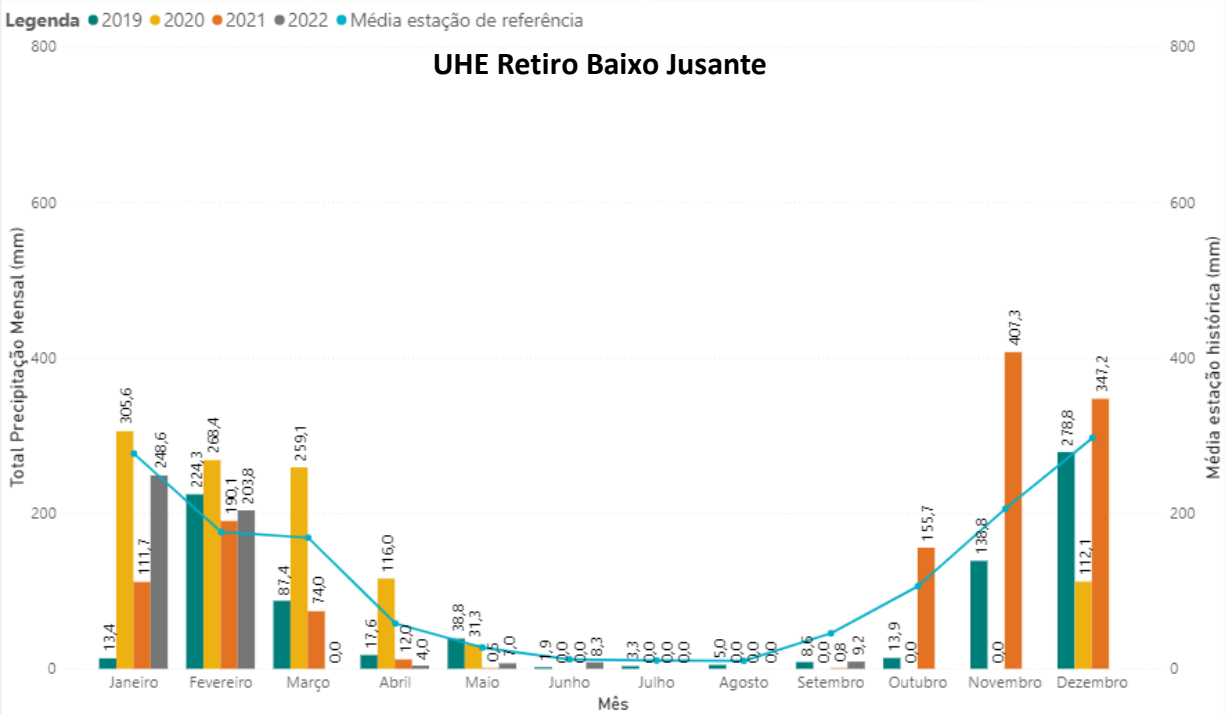
Gráfico 4.2-8 Total precipitado mensal (mm) para as estações Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, Retiro Baixo Montante e Retiro Baixo Jusante e médias mensais históricas de precipitações da estação de referência.






Legenda 2019 2020 2021 2022 Média estação de referência
Ponte Nova do Paraopeba
Total Precipitação Mensal (mm)
Média estação histórica (mm)
Mês
Janeiro Fevereiro Março Abril Maio Junho Julho Agosto Setembro Outubro Novembro Dezembro
6,6 495,8 176,8 649,6
265,0 231,6 381,4 333,8
189,6 193,4 82,4 7,6
110,0 40,0 14,8 24,0
53,4 40,6 20,2 51,4
33,8 5,2 2,0 1,8
3,6 9,0 0,4 1,6
0,2 12,2 11,6 0,2
27,0 15,6 14,8 0,0
43,0 78,4 183,0
200,2 127,6 287,0
218,4 266,4 434,8


Legenda 2019 2020 2021 2022 Média estação de referência
UHE Retiro Baixo Montante
Total Precipitação Mensal (mm)
Média estação histórica (mm)
Mês
Janeiro Fevereiro Março Abril Maio Junho Julho Agosto Setembro Outubro Novembro Dezembro
48,8 360,5 185,0 234,2
144,5 305,4 387,2 325,8
110,9 231,0 34,3 0,0
43,6 101,1 6,9 11,0
59,4 72,6 0,0 45,0
16,0 0,0 0,0 9,3
4,1 1,4 0,0 0,0
0,0 3,4 0,0 0,0
6,2 0,9 0,0 26,4
27,7 7,1 168,4
104,7 15,9 360,3
250,0 208,9 435,4



Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br)

De modo geral, os histogramas apresentam as variações temporais das precipitações típicas da região sudeste, com chuvas mais proeminentes entre outubro e março e atenuações entre os meses de abril e setembro.

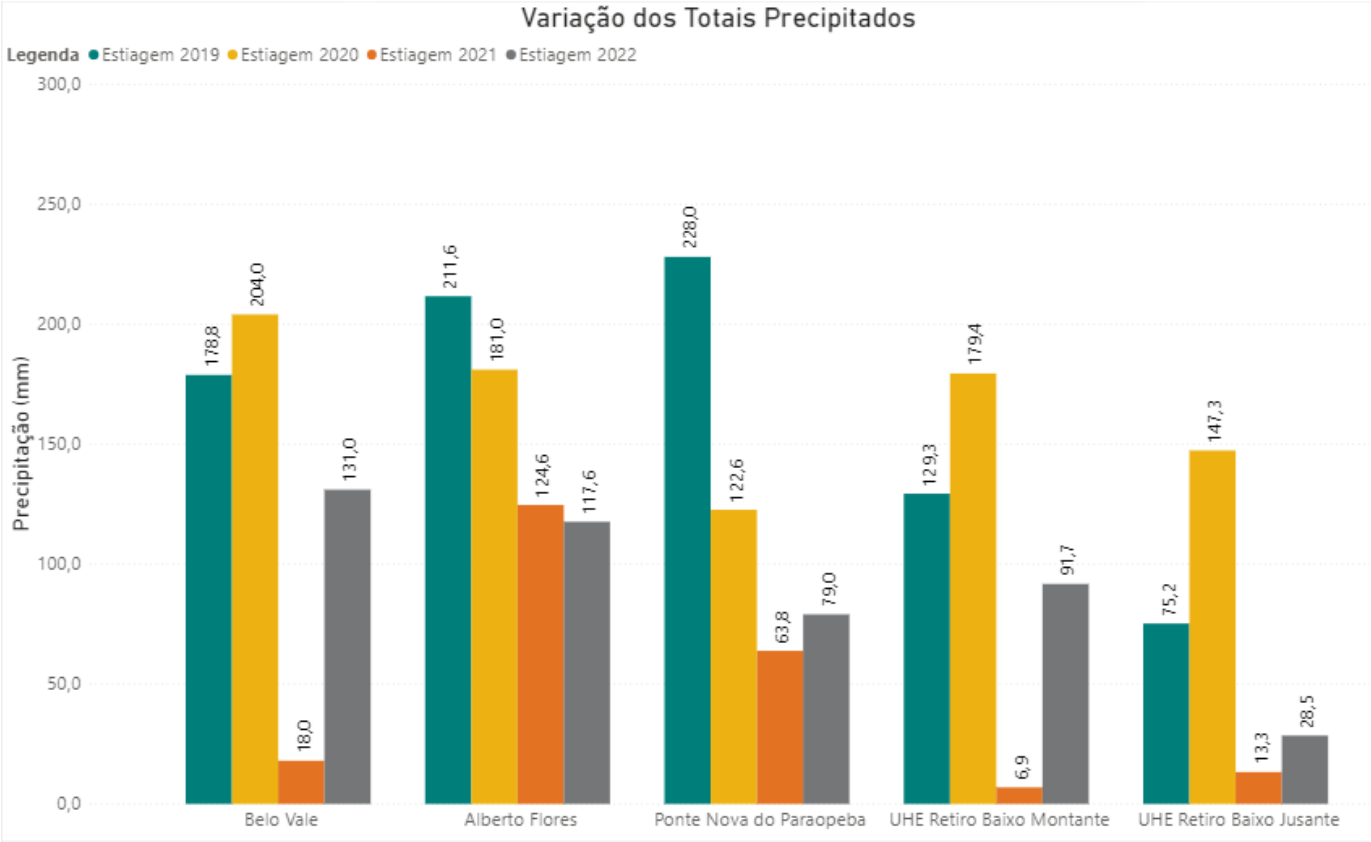
Complementarmente, no **Gráfico 4.2-9**, é apresentado o histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem (abril a setembro/2019), estiagem (abril a setembro/2020), estiagem (abril a setembro/2021) e estiagem (abril a setembro/2022). Evidencia-se, assim, a redução dos totais precipitados no período de estiagem 2022 em relação à estiagem 2019 e 2020 em todas as estações de monitoramento, e o aumento entre o período de estiagem 2022 e estiagem 2021, com exceção da estação Alberto Flores. A variação mais acentuada foi observada na estação UHE Retiro Baixo Montante, alterando de 6,9 mm no período de 2021 para 91,7 no período de 2022.

Destaca-se que no período chuvoso de 2021/2022 foram registrados elevados volumes de precipitação nas respectivas estações e bem superiores à média histórica, corroborando com os aumentos de nível e vazão do rio Paraopeba no período e reverberando no período de estiagem atual. De maneira geral, em caráter de exemplo, as precipitações de janeiro de 2022, além de terem sido intensas, aparentemente foram mais duradouras quando comparadas com o evento chuvoso de 2020 (de curta duração), para o qual estimou-se um período de recorrência (TR) em torno de 40 anos para a chuva de 24 horas de duração. Para 2022, o evento pluviométrico, ocorrido especialmente entre os dias 07/01 e 13/01, quando discretizado para três dias de duração, atingiu um TR equivalente a 1000 anos. Da mesma forma, é possível perceber que as chuvas no período 2021/2022 ocorreram em maior monta desde o mês de

outubro/2021 (mais chuvoso dos últimos onze anos). Esses aspectos, como já destacado, podem ser fatores de influência para o comportamento fluviométrico/hidrodinâmico no período de estiagem/2022, além de terem sido detectados totais precipitados superiores ao período de estiagem/2021, conforme apresentado no **Gráfico** 4.2-9.

É importante destacar, no entanto, 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.

Gráfico 4.2-9 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem (abril a setembro/2019), (abril a setembro/2020), (abril a setembro/2021) e (abril a setembro/2022).

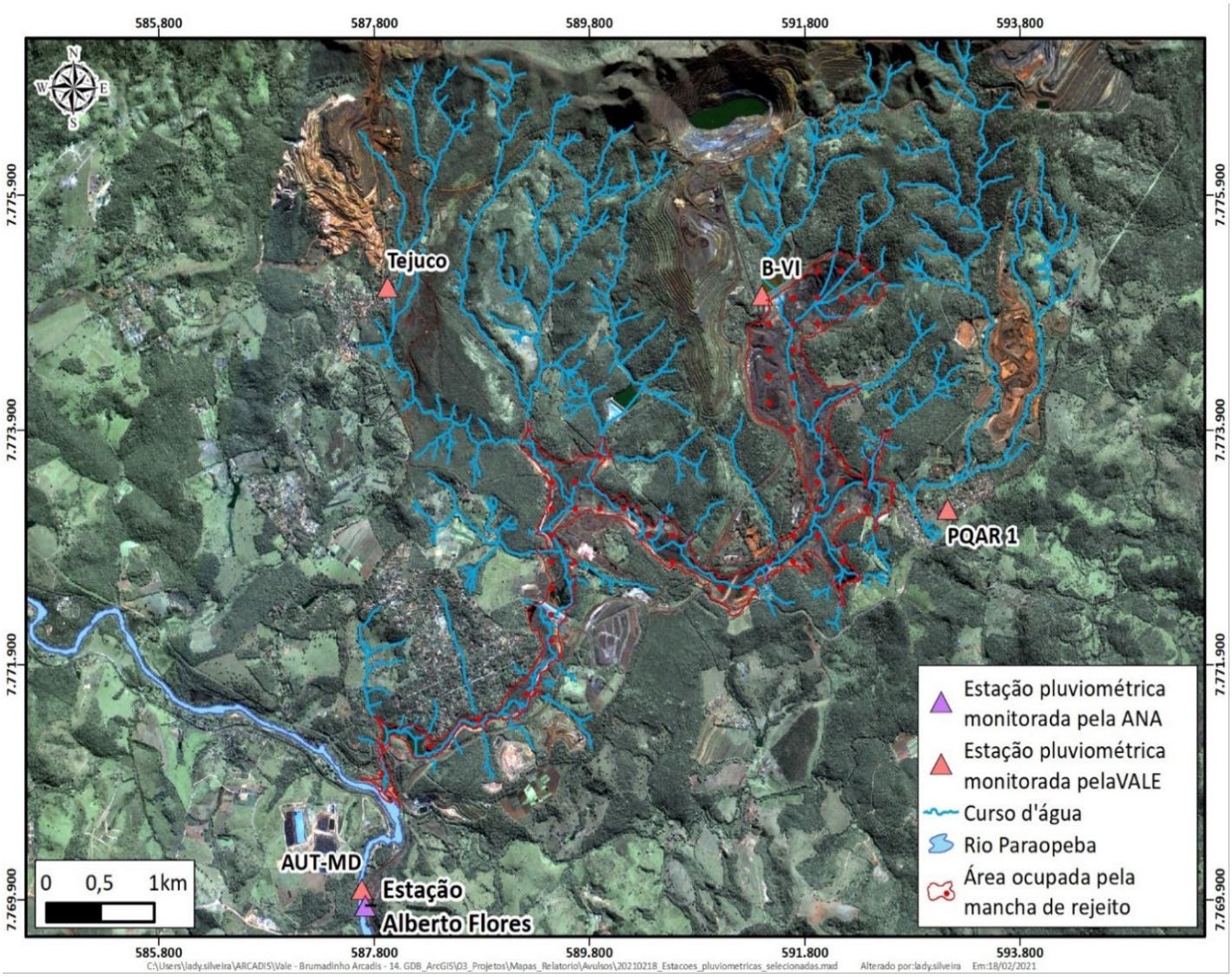


Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

4.3. Ribeirão Ferro-Carvão

Para uma caracterização hidrológica mais específica da região 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.

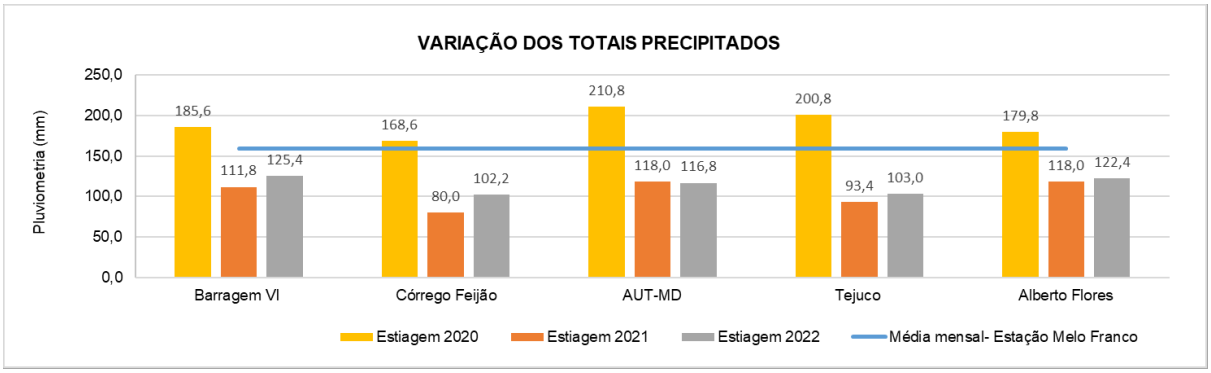


Elaboração: Arcadis, 2021.

O Gráfico 4.3-1 apresenta o histograma de variação dos totais precipitados registrados pelas estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI e Tejuco nos períodos sazonais de estiagem (abril a setembro/2020), estiagem (abril a setembro/2021) e estiagem

(abril a setembro/2022). Para fins comparativos, os dados reportados pela estação oficial da ANA, Alberto Flores, também foram apresentados junto às referidas estações de monitoramento da VALE. Nota-se, assim, redução da pluviosidade no período de 2021 e de 2022 em comparação ao total precipitado no período de estiagem de 2020 para todas as estações de monitoramento.

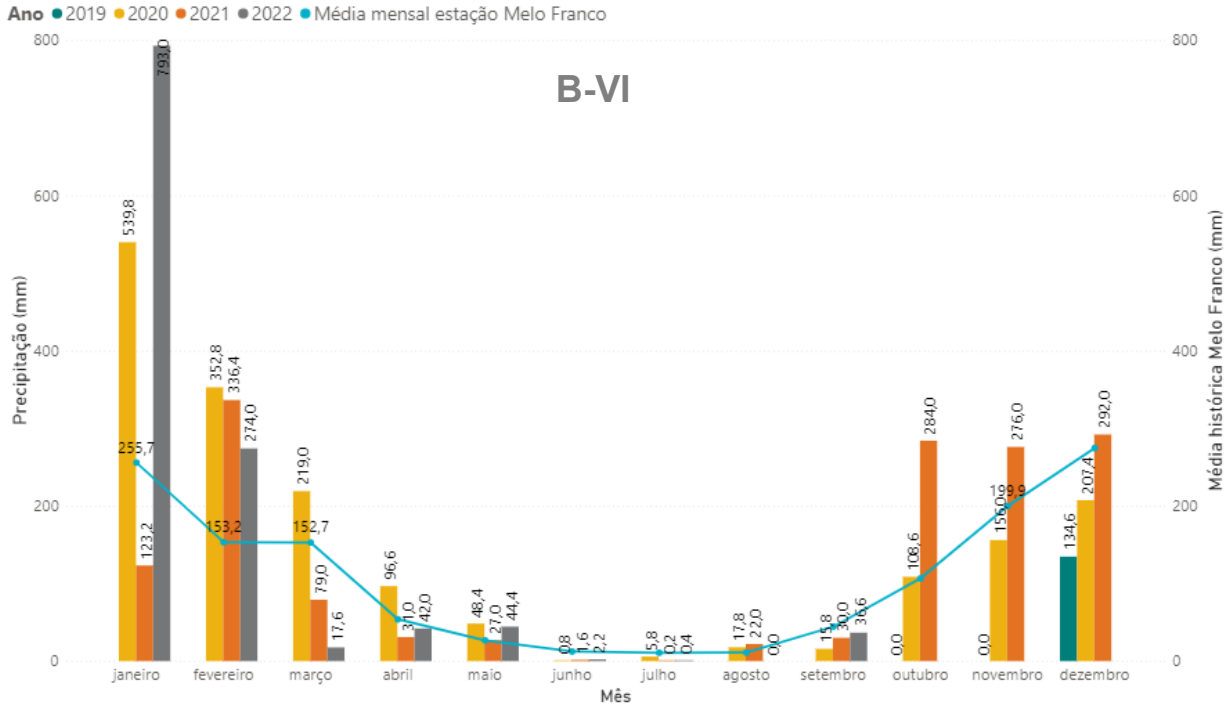
Gráfico 4.3-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de estiagem (abril a setembro/2020), estiagem (abril a setembro/2021) e estiagem (abril a setembro/2022).

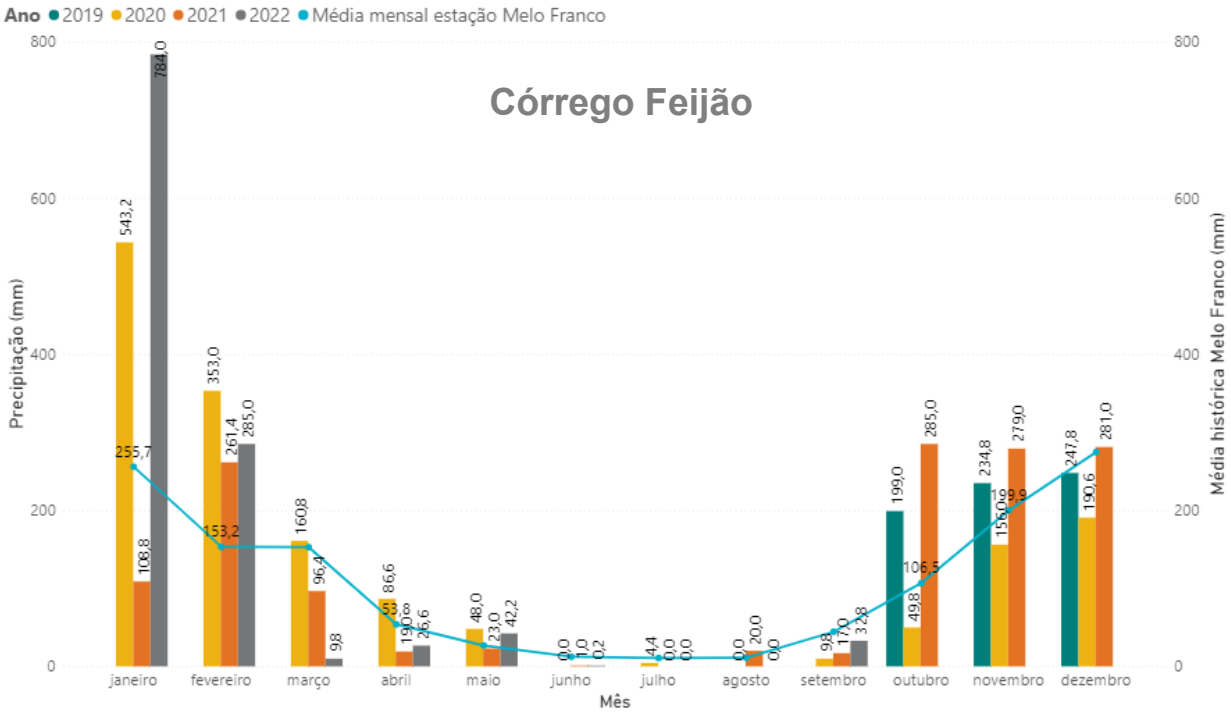


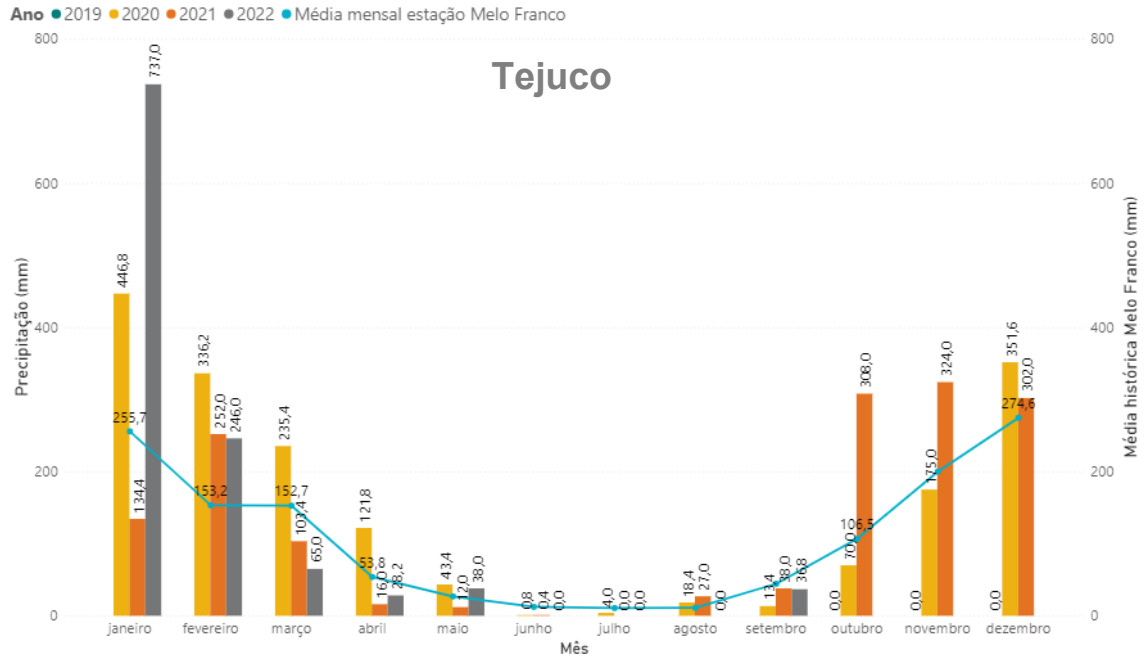
Elaboração: Arcadis, 2022. Fontes: VALE, 2022 (http://www.vale.com/brasil/PT/Paginas/plano-de-monitoramento-das-obras-emergenciais.aspx) e ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

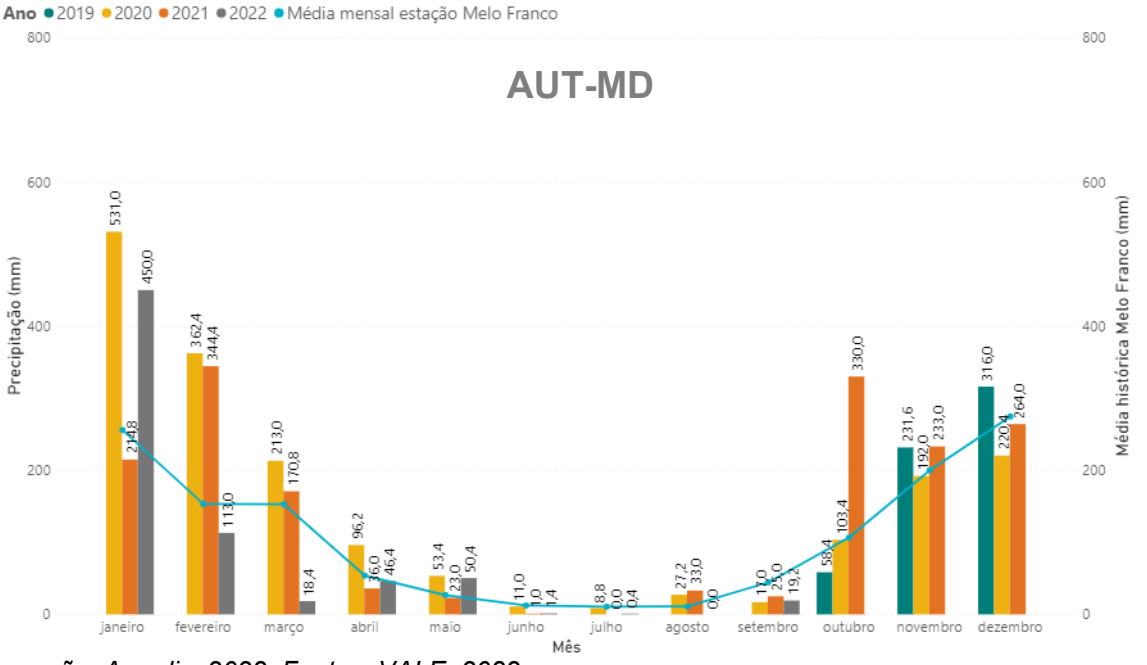
Os totais precipitados acumulados mensais (mm) nas estações pluviométricas localizadas no ribeirão Ferro-Carvão foram comparados às médias mensais históricas de precipitações reportadas pela estação Melo Franco (Gráfico 4.3-2). Notou-se que as precipitações totais mensais no período de estiagem/2022 foram inferiores às médias mensais históricas observadas na Estação Melo Franco para os meses de abril a setembro, exceto para o mês de maio em todas as estações e mês de abril na estação AUT-MD, em que foi observada precipitação superior à média mensal. A análise dos dados permite observar comportamento similar entre as estações durante os respectivos períodos de estiagem. Especificamente para abri/2022, maio/2022 e setembro/2022, as precipitações foram relativamente superiores ao mesmo período para o ano de 2021, com exceção de setembro na estação AUT-MD.

Gráfico 4.3-2 Total precipitado mensal (mm) para as estações B-VI, Córrego Feijão, Tejuco e AUT-MD e médias mensais históricas de precipitações.









Elaboração: Arcadis, 2022. Fontes: VALE, 2022.

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

5.1. Objetivo

Objetiva-se avaliar as alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 tendo em vista o *baseline* (sazonal) do 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 Fósforo dissolvido ao longo do tempo e do espaço nos períodos de estiagem.

A avaliação mais detalhada dos parâmetros Fósforo total e dissolvido 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, 2020). Entretanto, não foi possível associar diretamente a elevação das concentrações de Fósforo total e dissolvido na água às contribuições do rejeito, 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 avalição 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 apresentaram concentrações majoritariamente baixas e pouco variáveis ao longo dos períodos monitorados, sendo que, na estiagem/2022, ocorreram violações pontuais apenas para Cádmio total, Chumbo total, Cobre dissolvido 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 estiagem, visando identificar a similaridade entre os pontos de monitoramento contidos nas diferentes regiões monitoradas, foi empregada a Análise de Agrupamentos (AA), em específico a Análise de Cluster (AC) (HAIR *et al*., 2005). Essa análise agrupa objetos (casos) em classes (clusters) com base nas similaridades dentro da classe e dissimilaridades entre as diferentes classes. Para efetuar esta análise, foram consideradas as medianas mensais dos resultados dos parâmetros majoritários mencionados, desde o início do monitoramento até o final do período de estiagem/2022. 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 *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, 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 estiagem entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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 de estiagem separadamente (comparação espacial estiagem/2019, comparação espacial estiagem/2020, comparação espacial estiagem/2021 e comparação espacial estiagem/2022).

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 (H0) de que não há diferença significativa entre as amostras comparadas; e da hipótese alternativa (HA) de que existe diferença significativa em pelo menos uma das amostras em relação às demais. No caso de rejeição da hipótese nula do teste de Kruskal-Wallis (valor-p ≤ 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 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.

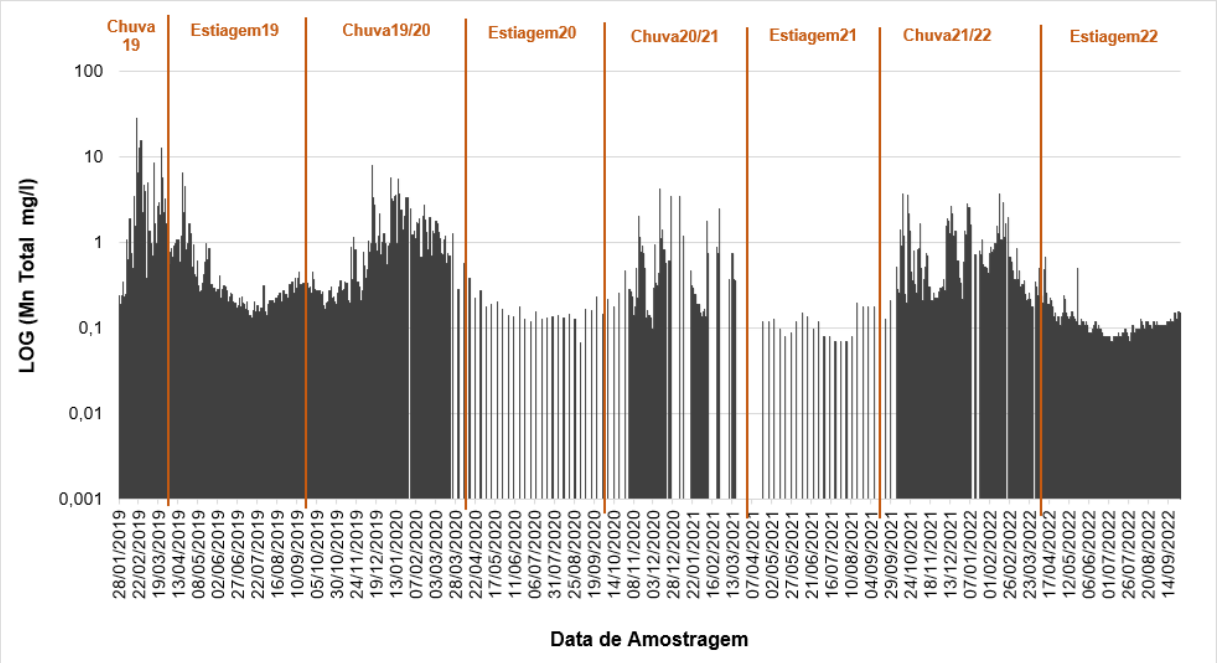
Em testes estatísticos de tendência temporal é habitual o preenchimento de falhas eventuais, por meio de estimativas e interpolações. Grandes lacunas de dados podem, no entanto, fazer com que a série perca sua continuidade e padronização do tempo, o que pode, muitas vezes, trazer mais incertezas para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

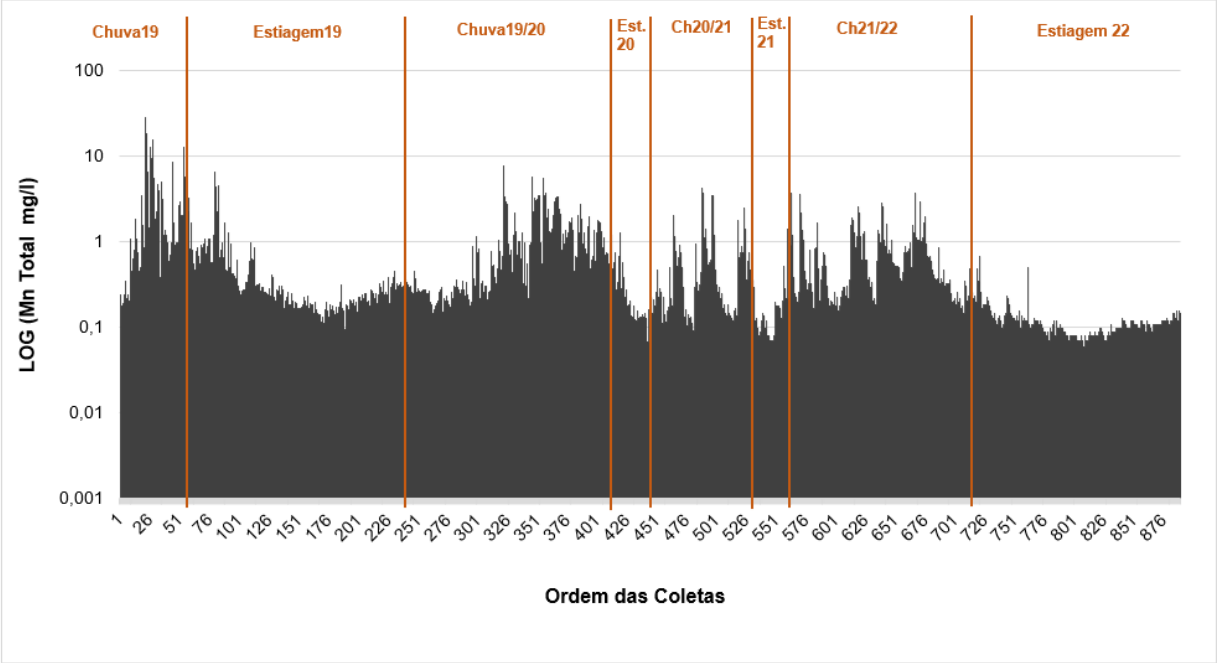
De forma ilustrativa, a Figura 5.2.2.1 mostra, do ponto de vista exploratório, como fica a avaliação temporal dos dados brutos (sem a compilação em uma métrica estatística). É possível identificar o comportamento das concentrações de Manganês total ao longo dos anos em termos de variabilidade, tendência 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).



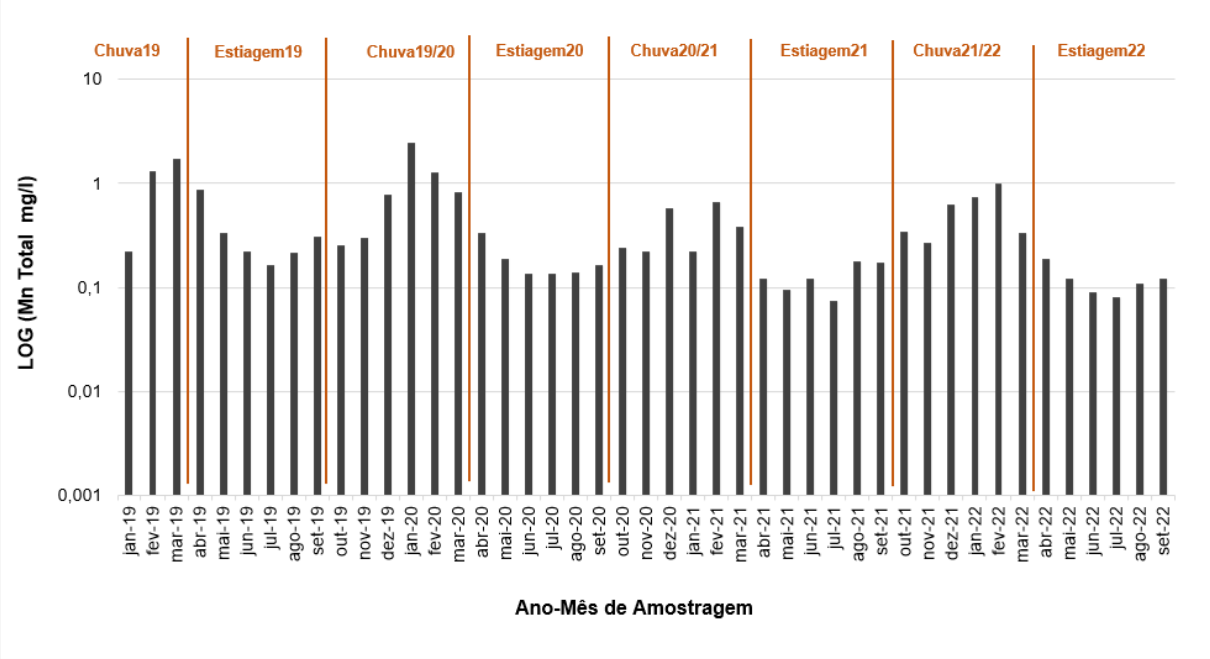
Elaboração: Arcadis, 2022.

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



Elaboração: Arcadis, 2022.

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



Elaboração: Arcadis, 2022.

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 e Fósforo total) considerando a métrica mediana mensal.

Cabe destacar, ainda, que em termos de número de amostras o conjunto de dados é robusto, mas em questão de tempo tem-se uma série temporal ainda pequena, constituída por quatro 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 estiagem/2022, 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 de estiagem separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de estiagem. Neste caso, o teste de Mann-Kendall foi empregado sem necessidade de avaliação prévia da influência da sazonalidade nos dados. Os resultados do teste de tendência temporal para os períodos de chuva monitorados, podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 31/03/2022 (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 - *baseline*

Buscando-se uma apresentação da informação em um contexto mais didático e visual, foram confeccionados mapas temáticos que permitem visualizar o comportamento dos parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez e Fósforo total ao longo da bacia do rio Paraopeba durante os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, em termos de concentrações máximas. A avaliação proposta é baseada na comparação de afastamento ou aproximação da qualidade da água, em termos dos resultados dos referidos parâmetros agregados por região, em relação ao *baseline* sazonal de cada uma das regiões de análise. No ANEXO VI-A, podem ser visualizados os mapas temáticos por mês para o período compreendido entre janeiro/2019 e setembro/2022. No anexo VI-C consta as tabelas de frequência de aproximação ao *baseline* para cada ponto de monitoramento ao longo dos meses monitorados.

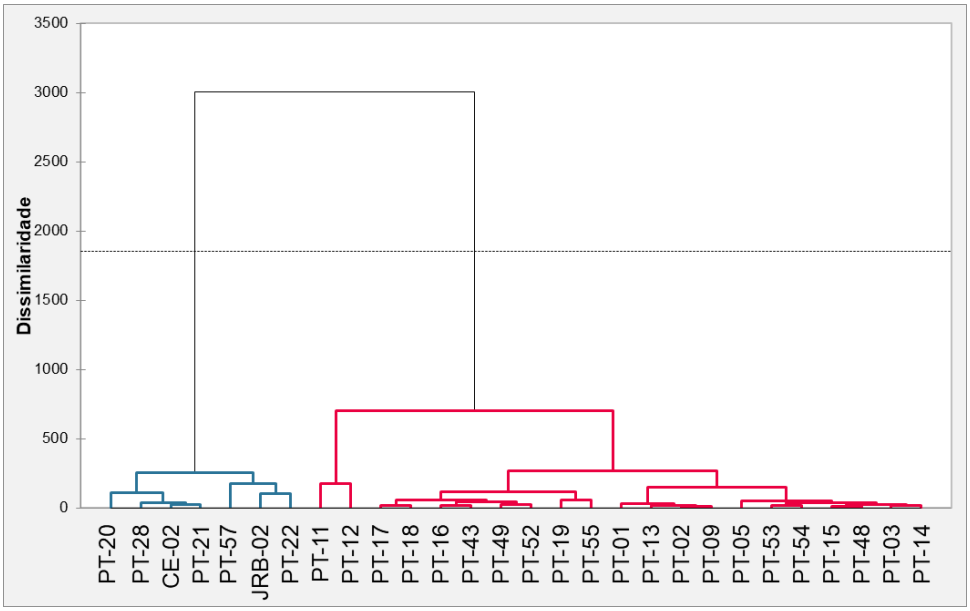
5.3. Resultados e discussão

À semelhança dos resultados obtidos no último Fechamento de Ciclo, com dados até a chuva 2021/2022, a análise de agrupamento (*cluster*) para água superficial (Figura 5.3.1) com a inclusão dos dados do período de estiagem/2022, indicou a manutenção de dois grandes grupos (vermelho: pontos de monitoramento localizados a montante da UHE de Retiro Baixo) e (azul: pontos localizados a partir de Retiro Baixo). Estes últimos são mais distais ao trecho mais afetado pelo rompimento e, em geral, apresentam teores mais baixos dos parâmetros monitorados, bem como maior aproximação da 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,2021c) 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 grupos formados, corroborando, na maior parte dos casos, com as regiões previamente 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-17, PT-18, PT-16, PT-43, PT-49, PT-52, PT-19 e PT-55) 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). Logo, em termos de localização, o PT-52 foi o que mais se destoou. Esse ponto, especificamente, apresentou comportamento similar e mais próximo aos pontos da Região 2A, o que pode ser um indicativo 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, 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.

5.3.1. Estatística descritiva e inferencial

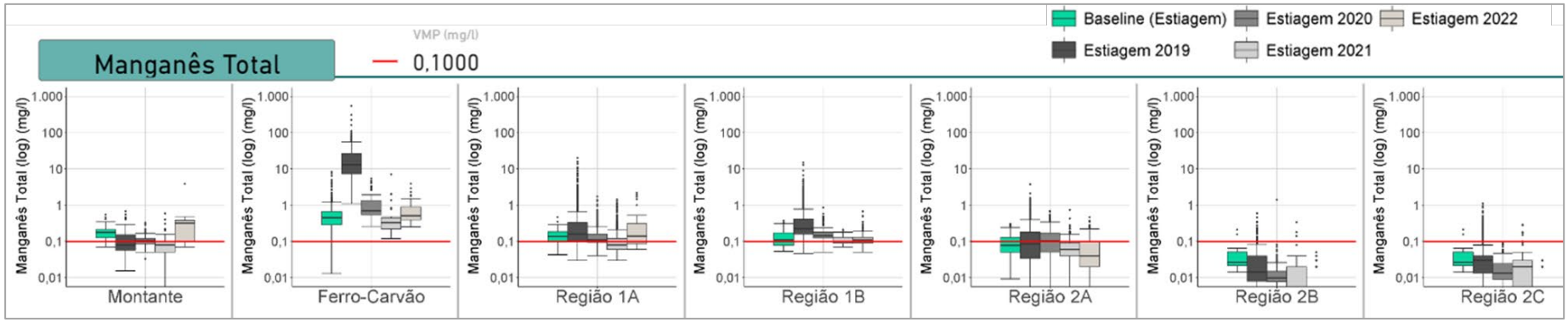
Nos itens a seguir, são apresentados os gráficos *boxplot* com os resultados de monitoramento (Manganês total, Manganês dissolvido, Ferro total, Ferro dissolvido, Alumínio total, Alumínio dissolvido, Turbidez, Fósforo total e Fósforo dissolvido) agregados para cada período sazonal de estiagem e para cada uma das regiões. Os resultados dos testes estatísticos da comparação espacial e temporal, também são apresentados e discutidos para cada um dos parâmetros mencionados. 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 Fósforo total e dissolvido discutidos neste presente item. No ANEXO IV-D, constam os resultados detalhados dos testes estatísticos temporais, sazonais e de tendência.

Ressalta-se que os resultados dos períodos de chuva constam no último relatório de fechamento de ciclo protocolado, referente ao período de 25/01/2019 a 31/03/2022 (ARCADIS 2022b).

5.3.1.1. Manganês total e dissolvido

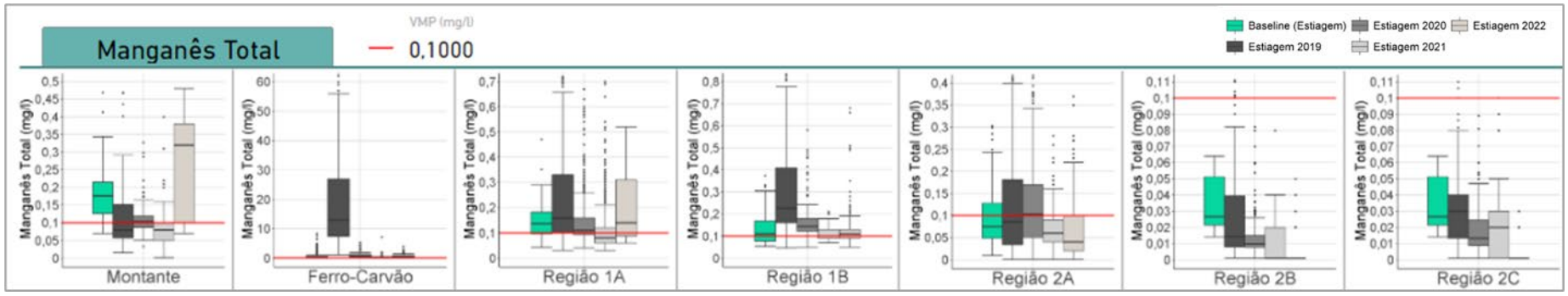
Nos Gráficos (5.3.1.1-1 e 2) e (5.3.1.1-3 e 4) são apresentados os *boxplot* dos parâmetros Manganês total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.1-1 a 5.3.1.1-4 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

Gráfico 5.3.1.1-1: *Boxplot* Manganês total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log, devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.1.1-2: *Boxplot* Manganês total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.1.1-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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	-	-	-	-	-	-	-

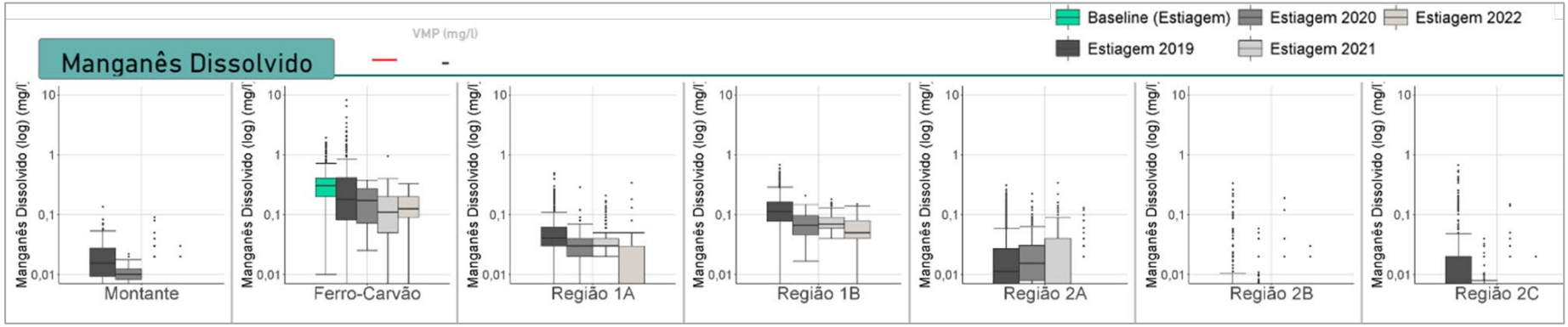
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre ao região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
< Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
> Os valores da região de jusante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

Tabela 5.3.1.1-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês total em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	>	>	>	~	<	<	<
Est-2022 x Est-2020	~	>	~	<	<	<	<
Est-2022 x Est-2019	<	>	<	<	<	<	<
Est-2022 x Est-Baseline	~	~	~	~	<	<	<
Est-2021 x Est-2020	<	<	<	<	<	<	~
Est-2021 x Est-2019	<	<	<	<	<	<	<
Est-2021 x Est-Baseline	~	<	<	~	<	<	<
Est-2020 x Est-2019	<	>	<	<	>	<	<
Est-2020 x Est-Baseline	>	<	~	>	~	<	<
Est-2019 x Est-Baseline	>	<	~	>	~	<	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Gráfico 5.3.1.1-3: *Boxplot* Manganês dissolvido para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log, devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.1.1-4: *Boxplot* Manganês dissolvido para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala variável.

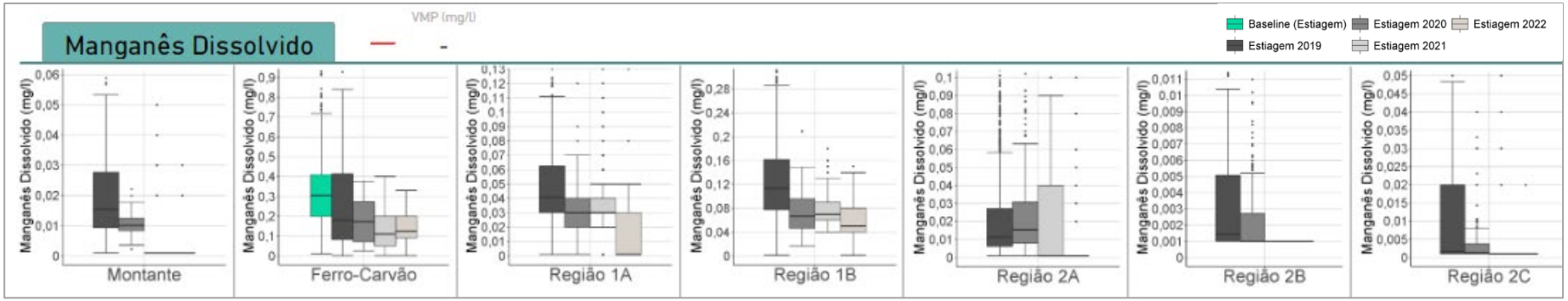


Tabela 5.3.1.1-3: Comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Manganês dissolvido.

	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 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 5.3.1.1-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês dissolvido em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	<	<	<	~	<
Est-2022 x Est-2020	~	<	<	<	<	<	<
Est-2022 x Est-2019	<	<	<	<	<	<	<
Est-2022 x Est-Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2021 x Est-2020	~	<	>	~	<	<	<
Est-2021 x Est-2019	<	<	<	<	<	<	<
Est-2021 x Est-Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	<	>	<	~
Est-2020 x Est-Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2019 x Est-Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Conforme indicado nos Relatórios de Fechamento de Ciclo de 25/01/2019 a 31/03/2021 e de 25/01/2019 a 30/09/2021 (ARCADIS, 2021a; ARCADIS 2021d), o Manganês total é um parâmetro 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 das barragens B1, B4 e B4-A, como também a montante. As diferentes respostas entre os períodos sazonais são verificadas tanto nos resultados pré rompimento (*baseline* Igam), quanto nos dados de pós rompimento (dados VALE). A energia hidráulica resultante dos períodos chuvosos e a consequente elevação das

vazões/escoamento superficial são forças propulsoras que favorecem arraste e ressuspensão de materiais acomodados no leito do rio Paraopeba e/ou carreados difusamente das áreas de contribuição adjacentes, com consequente aumento dos teores.

Sendo assim, nos períodos de estiagem as concentrações deste analito apresentam-se inferiores em relação aos períodos de chuva, contudo até o final da região 1B prevalecem acima do VMP (0,1 mg/L– Classe 2). A partir daí os teores medianos se encontram próximos ou abaixo do limite legal e, em geral, mais próximos, também, da concentração mediana do *baseline*. Neste caso, ressalta-se que o rio Paraopeba, na maior parte de sua extensão avaliada, incluindo a região de Montante, também apresenta condições de *baseline* acima do padrão legal, o que pode estar associado tanto a causas naturais quanto antrópicas presentes na bacia hidrográfica (ARCADIS, 2021d).

Em termos espaciais, considerando todos os períodos de estiagem conjuntamente, as concentrações de Manganês total registradas no ribeirão Ferro-Carvão foram significativamente superiores àquelas registradas em todas as regiões localizadas no rio Paraopeba. Notam-se, também, concentrações significativamente mais elevadas deste analito nas regiões 1A e 1B em relação à região de Montante não impactada. Essa condição também foi verificada nos períodos chuvosos, conforme detalhado em Arcadis (2022b). A partir da região 2A, as concentrações foram significativamente inferiores, inclusive em relação à região de Montante, o que pode indicar que trechos mais distais já tendem a retomar condições mais parecidas ao comportamento natural da bacia. Ao se considerar a comparação espacial para cada período de estiagem separadamente (ANEXO IV-D), em geral, essa condição se manteve em todos os períodos de estiagem, com exceção do período de estiagem/2022, quando se observa concentrações significativamente mais elevadas na região de Montante, mas sem diferenças significativas em relação as regiões do ribeirão Ferro-Carvão, 1A e 1B.

Em termos de avaliação temporal, na região de Montante, monitorada no ponto PT-52, observou-se na maior parte dos períodos de estiagem avaliados, condições significativamente inferiores ou ausência de diferenças significativas em relação ao *baseline* (BP036). Especificamente no atual período de análise, estiagem 2022, as concentrações de Manganês total foram significativamente mais elevadas que nos períodos precedentes, podendo estar associadas à influência dos eventos de precipitação mais críticos que ocorreram no período de chuvas antecedente (2021/2022), enquanto para os demais períodos comparados houve redução significativa, exceto na comparação entre a estiagem de 2020 e a de 2019. Essa condição corrobora com o apontamento (Item 4 – Caracterização hidrológica) de reverberação da influência do comportamento do período chuvoso antecedente nas alterações mais notáveis no período de estiagem seguinte, uma vez que ocorreram também volumes pluviométricos de importante ordem de grandeza nas chuvas de 2019/2020.

Para a Região Ferro-Carvão, relativa ao curso de água (tributário) mais afetado pelo rompimento nos aspectos morfológicos e de qualidade da água, é notória a prevalência de maiores concentrações de Manganês total nos períodos sazonais de estiagem mais próximos a ocorrência do rompimento (2019 e 2020), potencialmente por efeitos das atividades de contenção e recuperação aplicados neste tributário. Nota-se, no entanto, que na estiagem/2022

houve elevação significativa quando comparado com a estiagem/2021, mas ausência de diferença significativa em relação à estiagem/2020, mais uma vez indicando possível influência das chuvas antecedentes.

Em termos de comparação com a condição pré-rompimento, observa-se na Região Ferro-Carvão tanto no período de estiagem/2019 quanto de estiagem/2020, valores significativamente superiores ao *baseline* da região, enquanto para os demais períodos (estiagem/2021 e estiagem/2022), os resultados não diferiram significativamente em relação ao *baseline*. Tal situação indica melhoria das condições da qualidade da água referentes a este analito ao longo dos períodos de estiagem analisados, condição esta também verificada ao longo dos períodos de chuva (ARCADIS, 2022b).

No que tange à Região 1A, quando se comparam os períodos de estiagem analisados, verifica-se redução gradual e/ou ausência significativa das concentrações entre os períodos sucessivos de estiagem, exceto ao se compararem os dois últimos períodos, para os quais é evidenciado aumento significativo para o ano de 2022, refletindo mais uma vez a influência dos maiores volumes precipitados no último período chuvoso avaliado. No que se refere à comparação em relação às condições de *baseline*, neste caso referentes aos resultados do monitoramento do Igam nos pontos BP068 e BP070, com exceção do período de estiagem/2021, nos demais as concentrações deste analito não apresentaram diferenças significativas àquelas registradas anteriormente ao rompimento.

Comportamento semelhante foi observado na Região 1B, com indicativo de redução sucessiva das concentrações de Manganês total entre os três primeiros períodos de estiagem, seguido de manutenção no último período. Do mesmo modo, no que se refere à comparação em relação às condições de *baseline*, neste caso referentes aos resultados do monitoramento do Igam nos pontos BP070 e BP072, com exceção dos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020, nos demais as concentrações deste analito não apresentaram diferenças significativas que aquelas registradas anteriormente ao rompimento.

A Região 2A compreende trecho de longa extensão e passível de heterogeneidade de comportamento entre seus respectivos pontos de monitoramento. Todavia, ao se considerar a análise da região como um todo, nota-se redução sucessiva das concentrações entre os períodos de estiagem analisados, com exceção para concentrações significativamente superiores no período de estiagem/2020 em relação à estiagem/2019, possivelmente em função das chuvas de maior porte antecedentes (2019/2020) que ocorreram na região. Em relação ao monitoramento do Igam efetuado nos pontos BP082 e BP078, em todos os períodos chuvosos avaliados pós-rompimento, os resultados apresentaram-se significativamente mais atenuados, exceto para os anos de 2019 e 2020 em que não houve diferença significativa relação aos *baseline* do trecho.

Na Região 2B, sob influência do regime hidráulico lêntico do reservatório da UHE Retiro Baixo e de toda a sua capacidade de retenção de material, dispersão e outros aspectos de depuração típicas da natureza desse ambiente, é perceptível a predominância de concentrações mais reduzidas, com a maioria dos resultados inferiores ao VMP em todos os períodos monitorados.

Nota-se também, concentrações significativamente menores entre os períodos sucessivos de estiagem analisados, condição também indicada para os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). Em comparação com os resultados de *baseline,* nos períodos de estiagem avaliados os valores também foram significativamente inferiores.

Por fim na Região 2C, as concentrações também se apresentaram mais reduzidas e majoritariamente inferiores ao VMP (0,1 mg/l), exceto para a estiagem/2021 e estiagem/2020 para as quais não foi detectada diferença significativa. Na comparação com a condição pré-rompimento, com exceção da estiagem/2019, cujas concentrações não diferiram estatisticamente do *baseline*, todos demais períodos foram mais reduzidos. Entende-se que nos períodos de estiagem, especialmente, o trecho tem influência mais predominante das defluências do reservatório de Retiro Baixo e de contribuições pontuais dos tributários nessa bacia incremental, enquanto nas chuvas se somam as contribuições difusas, o que pode interferir mais em eventuais alterações de qualidade da água.

No que tange ao Manganês, em sua fração dissolvida, em geral, a comparação espacial englobando todos os períodos de estiagem indica comportamento similar ao observado para a fração total, com concentrações superiores no ribeirão Ferro-Carvão se comparadas às concentrações registradas nas regiões localizadas no rio Paraopeba. No entanto, nota-se também que a Região 2A aponta concentrações mais elevadas significativamente que a Região Montante. Esse padrão das concentrações de Manganês dissolvido nas referidas regiões, em geral, se manteve ao se considerar cada um dos períodos de estiagem separadamente, conforme indicado no ANEXO IV-D. Importante ressaltar que, neste caso, não há *baseline* disponível para fins comparativos.

Em termos de comparação temporal, diferentemente da fração total, para a fração dissolvida de Manganês, na Região Montante, nota-se indicativo de concentrações significativamente inferiores ou ausência de diferenças significativas entre os resultados do monitoramento dos períodos sucessivos de estiagem.

Já no ribeirão Ferro-Carvão, é possível verificar que as concentrações de Manganês dissolvido foram mais variáveis e significativamente mais elevadas nos períodos sucessivos ao rompimento, estiagem/2019 e estiagem/2020. Entretanto, mesmo nestes períodos, as concentrações foram estatisticamente inferiores frente aos resultados do *baseline* Vale. Para os demais períodos de estiagem, exceto para a comparação entre 2020 e 2019, em que o primeiro foi significativamente superior, as concentrações foram menores ou não se diferiram entre si, e foram inferiores à condição do *baseline*.

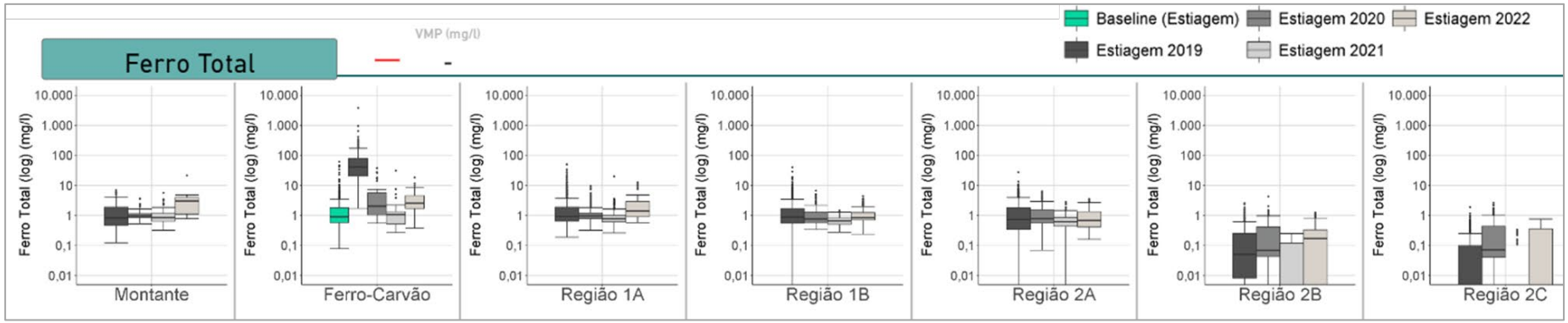
Para a Região 1A, as concentrações de Manganês dissolvido foram significativamente inferiores, bem como menos variáveis, ao se comparar os períodos de estiagem sucessivos. Comportamento semelhante foi observado para a Região 1B, porém sem indicativo de diferença estatística significativa entre as concentrações registradas no período de estiagem 2021 e estiagem 2020.

A partir da Região 2A, da mesma maneira que para fração total, as concentrações medianas de Manganês dissolvido se apresentam-se mais reduzidas. Comportamento semelhante foi observado para as Regiões 2B e 2C. Como observado para as demais regiões, nota-se o predomínio de concentrações significativamente inferiores nas comparações estabelecidas entre os períodos de estiagem sucessivos. Especificamente no período de estiagem mais recente, estiagem/2022, a maioria dos resultados do monitoramento dessas regiões, foram inferiores ao limite de quantificação do método analítico, correspondente a 0,001 mg/L. Essa condição também foi observada para o último período de chuvas analisado, conforme indicado em Arcadis (2022b).

5.3.1.2. Ferro total e dissolvido

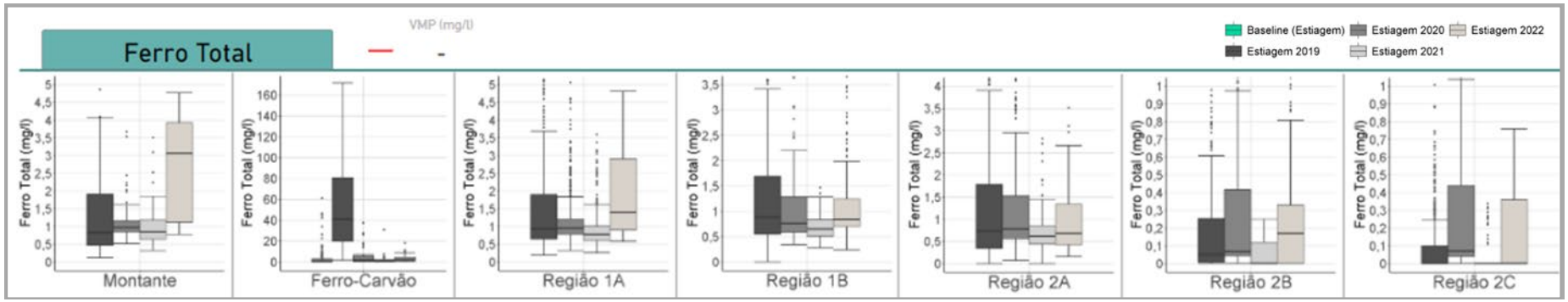
Nos Gráficos (5.3.1.2-1 e 2) e (5.3.1.2-3 e 4) são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Ferro total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.2-1 a 5.3.1.2-4 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

Gráfico 5.3.1.2-1: *Boxplot* Ferro total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.1.2-2: *Boxplot* Ferro total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.1.2-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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	-	-	-	-	-	-	-

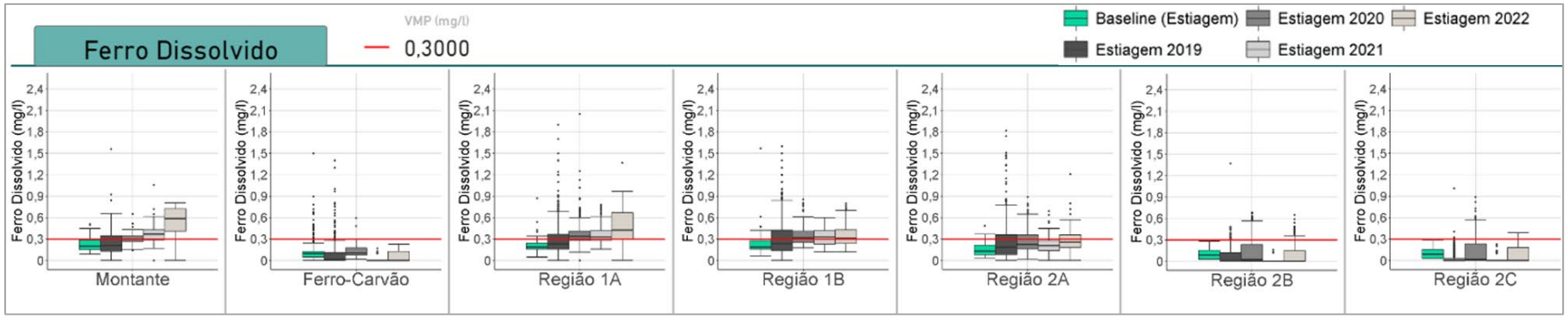
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre ao região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
< Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
> Os valores da região de jusante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

Tabela 5.3.1.2-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro total em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	>	>	>	>	>	>	>
Est-2022 x Est-2020	~	>	>	~	<	<	<
Est-2022 x Est-2019	<	>	>	~	~	~	>
Est-2022 x Est-Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2021 x Est-2020	<	<	<	<	<	<	<
Est-2021 x Est-2019	<	~	<	<	<	<	<
Est-2021 x Est-Baseline	~	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2020 x Est-2019	<	~	~	~	>	>	>
Est-2020 x Est-Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2019 x Est-Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA

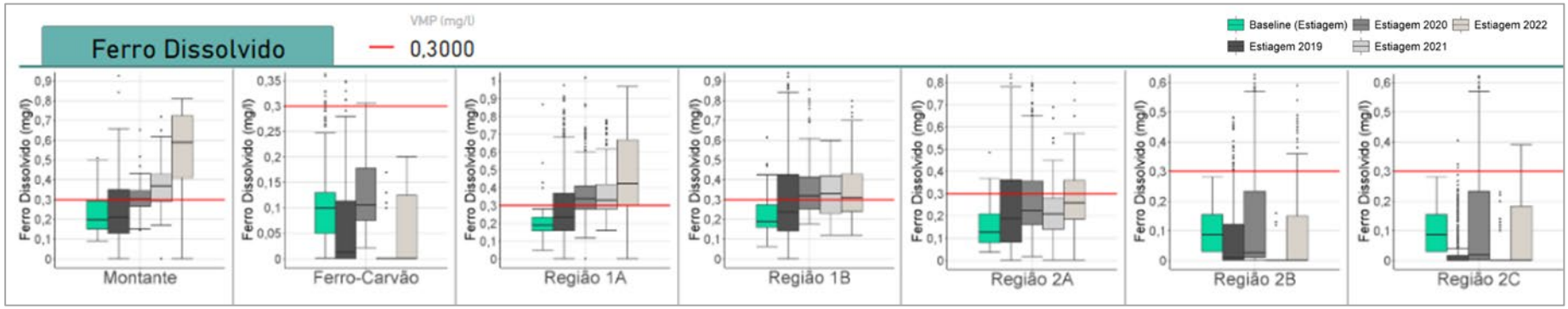
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Gráfico 5.3.1.2-3: *Boxplot* Ferro dissolvido para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 5.3.1.2-4: *Boxplot* Ferro dissolvido para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.1.2-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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 5.3.1.2-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro dissolvido em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	>	>	~	>	>	>
Est-2022 x Est-2020	<	>	>	~	~	<	<
Est-2022 x Est-2019	<	>	>	>	>	<	>
Est-2022 x Est-Baseline	<	>	>	>	>	<	<
Est-2021 x Est-2020	<	>	~	~	<	<	<
Est-2021 x Est-2019	<	>	>	>	~	<	<
Est-2021 x Est-Baseline	<	>	>	>	>	<	<
Est-2020 x Est-2019	>	>	>	>	>	>	>
Est-2020 x Est-Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Est-2019 x Est-Baseline	~	~	>	>	>	~	<

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Assim como o parâmetro Manganês total, o Ferro total compõe a matriz geológica da região e é influenciado pela sazonalidade, com concentrações mais elevadas nos períodos chuvosos em relação aos períodos de estiagem. Em termos espaciais, as concentrações deste analito registradas ao longo dos períodos de estiagem analisados conjuntamente, foram significativamente superiores na região do ribeirão Ferro-Carvão se comparadas as regiões do rio Paraopeba. Entretanto, ao se considerar apenas as regiões do rio Paraopeba, não há evidências de diferenças significativas entre as regiões 1A e 1B, mais afetadas, em relação à região de montante não impactada, sendo essa condição também verificada entre os períodos

de chuva analisados no relatório anterior (ARCADIS, 2022b). A partir da região 2A, as concentrações se mantêm significativamente inferiores, inclusive em relação a região de Montante, mesmo considerando os diferentes períodos sazonais separados, conforme indicado no ANEXO IV-D.

Em termos de avaliação temporal, na região de Montante, não houve diferença significativa entre as concentrações de Ferro total nos três primeiros períodos de estiagem analisados, situação também verificada nas comparações estabelecidas entre os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). Porém, no último período, estiagem/2022, nota-se incremento das concentrações, com resultados significativamente mais elevados, refletindo a influência do período chuvoso anterior. É importante destacar que não há disponível *baseline* para o analito Ferro total.

Por outro lado, no ribeirão Ferro-Carvão, as concentrações de Ferro total foram significativamente superiores no período de estiagem logo após o rompimento, estiagem/2019, se comparado aos demais. Destaca-se também concentrações de Ferro total mais elevadas no período de estiagem/2022 em relação a estiagem/2021, conforme notado em demais regiões. Em todos os períodos de estiagem pós-rompimento, com exceção da estiagem/2021, as concentrações deste analito foram significativamente superiores ao *baseline* Vale, condição também observada nos períodos de chuva, conforme descrito em Arcadis (2022b).

A Região 1A mais afetadas pelo rompimento, apresentou comportamento próximo ao da Região de Montante, com destaque para o incremento das concentrações no período de estiagem/2022. Já na região 1B, os resultados foram mais próximos entre os períodos, com exceção do período e estiagem/2021, quando as concentrações deste analito foram significativamente inferiores em relação aos demais períodos avaliados.

Nas regiões subsequentes, 2A, 2B e 2C, o comportamento foi similar, com concentrações significativamente mais elevadas no período de estiagem/2020 e mais reduzidas no período de estiagem/2021.

O comportamento do parâmetro Ferro na fração dissolvida, não se assemelha ao observado para a fração total. Em termos espaciais, considerando todos os períodos de estiagem, notam-se concentrações significativamente mais elevadas nas regiões do rio Paraopeba, desde Montante até 2A, em relação à região do ribeirão Ferro-Carvão, indicando que a disponibilização do Ferro dissolvido está predominante no rio Paraopeba. Tal situação pode ser justificada pelo fato de a região do ribeirão Ferro-Carvão ter apresentado uma menor solubilidade em relação às demais, eventualmente, porque a presença do ferro pode conter minerais em forma cristalina (hematita e goethita constituinte do rejeito da barragem B1) que seriam menos solúveis que as fases mais amorfas de minerais constituintes com ferro. Adicionalmente, a solubilização dos minerais constituintes do rejeito e os mobilizados naturalmente da bacia também podem contribuir para o aumento do Ferro dissolvido no rio Paraopeba. Esse padrão se manteve ao comparar espacialmente as regiões para cada período de estiagem separadamente, conforme indicado no ANEXO IV-D, bem como, em geral, nos períodos de chuva, conforme detalhado em Arcadis (2022b).

Em termos temporais, para a Região Montante, notam-se concentrações significativamente mais elevadas ao longo dos períodos de estiagem sucessivos, inclusive em relação a condição de *baseline*. O indicado comportamento de aumento substancial pode estar relacionado a condições específicas de ordem química, como valores de pH e Eh associados a solubilização do Ferro, e a fases minerais prevalentes. Essa condição também foi verificada ao longo dos períodos de chuva, com maiores concentrações deste analito no período mais recente (ARCADIS, 2022b). Além disso, nos dois últimos períodos de estiagem monitorados, mais de 75% dos resultados ficaram acima do VMP (0,3 mg/L).

Já na Região do ribeirão Ferro-Carvão, nota-se prevalência de resultados inferiores ao limite legal (0,3 mg/L) e concentrações maiores no período de estiagem/2020 se comparadas aos demais períodos monitorados após o rompimento, e próximas ou superiores ao *baseline*.

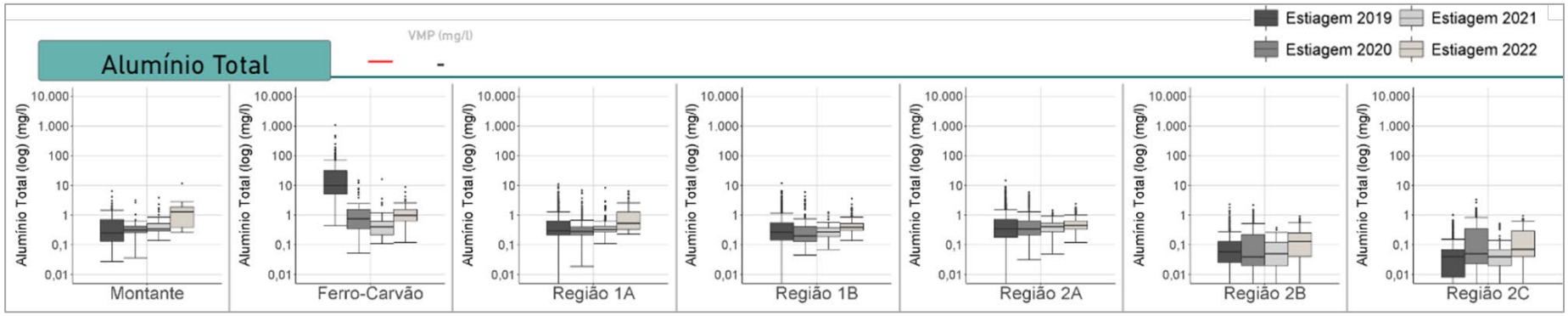
Nas regiões 1A a 2A, também houve predomínio de concentrações de Ferro dissolvido significativamente superiores entre os períodos de estiagem sucessivos, com exceção da comparação estabelecida entre estiagem/2022 e estiagem/2021 na Região 1B no qual não houve diferença estatística. Em todos os períodos pós-rompimento as concentrações deste analito também superaram o *baseline* de estiagem e, a partir do ano de 2020 nas regiões 1A e 1B majoritariamente superaram o VMP. Já na Região 2A a maior parte dos resultados ficou abaixo do VMP. Vale destacar que nessas regiões ao longo dos períodos sucessivos de chuva (ARCADIS, 2022b) também houve indicativo de concentrações mais elevadas. Essa condição de aumento para as concentrações, no entanto, como já apontado, foi observada, inclusive, na região Montante, em trecho não afetado, indicando estar associado, possível e relativamente às mesmas origens e, assim, a um contexto comportamental e de contribuição inerente à própria bacia hidrográfica. Não se exclui, no entanto, que também possa haver influência da disponibilização de material resultante do rompimento.

Por outro lado, nas regiões mais distais, 2B e 2C, as concentrações de Ferro dissolvido foram mais elevadas no período de estiagem/2020 e mais reduzidas no período de estiagem/2021, conforme identificado para a fração total deste analito. Em termos da condição do *baseline*, os resultados pós-rompimento não diferiram estatisticamente ou foram significativamente inferiores em ambas as regiões. Além disso, com exceção de resultados pontuais, em todos os períodos, incluindo a condição do *baseline* sazonal, a maior parte dos resultados permaneceu abaixo do VMP.

5.3.1.3. Alumínio total e dissolvido

Nos Gráficos (5.3.1.3-1 e 2) e (5.3.1.3-3 e 4) são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Alumínio total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.3-1 a 5.3.1.3-4 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

Gráfico 5.3.1.3-1: *Boxplot* Alumínio total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.1.3-2: *Boxplot* Alumínio total para os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável.

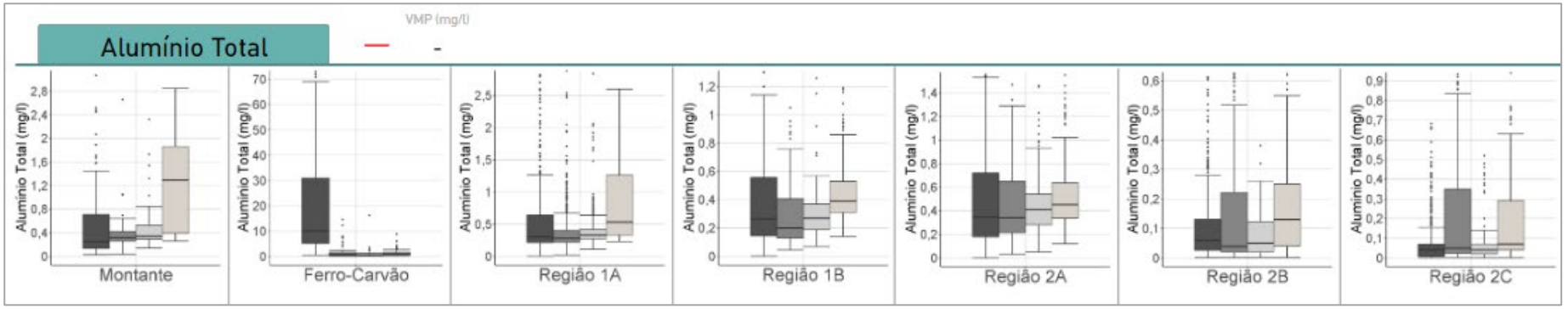


Tabela 5.3.1.3-1:Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Alumínio total.

	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	-	-	-	-	-	-	-

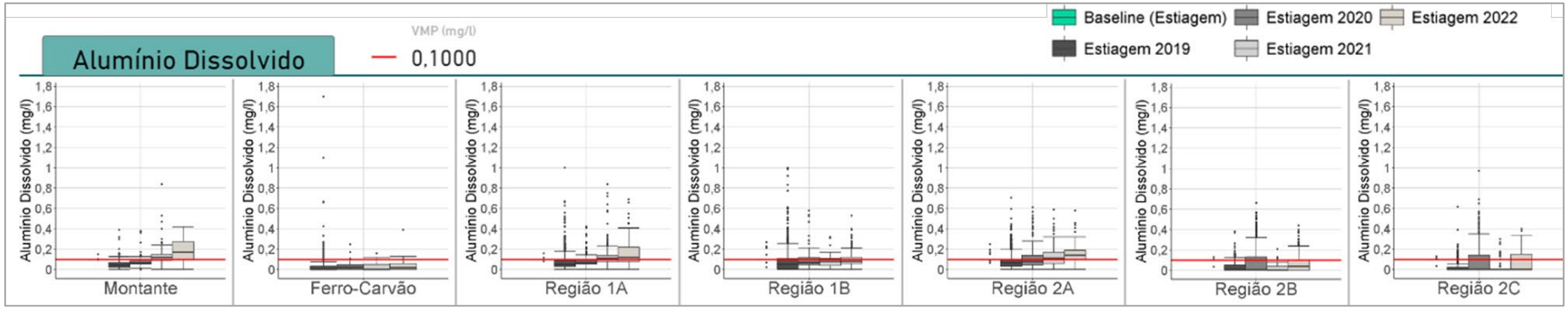
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre ao região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
< Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
> Os valores da região de jusante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

Tabela 5.3.1.3-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio total em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	>	>	>	>	>	>
Est-2022 x Est-2020	~	>	>	>	>	>	>
Est-2022 x Est-2019	<	>	>	>	>	>	>
Est-2022 x Est-Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2021 x Est-2020	~	>	>	~	~	~	<
Est-2021 x Est-2019	<	>	~	~	~	~	~
Est-2021 x Est-Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2020 x Est-2019	<	~	<	<	~	~	>
Est-2020 x Est-Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Est-2019 x Est-Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

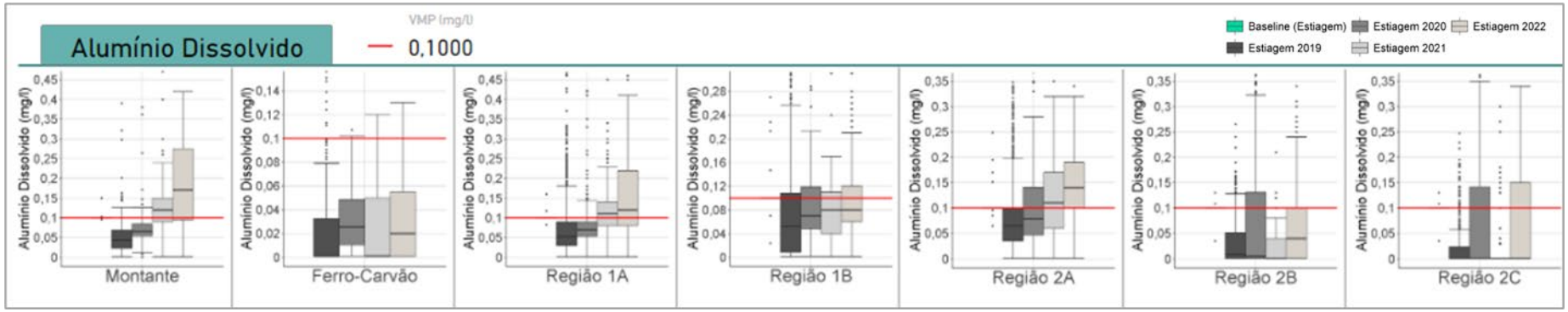
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Gráfico 5.3.1.3-3:*Boxplot* Alumínio dissolvido para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 5.3.1.3-4:*Boxplot* Alumínio dissolvido para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.1.3-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem 2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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 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 5.3.1.3-4:Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio dissolvido em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	>	>	>
Est-2022 x Est-2020	<	>	>	~	>	~	~
Est-2022 x Est-2019	~	>	>	>	>	>	>
Est-2022 x Est-Baseline	NA	>	>	>	>	>	~
Est-2021 x Est-2020	>	>	>	~	>	<	<
Est-2021 x Est-2019	~	>	>	>	>	<	~
Est-2021 x Est-Baseline	NA	>	>	>	>	~	~
Est-2020 x Est-2019	>	>	>	>	>	>	>
Est-2020 x Est-Baseline	NA	>	>	>	>	~	~
Est-2019 x Est-Baseline	NA	~	~	>	>	~	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Para Alumínio total, em termos espaciais, as concentrações registradas nas regiões do rio Paraopeba foram significativamente inferiores em relação à região do ribeirão Ferro-Carvão. Esse padrão espacial, em geral, se manteve ao se considerarem os períodos de estiagem separadamente, conforme indicado no ANEXO IV-D. A região 2A não diferiu das regiões Montante e 1A, mas apresentou valores significativamente mais elevados se comparados a região 1B. Já as regiões 2B e 2C sob influência do reservatório de Retiro Baixo e das condições

favoráveis à sedimentação de materiais, apresentaram concentrações de Alumínio total significativamente inferiores em relação às demais regiões, conforme observado para os outros analitos na fração total.

De acordo com a avaliação temporal, verifica-se que, na Região Montante, as concentrações de Alumínio total foram significativamente mais elevadas também no período de estiagem/2022, reverberando os efeitos do período chuvoso anterior. Já nos períodos de chuva avaliados no último relatório de fechamento de ciclo protocolado (ARCADIS, 2022b) não foram registradas diferenças significativas entre os períodos sazonais sucessivos.

Já no ribeirão Ferro-Carvão, região mais impactada, observam-se concentrações de Alumínio total significativamente superiores logo após o rompimento, no período de estiagem/2019, e nos demais não foi identificada diferença estatística significativa entre os resultados. Condição semelhante foi observada nas comparações estabelecidas entre os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). A redução das concentrações após a estiagem/2019 pode ser decorrente dos procedimentos de recuperação da área e contenção de material (implantação da cortina metálica e estação de tratamento de água – ETAF1).

Para as Regiões 1A e 1B, mais afetadas do rio Paraopeba, foi identificada situação semelhante com concentrações de Alumínio total significativamente inferior no período de estiagem/2022 se comparadas ao período de estiagem mais próximo ao rompimento, estiagem/2019. Tal fato também pode estar relacionado a contenção do material e melhoria da qualidade da água. Porém, considerando os demais períodos, nota-se prevalência de concentrações significativamente mais elevadas no período de estiagem/2022, conforme evidenciado na região de Montante, não afetada, o que possivelmente está atrelado aos elevados volumes de chuva do período anterior.

Nas demais regiões, 2A a 2C, evidencia-se a prevalência de maiores concentrações no último período de estiagem analisado, estiagem/2022, e, em geral, ausência de diferenças significativas entre as comparações estabelecidas para os demais períodos. É válido destacar que as regiões 2A, 2B e 2C fazem parte do contexto geológico Supergrupo Minas (Grupo Bambuí), rico em compostos de Alumínio, o que pode favorecer o aporte deste elemento para o ambiente.

Do mesmo modo que identificado para o analito Ferro, o comportamento do parâmetro Alumínio na fração dissolvida, não se assemelha ao observado para a fração total. Em termos espaciais, na estiagem, notam-se concentrações significativamente mais elevadas desde a região de montante até a região 2C em relação a região do ribeirão Ferro-Carvão, condição, em geral, também indicada ao se avaliar os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). No Paraopeba, destaca-se que as regiões Montante, 1A e 2A apresentaram comportamento próximo, com concentrações significativamente superiores às demais.

Para o Alumínio dissolvido, assim como observado para Ferro dissolvido, na Região Montante, é possível constatar aumentos sucessivos e expressivos das concentrações entre os períodos de estiagem, sendo essa condição também observada nas comparações estabelecidas entre

os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). Como referência, a mediana do *baseline* sazonal de estiagem para a região é significativamente inferior aos resultados registrados nos períodos de estiagem pós-rompimento, com exceção do período de estiagem/2019, em que não houve indicativo de diferença estatística com a condição de referência. Destaca-se também, com exceção dos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020, a prevalência de resultados acima do VMP (0,1 mg/L). Como também apontado para o parâmetro Ferro dissolvido, a observada condição de incremento pode estar associada a condições específicas de ordem química (condições de ph e eH) e, ademais, relacionadas a fases minerais prevalentes. Tais fatores poderiam configurar condições indutoras à elevação de frações dissolvidas na bacia.

Já para a região do ribeirão Ferro-Carvão, as comparações estabelecidas, em geral, indicaram ausência de diferença significativa entre os períodos. Para este analito, nesta região, não há *baseline* comparativo. Se comparado ao VMP, em todos os períodos, a maioria dos resultados permaneceu abaixo do limite legal.

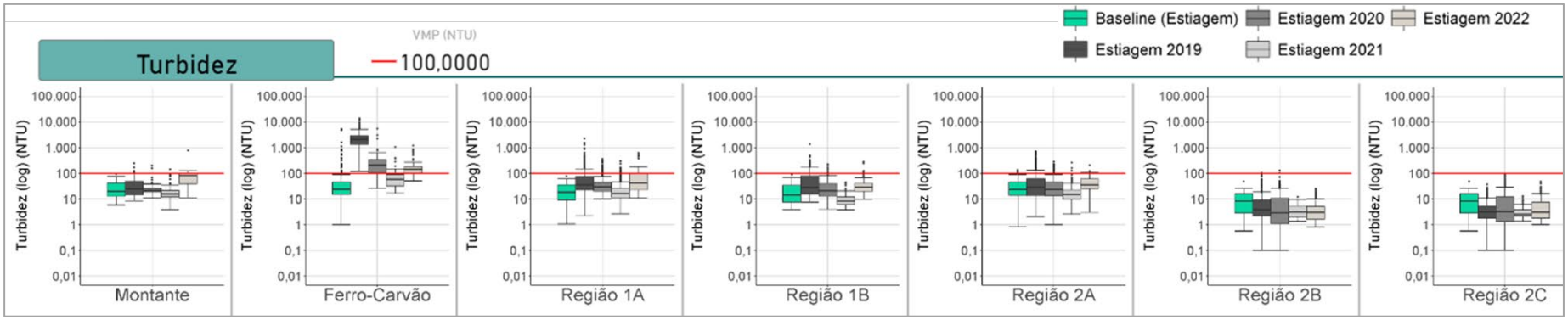
Da região 1A até a região 2A prevalece condição de incremento das concentrações entre os períodos de estiagem sucessivos, assim como identificado para a região de Montante não afetadas, e em geral, também nos períodos de chuva comparados (ARCADIS, 2022b). Nas regiões 1A e 2A destaca-se a prevalência de valores superiores ao VMP nos dois últimos períodos de estiagem analisados, enquanto na região 1B mais resultados permanecem abaixo do limite legal. Em todos os casos, os resultados foram superiores às condições dos respectivos *baselines* sazonais.

Já nas regiões 2B e 2C, as concentrações oscilaram entre os períodos, porém ainda é possível destacar concentrações significativamente superiores no último período analisado, estiagem/2022. Porém as concentrações do monitoramento pós-rompimento se mantêm próximas dos *baselines* sazonais.

5.3.1.4. Turbidez

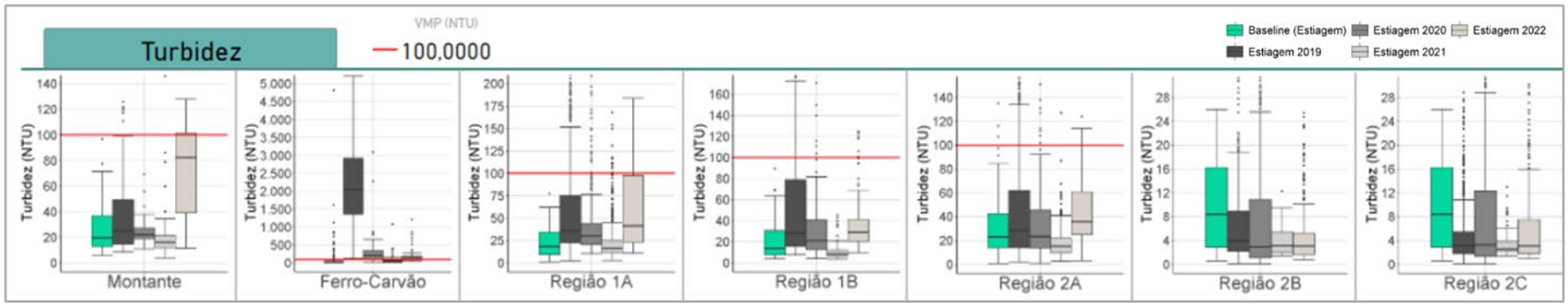
Nos Gráficos 5.3.1.4.1 e 2 são apresentados os *boxplot* do parâmetro Turbidez. Nas Tabelas 5.3.1.4-1 e 5.3.1.4-2 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros, respectivamente.

Gráfico 5.3.1.4-1: *Boxplot* Turbidez para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.1.4-2: *Boxplot* Turbidez para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região, dada a variabilidade dos resultados.

Tabela 5.3.1.4-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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 5.3.1.4-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro turbidez em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	>	>	>	>	>	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	>	>	>	>	~	~
Est-2022 x Est-2019	<	>	~	~	>	<	>
Est-2022 x Est-Baseline	>	>	>	>	>	<	<
Est-2021 x Est-2020	<	<	<	<	<	~	~
Est-2021 x Est-2019	<	<	<	<	<	~	~
Est-2021 x Est-Baseline	>	<	~	<	<	<	<
Est-2020 x Est-2019	<	~	<	<	~	<	~
Est-2020 x Est-Baseline	>	~	>	>	~	<	>
Est-2019 x Est-Baseline	>	~	>	>	~	~	<

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Para o parâmetro Turbidez, tendo em vista que o mesmo não é um marcador principal e pode, ademais, sofrer influência de várias contribuições, não relacionadas ao rompimento, sua análise neste item será realizada de forma mais abrangente. Assim como indicado para o parâmetro Manganês total, a Turbidez é um parâmetro fortemente influenciado pela sazonalidade, com teores majoritariamente elevados na chuva em relação aos períodos de estiagem.

De acordo com os resultados da avaliação espacial, observa-se que os teores de Turbidez registrados ao longo dos períodos de estiagem no ribeirão Ferro-Carvão foram significativamente superiores aos registrados em todas as regiões localizadas no rio Paraopeba. Essa condição também ocorreu aos se analisar os períodos de chuva conjuntamente (ARCADIS, 2022b). Em geral, esse padrão dos teores de Turbidez nas regiões se manteve nos períodos de estiagem analisados individualmente (ANEXO IV-D). Além disso, até a região 2A, os teores de turbidez foram significativamente mais elevados em relação à região de Montante, não impactada. Exceção se deu para o último período de estiagem avaliado, estiagem/2022, quando os valores de Turbidez foram mais elevados na região de montante, o que pode ser justificado pelos efeitos do período chuvoso anterior. 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 as demais regiões de montante. Essa condição se mantém na região 2C, localizada após o reservatório de Retiro Baixo, sem diferença significativa em relação a região 2B, indicando a capacidade de sedimentação e retenção de sólidos no interior do reservatório e consequente influência na qualidade da água nos pontos de jusante.

Em relação a avaliação temporal, na Região Montante, os teores de Turbidez foram significativamente maiores no período de estiagem/2022, o que pode ser justificado pelos efeitos das elevações do nível e vazão bem como do carreamento difuso de material para o curso d'água decorrentes das precipitações do período de chuva anterior, chuva 2021/2022. Conforme pontuado no item 4, Caracterização hidrológica, o comportamento sazonal anterior pode ser um potencial fator de influência para o período posterior, prolongando-se seus efeitos ao longo do tempo. Dessa maneira, destaca-se que o período chuvoso 2021/2022 apresentou volumes pluviométricos notadamente elevados, o que poderia reverberar para o período de estiagem imediatamente seguinte, estiagem/2022, com a bacia ainda em condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal fluvial. Ainda assim, em todos os períodos de estiagem avaliados, mais de 75% dos resultados ficaram abaixo do VMP (100 NTU), incluindo o período de *baseline.*

Para a Região Ferro-Carvão, relativa ao curso de água (tributário) mais afetado pelo rompimento nos aspectos morfológicos e de qualidade da água, especificamente nos períodos de estiagem, os maiores teores de Turbidez foram registrados no ano de 2019, mais próximo ao rompimento. Especificamente no período de estiagem mais recente, estiagem/2022, os teores de Turbidez foram mais reduzidos se comparados aos períodos de estiagem/2019, não diferiram do período de estiagem/2020 e foram superiores em relação a estiagem/2021. No entanto, ainda assim, nos quatro períodos de estiagem pós-rompimento os valores foram significativamente superiores à condição de *baseline* da região e, em grande parte, acima do VMP (100 NTU), com destaque para o período de estiagem/2019 em que todos os resultados superaram este limite. Condição semelhante foi observada nos períodos de chuva, onde nos quatro períodos monitorados os teores de Turbidez foram significativamente superiores à condição de *baseline* da região e, em grande parte, acima do VMP (ARCADIS, 2022b).

Nas regiões mais afetadas do rio Paraopeba, Região 1A e Região 1B, prevaleceram as mesmas condições, com ocorrência de teores de Turbidez significativamente inferiores entre

os períodos de estiagem sucessivos de 2019 a 2021, seguida de elevação na estiagem/2022. Essa condição também foi verificada para as comparações estabelecidas estre os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b), com decréscimo dos teores entre os anos avaliados. Especificamente no último período avaliado, estiagem/2022, os teores de Turbidez foram significativamente superiores em relação aos períodos de estiagem/2020 e estiagem/2021, o que reforça a possível influência do período de chuva 2021/2022 nos resultados do período de estiagem mais recente. Importante destacar que, ainda que tenham sido observadas reduções em relação ao período mais próximo do rompimento, em todos os períodos de estiagem pós-rompimento os teores de Turbidez foram significativamente mais elevados se comparados à condição do *baseline* de estiagem para as duas regiões. Contudo, em todas elas, em geral, mais de 75% dos resultados ficaram abaixo do VMP (100 NTU), conforme esperado para o período de estiagem.

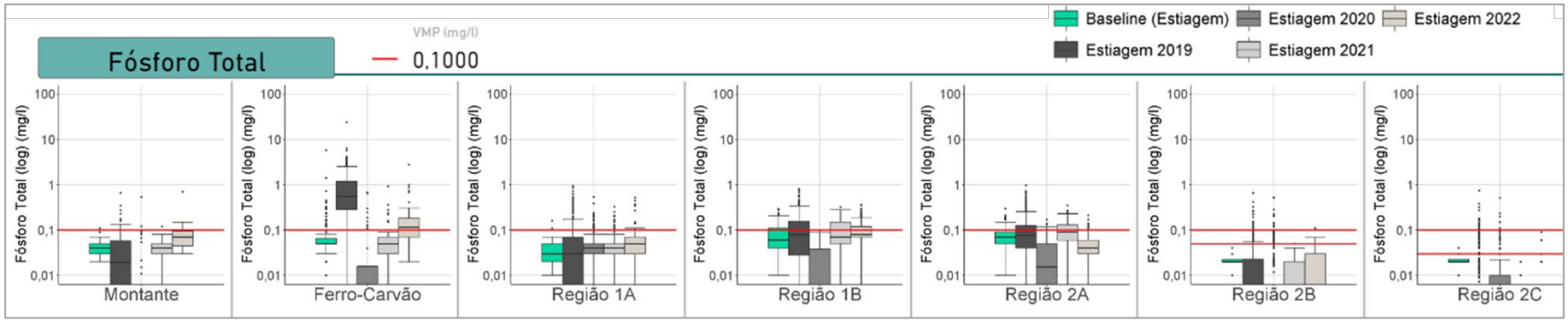
Já a região 2A, mais distal ao local do rompimento, os teores de turbidez registrados na estiagem/2022 foram significativamente superiores, inclusive ao período de estiagem/2019 e ao *baseline* sazonal, reafirmando a potencial influência do período de chuva 2021/2022. Em termos comparativos com a condição pré-rompimento, os períodos de 2019 e 2020 não apresentaram diferenças significativas, enquanto o período de estiagem/2021 apresentou resultados inferiores ao *baseline.* Do mesmo modo que apresentado nas regiões anteriores, a maioria dos resultados mantiveram-se abaixo do limite legal, conforme esperado para períodos de estiagem.

Por fim, nas regiões 2B e 2C, sob influência do reservatório da UHE Retiro Baixo, as comparações entre os períodos de estiagem oscilaram, com predominância de ausência de diferenças significativas entre as comparações estabelecidas. Considerando o período mais recente, estiagem/2022, não houve diferenças significativas em relação aos dois últimos períodos avaliados, estiagem/2021 e estiagem/2020, e os resultados mantiveram-se abaixo do *baseline* sazonal. Em termos de comparação com o limite legal, em ambas as regiões, os resultados mantiveram-se abaixo do VMP dos períodos de estiagem. Cabe ressaltar que, mesmo no período sazonal de chuva, nessas regiões, os teores foram majoritariamente inferiores ao VMP (100 NTU) e não diferiram da condição do *baseline* sazonal (ARCADIS, 2022b).

5.3.1.5. Fósforo total e dissolvido

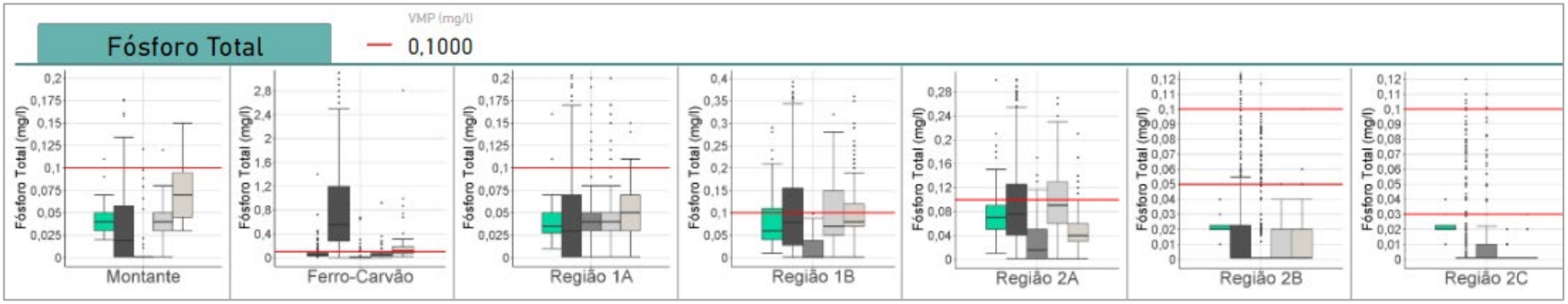
Nos Gráficos (5.3.1.5-1 e 2) e (5.3.1.5-3 e 4), são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Fósforo total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.5-1 a 5.3.1.5-4, são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

Gráfico 5.3.1.5-1: *Boxplot* Fósforo total para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. 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 5.3.1.5-2: *Boxplot* Fósforo total para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região.

Tabela 5.3.1.5-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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	-	-	-	-	-	-	-

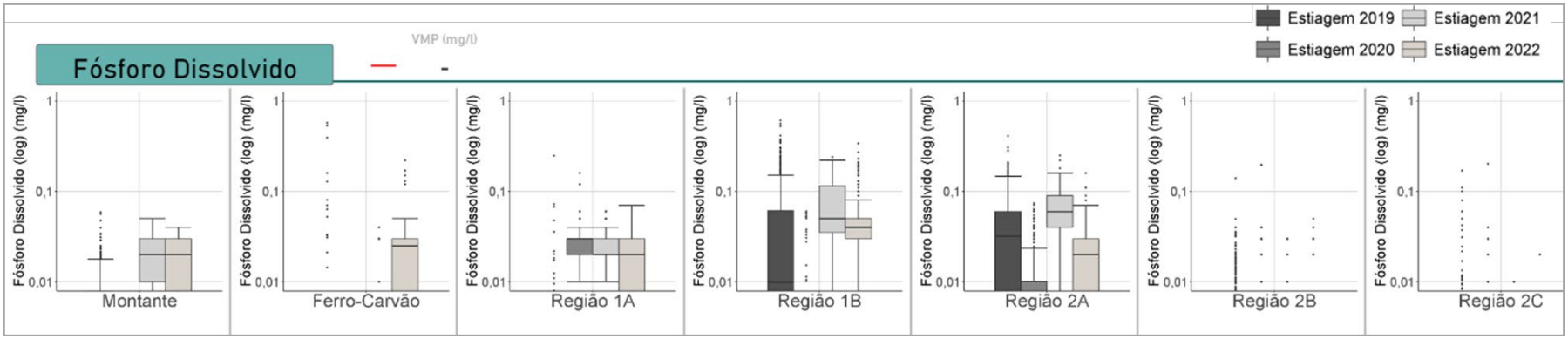
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre ao região A (montante) e B (jusante) - valor p do teste de comparações múltiplas > 0,05
< Os valores da região de jusante são significativamente inferiores aos da região A - valor p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05
> Os valores da região de jusante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

Tabela 5.3.1.5-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo total em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	>	>	~	<	~	~
Est-2022 x Est-2020	>	>	>	>	>	>	<
Est-2022 x Est-2019	<	>	>	>	<	~	<
Est-2022 x Est-Baseline	>	>	>	>	<	~	<
Est-2021 x Est-2020	>	>	~	>	>	~	<
Est-2021 x Est-2019	<	>	>	~	>	~	<
Est-2021 x Est-Baseline	~	~	~	~	>	~	<
Est-2020 x Est-2019	<	<	>	<	<	<	~
Est-2020 x Est-Baseline	~	<	~	<	<	~	<
Est-2019 x Est-Baseline	>	<	~	~	~	~	<

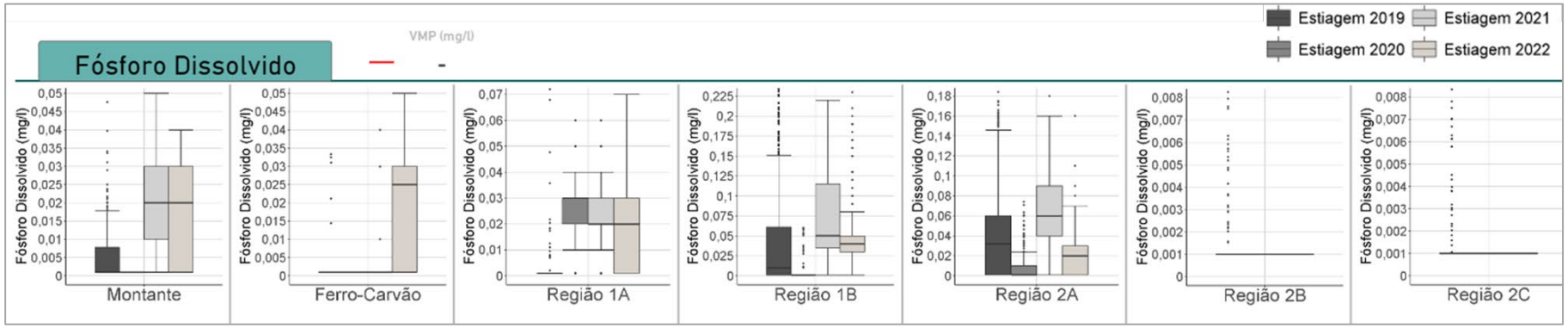
Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Gráfico 5.3.1.5-3: *Boxplot* Fósforo dissolvido para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala fixa.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido a alguns valores mais elevados na estiagem/2019 no ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 5.3.1.5-4: *Boxplot* Fósforo dissolvido para períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala linear personalizada, para melhor visualização dos resultados em cada região.

Tabela 5.3.1.5-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Fósforo 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 5.3.1.5-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo dissolvido em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	>	~	<	<	<	~	~
Est-2022 x Est-2020	>	>	<	>	>	~	~
Est-2022 x Est-2019	>	>	>	>	<	<	<
Est-2021 x Est-2020	~	>	~	>	>	~	~
Est-2021 x Est-2019	~	>	>	>	>	<	<
Est-2020 x Est-2019	~	<	>	<	<	<	<

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Para Fósforo total, espacialmente, observa-se comportamento próximo ao registrado para Turbidez. Ao longo dos períodos de estiagem, as concentrações deste analito foram significativamente superiores no ribeirão Ferro-Carvão em relação às demais regiões localizadas no rio Paraopeba, o que possivelmente está atrelado as concentrações substancialmente mais elevadas no ano de 2019 nesta região mais impactada pelo rompimento das barragens. Além disso, até a região 2A, as concentrações de Fósforo total foram significativamente mais elevados em relação à região de Montante, não impactada. Conforme indicado na comparação espacial para cada período de estiagem analisado separadamente (Anexo IV-D), esse padrão se manteve com exceção do último período de estiagem avaliado, estiagem/2022, quando os valores de Fósforo total foram mais elevados na região de Montante, o que pode ser justificado pelos efeitos do período chuvoso anterior. Importante destacar, também, as concentrações mais elevadas de Fósforo total na Região 1B em relação às regiões

1A e 2A, sendo a região 1B notadamente de caráter urbano e fortemente influenciada pela disposição de efluentes domésticos não tratados ou tratados de forma insuficiente (sem remoção de nutrientes). Nessa região também pode ser considerada a contribuição proveniente do rio Betim que apresenta elevada carga orgânica e concentrações de Fósforo total, com a discussão mais detalhada no item referente a avaliação dos tributários (9.3.2). Do mesmo modo que indicado para os demais analitos na fração total, nas regiões 2B e 2C sob influência do reservatório de Retiro Baixo, as concentrações são significativamente inferiores às demais regiões de montante.

Em termos de avaliação temporal, na região de Montante, notam-se concentrações de Fósforo total significativamente mais elevadas no período de estiagem/2022. Com exceção dos períodos de estiagem de 2022 e de 2021, as concentrações de Fósforo total foram significativamente inferiores ao *baseline* de estiagem. Destaca-se ainda que, mesmo com a elevação das concentrações em 2022, em todos os períodos avaliados os resultados permanecem abaixo do VMP, com exceção de desvios pontuais.

Na região do ribeirão Ferro Carvão, mais afetada pelo rompimento das barragens, 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.). No entanto, no período de estiagem/2020, nota-se queda nas concentrações deste analito, com maior proximidade tanto das condições de montante quanto do *baseline* sazonal. Nos períodos seguintes, 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.

Conforme indicado no Capítulo 2 - Caracterização socioambiental pós-rompimento e avaliação de impactos, do PLANO DE REPARAÇÃO SOCIOAMBIENTAL DA BACIA DO RIO PARAOPEBA (ARCADIS, 2022c), no primeiro período pós-rompimento (Chuva/ 2019), as magnitudes das concentrações de Fósforo total foram bastante elevadas na região do Ferro-Carvão, com praticamente todos os resultados acima do VMP e cerca de 25 vezes superiores à maior mediana registrada no *baseline* (0,1 mg/L na estação FEI-COR-03-AS). A partir do período Estiagem/2019, já foi possível perceber queda das concentrações do Fósforo total.

Já nas regiões 1A e 1B as concentrações de Fósforo total, foram, em geral, significativamente mais elevadas no período de estiagem/2022. Com exceção deste período, para os outros três monitorados predominou ausência de diferenças significativas em relação ao *baseline* de estiagem. Na região 1A, em todos os períodos, mais de 75% dos resultados ficaram abaixo do VMP, e na região 1B, mais de 50% dos resultados atenderam a esta condição.

Ainda segundo informações do Plano de Reparação (ARCADIS, 2022c), ao se avaliar o comportamento do Fósforo total no rio Paraopeba após o rompimento das barragens, verificou-se um notório incremento de seus teores também na Região 1A, cujas concentrações máximas atingiram valores de até 5,2 mg/L no período chuvoso de 2019, o que representa cerca de 18 vezes a máxima registrada no PT-52 (0,285 mg/L) e 52 vezes o valor máximo permitido para águas doces classe 2 de ambientes lóticos (0,1 mg/L). Entretanto, as concentrações foram

gradualmente sendo reduzidas ao longo dos meses, conforme observado nos gráficos acima para o período de estiagem/2019. 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. Essas concentrações mais elevadas reduziram entre as estações PT-06 e PT-14 (Região 1B), localizadas a montante da confluência do rio Paraopeba com o rio Betim, e a 53 km do local do rompimento. Entretanto, após a confluência com o rio Betim, o rio Paraopeba apresentou novo incremento do Fósforo total na água, demonstrando a influência desse curso d'água para o incremento desse parâmetro no rio Paraopeba, relacionada ao despejo de efluentes urbanos.

Já na região 2A, as concentrações de Fósforo total oscilaram entre os períodos comparados, destacando-se a ocorrência de concentrações significativamente mais elevadas no período de estiagem/2021, sendo que apenas neste período os resultados mantiveram-se acima da condição do *baseline* sazonal. Na região 2A, as contribuições de fósforo parecem estar mais relacionadas ao lançamento de efluentes urbanos, que ocorre ao longo de todo o ano. Além disso, a região 2A recebe contribuição do ribeirão Grande. Essa região, além de estar a jusante de centros urbanos, está inserida em uma área de produção agrícola, e pode sofrer contribuições de Fósforo total a partir da lixiviação dos solos fertilizados e escoamento superficial (ARCADIS 2022c).

Na região 2B, sob influência do regime hidráulico do reservatório de Retiro Baixo, houve prevalência de ausência de diferenças significativas das concentrações de Fósforo total entre os períodos de estiagem comparados, com a maioria dos resultados pouco variáveis e muitos inferiores ao limite de quantificação do método analítico. Destaca-se também a prevalência de resultados abaixo do respectivo VMP para a condição intermediária do ambiente.

Por fim, na região 2C, prevalece o indicativo de concentrações de Fósforo total significativamente inferiores nos dois últimos períodos avaliados, com grande parte dos resultados inferiores ao LQ. Destaca-se, também, a prevalência de resultados abaixo do VMP, indicando mais uma vez a influência do barramento da UHE Retiro Baixo na redução das concentrações da fração total dos analitos.

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 Hydrológico 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 termoelétrica 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 (agricultura, ocupação urbana, efluentes, mineração, etc.). 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.

Já em relação aos resultados de Fósforo dissolvido, em termos espaciais, nota-se comportamento distinto em relação à fração total. Observam-se concentrações significativamente superiores nas regiões do rio Paraopeba, desde montante até 2A, se comparado a região do ribeirão Ferro Carvão, o que pode indicar maior solubilidade na bacia do Paraopeba, como também ocorre para Ferro dissolvido. As regiões 1A a 2A apresentaram maior variabilidade, bem como resultados significativamente mais elevados, enquanto as regiões mais distais, 2B e 2C, apresentaram concentrações significativamente inferiores e em grande parte abaixo do LQ. Essa avaliação reforça, possivelmente, maior influência do aporte de fósforo dissolvido pelo lançamento de efluentes e outras contribuições na bacia, incluindo a região de Montante não afetada.

Em relação à comparação temporal, nota-se oscilação entre os períodos, mas prevalência de resultados de Fósforo dissolvido significativamente mais elevados nos dois últimos períodos avaliados, estiagem/2021 e estiagem/2022, incluindo a região de Montante não afetada.

Logo, observa-se comportamento distinto para a fração total e dissolvida do fósforo, de modo que, apesar da elevação abrupta das concentrações de fósforo total nas regiões mais afetadas nos períodos próximos ao rompimento, não ocorreu de modo semelhante para a fração dissolvida, visto que grande parte dos resultados de Fósforo dissolvido permaneceu abaixo do LQ desde Ferro-Carvão até 1B, com concentrações no Ferro-Carvão inferiores inclusive a região de Montante, não impactada.

Este resultado também foi indicado no Capítulo 2 - Caracterização socioambiental pós-rompimento e avaliação de impactos, do PLANO DE REPARAÇÃO SOCIOAMBIENTAL DA BACIA DO RIO PARAOPEBA (ARCADIS, 2022c), em que se verificou, para o Fósforo dissolvido, majoritariamente concentrações inferiores ao limite de quantificação do método de análise (LQ) em 2019 na região mais afetada – Ribeirão Ferro Carvão.

Logo, apesar dos altos resultados de Fósforo total no Ferro Carvão após o rompimento, a contribuição de sua fração dissolvida foi reduzida, o que pode estar relacionado a fatores físico-químicos que interferem na precipitação (imobilização) dos íons fosfato no ambiente aquático, destacando-se a concentração dos íons de ferro. O Fósforo total presente na água foi composto majoritariamente pela fração inorgânica particulada, que não está biodisponível para assimilação dos organismos aquáticos.

O Modelo de “Contaminação Hídrica” desenvolvido no projeto Entire (ENTIRE, 2022), demonstrou efeitos causais positivos entre a distribuição de rejeitos, contaminação hídrica e a deterioração (correlacionada diretamente com a elevação dos teores de Fósforo dissolvido). Assim, quanto maior o valor do Fósforo dissolvido, maior a deterioração ambiental. Entretanto, conforme evidenciado anteriormente, 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.

5.3.2. Análise de tendência temporal

Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados na Tabela 5.3.2-2, para a série completa de dados (todos os períodos sazonais de chuva e de estiagem desde 25/01/2019 até 30/09/2022), e na Tabela 5.3.2-1, para a série de estiagem (todos os períodos de estiagem, desde 2019 até 2022). 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, os resultados e discussões referentes as séries de chuva podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem (25/01/2019 a 31/03/2022) (ARCADIS, 2022b).

Os testes de hipóteses apresentados no item 5.3.1 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.

Tabela 5.3.2-1: Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série completa de dados (todos os períodos sazonais, desde 25/01/2019 até 30/09/2022) – medianas mensais.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.			UHE TM
	Mont.	Ferro		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	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓
Manganês Dissolvido	T↓	T↑	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	T↓
Ferro Total	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓
Ferro Dissolvido	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓
Alumínio Total	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑
Alumínio Dissolvido	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↓	T↓	ST	T↓	ST	T↓
Turbidez	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Fósforo Total	ST	T↓	ST	T↑	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓

Tabela 5.3.2-2: Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de estiagem (períodos de estiagem/2019, 2020, 2021, 2022) – medianas mensais.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.			UHE TM
	Mont.	Ferro		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	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST
Manganês Dissolvido	T↓	T↑	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↑	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓
Ferro Total	ST	T↓	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST
Ferro Dissolvido	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST
Alumínio Total	ST	T↓	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↑
Alumínio Dissolvido	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↓	ST	ST	ST	ST	ST
Turbidez	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST
Fósforo Total	T↑	ST	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST

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

5.3.2.1. Manganês total e dissolvido

Tendo em vista a aplicação do teste de tendência temporal aos dados medianos mensais, é possível verificar, para o parâmetro Manganês total, tendência de redução ou ausência de tendência para a série completa de dados nos pontos distribuídos nas diferentes regiões. Por outro lado, não houve indicativo de elevação ao longo da extensão longitudinal do rio Paraopeba. Entre os períodos sazonais de estiagem consecutivos, a predominância de ausência de tendência ou tendência significativa de redução se manteve, porém houve indicativo de tendência de elevação no ponto PT-18, localizado na região 2A.

Já nos períodos de chuva, conforme indicado no relatório de Fechamento de Ciclo protocolado anteriormente (ARCAIDS, 2022b), as tendências de redução de Manganês total ocorreram efetivamente apenas no PT-12 (região Ferro-Carvão) e nos pontos PT-09, PT-12 e PT-05 da região mais afetada (região 1A). Tal condição aponta para estabilidade ou melhoria da qualidade da água em relação a concentração de Manganês total ao longo da série temporal pós-rompimento.

Em relação à fração dissolvida de Manganês, para a série completa de dados, verifica-se predomínio de tendência significativa de redução no trecho de montante, no ponto PT-12 localizado no ribeirão Ferro-Carvão, em todos os pontos da Região 1A e 2B, bem como em todos os pontos das regiões 1B, 2A, indicando condição de melhora predominante da qualidade da água ao longo do monitoramento efetuado. Apenas no ponto PT-11, houve tendência de aumento considerando todo o período analisado. Nos períodos de estiagem, os mesmos pontos mantiveram tendência de redução ou nulidade de tendência, porém além do PT-11, foi indicada tendência significativa de elevação das concentrações de Manganês dissolvido no PT-54, localizado na região 2A.

Do mesmo modo, na série dos períodos de chuvas (ARCADIS, 2022b), em grande parte dos pontos, identificou-se tendência de atenuação das concentrações de Manganês dissolvido. Excepcionalmente, também houve tendência de aumento no ponto PT-11.

5.3.2.2. Ferro total e dissolvido

Para o analito Ferro total, a aplicação do teste indica para a série completa de dados, não haver tendência temporal significativa para a maioria dos pontos monitorados ao longo de toda a extensão do rio Paraopeba, inclusive no trecho de montante e não afetado. Tendências significativas de redução ocorreram principalmente nos pontos localizados na região do ribeirão Ferro Carvão e nas regiões mais afetadas, 1A e 1B, bem como na região 2C com exceção do ponto CE-02. Apenas no PT-17, houve indicativo de tendência de elevação significativa. Com isso, aponta-se para condição de estabilidade ou melhoria da qualidade da água para o analito Ferro Total ao longo do monitoramento. Por outro lado, considerando apenas os períodos de estiagem, nota-se predominância de ausência de tendência significativa ao longo do rio Paraopeba, e indicativo de elevação apenas nos pontos PT-01 e PT-17, destacando-se, inclusive, valores mais elevados no último período de estiagem monitorado, conforme apontado em itens anteriores.

Especificamente para as chuvas, conforme discutido no relatório anterior, também houve predominância de nulidade de tendência nos pontos de monitoramento, com exceção dos pontos PT-09 e PT-05, que indicaram tendência de redução, e do ponto PT-22, com indicativo de elevação.

Quanto ao comportamento do Ferro em sua fração dissolvida, para a série completa de dados, houve predominância de tendência temporal de elevação significativa nos pontos de monitoramento distribuídos entre as regiões montante, 1B e 2A, principalmente. Tendência de redução ocorreu apenas em pontos das regiões 2B e 2C, mas em menor monta. Para a série de estiagem, prevaleceu condição de nulidade de tendência, com destaque para elevação significativa no ponto de montante, PT-52, e no PT-14, localizado na região 1B. Já redução significativa ocorreu apenas no PT-28, localizado na região 2B.

Enquanto nos períodos de chuva sucessivos (ARCADIS, 2022b), por outro lado, houve indicativo prevalente de tendência significativa de aumento nos pontos de monitoramento distribuídos ao longo de toda área monitorada, inclusive no trecho de montante, o que pode estar associado a um comportamento inerente à bacia hidrográfica.

5.3.2.3. Alumínio total e dissolvido

Com relação ao parâmetro Alumínio total, tanto para a série completa de dados, quanto para a série do período de estiagem, observa-se predomínio de ausência de tendência, seja de redução ou de elevação, apontando estabilidade predominante dos teores de Alumínio total ao longo do rio Paraopeba entre seu trecho de montante e o trecho mais distal. Em ambas as séries avaliadas, houve indicativo de tendência de redução significativa apenas no PT-11 e de elevação em pontos da Região 2A e 2C (PT-22). Na estiagem, também houve elevação no ponto PT-01 (Região 1A) e PT-14 (Região 1B).

Condição aproximada foi detectada no âmbito do relatório de fechamento de ciclo anterior (chuva), destacando-se tendência de elevação significativa no PT-22, o que pode estar atrelado à região mais enriquecida naturalmente por compostos de Alumínio e em trecho de transição lótico-lêntico para o reservatório de Três Marias, que no período de chuva ainda se soma as contribuições difusas.

Na região 2A, mais extensa, 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, 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 metassiltito/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.

Campos, L (2017) 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, ferro em sua composição.

No que se refere ao Alumínio dissolvido, verifica-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. Em ambas as séries foram detectadas tendências de redução apenas em pontos das regiões 2B e 2C. Nos períodos de chuva, conforme discutido em ARCADIS (2022b), também houve predomínio de tendência de elevação significativa de Alumínio dissolvido ao longo do rio Paraopeba, o que pode indicar uma condição inerente a própria bacia.

5.3.2.4. Turbidez

Para o parâmetro 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 1B). Na série dos períodos de estiagem, essa condição se mantém, porém com indicativo de redução apenas nas regiões do ribeirão Ferro Carvão e 1A. Além disso, no período completo, não houve indicativo de tendência significativa de elevação e, na estiagem, essa condição ocorreu em apenas alguns pontos, sendo eles (PT-19 na região 2A) e (JRB-02 na região 2C).

Para a série de chuvas sucessivas (ARCADIS, 2022b), alguns pontos apontam tendência de redução na região Ferro-Carvão e região 1A e, excepcionalmente, elevação para o ponto PT-22 em trecho mais distal do rio Paraopeba a montante do remanso do reservatório de Três Marias.

5.3.2.5. Fósforo total e dissolvido

Quanto ao analito Fósforo total, é possível verificar predominância de ausência de tendência ao longo do corpo hídrico, e em alguns pontos ocorrência de tendência de redução, tanto na série completa quanto na estiagem. Para a série completa dos dados, os indicativos de redução ocorreram no PT-11 (Ferro Carvão), PT-09 e PT-02 (região 1A) e na maioria dos pontos das regiões 2B e 2C. Já na estiagem, ocorreram nos pontos PT-09 e PT-02 (Região 1A) e PT-57 e JRB-02 (Região 2C).

Em termos de elevação, tendência significativa foi detectada na série completa de dados apenas no ponto PT-01, enquanto na séria de estiagem, houve indicativo em mais pontos,

sendo eles PT-52 (montante), PT-01 e PT-05 (região 1A) e PT-20 (região 2B). 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.

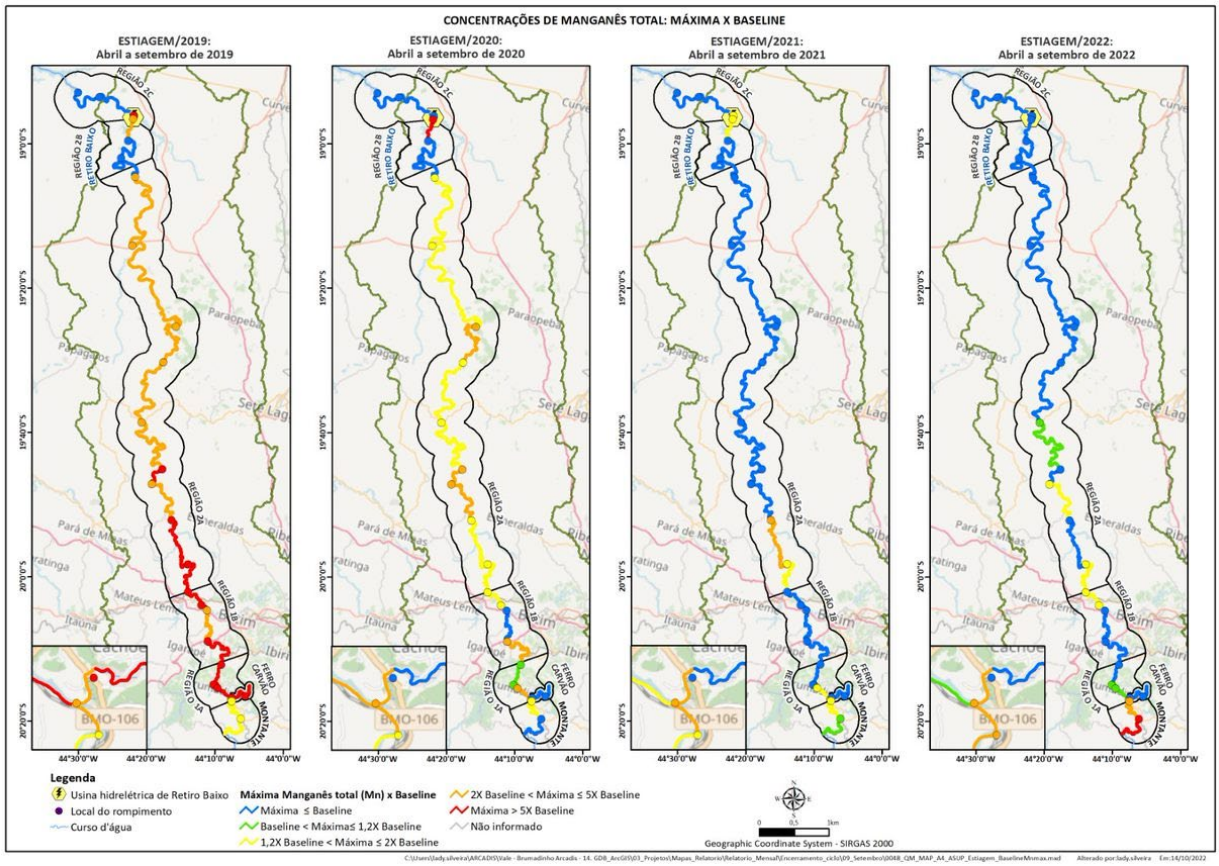
Para Fósforo dissolvido, não foi possível aplicar testes estatísticos, dada a baixa variabilidade dos resultados (MAD igual a zero e grande parte dos resultados abaixo do LQ).

5.3.3. Mapas temáticos - *baseline*

Considerando-se nesta análise os meses dos períodos de estiagem agregados (Figuras 5.3.3.1 a 5.3.3.5), observa-se um comportamento de atenuação dos parâmetros monitorados na maior parte das regiões, devido a redução da pluviosidade e alterações do regime de escoamento superficial. Os efeitos mais pronunciados das concentrações de Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Fósforo total e dos teores de Turbidez na bacia e consequente afastamento dos valores de *baseline*, foram verificados principalmente no período de estiagem/2019, a partir da região de Ferro-Carvão até a Região 2A. Os teores dos referidos analitos foram minimizados na estiagem/2020, mantendo, de forma majoritária, uma atenuação na estiagem de 2021 e em 2022. Entre os analitos citados, os afastamentos mais pronunciados das condições de *baseline* ocorreram para o Manganês total em 2019, da região do Ferro-carvão até a região 2A e 2022, na região montante; para Alumínio dissolvido, em 2019 nas regiões montante e Ferro-carvão, em 2020 na região 2B e, em 2021 nas regiões montante e 1A; para Turbidez, em 2019 entre a região de montante e 2A, e em 2022 nas regiões montante e 1A; por fim, para Fósforo total, em 2019 nas regiões montante, 2B e 2C, em 2020 nas regiões 2B e 2C e, em 2022, na região de montante.

Ao analisar o analito Manganês total (Figura 5.3.3.1) observa-se que, em relação ao período de estiagem dos últimos anos, houve atenuação expressiva de suas concentrações máximas, com reduções perceptíveis em todas as regiões do rio Paraopeba, exceto na região de Montante em 2022 que apresentou valor máximo 5 vezes acima do máximo de *baseline*. Na estiagem de 2019, os maiores afastamentos ocorreram a partir da Região do Ferro-Carvão até a porção média da Região 2A, com predomínio de concentrações máximas superiores a 5 vezes o valor do *baseline*. As regiões 2B e 2C, em geral, apresentaram valores iguais ou abaixo do *baseline*. Na estiagem/2020, ocorreu maior variação das condições de afastamento ao *baseline*, com predomínio de maiores afastamentos até a região 2A, em que as concentrações foram majoritariamente 1,2 a 2 vezes superiores ao *baseline*. Já na estiagem/2021, os valores foram inferiores ou iguais ao *baseline* na maior parte das regiões. Finalmente, na estiagem/2022, em geral, os resultados máximos permaneceram similares ou ligeiramente menores que a estiagem/2021, porém, como já mencionado, na região de montante o valor máximo foi ao maior histórico para estiagem. Entretanto, esse valor corresponde a um dia de ocorrência de chuvas (11/04/2022) que ocasionou um incremento de grande monta deste analito, além disso, destaca-se que o resultado, expressivo para o período, passou por verificação e foi confirmado pelo laboratório.

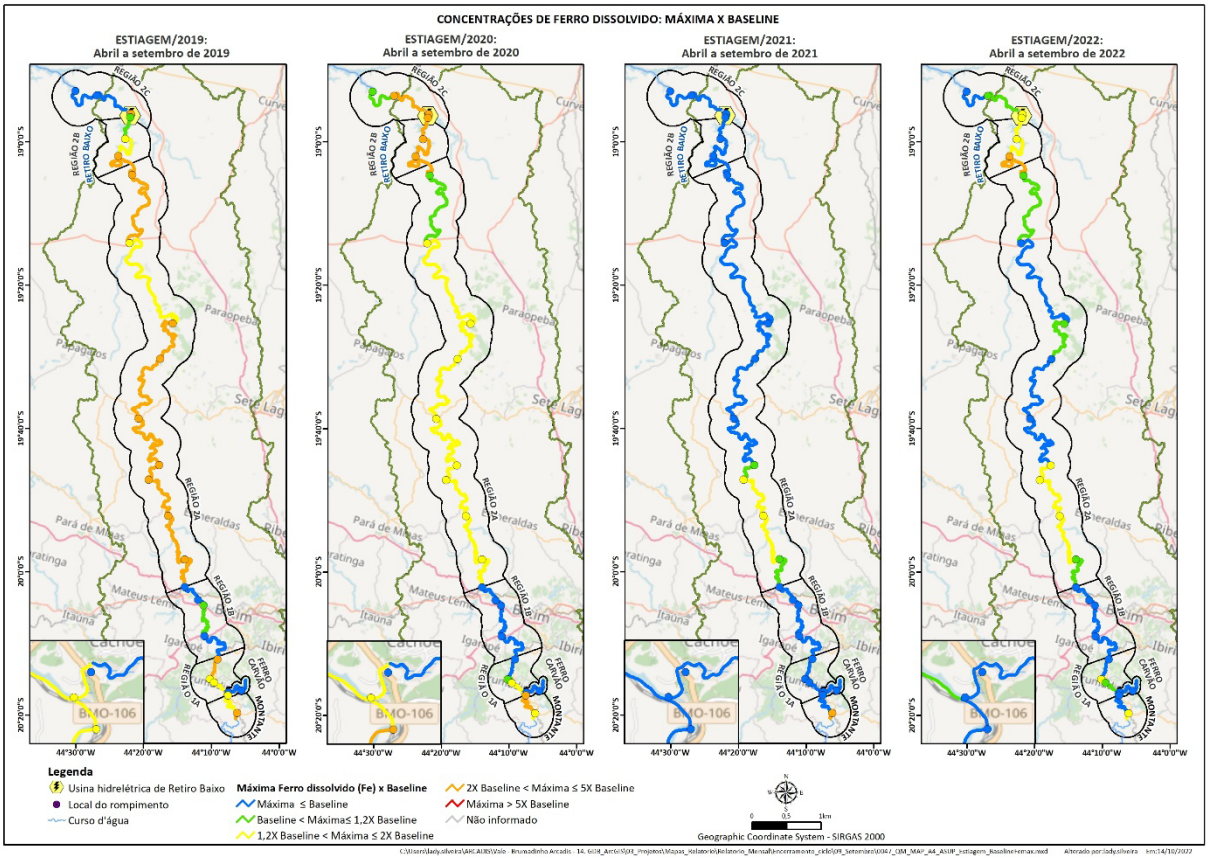
Figura 5.3.3-1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com os máximos do *baseline*.



Para o Ferro dissolvido (5.3.3.2), também se observa uma maior aproximação dos valores de *baseline* ao longo dos anos, 2019 a 2021, seguido de incremento em 2022, sendo os valores reportados muitas vezes menores ou iguais ao *baseline*. No ano de 2019, é possível notar os maiores afastamentos do *baseline* nas regiões 1A, 2A e 2B dentro da escala definida, de até 5 vezes o valor do baseline. Na estiagem/2020, ocorre menor condição de afastamento na região 2A se comparado com o período de estiagem anterior, com concentrações até 2 vezes superiores ao *baseline*. Na estiagem/2021, ocorreram menores afastamentos às condições de *baseline* em todas as regiões, se comparadas aos períodos anteriores. Com exceção das regiões Montante e parte da região 2A, as concentrações mantiveram-se iguais ou abaixo da condição de referência. Na estiagem/2022, percebe-se que houve redução das máximas observadas, em relação ao período anterior, na região de montante. Nas demais regiões, até os últimos pontos da região 2A, percebe-se que houve manutenção dos valores máximos, todavia, dos últimos pontos da região 2A até a região 2C, nota-se aumento das concentrações

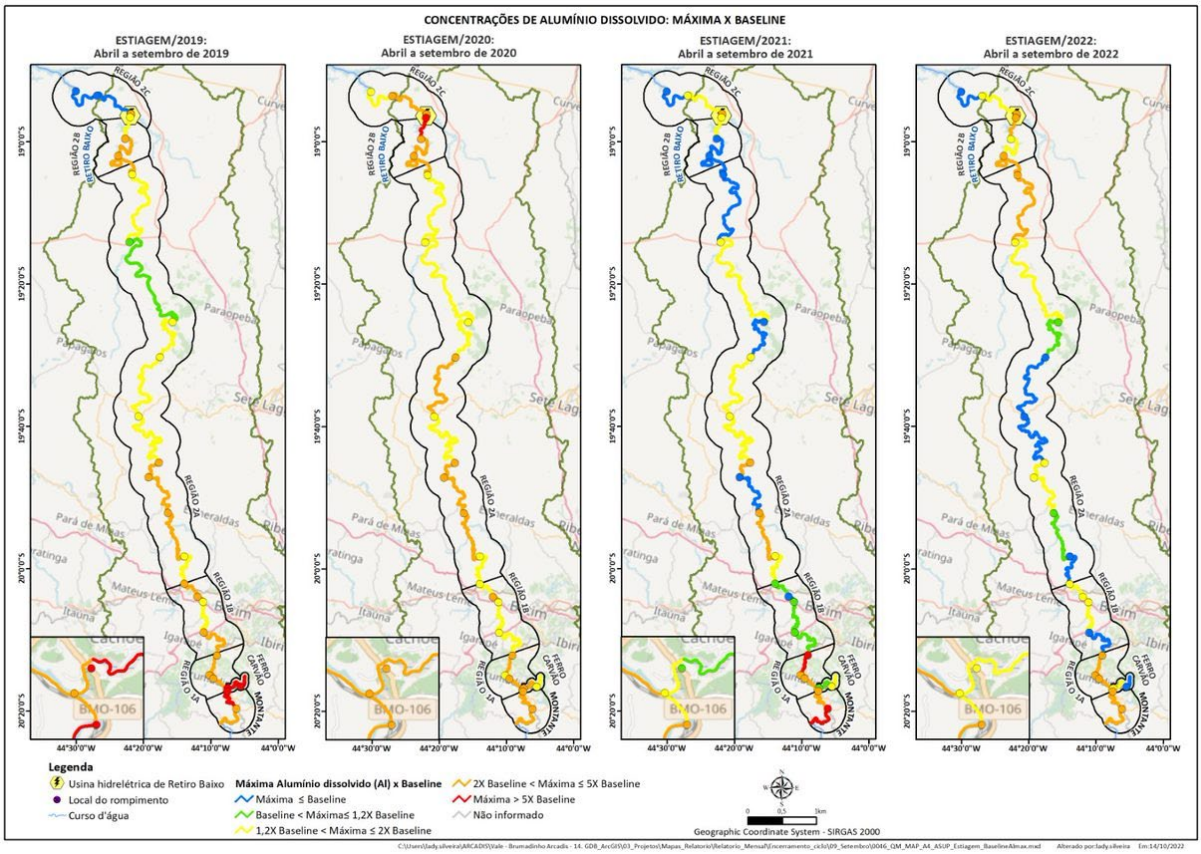
máximas em relação a estiagem/2021, embora menores dos que os observados na estiagem 2020.

Figura 5.3.3-2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com os máximos do *baseline*.



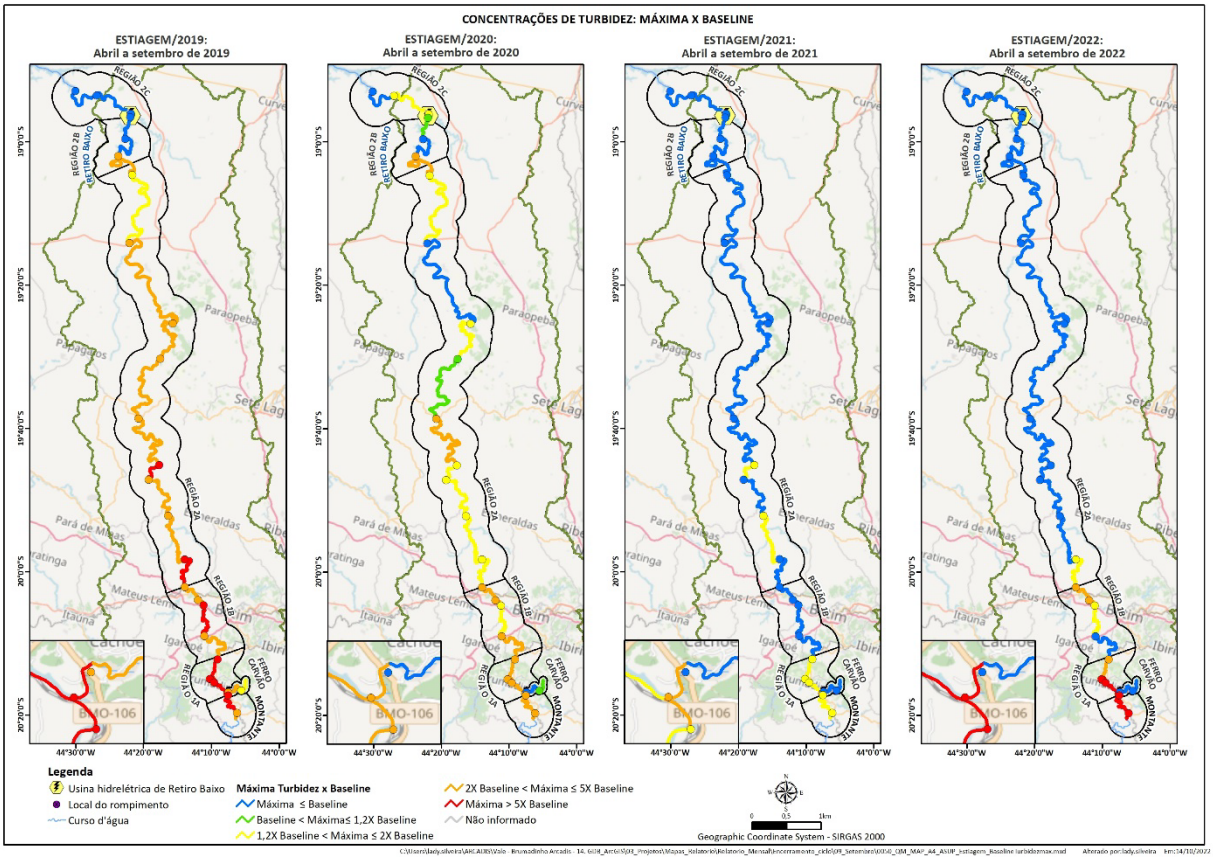
Em relação ao Alumínio dissolvido (5.3.3.3), especificamente para a estiagem/2019, é possível observar que os resultados de concentrações máximas ultrapassaram o *baseline* histórico, com exceção da Região 2C, onde as concentrações foram iguais ou inferiores ao *baseline*. Quanto às concentrações máximas ao longo do período de estiagem/2020, notam-se incrementos nos valores deste parâmetro nas regiões 2B e 2C, em geral, até cinco vezes superiores à condição de *baseline*. Já na estiagem/2021, houve menores condições de afastamento, com destaque para melhoria nas regiões 1B a 2C. Na estiagem/2022, as concentrações máximas apresentaram comportamento aproximado a estiagem/2021, com destaque para maiores condições de afastamento nas regiões 1B, final da 2A e 2B.

Figura 5.3.3-3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com os máximos do *baseline.*



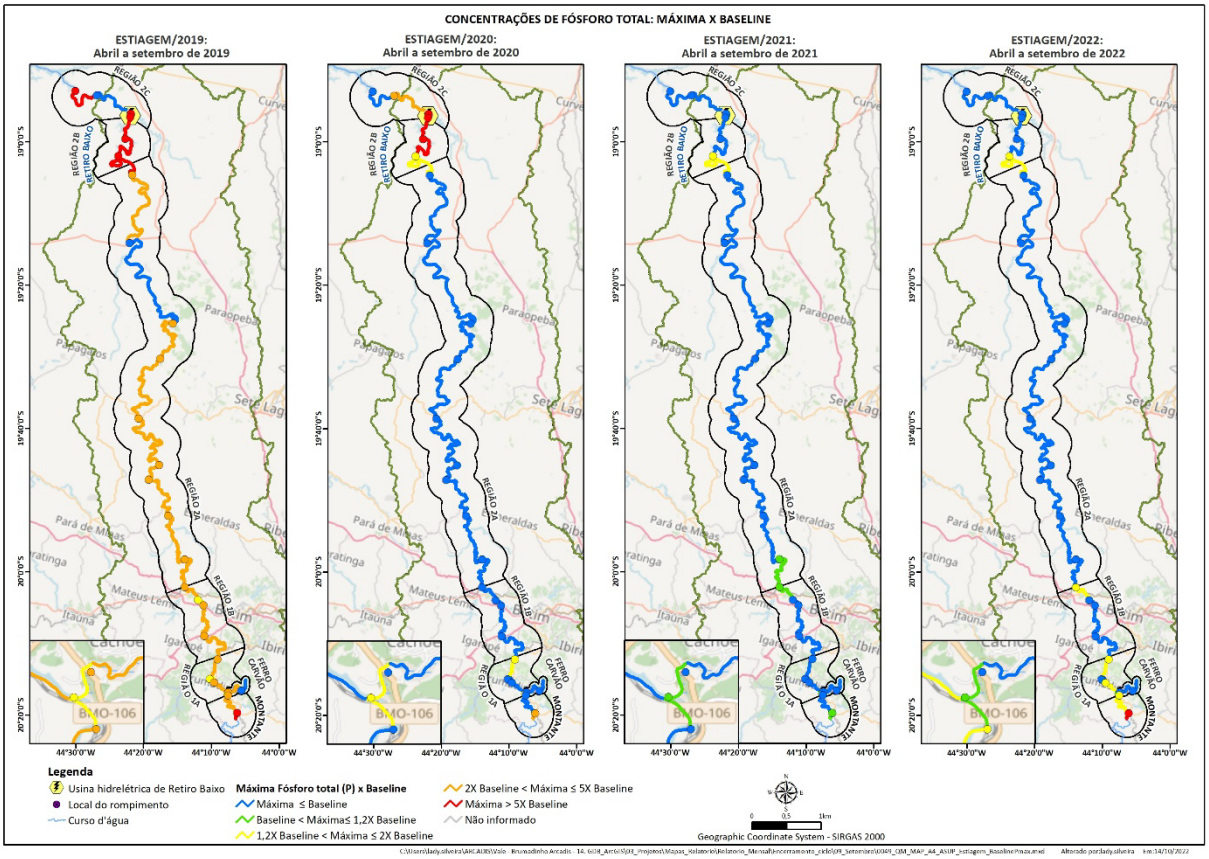
Em relação ao parâmetro Turbidez (5.3.3.4), nota-se nítida evolução da redução dos teores máximos entre os períodos de estiagem, em geral, com menor afastamento aos *baselines* entre os períodos sucessivos. Na estiagem/2019, os valores máximos de Turbidez ficaram mais distantes da condição máxima de referência nas regiões montante, 1A, 1B e parte da 2A, com valores até 5 vezes maiores que o *baseline*. Na estiagem/2020, os maiores afastamentos se mantiveram nessas regiões, porém com valores máximos de 2 a 5 vezes superiores ao *baseline*. Enquanto na estiagem/2021, com exceção das regiões Montante,1A e parte da 2A, os teores máximos, em geral, foram iguais ou inferiores à condição pré-rompimento. Na estiagem/2022, os teores máximos apresentam condição aproximada ao período anterior, com exceção das regiões de montante, 1A e 1B para as quais notou-se maiores afastamentos em relação ao máximo do *baseline* sazonal. Tais valores correspondem aos observados no início de abril, quando ainda ocorreram fortes chuvas no alto Paraopeba que ocasionaram o aumento da Turbidez nessas regiões.

Figura 5.3.3-4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com os máximos do *baseline*.



Por fim, em relação ao parâmetro Fósforo total (5.3.3.5), nota-se nítida redução dos teores máximos entre o período de estiagem 2019 com os demais. Na estiagem/2019, os valores máximos ficaram mais distantes da condição máxima do *baseline* em todas as regiões do rio Paraopeba, desde o ponto a montante até pontos da região 2C, com valores até 5 vezes maiores que o *baseline*. No período de estiagem/2020, os maiores afastamentos se mantiveram no ponto de montante e nas regiões 2B e 2C. Na estiagem/2021, com exceção da região Montante e alguns pontos das regiões 1B, 2A e 2B, os teores máximos, em geral, foram iguais ou inferiores à condição pré-rompimento, destacando-se ainda que neste período os valores apresentaram certa redução em relação ao período de 2020. Na estiagem/2022, percebe-se continuação da redução das máximas no rio Paraopeba, porém com aumento dos valores máximos na região de montante, 1A e 1B. Nas demais regiões, nota-se manutenção dos valores máximos. Destaca-se que, como observado para os analitos Manganês total e Turbidez, o elevado valor observado para este analito na região de montante, no período de estiagem/2022, está relacionado com a ocorrência de chuvas na região do Alto Paraopeba que ocasionou o aumento dos parâmetros citados.

Figura 5.3.3-5: Mapa de comparação dos teores máximos de Fósforo total com os máximos do *baseline*.



De forma geral, no período de estiagem/2022, mais regiões ao longo do rio Paraopeba foram identificadas com teores máximos dos parâmetros próximos ou inferiores às condições máximas de referência em relação aos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020. Em relação ao período de estiagem/2021 as condições de afastamento foram, em geral, próximas ou superiores no atual período de análise. A melhoria da qualidade da água em relação aos resultados máximos ao longo dos períodos analisados, principalmente entre 2019 e 2021, ficou mais evidente para os parâmetros Manganês total, Fósforo total e Turbidez nas regiões mais afetadas, desde o ribeirão Ferro-Carvão até a região 1B. De toda forma, destacam-se ainda concentrações elevadas pontuais que ocorreram no período de estiagem/2022, devido à ocorrência de precipitações consideráveis no início do mês de abril. Ademais, recorda-se que este período de estiagem ocorre posteriormente a um período chuvoso marcado por elevados volumes pluviométricos na bacia, reverberando alterações na qualidade da água no período de estiagem/2022.

5.4. Considerações

Como já destacado no presente documento, após o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, o rio Paraopeba esteve sujeito a alterações de qualidade da água, especialmente nos

trechos (Região 1A e 1B) mais próximos à confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, mas que se estenderam até o reservatório da UHE Retiro Baixo onde, ao final do período de estiagem de 2019, verificou-se a dissipação da pluma ou sedimentos original em suspensão e aproximação com as condições de *baseline*. Os principais indicadores de alteração e associação ao rompimento e, assim, aos rejeitos, foram os elementos Manganês e Ferro e, de forma secundária, o Alumínio, para os quais as variações em seus teores ocorreram de forma específica ao longo espaço e do tempo.

Verificou-se que, no período sazonal de estiagem/2019 mais próximo à ocorrência do rompimento, que os parâmetros de qualidade da água na fração total apresentaram, em geral, teores mais elevados e superação das condições de *baseline*, indicando os impactos decorrentes do evento. Nos períodos seguintes, estiagem/2020 e estiagem/2021, os resultados foram mais atenuados e mais próximos das condições do *baseline* sazonal, em função da redução de arraste hidráulico das vazões do rio Paraopeba. Especificamente no período de estiagem atual, estiagem/2022, os resultados dos analitos avaliados se elevaram, superando, por vezes, os resultados do ano de 2019. Tal fato pode estar atrelado à influência do período chuvoso anterior, chuva 2021/2022, que apresentou volumes pluviométricos notadamente elevados, o que poderia reverberar para o período de estiagem imediatamente seguinte com a bacia ainda em condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal fluvial.

De maneira geral, para os períodos de estiagem, as análises estatísticas aplicadas indicam que as concentrações dos parâmetros em suas parcelas totais, espacialmente, apresentam comportamento aproximado e valores mais elevados para as regiões 1A e 1B (mais afetadas pelo rompimento), seguidas de atenuações para os trechos de jusante, para os quais se nota, inclusive, resultados próximos e até inferiores em relação à região de montante não afetada. Em termos temporais, para as regiões mais afetadas no rio Paraopeba, verifica-se que o período de estiagem de 2019 apresentou teores mais elevados, porém no último período avaliado, estiagem/2022, os resultados, em geral, não diferiram daqueles registrados em 2019 ou foram significativamente mais elevados, com exceção do Manganês total. Nas demais regiões, destacando a 2B e 2C, sob influência do reservatório de Retiro Baixo, os resultados foram mais reduzidos, porém, em geral, ainda mais elevados no período de estiagem/2022, principalmente ao se comparar com o período de estiagem/2021.

Os elementos Ferro e Alumínio em suas frações dissolvidas, em geral, se assemelham em comportamento e, em termos espaciais, considerando os períodos de estiagem analisados, notam-se concentrações significativamente mais elevadas ao longo das regiões do rio Paraopeba em relação à região do ribeirão Ferro-Carvão, indicando que a disponibilização dessas frações está predominante no rio Paraopeba. Entretanto, no âmbito temporal, é indicado aumento sucessivo de Ferro e Alumínio dissolvido nas regiões, inclusive em Montante, ao se comparar os períodos de estiagem, especialmente em 2021/2022, situação esta que se aproxima, relativamente, ao comportamento observado também entre os períodos de chuva analisados no relatório anterior. Para a fração dissolvida de Manganês, por outro lado, é apontada redução gradual ao longo dos períodos de estiagem e, espacialmente, no eixo longitudinal do rio Paraopeba.

Quanto à Turbidez, este é um parâmetro fortemente influenciado pela sazonalidade, com teores majoritariamente elevados na chuva em relação aos períodos de estiagem. Espacialmente, os teores de turbidez foram mais reduzidos nas regiões do rio Paraopeba em relação ao ribeirão Ferro Carvão. À medida que se avança para o trecho de jusante, sob influência do reservatório da UHE Retiro Baixo e do trecho fluvial seguinte ao barramento, é possível verificar atenuação do parâmetro ao longo dos períodos. Temporalmente, destacam-se teores mais elevados no período de estiagem/2019, período pós rompimento, e no período de estiagem mais recente, estiagem/2022, que conforme discutido, foi influenciado pelos efeitos das chuvas do período chuvoso anterior, chuva 2021/2022. Ainda assim, come exceção da região do ribeirão Ferro Carvão, durante as estiagens os resultados de Turbidez permaneceram majoritariamente abaixo do limite legal, conforme esperado.

Destaca-se, também, que após o rompimento das barragens foi observado um aumento intermitente dos teores de Fósforo total nas regiões Ferro-Carvão até 1B. Tais teores sofreram redução a partir do período de estiagem/2019, com variações ao longo dos diferentes períodos sazonais avaliados, relacionadas às contribuições difusas e pontuais ao longo da bacia. Para a fração dissolvida, a maior parte dos resultados de Fósforo permaneceram abaixo do LQ desde Ferro-Carvão até 1B, com concentrações inferiores, inclusive, à região de Montante não impactada. Assim, não foi possível associar diretamente a elevação das concentrações de Fósforo total e dissolvido às contribuições do rejeito.

Dessa forma, entende-se, que as referidas alterações e os comportamentos observados no tempo e no espaço ao longo do rio Paraopeba, estiveram associados 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 das precipitações e de sua resposta hidrológica da bacia como um todo. A bacia do rio Paraopeba esteve sujeita a condições hidrológicas muito contrastantes 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. 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, conforme evidenciado para o período de estiagem/2022. Com exceção da Região 1A e da Região 1B (trechos mais afetados), à medida que se atinge os trechos fluviais mais distais, nota-se comportamento com padrões mais próximos às condições de *baseline*, inclusive, em comparação com o comportamento do trecho de montante não impactado, guardadas suas particularidades locais.

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

6.1. Objetivo

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

6.2. Metodologia

A fim de identificar as violações em relação aos padrões legais, foram compiladas informações a respeito das amostras de água superficial coletadas no rio Paraopeba. Para isso, consideraram-se os períodos sazonais de estiagem relativos aos anos de 2019 a 2022. Maior enfoque é dado ao período de estiagem/2022 (abril a setembro/2022), uma vez que se trata do período de estiagem mais recente. Os resultados das análises de violações aos padrões nos períodos de chuva podem ser consultados no último Relatório de Fechamento de Ciclo protocolado e referente ao período de 25/01/2019 a 31/03/2022 (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

As análises de violação aos padrões legais foram segregadas por período sazonal de estiagem, sendo eles, estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022, para cada uma das regiões (Montante, Ferro Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C), e estão indicadas nas Tabelas 6.3.1 à Tabela 6.3.7. Em caráter complementar, enfoque é dado às violações de cada ponto de monitoramento, dentro do contexto do último período de estiagem, abril a setembro de 2022, conforme Tabela 6.3.8. Nas tabelas também constam os percentuais de violação registrados na série histórica pré-rompimento para o período sazonal de estiagem.

Tabela 6.3-1: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Montante.

Tabela 6.3-2: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Ferro Carvão.

Tabela 6.3-3: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 1A.

Tabela 6.3-4: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 1B.

Tabela 6.3-5: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 2A.

Tabela 6.3-6: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 2B.

Tabela 6.3-7: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 – Região 2C.

Montante

-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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**
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	182	26	↓ 14,3 %	96	13	↓ 13,5 %	140	88	↗ 62,9 %	27	19	↗ 70,4 %
Ferro Dissolvido	37	9	24,3 %	182	57	↗ 31,3 %	96	50	↗ 52,1 %	140	98	↗ 70,0 %	27	23	↗ 85,2 %
Manganês Total	36	31	86,1 %	182	70	↓ 38,5 %	96	54	↗ 56,3 %	140	29	↓ 20,7 %	27	19	↗ 70,4 %
Turbidez	37	0	0,0 %	182	9	↗ 4,9 %	96	2	↓ 2,1 %	140	1	↓ 0,7 %	27	7	↗ 25,9 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	29	3	10,3 %	181	3	↓ 1,7 %	17	2	↗ 11,8 %	140	0	↓ 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	182	3	↗ 1,6 %	96	0	↓ 0,0 %	139	13	↗ 9,4 %	27	1	↓ 3,7 %
pH	37	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	96	0	↓ 0,0 %	139	7	↗ 5,0 %	27	3	↗ 11,1 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	181	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	0	0,0 %	181	5	↗ 2,8 %	93	2	↓ 2,2 %	140	3	↓ 2,1 %	27	8	↗ 29,6 %
Outros															
Cianeto livre	10	0	0,0 %	180	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Cobre Total	7	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	96	0	— 0,0 %	139	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
DBO	37	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	139	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	15	40,5 %	182	11	↓ 6,0 %	17	4	↗ 23,5 %	139	8	↓ 5,8 %	27	17	↗ 63,0 %
Fenóis Totais	37	0	0,0 %	181	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	138	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Fósforo Total	37	1	2,7 %	182	18	↗ 9,9 %	52	2	↓ 3,8 %	140	1	↓ 0,7 %	27	4	↗ 14,8 %
Nitrato	37	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	17	0	↓ 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	181	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	96	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	96	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Chumbo Total	37	2	5,4 %	182	0	↓ 0,0 %	96	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	1	↗ 3,7 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	17	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	96	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	96	0	↓ 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	96	0	↓ 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	96	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	96	0	— 0,0 %	140	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %

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

Ferro - Carvão

-	Baseline estiagem Vale			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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**
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	-	0	0,0 %	353	32	↗ 9,1 %	50	4	↓ 8,0 %	37	2	↓ 5,4 %	51	2	↓ 3,9 %
Ferro Dissolvido	420	33	7,9 %	353	34	↗ 9,6 %	50	3	↓ 6,0 %	37	0	↓ 0,0 %	51	0	— 0,0 %
Manganês Total	418	416	99,5 %	353	353	↗ 100,0 %	50	50	— 100,0 %	37	37	— 100,0 %	52	52	— 100,0 %
Turbidez	424	33	7,8 %	351	351	↗ 100,0 %	50	38	↓ 76,0 %	37	9	↓ 24,3 %	52	40	↗ 76,9 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	354	0	0,0 %	353	1	↗ 0,3 %	50	7	↗ 14,0 %	37	0	↓ 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	420	6	1,4 %	353	272	↗ 77,1 %	50	3	↓ 6,0 %	37	18	↗ 48,6 %	52	4	↓ 7,7 %
pH	434	2	0,5 %	353	1	↓ 0,3 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	1	↗ 1,9 %
Sólidos dissolvidos totais	420	0	0,0 %	353	0	— 0,0 %	50	0	— 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	1	↗ 1,9 %
Sólidos suspensos totais	418	19	4,5 %	353	335	↗ 94,9 %	50	17	↓ 34,0 %	37	5	↓ 13,5 %	51	16	↗ 31,4 %
Outros															
Cianeto livre	-	0	0,0 %	353	6	↗ 1,7 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
DBO	418	8	1,9 %	353	0	↓ 0,0 %	50	0	— 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	34	11	32,4 %	353	200	↗ 56,7 %	50	5	↓ 10,0 %	37	0	↓ 0,0 %	51	5	↗ 9,8 %
Fenóis Totais	48	0	0,0 %	353	0	— 0,0 %	50	0	— 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Fósforo Total	191	28	14,7 %	353	324	↗ 91,8 %	50	10	↓ 20,0 %	37	8	↗ 21,6 %	50	26	↗ 52,0 %
Nitrato	179	0	0,0 %	353	0	— 0,0 %	50	0	— 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Nitrito	-	0	0,0 %	353	0	— 0,0 %	50	0	— 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	164	0	0,0 %	353	1	↗ 0,3 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	354	0	0,0 %	353	44	↗ 12,5 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Bário Total	-	0	0,0 %	353	63	↗ 17,8 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Cádmio Total	-	0	0,0 %	353	95	↗ 26,9 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	50	0	— 0,0 %
Chumbo Total	354	2	0,6 %	353	320	↗ 90,7 %	50	7	↓ 14,0 %	37	1	↓ 2,7 %	51	4	↗ 7,8 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	353	116	↗ 32,9 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	-	0	0,0 %	353	8	↗ 2,3 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	51	0	— 0,0 %
Cromo Total	354	0	0,0 %	353	14	↗ 4,0 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	354	0	0,0 %	353	100	↗ 28,3 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Níquel Total	-	0	0,0 %	353	150	↗ 42,5 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	353	1	↗ 0,3 %	50	0	↓ 0,0 %	37	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %
Zinco Total	-	0	0,0 %	353	54	↗ 15,3 %	50	2	↓ 4,0 %	37	0	↓ 0,0 %	52	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 estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	878	191	↗ 21,8 %	514	95	↘ 18,5 %	579	304	↗ 52,5 %	152	89	↗ 58,6 %
Ferro Dissolvido	37	5	13,5 %	878	310	↗ 35,3 %	514	338	↗ 65,8 %	579	362	↘ 62,5 %	152	113	↗ 74,3 %
Manganês Total	36	26	72,2 %	878	631	↘ 71,9 %	514	306	↘ 59,5 %	577	172	↘ 29,8 %	152	89	↗ 58,6 %
Turbidez	37	0	0,0 %	878	177	↗ 20,2 %	514	24	↘ 4,7 %	578	14	↘ 2,4 %	152	33	↗ 21,7 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	29	2	6,9 %	867	36	↘ 4,2 %	216	2	↘ 0,9 %	473	0	↘ 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	871	96	↗ 11,0 %	513	4	↘ 0,8 %	578	22	↗ 3,8 %	152	0	↘ 0,0 %
pH	37	0	0,0 %	872	1	↗ 0,1 %	514	0	↘ 0,0 %	574	7	↗ 1,2 %	152	1	↘ 0,7 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	877	0	— 0,0 %	512	0	— 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	0	0,0 %	877	102	↗ 11,6 %	512	18	↘ 3,5 %	579	11	↘ 1,9 %	149	33	↗ 22,1 %
Outros															
Benzo(a)antraceno	-	0	0,0 %	862	0	— 0,0 %	168	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %	98	2	↗ 2,0 %
Benzo(a)pireno	-	0	0,0 %	862	0	— 0,0 %	168	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %	99	3	↗ 3,0 %
Benzo(b)fluoranteno	-	0	0,0 %	862	0	— 0,0 %	168	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %	99	2	↗ 2,0 %
Benzo(k)fluoranteno	-	0	0,0 %	859	0	— 0,0 %	111	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %	99	1	↗ 1,0 %
Cianeto livre	10	0	0,0 %	584	24	↗ 4,1 %	216	2	↘ 0,9 %	473	0	↘ 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Cobre Total	7	0	0,0 %	878	0	— 0,0 %	514	0	— 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Criseno	-	0	0,0 %	862	0	— 0,0 %	168	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %	98	1	↗ 1,0 %
DBO	37	0	0,0 %	867	1	↗ 0,1 %	216	3	↗ 1,4 %	465	0	↘ 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	35	94,6 %	866	495	↘ 57,2 %	216	99	↘ 45,8 %	469	402	↗ 85,7 %	150	100	↘ 66,7 %
Fenóis Totais	37	0	0,0 %	867	3	↗ 0,3 %	216	0	↘ 0,0 %	469	0	— 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Fósforo Total	37	3	8,1 %	873	111	↗ 12,7 %	459	27	↘ 5,9 %	578	18	↘ 3,1 %	148	10	↗ 6,8 %
Nitrato	37	0	0,0 %	867	0	— 0,0 %	216	0	— 0,0 %	473	0	— 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	867	0	— 0,0 %	216	0	— 0,0 %	473	0	— 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	867	0	— 0,0 %	216	0	— 0,0 %	473	0	— 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	877	0	— 0,0 %	514	0	— 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	878	0	— 0,0 %	216	0	— 0,0 %	473	0	— 0,0 %	150	0	— 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	878	1	↗ 0,1 %	514	0	↘ 0,0 %	579	1	↗ 0,2 %	151	0	↘ 0,0 %
Chumbo Total	29	0	0,0 %	878	25	↗ 2,8 %	514	0	↘ 0,0 %	579	0	— 0,0 %	149	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	14	0	0,0 %	878	0	— 0,0 %	514	0	— 0,0 %	577	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	878	0	— 0,0 %	515	0	— 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	877	0	— 0,0 %	514	0	— 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	878	3	↗ 0,3 %	514	0	↘ 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	878	0	— 0,0 %	514	0	— 0,0 %	579	0	— 0,0 %	152	0	— 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	878	5	↗ 0,6 %	514	0	↘ 0,0 %	578	1	↗ 0,2 %	151	0	↘ 0,0 %

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

Região 1B

-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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**
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	22	4	18,2 %	737	209	↗ 28,4 %	104	36	↗ 34,6 %	95	25	↘ 26,3 %	240	80	↗ 33,3 %
Ferro Dissolvido	74	16	21,6 %	737	291	↗ 39,5 %	104	58	↗ 55,8 %	95	50	↘ 52,6 %	240	121	↘ 50,4 %
Manganês Total	72	39	54,2 %	737	714	↗ 96,9 %	104	91	↘ 87,5 %	95	42	↘ 44,2 %	238	131	↗ 55,0 %
Turbidez	74	0	0,0 %	737	117	↗ 15,9 %	104	9	↘ 8,7 %	94	0	↓ 0,0 %	240	10	↗ 4,2 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	58	6	10,3 %	737	36	↘ 4,9 %	104	10	↗ 9,6 %	95	0	↓ 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Oxigênio dissolvido	74	0	0,0 %	737	203	↗ 27,5 %	104	11	↘ 10,6 %	94	8	↘ 8,5 %	238	6	↘ 2,5 %
pH	74	0	0,0 %	737	3	↗ 0,4 %	104	0	↓ 0,0 %	94	1	↗ 1,1 %	240	32	↗ 13,3 %
Sólidos dissolvidos totais	60	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	238	0	– 0,0 %
Sólidos suspensos totais	74	1	1,4 %	737	62	↗ 8,4 %	104	3	↘ 2,9 %	95	0	↓ 0,0 %	237	7	↗ 3,0 %
Outros															
Cianeto livre	28	2	7,1 %	736	1	↘ 0,1 %	104	0	↓ 0,0 %	95	0	– 0,0 %	236	0	– 0,0 %
Cobre Total	14	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	239	0	– 0,0 %
DBO	74	1	1,4 %	737	0	↓ 0,0 %	104	0	– 0,0 %	92	13	↗ 14,1 %	237	16	↘ 6,8 %
Escherichia/Coliformes	74	63	85,1 %	737	584	↘ 79,2 %	104	78	↘ 75,0 %	94	52	↘ 55,3 %	240	180	↗ 75,0 %
Fenóis Totais	74	2	2,7 %	737	0	↓ 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Fósforo Total	74	22	29,7 %	737	308	↗ 41,8 %	104	0	↓ 0,0 %	95	42	↗ 44,2 %	233	68	↘ 29,2 %
Nitrato	74	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Nitrito	62	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	74	0	0,0 %	737	1	↗ 0,1 %	104	0	↓ 0,0 %	95	1	↗ 1,1 %	240	2	↘ 0,8 %
Traços															
Arsênio Total	38	0	0,0 %	736	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Bário Total	38	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Cádmio Total	74	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	239	0	– 0,0 %
Chumbo Total	74	2	2,7 %	737	16	↘ 2,2 %	104	0	↓ 0,0 %	95	0	– 0,0 %	239	0	– 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Cobre Dissolvido	28	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	238	0	– 0,0 %
Cromo Total	54	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Mercúrio Total	38	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Níquel Total	56	0	0,0 %	737	1	↗ 0,1 %	104	0	↓ 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	737	0	– 0,0 %	104	0	– 0,0 %	95	0	– 0,0 %	240	0	– 0,0 %
Zinco Total	56	0	0,0 %	737	7	↗ 0,9 %	104	0	↓ 0,0 %	95	0	– 0,0 %	239	0	– 0,0 %

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

Região 2A

-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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**
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	33	4	12,1 %	1644	408	↗ 24,8 %	232	89	↗ 38,4 %	214	115	↗ 53,7 %	239	175	↗ 73,2 %
Ferro Dissolvido	111	7	6,3 %	1644	538	↗ 32,7 %	232	81	↗ 34,9 %	214	41	↘ 19,2 %	239	94	↗ 39,3 %
Manganês Total	108	41	38,0 %	1644	717	↗ 43,6 %	232	117	↗ 50,4 %	214	40	↘ 18,7 %	238	57	↗ 23,9 %
Turbidez	111	4	3,6 %	1644	187	↗ 11,4 %	231	24	↘ 10,4 %	212	3	↘ 1,4 %	239	9	↗ 3,8 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	87	9	10,3 %	1640	48	↘ 2,9 %	232	18	↗ 7,8 %	214	0	↘ 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	111	0	0,0 %	1644	42	↗ 2,6 %	232	9	↗ 3,9 %	212	12	↗ 5,7 %	238	9	↘ 3,8 %
pH	111	0	0,0 %	1644	3	↗ 0,2 %	231	0	↘ 0,0 %	214	4	↗ 1,9 %	237	14	↗ 5,9 %
Sólidos dissolvidos totais	90	0	0,0 %	1640	0	— 0,0 %	232	0	— 0,0 %	214	0	— 0,0 %	236	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	111	3	2,7 %	1640	44	↘ 2,7 %	232	5	↘ 2,2 %	214	2	↘ 0,9 %	235	3	↗ 1,3 %
Outros															
Cianeto livre	38	2	5,3 %	1538	5	↘ 0,3 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	234	0	— 0,0 %
DBO	111	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	210	6	↗ 2,9 %	236	0	↘ 0,0 %
Escherichia/Coliformes	111	25	22,5 %	1644	174	↘ 10,6 %	232	36	↗ 15,5 %	214	8	↘ 3,7 %	238	19	↗ 8,0 %
Fenóis Totais	94	5	5,3 %	1644	1	↘ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Fósforo Total	111	16	14,4 %	1644	566	↗ 34,4 %	232	4	↘ 1,7 %	214	89	↗ 41,6 %	233	10	↘ 4,3 %
Nitrato	111	0	0,0 %	1644	0	— 0,0 %	232	0	— 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Nitrito	93	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	111	0	0,0 %	1639	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	238	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	57	0	0,0 %	1644	0	— 0,0 %	231	3	↗ 1,3 %	214	0	↘ 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Bário Total	57	0	0,0 %	1644	0	— 0,0 %	232	0	— 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Cádmio Total	111	0	0,0 %	1644	2	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Chumbo Total	111	2	1,8 %	1644	8	↘ 0,5 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	238	0	— 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	1644	0	— 0,0 %	232	0	— 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	66	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	237	0	— 0,0 %
Cromo Total	69	0	0,0 %	1644	1	↗ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	57	0	0,0 %	1644	4	↗ 0,2 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Níquel Total	57	1	1,8 %	1644	1	↘ 0,1 %	232	0	↘ 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	1644	0	— 0,0 %	232	0	— 0,0 %	214	0	— 0,0 %	239	0	— 0,0 %
Zinco Total	75	3	4,0 %	1644	2	↘ 0,1 %	232	1	↗ 0,4 %	214	0	↘ 0,0 %	239	0	— 0,0 %

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

Região 2B															
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	549	58	↓ 10,6 %	392	114	↑ 29,1 %	72	3	↓ 4,2 %	533	117	↑ 22,0 %
Ferro Dissolvido	20	0	0,0 %	549	24	↑ 4,4 %	392	87	↑ 22,2 %	72	0	↓ 0,0 %	536	40	↑ 7,5 %
Manganês Total	20	2	10,0 %	549	34	↓ 6,2 %	392	1	↓ 0,3 %	72	3	↑ 4,2 %	536	0	↓ 0,0 %
Turbidez	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	2	↑ 0,5 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	20	3	15,0 %	549	8	↓ 1,5 %	392	26	↑ 6,6 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Oxigênio dissolvido	20	0	0,0 %	547	61	↑ 11,2 %	392	5	↓ 1,3 %	72	7	↑ 9,7 %	530	0	↓ 0,0 %
pH	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	390	0	↓ 0,0 %	72	0	– 0,0 %	536	2	↑ 0,4 %
Sólidos dissolvidos totais	16	0	0,0 %	547	0	– 0,0 %	390	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	534	0	– 0,0 %
Sólidos suspensos totais	20	0	0,0 %	547	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	531	2	↑ 0,4 %
Outros															
Cianeto livre	14	0	0,0 %	447	5	↑ 1,1 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	– 0,0 %	528	0	– 0,0 %
DBO	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	391	0	↓ 0,0 %	72	0	– 0,0 %	528	0	– 0,0 %
Escherichia/Coliformes	20	3	15,0 %	549	3	↓ 0,5 %	392	1	↓ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	534	1	↑ 0,2 %
Fenóis Totais	20	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	391	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	536	0	– 0,0 %
Fósforo Total	20	0	0,0 %	549	82	↑ 14,9 %	392	44	↓ 11,2 %	72	0	↓ 0,0 %	519	3	↑ 0,6 %
Nitrato	20	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Nitrito	19	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	20	0	0,0 %	548	3	↑ 0,5 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	– 0,0 %	536	0	– 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	11	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	1	↑ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Bário Total	11	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Cádmio Total	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	1	↑ 0,2 %
Chumbo Total	20	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	1	↑ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Cobre Dissolvido	20	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	1	↑ 0,3 %	72	0	↓ 0,0 %	536	0	– 0,0 %
Cromo Total	15	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	549	1	↑ 0,2 %	392	0	↓ 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	549	0	– 0,0 %	392	0	– 0,0 %	72	0	– 0,0 %	537	0	– 0,0 %
Zinco Total	16	1	6,3 %	549	3	↓ 0,5 %	392	2	↓ 0,5 %	72	0	↓ 0,0 %	536	1	↑ 0,2 %

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

Região 2C

-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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**
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	562	41	↓ 7,3 %	260	71	↑ 27,3 %	74	10	↓ 13,5 %	378	117	↑ 31,0 %
Ferro Dissolvido	20	0	0,0 %	562	4	↑ 0,7 %	260	56	↑ 21,5 %	74	0	↓ 0,0 %	380	16	↑ 4,2 %
Manganês Total	20	2	10,0 %	562	56	↓ 10,0 %	260	0	↓ 0,0 %	74	5	↑ 6,8 %	380	0	↓ 0,0 %
Turbidez	20	0	0,0 %	560	0	— 0,0 %	259	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	20	3	15,0 %	562	7	↓ 1,2 %	259	28	↑ 10,8 %	74	0	↓ 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	20	0	0,0 %	561	120	↑ 21,4 %	259	6	↓ 2,3 %	74	4	↑ 5,4 %	380	2	↓ 0,5 %
pH	20	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	256	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	7	↑ 1,8 %
Sólidos dissolvidos totais	16	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	377	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	20	0	0,0 %	562	1	↑ 0,2 %	260	0	↓ 0,0 %	74	0	— 0,0 %	377	1	↑ 0,3 %
Outros															
Cianeto livre	14	0	0,0 %	277	4	↑ 1,4 %	246	0	↓ 0,0 %	74	0	— 0,0 %	373	0	— 0,0 %
DBO	20	0	0,0 %	562	1	↑ 0,2 %	259	0	↓ 0,0 %	74	0	— 0,0 %	375	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	20	3	15,0 %	562	1	↓ 0,2 %	259	2	↑ 0,8 %	74	0	↓ 0,0 %	379	0	— 0,0 %
Fenóis Totais	20	0	0,0 %	377	1	↑ 0,3 %	245	0	↓ 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Fósforo Total	20	0	0,0 %	562	31	↑ 5,5 %	260	9	↓ 3,5 %	74	0	↓ 0,0 %	365	0	— 0,0 %
Nitrato	20	0	0,0 %	561	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Nitrito	19	0	0,0 %	561	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	20	0	0,0 %	562	1	↑ 0,2 %	260	0	↓ 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	11	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Bário Total	11	0	0,0 %	404	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Cádmio Total	20	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Chumbo Total	20	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	404	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	20	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	379	1	↑ 0,3 %
Cromo Total	15	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	562	1	↑ 0,2 %	260	0	↓ 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	260	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	562	0	— 0,0 %	246	0	— 0,0 %	74	0	— 0,0 %	380	0	— 0,0 %
Zinco Total	16	1	6,3 %	562	3	↓ 0,5 %	260	1	↓ 0,4 %	74	0	↓ 0,0 %	380	0	— 0,0 %

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 6.3-8:Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco no período de Estiagem/2022

Parâmetro	COPAM 08/22	Rio Paraopeba																																				UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.				UHE TM
		Mont.		Ferro Carvão					Região 1A						Região 1B						Região 2A																			Região 2B			Região 2C				
	VMP	BP036	PT-52	FEI-COR-01	FEI-COR-03-AS	FEI-COR-07	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	BP068	PT-05	BP070	PT-03	PT-14	PT-48	BP072	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	BP082	PT-16	PT-17	PT-18	BP083	PT-49	BP078	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	PT-57	CE-02	BP099	JRB-02	PT-22
MAJORITÁRIOS																																													
Manganês Total	0,1	86	70	99	97	100	100	100	42	48	63	59	72	67	61	73	21	43	47	60	71	80	50	33	63	50	20	42	40	39	-	17	-	-	-	-	-	10	-	-
Ferro Dissolvido	0,3	24	85	7	11	8	-	-	58	57	85	76	14	78	16	73	58	43	27	49	43	80	50	14	63	63	40	3	60	3	25	35	16	5	1	4	4	-	8	-
Alumínio Dissolvido	0,1	18	70	NA	NA	NA	-	8	33	39	68	66	18	61	27	27	29	26	9	35	29	40	25	9	63	50	80	9	70	18	88	79	31	14	21	32	32	18	24	-
Turbidez	100	-	26	11	-	6	100	54	17	17	28	22	-	19	-	-	4	9	-	4	14	-	-	-	13	13	-	5	-	5	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Fósforo Total	0,1(Lót); 0,05(Interm.); 0,03(Lênt.)	3	15	17	-	17	85	16	8	5	5	10	8	6	8	-	4	14	51	36	57	25	25	32	13	25	-	8	-	3	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
TRAÇOS																																												
CádmioTotal	0,001	-	-	NA	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Chumbo Total	0,01	5	4	1	-	1	14	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre Dissolvido	0,009	-	-	NA	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-
Zinco Total	0,18	-	-	NA	NA	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	3	-	5	-	-	1	-	-	-	6	-	-
FÍSICO-QUÍMICOS																																											
DBO	5	-	-	3	3	1	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxigênio dissolvido	5	-	4	2	-	2	-	15	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	3	-	-	38	-	25	38	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1	-	4	-
pH	6 a 9	-	11	1	-	1	-	4	-	-	-	-	-	3	-	9	8	9	-	15	14	20	25	-	-	50	40	-	-	-	-	3	1	-	-	-	-	-	20	29
Sólidos Dissolvidos totais	500	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sólidos suspensos totais	100	-	30	6	-	4	59	-	8	9	26	28	-	25	3	-	4	9	-	2	29	-	13	3	-	-	-	3	-	3	-	-	-	1	1	-	1	-	-	-
OUTROS																																												
Escherichia coli	1.000	41	63	50	19	NA	-	4	25	17	60	95	95	83	84	91	67	70	86	76	86	20	50	35	50	-	-	24	10	8	-	2	1	-	-	-	-	15	-	-
Nitrogênio Amoniacal T.	3,7 p/ pH < =7,5 2,0 p/ 7,5<pH<=8,0 1,0 p/ 8,0<pH<=8,5 0,5 p/ pH>8,5	-	-	-	NA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Benzo(a)antraceno	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10	5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Benzo(a)pireno	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	18	5	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	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Benzo(k)fluoranteno	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	9	-	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	0,05	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
N coletas realizadas		37	27	199	36	199	28	26	12	23	40	41	37	35	37	11	24	23	37	182	7	5	8	37	8	8	5	37	10	37	8	180	179	179	179	174	174	20	25	7

Elaboração: Arcadis, 2022.

Menor % de resultados acima do VOR — **Maior % de resultados acima do VOR**

NA - não tiveram análises no período

(-) 0% de desconformidade legal, ou seja, todos os resultados ficaram abaixo do VMP

Na região de Montante, de acordo com a Tabela 6.3-1, observa-se incremento do percentual de violações para todos os parâmetros majoritários no período de estiagem/2022 (Manganês total: 70,4%; Ferro dissolvido: 85,2%; Alumínio dissolvido: 70,4%; Turbidez: 25,9%) em relação aos períodos de estiagem anteriores, e, em geral, incluindo a condição do *baseline* sazonal (Manganês total: 86,1%; Ferro dissolvido: 24,3%; Alumínio dissolvido: 18,2%; Turbidez: 0%). Já para os parâmetros físico-químicos ocorreu elevação dos percentuais no período de estiagem atual apenas para pH (11,1%) e Sólidos Suspensos totais (29,6%), destacando-se a não ocorrência de violações para ambos os parâmetros na condição do *baseline*. Para Cor verdadeira, manteve-se a condição de ausência de violações nos períodos de estiagem/2021 e estiagem/2022 e, para Oxigênio dissolvido, houve redução entre os períodos. Quanto aos parâmetros vinculados a contribuições difusas e de origem sanitária *Escherichia coli* e Fósforo total, os percentuais de violações registrado na estiagem/2022, respectivamente 63% e 14,8%, ficaram acima dos percentuais registrados nos períodos anteriores, incluindo o *baseline* sazonal de estiagem (*E.coli:* 40,5% e Fósforo total: 2,7%). Dentre os parâmetros traço analisados, nota-se a ocorrência de violação pontual apenas para Chumbo total, com percentual equivalente a 3,7%, superior ao registrado nos períodos anteriores (nulo), mas, abaixo do *baseline* de estiagem (5,4%).

Estes resultados indicam que, mesmo nas áreas não afetadas pelo rejeito, alguns parâmetros apresentam valores acima do VMP, inclusive na série histórica pré-rompimento, evidenciando as 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 das chuvas que ocorreram no período chuvoso anterior (chuva 2021/2022) podem ter reverberado no período de estiagem/2022, por meio das notáveis elevações dos níveis e vazões com consequente carreamento de materiais para o curso d'água, contribuindo para a elevação dos parâmetros e respectivos percentuais de violação neste período de estiagem seguinte.

Na região do ribeirão Ferro-Carvão, de acordo com a Tabela 6.3-2 todos os parâmetros majoritários, com exceção do Ferro Dissolvido, violaram os padrões estabelecidos no período de estiagem/2022. Para Alumínio dissolvido, houve redução do percentual de violação (3,9%) em relação aos períodos de estiagem anteriores, porém o percentual se manteve acima do *baseline* de estiagem, sendo nulo para esta região. Para Manganês total o percentual de violação se manteve equivalente a 100% em todos os períodos de estiagem avaliados, um pouco acima da condição do *baseline* (99,5%). Em termos históricos, observa-se na Tabela 6.3-8:Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento que em todos os pontos monitorados nesta região (FEI-COR-01; FEI-COR-03-AS; FEI-COR-07 - *baseline* VALE), o percentual de violação para Manganês total sempre foi elevado, acima de 97%, já apontando para condições de alteração da qualidade da água previamente ao rompimento das barragens na região. Para Turbidez, houve elevação do percentual no período de estiagem/2022 (76,9%) em relação aos demais períodos, incluindo o *baseline*, com exceção do período de estiagem/2019 (100%).

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 morfologicamente pela força e volume de rejeito carreado, estando seu leito sob influência de obras e disposição de material dragado.

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 pelos menores 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 demais parâmetros, no período de estiagem/2022, na região do ribeirão Ferro-Carvão, foram registradas violações para Oxigênio dissolvido (7,7%), pH (1,9%), Sólidos suspenso totais (31,4%), *E. coli* (9,8%) e Fósforo total (52%). Com exceção de *E. coli,* todos os percentuais foram superiores ao *baseline* de estiagem. Para os traço, violações pontuais de Chumbo total ocorreram no PT-11 (Tabela 6.3-8), com 4 amostras dentre as 28 analisadas acima do VMP (0,01 mg/L). Considerando os dois pontos monitorados na região, PT-11 e PT-12, o percentual de violação para Chumbo total no período de estiagem/2022 foi equivalente a 7,8% (Tabela 6.3-2), sendo este valor menor que o registrado nos anos de 2019 e 2020, porém acima da condição do *baseline* (0,6%) e do período de estiagem/2021 (2,7%).

Após a região do ribeirão Ferro-Carvão, a Região 1A (Tabela 6.3-3), 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 e das operações de dragagem ativas nesse trecho fluvial, destaca-se entretanto, que a influência dessa operação é pontual e rapidamente reversível.

No período de estiagem/2022, verificou-se que a região 1A apresentou, para os parâmetros majoritários, percentuais de violação mais reduzidos que a região Montante, não afetada pelo rompimento. Entretanto, ao comparar as violações do período de estiagem mais recente com o período de estiagem anterior, estiagem/2021, para todos esses parâmetros houve elevação dos percentuais. Conforme apontado, essa condição pode estar atrelada aos efeitos do período chuvoso anterior, chuva 2021/2022. Na estiagem/2022, as inconformidades atingiram para Alumínio dissolvido 58,6%, para Ferro dissolvido 74,3%, para Manganês total 58,6% e para Turbidez 21,7%. Com exceção do parâmetro Manganês total, tais percentuais também foram superiores aos respectivos *baselines* de estiagem da região. De acordo com a Tabela 6.3-8,

os maiores percentuais de violação ocorreram nos pontos PT-09, PT-02 e PT-05 para estes analitos, com destaque para o Ferro dissolvido.

Além dos parâmetros majoritários, na região 1A também ocorreram violações no período de estiagem/2022 para pH (0,7%), Sólidos suspensos totais (22,1%), *E. coli* (66,7%) e para Fósforo total (6,8%). Para pH, a violação ocorreu de forma pontual no ponto PT-05, enquanto para Sólidos suspensos totais, *E. coli* e Fósforo total as violações se estenderam ao longo dos pontos monitorados na região 1A, com destaque para maiores percentuais do indicador sanitário *E. coli*, mas em condições próximas ao *baseline* sazonal (Tabela 6.3-8). Para os parâmetros traço, não houve registro de violações no período de estiagem/2022, assim como na condição pré-rompimento. Especificamente nos pontos PT-01 e PT-13, ocorreram violações pontuais para demais parâmetros, sendo eles: PT-01 (benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(k)fluoranteno) e PT-13 (benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno e criseno). Estes parâmetros são monitorados apenas nestes pontos e os resultados foram reanalisados e confirmados pelo laboratório. 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 existe uma draga para extração de areia instalada próxima à localização do 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 6.3-4, na Região 1B, monitorada pelos pontos BP070 e BP072 (*baseline* Igam) e PT-03, PT-14, PT-48 e PT-15 (VALE), no período de estiagem/2022, ocorreram violações para todos os parâmetros majoritários, com destaque de elevações para Alumínio dissolvido (33,3%), Manganês total (55%) e Turbidez (4,2%) em relação ao período de estiagem/2021 (Alumínio dissolvido: 26,3%; Manganês total: 44,2%; e Turbidez: 0%) e ao *baseline* sazonal (Alumínio dissolvido: 18,2%; Manganês total: 54,2%; e Turbidez: 0%). Para Ferro dissolvido (50,4%), apesar da redução do percentual em relação ao período de estiagem anterior (52,6%), o percentual no atual período de análise ainda se manteve bem acima do *baseline* (21,6%). Os pontos PT-14, PT-48 e PT-15 apresentaram violações para os quatro parâmetros majoritários mencionados, entretanto, os maiores percentuais foram registrados no ponto PT-03 para Manganês total e Ferro dissolvido, acima dos *baselines* de estiagem considerados (Tabela 6.3-8).

Para os parâmetros de cunho sanitário, houve registro de violações para DBO (6,8%), *E. coli* (75%), Fósforo total (29,2%) e Nitrogênio amoniacal (0,8%). Dentre estes, para *E. coli e Fósforo total* o percentual se manteve abaixo do *baseline* de estiagem, respectivamente 85,1% e 29,7%. As violações para DBO e Nitrogênio amoniacal ocorreram de forma pontual no PT-15, enquanto as violações para *E. coli e* Fósforo total se estenderam ao longo dos pontos monitorados na região 1B, com destaque para elevados percentuais já na série histórica pré-rompimento (Tabela 6.3-8). Dentre os demais parâmetros monitorados, destaca-se a ocorrência de violações para os físico-químicos, Oxigênio (2,5%), pH (13,3%) e Sólidos suspensos totais (3%) no período de estiagem atual, sendo todos os percentuais acima do

baseline de estiagem para a região. Para os parâmetros traço, não houve registro de violações no período de estiagem/2022, sendo esta condição também observada nos períodos de estiagem/2020 e estiagem/2021, bem como no *baseline* sazonal, exceto para Chumbo total, o qual já apresentou violação na série histórica pré-rompimento.

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 6.3-5, observa-se, em geral, queda dos percentuais de violação dos parâmetros majoritários, com exceção do Alumínio dissolvido, se comparados àqueles registrados nas regiões anteriormente analisadas. É importante ressaltar que o trecho fluvial da região 2A se situa em porção da bacia do rio Paraopeba de menor caráter urbano e mais distante do rompimento das barragens B1, 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 estiagem/2022, foram registradas inconformidades para Alumínio dissolvido (73,2%), Ferro dissolvido (39,3%), Manganês total (23,9%) e Turbidez (3,8%). Para Alumínio, Ferro e Turbidez, os percentuais de violação se apresentaram mais elevados que os valores de *baseline* de estiagem da região, bem como em relação ao período de estiagem/2021. Para Manganês total, o percentual do atual período de análise foi superior ao período de estiagem/2021, porém abaixo do *baseline* (38%). Pontualmente, de acordo com a Tabela 6.3-8, observa-se ocorrência de violações para todos esses parâmetros nos pontos PT-53, PT-16 e PT-17, embora os maiores percentuais tenham sido registrados para Manganês total e Ferro dissolvido no PT-54 e Alumínio dissolvido nos pontos PT-18 e PT-19, em todos os casos acima de 79% e bem além das condições do *baseline* do corpo hídrico. Cabe destacar a recorrência de violações do Alumínio dissolvido na região, que pode ser explicada pelo fato da mesma se encontrar em meio à formação geológica do Complexo Bambuí, rica em Alumínio.

Na região 2A, em relação aos demais parâmetros analisados, ocorreram violações na estiagem/2022 para Oxigênio dissolvido (3,8%), pH (5,9%) e Sólidos suspensos totais (1,3%).

Tanto para Oxigênio dissolvido quanto para pH, o percentual de violação na série histórica pré-rompimento era nulo, enquanto para Sólidos suspensos totais era equivalente a 2,7%. Além disso, ocorreram violações para os parâmetros *E. coli* (8%) e Fósforo total (4,3%). Para *E.coli* este valor foi próximo ou inferior aos registrados nos períodos anteriores, incluindo o *baseline* (22,5%). Do mesmo modo, para Fósforo total, o percentual de violação no período de estiagem/2022 foi próximo ou inferior aos demais períodos de estiagem, bem como em relação ao *baseline* sazonal (14,4%). Já para os traço, não houve registro de violações na estiagem/2021 e estiagem/2022, indicando melhores condições frente aos períodos anteriores e ao *baseline* sazonal.

Para a região 2B, Tabela 6.3-6, a qual compreende os pontos de monitoramento BP099 (Igam) e PT20, PT28 e PT21 (VALE), 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 lêntico, favorável à sedimentação das partículas e consequente atenuação das concentrações na superfície da água. Nesta região, no período de estiagem/2022, dentre os parâmetros majoritários, foram registradas violações apenas para Alumínio dissolvido (22%) e Ferro Dissolvido (7,5%), todos eles superiores aos percentuais registrados no período de estiagem anterior, estiagem/2021, e ao *baseline* de estiagem.

Dentre os demais parâmetros avaliados na região 2B, ocorreram violações pontuais para Cádmio total e Zinco total no PT-28 (Tabela 6.3-8), com ambos os resultados confirmados pelo laboratório, embora devam ser considerados com ressalva, dada a não persistência desta condição ao longo do tempo. Além de pH, *E. coli e* Fósforo total no PT-20 e sólidos suspensos totais no PT-28 e PT-21. Apesar dos desvios serem pontuais, em termos percentuais ainda se mantiveram acima da condição do *baseline* sazonal, com exceção do Zinco total para o qual houve registro de 6,3% de violações na série histórica pré-rompimento.

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 6.3-7 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. Dentre os majoritários, na estiagem/2022, houve violação apenas para Alumínio dissolvido (31%) e Ferro dissolvido (4,2%), ambos os percentuais superiores aos registrados no período de estiagem/2021 (13,5% e 0%, respectivamente) e ao *baseline* de estiagem (18,2% e 0%, respectivamente). Conforme indicado na Tabela 6.3-8, apenas o ponto PT-22 não registrou nenhum desvio para os majoritários. Para os físico-químicos, houve violação para Oxigênio dissolvido (0,5%), pH (1,8%) e Sólidos suspensos totais (0,3%), com condição de ausência de desvios no *baseline* de estiagem para estes parâmetros. Para os demais parâmetros analisados e traço, houve registro pontual de violação para Cobre dissolvido apenas no JRB-02 (Tabela 6.3-8).

6.3.1. Mapas temáticos - VMP

Nas Figuras 6.3.1.1 a 6.3.1.4, 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 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. Assim, é possível visualizar a condição de afastamento e aproximação de tais resultados em relação aos limites legais nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. Os mapas para cada mês, compreendido entre janeiro/2019 e setembro/2022, são apresentados no ANEXO VI-B.

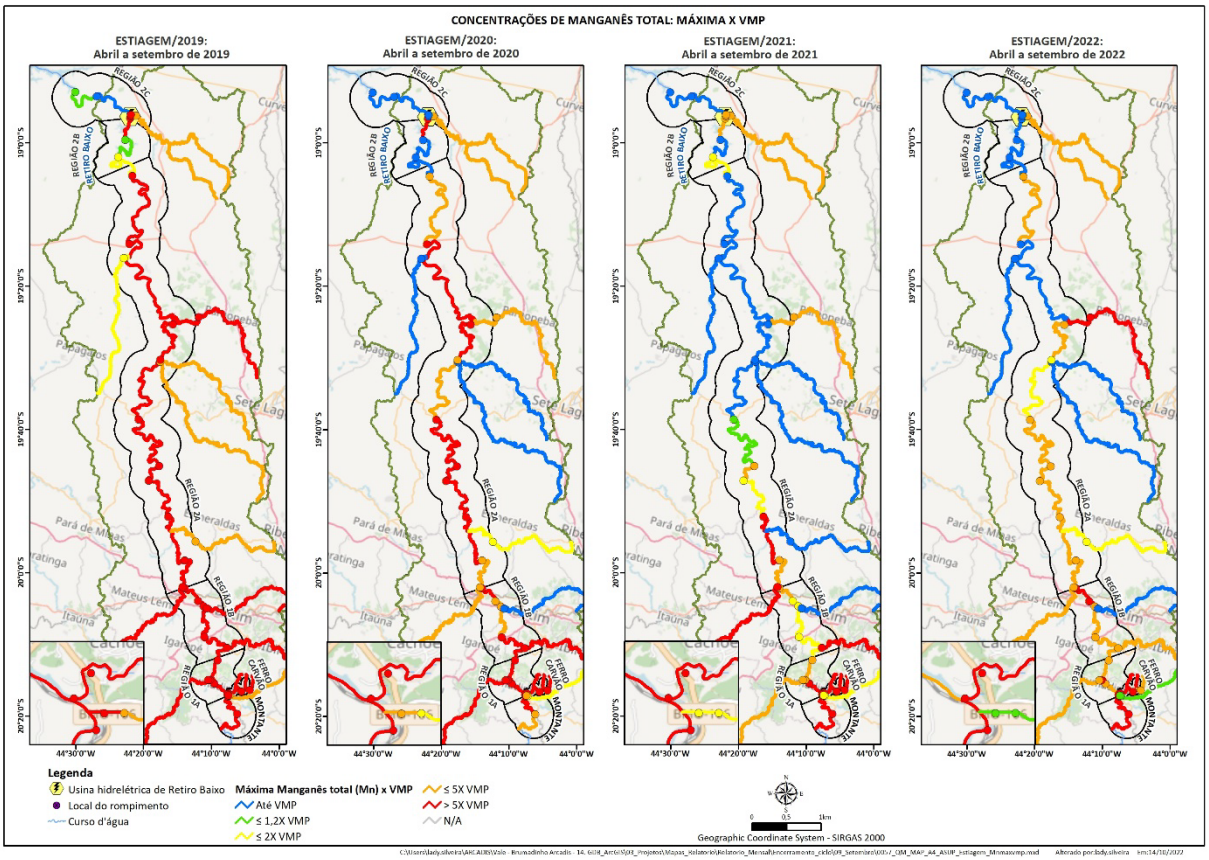
Verifica-se que, após o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, nos primeiros meses subsequentes, os metais marcadores apresentaram substancial comportamento de violações aos padrões em função dos impactos do citado evento e tendência de aumento em função das precipitações registradas na época.

Ao longo dos meses, especialmente com o avanço do período de estiagem/2019, com consequente redução de arraste hidráulico das vazões do rio Paraopeba, as respectivas concentrações se atenuaram, reduzindo suas condições de violações. Ao longo do período de estiagem/2020, observa-se notório retorno às condições de menor violação dos parâmetros analisados e compatíveis à redução da energia hidráulica das vazões do rio Paraopeba e do escoamento difuso das áreas de contribuição de entorno. Esse mesmo comportamento se estendeu durante o período de estiagem referente ao ano de 2021, com menores condições de afastamento aos respectivos VMPs ao longo das regiões monitoradas. Já no período de estiagem/2022, em geral, nota-se maiores afastamentos aos limites legais se comparado ao período de 2021. No período chuvoso anterior, chuva 2021/2022, como destacado no capítulo de caracterização hidrológica, foram observadas intensas chuvas, especialmente, no mês de janeiro/2022, em que ocorreram alterações mais pronunciadas e que apesar de terem sido gradualmente atenuadas ainda reverberaram no período de estiagem/2022.

Para o Manganês total (Figura 6.3.1), comparando-se os períodos de estiagem dos três últimos anos, identifica-se redução expressiva das concentrações máximas ao longo do tempo em grande parte da extensão do rio Paraopeba, com destaque para as regiões 1A, 1B e 2A. Na região de Montante, não afetada, e no Ferro-Carvão as concentrações deste analito se mantém, em geral, mais que 5 vezes acima do VMP. Já as regiões 2B e 2C apresentam comportamento mais próximo entre os períodos monitorados, com menores afastamentos ao limite legal, corroborando com as condições do ambiente de maior sedimentação das frações totais e um menor arraste hidráulico. No último período avaliado, estiagem/2022, observa-se condição aproximada em relação ao período de estiagem anterior, estiagem/2021, nas regiões de Montante, Ferro-Carvão e 1A, e maiores afastamentos ao VMP para as regiões 1B e 2A, com concentrações máximas, em geral, até 5 vezes o VMP. Nota-se que o tributário ribeirão do Cedro que desagua na região 2A, apresentou concentrações máximas de Manganês total superiores a 5 vezes o VMP, condição também verificada na estiagem/2019. Por fim, nas regiões mais distais e sob influência do reservatório de Retiro Baixo, 2B e 2C, as concentrações

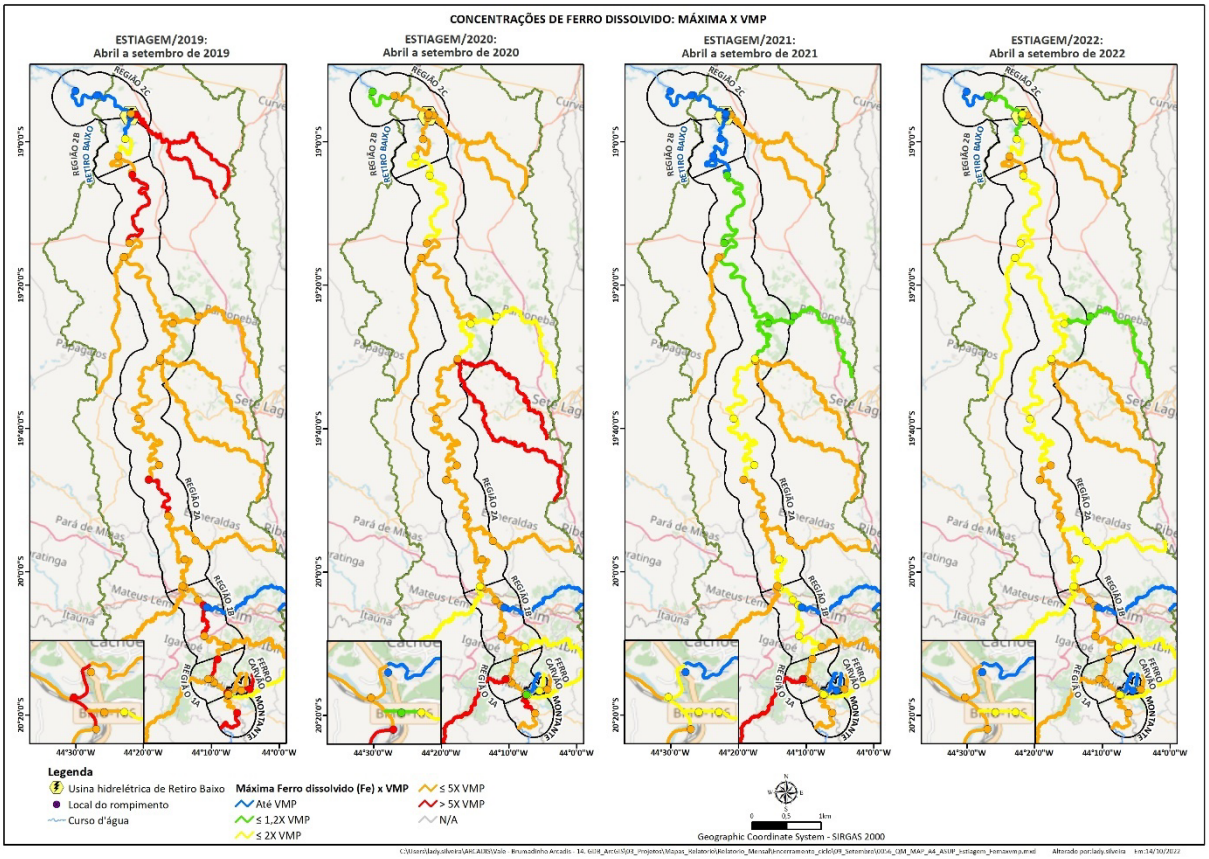
máximas de Manganês total permaneceram abaixo do limite estabelecido na legislação vigente.

Figura 6.3.1-1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP.



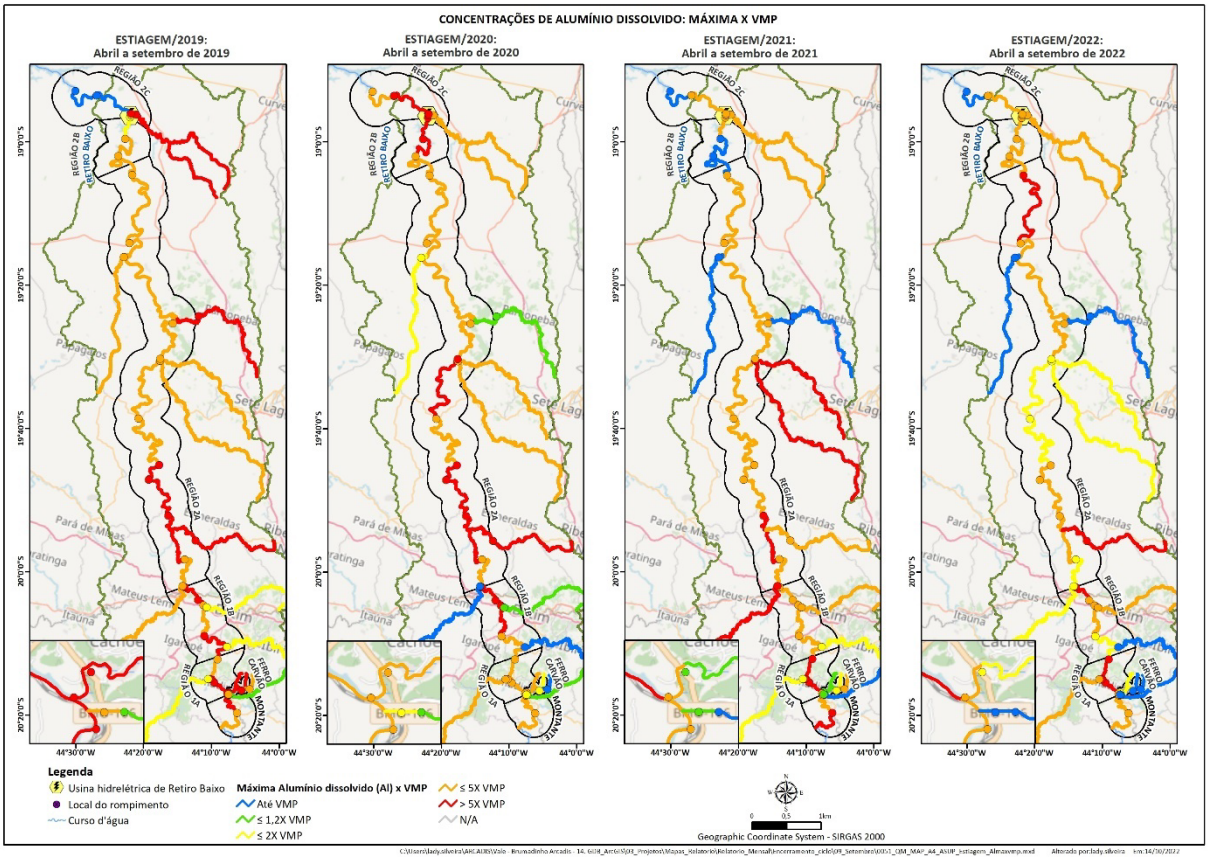
Para Ferro dissolvido (6.3.1.2), ao se analisar as concentrações máximas nos períodos de estiagem dos anos de 2019, 2020, 2021 e 2022, nota-se certa proximidade das condições de afastamento em relação ao VMP ao longo dos períodos. Registros acima do VMP se estendem por grande parte do rio Paraopeba, salvo nas Regiões 2B e 2C no período de estiagem/2021. Quando se compara a estiagem/2021 com a estiagem/2022, observa-se maiores afastamentos em relação ao VMP desde a região 1B até a região 2C, com concentrações máximas de Ferro dissolvido variando de 1,2 vezes acima do VMP até 5 vezes superiores ao VMP.

Figura 6.3.1-2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP.



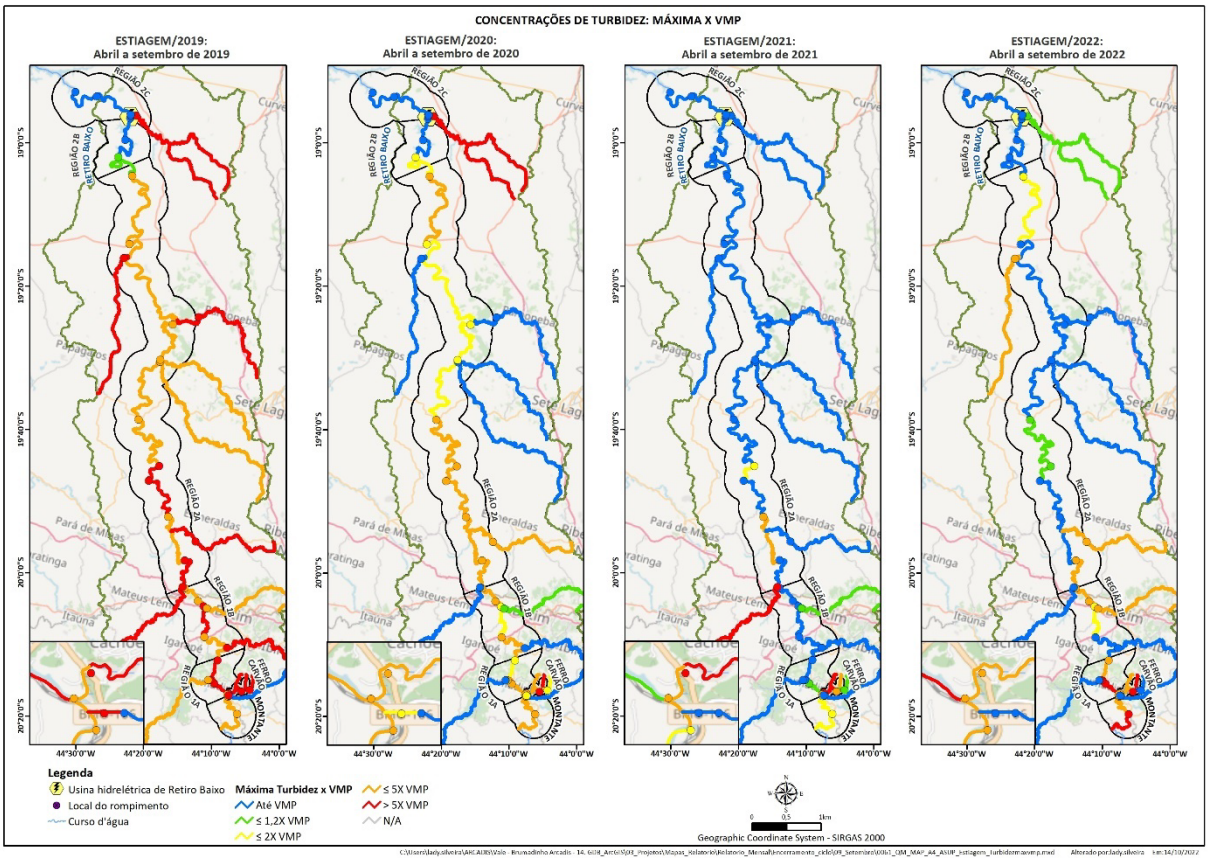
Para o Alumínio dissolvido (Figura 6.3.3), observa-se, de maneira geral, que este analito apresenta concentrações máximas acima do VMP ao longo de toda bacia e períodos analisados, incluindo os afluentes monitorados do rio Paraopeba, com valores bem acima do preconizado na legislação. De modo geral, no período de estiagem atual, as maiores violações (nas cores laranja e vermelho) para o Alumínio dissolvido se centralizaram entre os trechos de Montante, 1A, 1B e nos pontos finais da região 2A, na região 2B e 2C. Conforme indicado no tópico anterior, as violações observadas na Região Montante refletem as atividades de mineração e dragagem de areia na porção mais alta da bacia, bem como a constituição geológica regional no alto rio Paraopeba. A Região 2A configura uma área de condições geológicas regionais com riqueza natural de compostos contendo Alumínio. Enquanto na Região 2B é observada influência do regime hidráulico lêntico do reservatório da UHE Retiro Baixo, o que viabiliza a redução das concentrações em comparação aos trechos de montante. A Região 2C, encontra-se sob influência direta das defluências do reservatório e recebe contribuição advinda da bacia do tributário ribeirão dos Gomes, no qual as concentrações máximas foram até 5 vezes superiores ao VMP. Ressalta-se que a grande diferença de vazão entre o rio Paraopeba e esse tributário aumenta, substancialmente, a capacidade de diluição do rio principal.

Figura 6.3.1-3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP.



Por fim, em relação aos valores analisados para Turbidez (Figura 6.3.4), nota-se comportamento de redução para todas as regiões entre os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020 e estiagem/2021, seguido de aumento na estiagem/2022. Especificamente no último período analisado, destaca-se maiores afastamentos em relação ao VMP nas regiões de Montante, Ferro-Carvão e 1A, com teores máximos até cinco vezes acima do limite legal, o que pode ser associado a condição de elevada precipitação do período chuvoso anterior, chuva 2021/2022, conforme já explicado anteriormente.

Figura 6.3.1-4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP.



6.4. Considerações

No período de estiagem/2022, observam-se maiores percentuais de violação dos parâmetros em relação ao período de estiagem/2021 e à condição do *baseline* sazonal, enquanto nos demais períodos, principalmente estiagem/2019, um maior número de parâmetros violados bem como maiores percentuais foram registrados nas regiões. Neste contexto, têm-se um maior quantitativo de violações para os metais majoritários, com destaque para Ferro e Alumínio dissolvidos nas regiões do rio Paraopeba e Manganês total no Ferro-Carvão. Destaca-se também a ocorrência de violações para o parâmetro sanitário *E. coli* ao longo das regiões.

Além disso, pode ser destacado o elevado percentual de violação para Turbidez na região do ribeirão Ferro-Carvão no período de estiagem/2022. Demais parâmetros, incluindo físico-químicos, em geral apresentaram apenas violações pontuais. Além disso, ressalta-se que para os parâmetros traço não houve violações nas regiões 1A a 2A. Nas regiões do ribeirão Ferro-Carvão e Montante ocorreram violações pontuais apenas para Chumbo total, destacando-se a ocorrência de inconformidades também na condição pré-rompimento e em trecho não afetado pelo rompimento. Já na região 2B, foram identificadas violações pontuais para Cádmio total e Zinco total, sem persistência de valores elevados destes analitos ao longo do tempo. Na região 2C violação pontual ocorreu para Cobre dissolvido. Vale apontar, ademais, que violações mais recorrentes ocorreram nas regiões mais afetadas (Ferro-Carvão, 1A, 1B e início da 2A), além de serem percebidas, também, na Região Montante. Na região 2B, de característica lêntica, e na região 2C pós reservatório de Retiro Baixo, os resultados apresentaram-se mais atenuados, assim como, os percentuais de violação mais reduzidos.

Considerando a avaliação do último período de chuva 2021/2022, apresentada detalhadamente no último Relatório de Fechamento de Ciclo protocolado (ARCADIS, 2022b), notou-se manutenção ou aumento nas concentrações dos metais marcadores, bem como dos percentuais de violação, para algumas regiões quando comparados aos períodos de chuva abrangidos entre os anos de 2019 e 2022, o que pode ser consequência das intensas chuvas ocorridas e dos significativos incrementos de vazões no rio Paraopeba, principalmente em janeiro/2022. Os efeitos dos volumes de chuva precipitados no período chuvoso anterior (2021/2022), com reflexo no aumento das vazões na bacia como um todo, podem ter reverberado na estiagem seguinte, estiagem/2022, justificando, em parte, as violações registradas no período de estiagem vigente.

7. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba nas imediações das captações de água para consumo humano de acordo com as alterações sazonais

7.1. Objetivo

Neste item, objetiva-se avaliar o comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba nas imediações das captações de água para consumo humano ao longo dos ciclos sazonais correspondentes aos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 bem como comparar com os resultados históricos dos pontos de monitoramento do Igam.

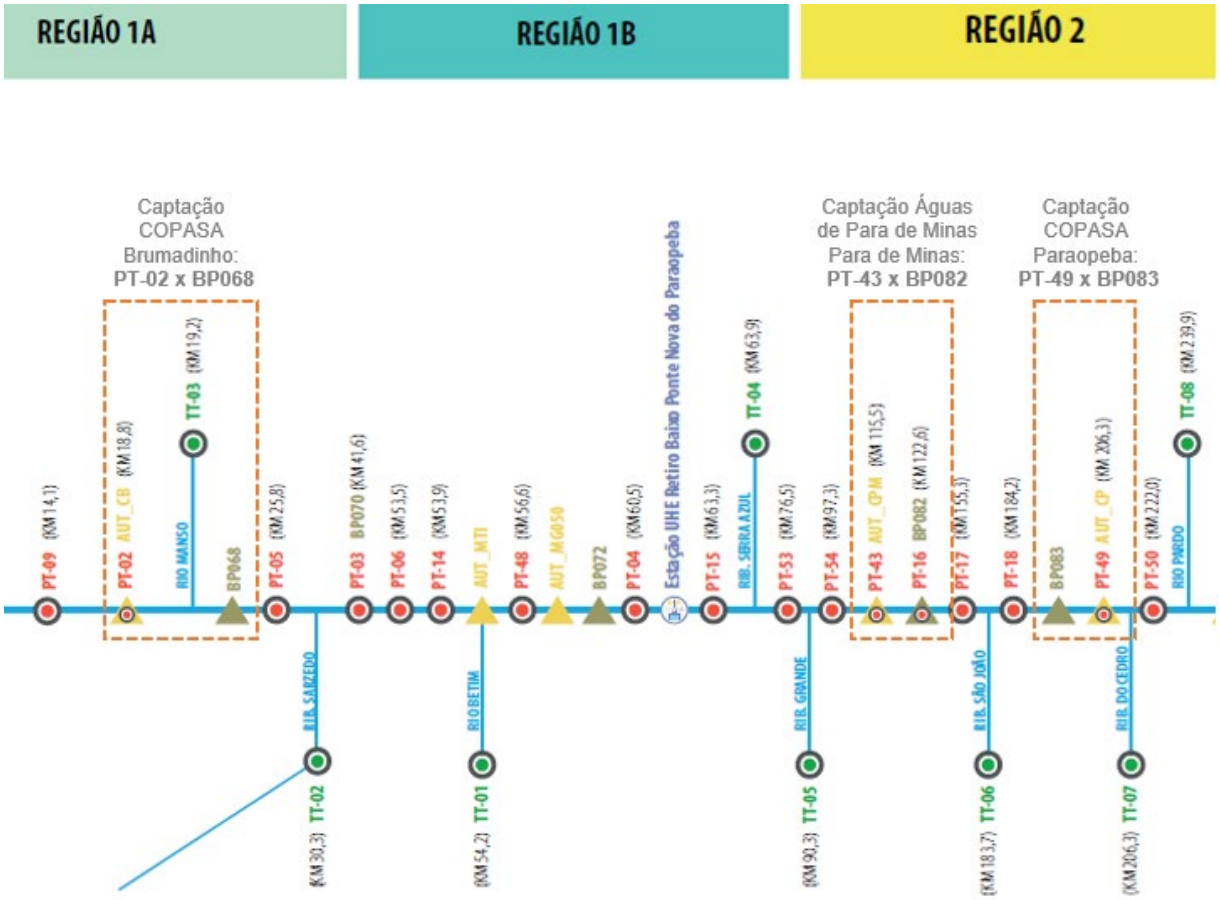
7.2. Metodologia

Após o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, no intuito de se verificar a qualidade da água do rio Paraopeba nas imediações das captações para abastecimento humano, foram avaliados os resultados do monitoramento da qualidade da água nos pontos próximos a essas estruturas e comparados com os resultados históricos do monitoramento efetuado pelo Igam.

Para tal, foram considerados os pontos de monitoramento (VALE e Igam) próximos às captações de água para abastecimento público dos seguintes municípios:

- Brumadinho (**PT-02 x BP068**), cuja distância entre esses pontos é de aproximadamente 5,33 km;
- Pará de Minas (**PT-43 x BP082**), cuja distância entre esses pontos é de aproximadamente 7,21 km;
- Paraopeba (**PT-49 x BP083**), com distanciamento de aproximadamente 14,42 km, conforme indicado na Figura 7.2.1.

Figura 7.2-1: Localização dos pontos de Captação no Diagrama Unifilar.



Elaboração: Arcadis, 2021.

Um conjunto de parâmetros foi selecionado, considerando seu caráter de potencial poluidor, de uso e ocupação do solo, de contexto geológico da bacia e possível relação com o rejeito proveniente do rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, a saber: Manganês total, Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Arsênio total, Bário total, Chumbo total, Cobre dissolvido, Fósforo total, Mercúrio total, Níquel total, Zinco total e Turbidez. Os resultados analíticos foram comparados aos valores de *baseline* dos pontos de monitoramento do Igam e aos padrões de Classe 2 dos trechos fluviais, segundo a Deliberação Normativa COPAM-CERH 08/2022.

Os resultados de monitoramento foram analisados, considerando os teores registrados no período de estiagem/2019 (abril a setembro/2019), estiagem/2020 (abril a setembro/2020), estiagem/2021 (abril a setembro/2021) e estiagem/2022 (abril a setembro/2022). Em seguida, os percentuais de violação foram verificados ao longo dos quatro períodos sazonais de estiagem mencionados. Os resultados dos períodos de chuva monitorados, podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 31/03/2022 (ARCADIS, 2022b).

No ANEXO VII, estão apresentados gráficos com a comparação dos resultados máximos mensais dos períodos de estiagem, e os respectivos *baselines* sazonais do Igam para os trechos analisados.

Vale ressaltar que, conforme disposto nas premissas de elaboração do presente documento, para os resultados analíticos, cujos valores se apresentaram inferiores ao Limite de Quantificação (LQ) dos laboratórios responsáveis, foi utilizada a padronização do menor valor de LQ. Entretanto, para os dados brutos apresentados nos gráficos, os diferentes valores de LQ foram mantidos.

7.3. Resultados e discussão

7.3.1. Município de Brumadinho - Captação COPASA

O ponto de captação da concessionária COPASA, no município de Brumadinho, encontra-se localizado a aproximadamente dez quilômetros da confluência entre o rio Paraopeba e o ribeirão Ferro-Carvão, sendo o ponto mais próximo à área do rompimento (~18km). No Gráfico 7.3.1-1 e na Tabela 7.3.1-1, podem ser consultados, respectivamente, os resultados do monitoramento e os percentuais de violação nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 relativos a este trecho de captação (ponto Vale PT-02 e ponto Igam BP068).

Na comparação entre os períodos de estiagem, em linhas gerais, foi possível observar valores mais elevados nos meses referentes ao período de estiagem/2019, principalmente nos meses de abril e maio/2019, justificado pela maior proximidade em relação à data de ocorrência do rompimento da barragem. Nos períodos seguintes, observa-se um certo padrão, em que os teores dos analitos apresentaram-se mais reduzidos e, em geral, com variabilidade da mesma ordem de grandeza, com destaque para as frações totais. Já para alguns analitos na fração dissolvida, como Alumínio e Ferro, com relação a distribuição dos resultados, nota-se incremento das concentrações e prevalência de maiores resultados no período de estiagem/2022, destacando-se os meses de abril e maio/2022. Importante ressaltar que tal condição também foi verificada ao considerar os períodos de chuva avaliados no Relatório de Fechamento de Ciclo anterior (ARCADIS, 2022b) e permaneceu no ponto PT-52 localizado na região de Montante não afetada (ANEXO IV A), o que pode indicar condições de solubilização inerentes à própria bacia.

Para Manganês total, as concentrações registradas no período de estiagem/2022 mantiveram-se próximas dos resultados do período anterior, estiagem/2021, com exceção dos meses de abril e maio/2022, para os quais os resultados apresentaram-se mais elevados. Tal condição pode ser reflexo dos altos volumes de precipitação do período de chuva anterior, reverberando ainda nos meses iniciais do período de estiagem. Em relação aos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020, bem como em relação ao *baseline* sazonal, em geral, as concentrações de Manganês total foram próximas ou mais atenuadas no período atual. Em termos de inconformidades, nota-se incremento do percentual no atual período de estiagem (58,5%), se

comparado aos períodos de estiagem/2021 (24,6%) e estiagem/2020 (57,1%), porém redução em relação ao período de estiagem/2019 (78,6%) e ao *baseline* sazonal (72,2%).

Já para o parâmetro Ferro dissolvido, com exceção dos valores mais extremos identificados no período de estiagem/2019 (até 1,5 mg/L no mês de abril), mais próximo ao rompimento, observou-se prevalência de maiores concentrações no atual período de estiagem analisado. Em relação ao *baseline* de estiagem, as concentrações de Ferro dissolvido também foram mais elevadas no período de estiagem/2022, sendo a concentração máxima registrada no ponto do Igam (BP068) equivalente a 0,87 mg/L. Em termos de violação, os percentuais oscilaram ao longo dos períodos de estiagem monitorados: estiagem/2019 (47,3%), estiagem/2020 (81,0%), estiagem/2021 (66,2%) e estiagem/2022 (75,6%). Em todos os casos, os percentuais de violação registrados pós-rompimento foram substancialmente superiores ao *baseline* (13,5%).

Da mesma forma, quanto ao Alumínio dissolvido, notou-se predomínio de concentrações mais elevadas no atual período de análise, principalmente no mês de abril/2022, característico de período de transição sazonal. Em termos do registro de inconformidades, em relação aos períodos de estiagem anteriores, o percentual de violação do atual período de análise, estiagem/2022, também foi mais elevado, conforme indicado a seguir: estiagem/2019 (29,1%), estiagem/2020 (26,7%), estiagem/2021 (51,4%) e estiagem/2022 (65,9%). Vale destacar, ainda, que o *baseline* de estiagem indica 18,2% de violações para Alumínio dissolvido, valor este bem inferior aos percentuais observados pós rompimento.

Para Turbidez, observa-se condição semelhante à discutida para o parâmetro Manganês total, com proximidade dos teores registrados no período atual, com exceção do mês de abril/2022, e àqueles registrados no período anterior, estiagem/2021. Enquanto se comparados aos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020, bem como ao *baseline* sazonal, os resultados do período atual foram próximos ou inferiores. Por outro lado, em termos de violação, os percentuais foram mais elevados no período de estiagem atual (22%) em relação aos períodos de estiagem/2020 (2,9%) e estiagem/2021 (0%), em função dos altos valores de Turbidez registrados no mês de abril/2022, quando os níveis e vazões se mantinham elevados dado o elevado volume pluviométrico registrado no período chuvoso antecedente. Por outro lado, no período de estiagem/2019, mais próximo a ocorrência do rompimento, o percentual foi maior e equivalente a 24,2%. Em todos os casos, com exceção do período de estiagem/2021, os percentuais foram superiores à condição do *baseline* (ausência de violações).

Em relação aos parâmetros traço, nota-se prevalência de resultados baixos e pouco variáveis ao longo dos períodos de estiagem, e consequentemente, ausência de violações aos limites legais, com exceção do período de estiagem/2019. Apenas no período de estiagem/2019 houve registro de violações para Chumbo total (3,3%), Cádmio total (0,5%) e Níquel total (0,5%). Na série histórica pré-rompimento também se observa ausência de desvios para os parâmetros traço, sendo essa condição característica do período de estiagem.

Para os parâmetros físico-químicos (cor verdadeira, oxigênio dissolvido, pH, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais), ocorreram violações apenas para sólidos suspensos totais

(27,5%) no atual período de análise, sendo este percentual superior ao registrado nos demais períodos monitorados, incluindo a condição do *baseline* de estiagem (0%).

Para os parâmetros associados às contribuições difusas e de origem sanitária, no período de estiagem/2022, ocorreu violação para *Escherichia coli*, para o qual o percentual de violação foi equivalente a 94,9%, inferior, com exceção da estiagem/2019, ao registrado nos períodos anteriores, e próximo do *baseline* (94,6%). Houve também violação para Fósforo total, com oscilação dos percentuais entre os períodos, com percentuais mais próximos e elevados nos períodos de estiagem/2019 (10,4%) e estiagem/2022 (10%), ambos acima da condição do *baseline* sazonal (8,1%), e mais reduzidos nos períodos de estiagem/2020 (2,9%) e estiagem/2021 (0,7%).

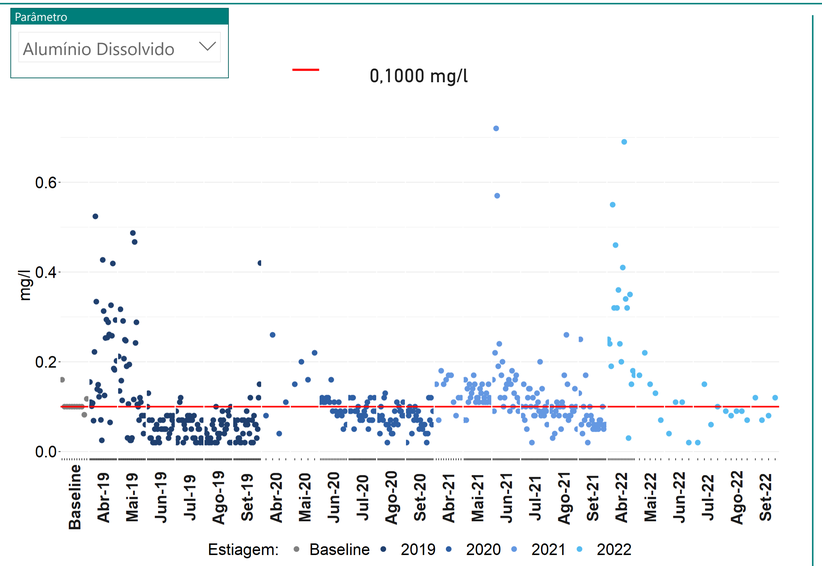
Nesse contexto, cabe destacar, relativa proximidade das condições da qualidade da água no período de estiagem/2022 em relação período de estiagem/2021, em que, em geral, apresentaram menores teores dos parâmetros majoritários de qualidade da água na fração total, bem como menores percentuais de violação, se comparados aos períodos de estiagem de 2019 e 2020. Além disso, observou-se o incremento dos resultados de alguns parâmetros nos meses de abril e maio/2022, o que pode estar atrelado a ocorrência das precipitações no período chuvoso anterior, reverberando ainda os efeitos da elevação dos níveis e vazões e do carreamento difuso de materiais para o interior dos cursos d'água. Especificamente para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, os resultados apresentaram-se mais elevados no período de estiagem/2022 e, com isso, em geral, maiores percentuais de violação foram registrados no período atual.

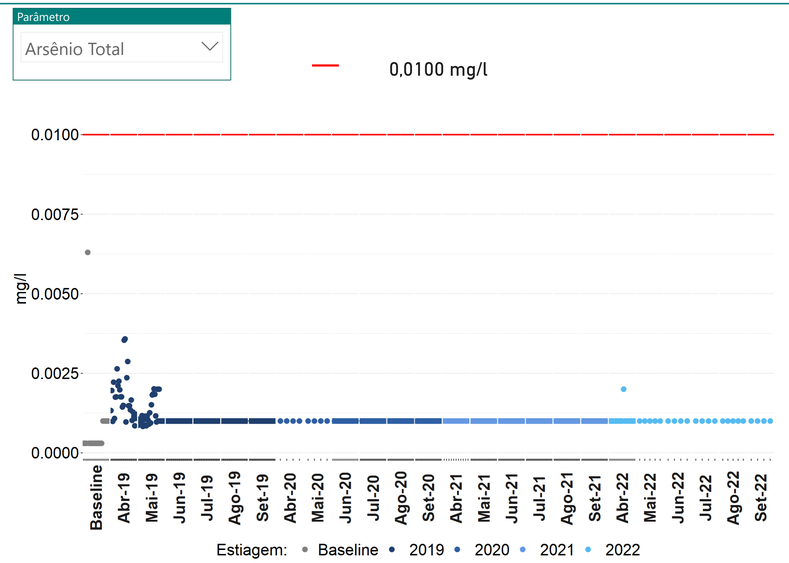
Comparativamente, em relação aos períodos de chuva monitorados, para o PT-02, notou-se o predomínio de melhores condições da qualidade da água, em termos da fração total dos analitos, nos períodos de chuva 2021/2022 e chuva 2020/2021 em relação aos períodos de chuva mais próximos a ocorrência do rompimento. Enquanto para a fração dissolvida, especificamente, de Ferro e Alumínio, do mesmo modo, houve indicativo de elevações entre os períodos sucessivos de chuva. Em termos de violação, destaca-se a maior recorrência de resultados acima do VMP nos períodos de chuva se comparados aos períodos de estiagem, com condições próximas ou superiores à condição do *baseline.* Maiores detalhamentos sobre os resultados dos períodos de chuva são apresentados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 31/03/2022 (ARCADIS, 2022b).

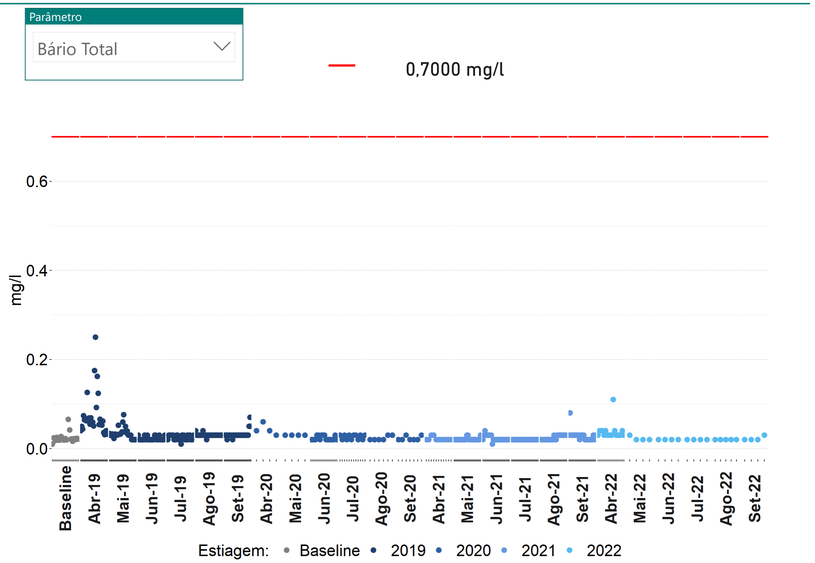
Gráfico 7.3.1-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados no ponto do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

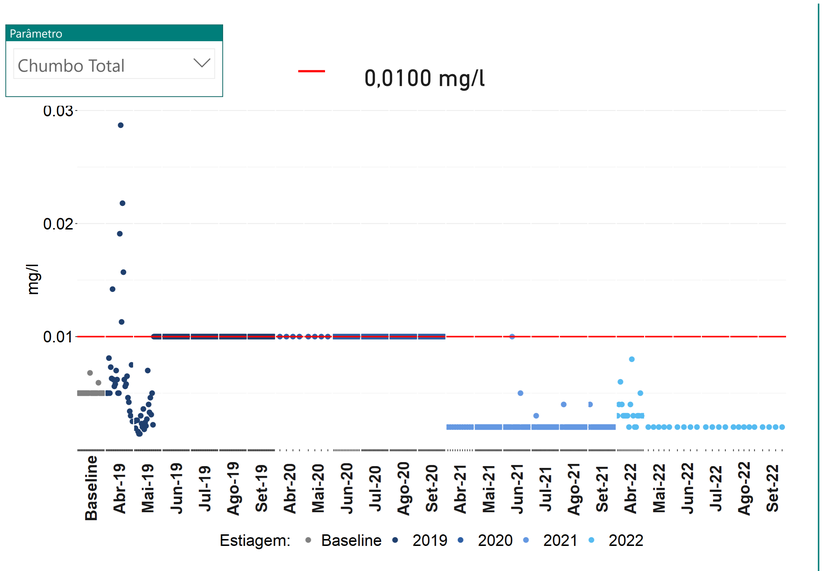
Tabela 7.3.1-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

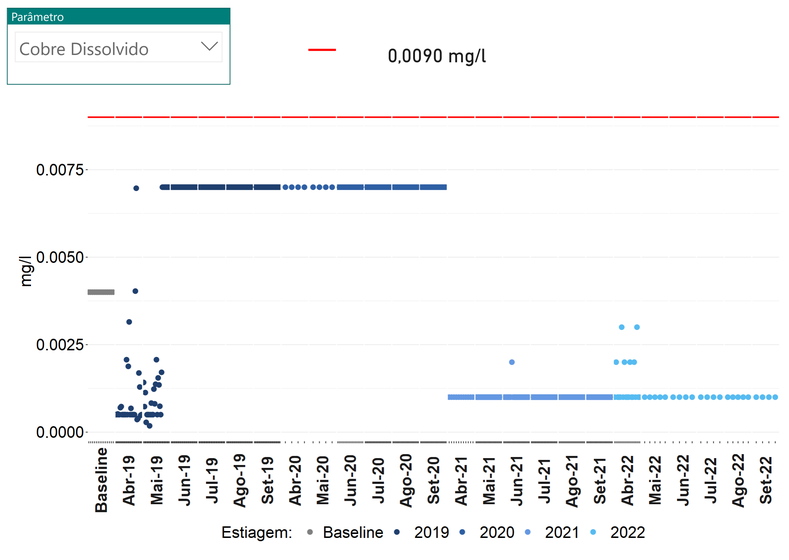
Análise do período de Estiagem- Baseline IGAM(BP068) e Vale(PT-02)

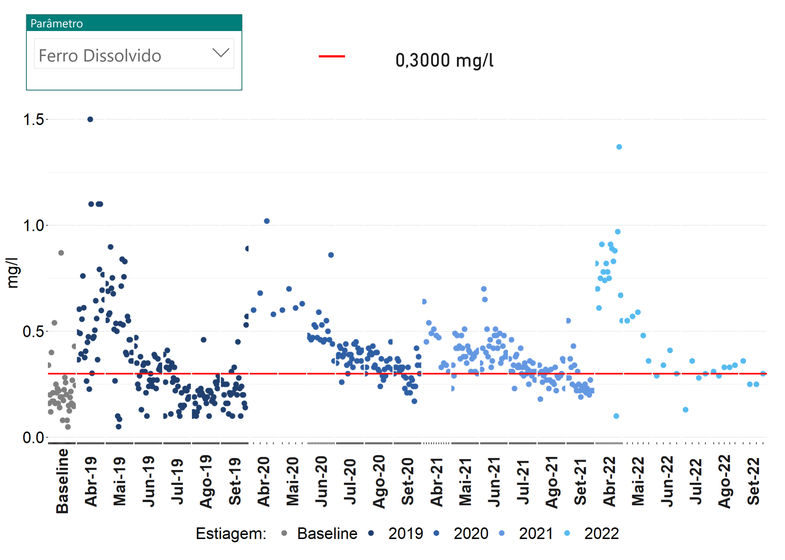




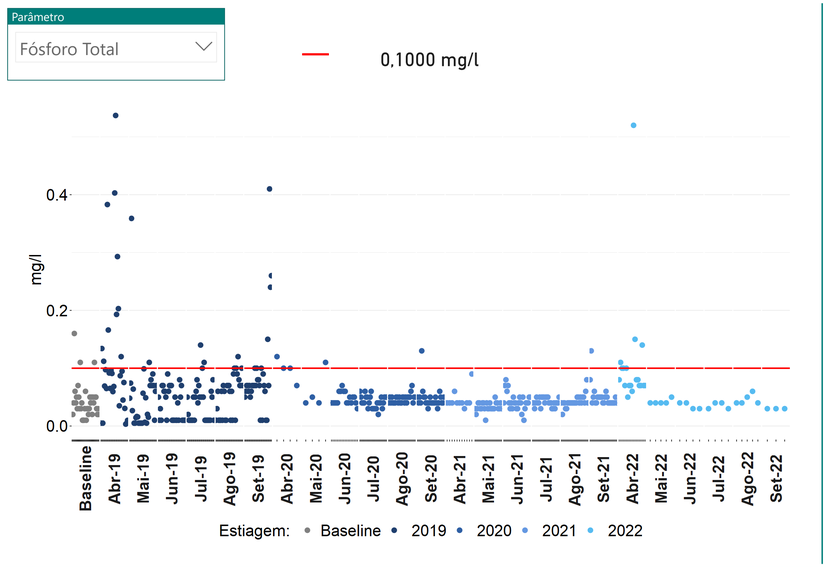


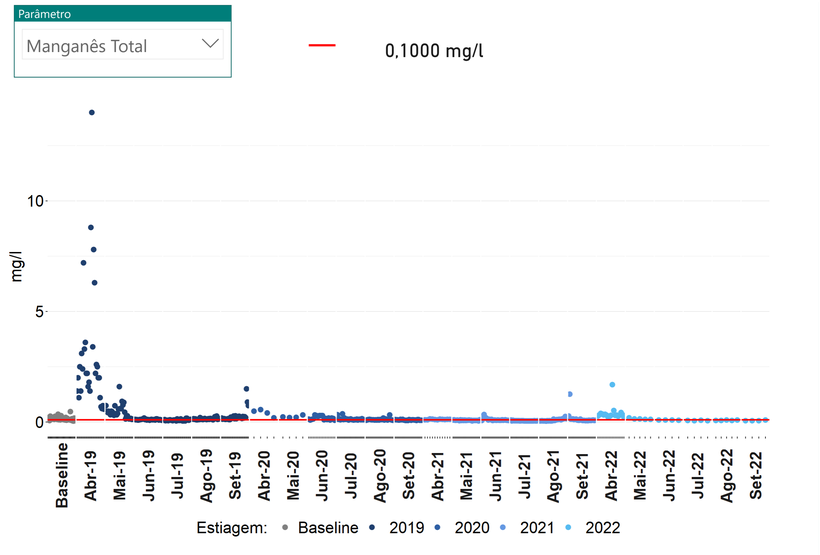


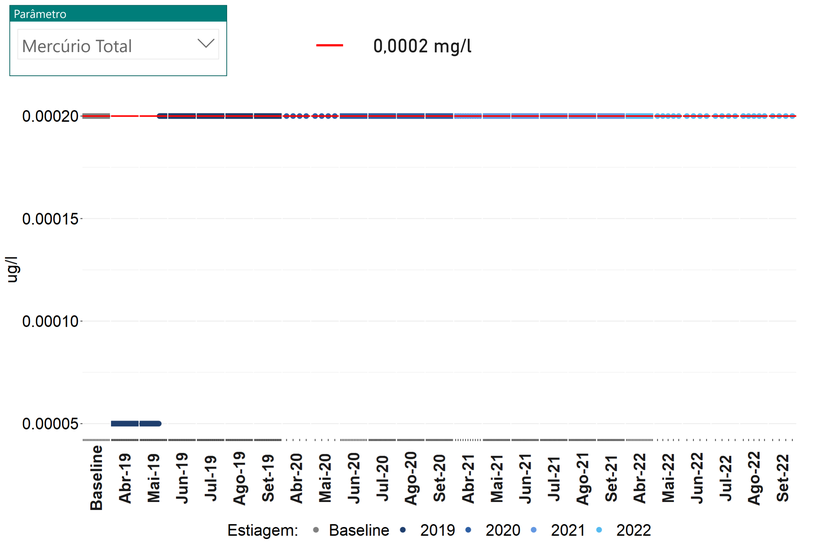


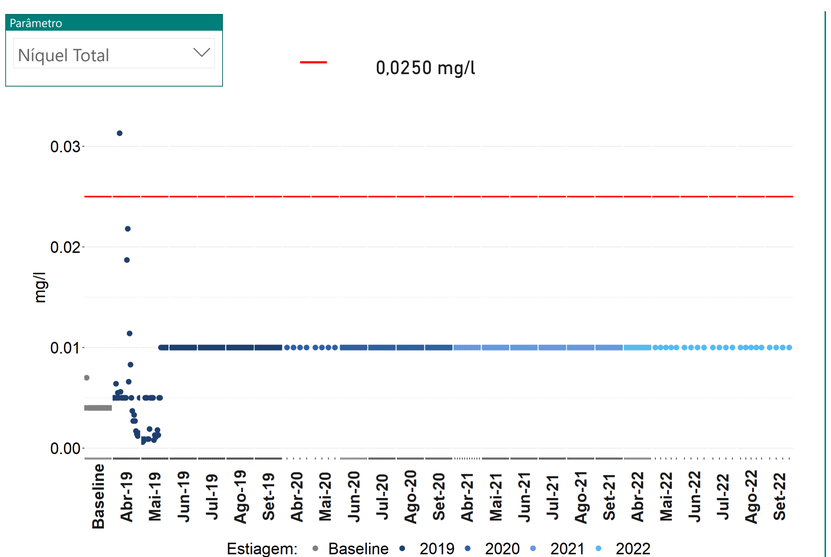


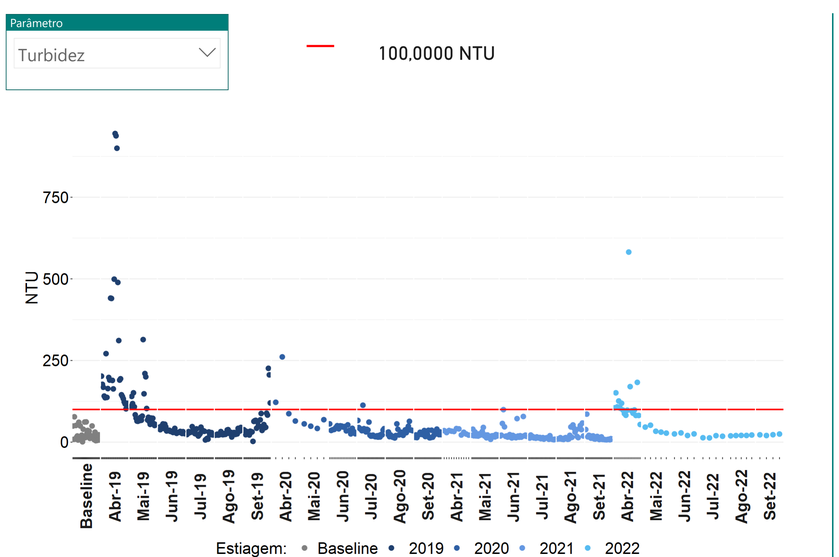
Análise do período de Estiagem- Baseline IGAM(BP068) e Vale(PT-02)

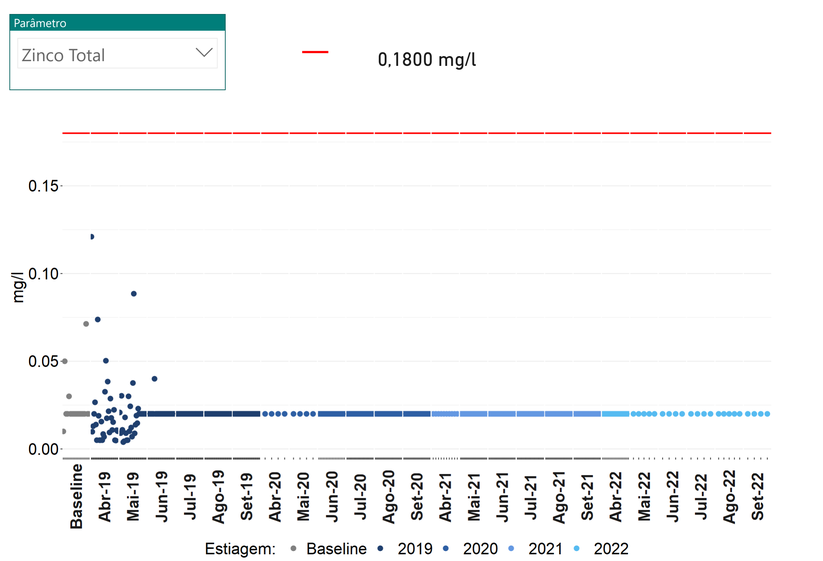












BP068 e PT-02															
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	2	18,2 %	182	53	↗ 29,1 %	105	28	↘ 26,7 %	142	73	↗ 51,4 %	41	27	↗ 65,9 %
Ferro Dissolvido	37	5	13,5 %	182	86	↗ 47,3 %	105	85	↗ 81,0 %	142	94	↘ 66,2 %	41	31	↗ 75,6 %
Manganês Total	36	26	72,2 %	182	143	↗ 78,6 %	105	60	↘ 57,1 %	142	35	↘ 24,6 %	41	24	↗ 58,5 %
Turbidez	37	0	0,0 %	182	44	↗ 24,2 %	105	3	↘ 2,9 %	142	0	↘ 0,0 %	41	9	↗ 22,0 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	29	2	6,9 %	182	16	↗ 8,8 %	51	1	↘ 2,0 %	142	0	↘ 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	181	18	↗ 9,9 %	105	2	↘ 1,9 %	142	6	↗ 4,2 %	41	0	↘ 0,0 %
pH	37	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	142	1	↗ 0,7 %	41	0	↘ 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	0	0,0 %	182	23	↗ 12,6 %	105	3	↘ 2,9 %	142	1	↘ 0,7 %	40	11	↗ 27,5 %
Outros															
Cianeto livre	10	0	0,0 %	111	5	↗ 4,5 %	51	1	↘ 2,0 %	142	0	↘ 0,0 %	39	0	– 0,0 %
DBO	37	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	51	1	↗ 2,0 %	140	0	↘ 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	35	94,6 %	182	158	↘ 86,8 %	51	51	↗ 100,0 %	140	135	↘ 96,4 %	39	37	↘ 94,9 %
Fenóis Totais	37	0	0,0 %	182	2	↗ 1,1 %	51	0	↘ 0,0 %	141	0	– 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Fósforo Total	37	3	8,1 %	182	19	↗ 10,4 %	105	3	↘ 2,9 %	142	1	↘ 0,7 %	40	4	↗ 10,0 %
Nitrato	37	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	51	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	51	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	51	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	51	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	105	0	↘ 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Chumbo Total	29	0	0,0 %	182	6	↗ 3,3 %	105	0	↘ 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	51	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	39	0	– 0,0 %
Cobre Dissolvido	14	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	140	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	182	1	↗ 0,5 %	105	0	↘ 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	142	0	– 0,0 %	41	0	– 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	182	0	– 0,0 %	105	0	– 0,0 %	141	0	– 0,0 %	41	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.

7.3.2. Município de Pará de Minas - Captação Concessionária Águas de Pará de Minas

O trecho da captação do município de Pará de Minas se localiza a aproximadamente 115 km do local de rompimento das barragens B1, B4 e B4-A e a captação é operacionalizada pela Concessionária Águas de Pará de Minas. Por meio do Gráfico 7.3.2-1, podem ser consultados os resultados do monitoramento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no ponto PT-43 (Vale) e o respectivo *baseline* do Igam (ponto BP082). Na Tabela 7.3.2-1, são apresentados os percentuais de violação registrados nos pontos e períodos mencionados.

Na comparação entre os períodos de estiagem para este trecho, no geral, observam-se maiores resultados dos parâmetros majoritários na fração total e parâmetros traço no primeiro período (estiagem/2019), mais próximo ao rompimento, com comportamento mais aproximado entre os demais períodos avaliados. Já para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, observa-se um comportamento mais aproximado entre os períodos monitorados com, em geral, maiores concentrações nos meses iniciais do período de estiagem, sendo eles abril e maio, quando ainda reverberam os efeitos do período chuvoso anterior, seguida de atenuação dos teores nos meses seguintes.

Para o parâmetro Manganês total, no período de estiagem/2022, observam-se maiores concentrações se comparado ao período de estiagem/2021, principalmente no mês de abril, enquanto em relação aos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020, os resultados do atual período de análise apresentaram-se mais atenuados. Em relação ao *baseline* sazonal, os resultados apresentaram magnitude aproximada. Entretanto, ainda que os resultados tenham sido, em geral, inferiores no atual período de análise se comparado aos demais, houve acréscimo no percentual de violação ao padrão legal. Destaca-se neste caso, o menor número de resultados disponíveis para o atual período de análise, dada a frequência de amostragem mensal. Os seguintes percentuais de violação foram registrados nos períodos de estiagem analisados: *baseline* (33,3%), estiagem/2019 (46,4%); estiagem/2020 (46,2%), estiagem/2021 (9,1%) e estiagem/2022 (50%).

Quanto ao Ferro dissolvido, observa-se certo padrão na distribuição dos resultados entre os diferentes períodos de estiagem, com concentrações mais elevadas nos dois primeiros meses, abril e maio, seguida de atenuação gradual e resultados majoritariamente abaixo do VMP (0,3 mg/L). Em termos do *baseline*, nota-se predominância de valores mais elevados na condição pós-rompimento. Em relação aos percentuais de violação ao padrão, houve incremento no último período avaliado: estiagem/2019 (32,2%), chuva/2020 (42,3%), chuva/2021 (22,7%), chuva/2022 (50%). Em todos os casos, os percentuais pós rompimento foram superiores à condição do *baseline* de estiagem para a região (13,5%).

No que se refere ao parâmetro Alumínio dissolvido, observa-se oscilação das concentrações ao longo dos períodos de estiagem sucessivos com, em geral, menores concentrações no atual período de análise, estiagem/2022. Na condição de *baseline*, a variabilidade foi reduzida, com a maior parte dos resultados correspondentes ao VMP (0,1 mg/L). Em termos de percentual de

violação, também houve oscilação entre os períodos avaliados: estiagem/2019 (23%), estiagem/2020 (34,6%), estiagem/2021 (50%) e estiagem/2022 (25%). Além disso, o *baseline* de estiagem é substancialmente inferior para este analito, correspondente à 9,1% de inconformidades.

Para Turbidez, o comportamento assemelha-se ao discutido para Manganês total, com resultados mais elevados no período atual se comparado ao período de estiagem/2021, principalmente no mês de abril, porém mais atenuados em relação aos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020. Em relação ao *baseline* de estiagem, os teores de turbidez da estiagem/2022 mantiveram-se próximos ou mais reduzidos. Em termos dos percentuais de violação, ocorreu redução acentuada no período atual se comparado aos períodos de 2019 (13,7%) e 2020 (11,5%), sendo este percentual nulo e equivalente ao *baseline* de estiagem e ao período de estiagem anterior, estiagem/2021, para os quais também não foram registrados desvios.

Em relação aos parâmetros traço, os resultados foram pouco variáveis ao longo dos períodos de monitoramento avaliados e, em geral, abaixo dos respectivos limites de quantificação. Violação pontual ocorreu apenas para Arsênio total na estiagem/2020, com 1 resultado acima do VMP (0,01 mg/L) dentre as 26 amostras analisadas.

Para os parâmetros físico-químicos, no atual período de análise ocorreu violação para oxigênio dissolvido (37,5%), pH (25%) e sólidos suspensos totais (12,5%), sendo esses percentuais superiores se comparados aos registrados nos períodos de estiagem precedentes, incluindo a condição do *baseline* sazonal.

Em relação aos parâmetros associados às contribuições difusas e de origem sanitária, no período atual, houve acréscimo dos percentuais de violação para o parâmetro *E. coli*. No período de estiagem/2022, 50% dos resultados ficaram acima do limite legal, enquanto na estiagem/2021 não houve violação e nas estiagens de 2019 e 2020, os percentuais foram equivalentes a 8,7% e 19,2%, respectivamente. No âmbito do *baseline,* o percentual de violação para *E. coli* é de 35,1%. Destaca-se também a ocorrência de violações para Fósforo total na estiagem/2022, com oscilação dos resultados entre os diferentes períodos de estiagem monitorados, sendo eles: *baseline* (32,4%), estiagem/2019 (54,6%), estiagem/2020 (3,8%), estiagem/2021 (63,6%), estiagem/2022 (25%). Logo, observa-se que, no período de estiagem/2022, a maioria dos resultados deste analito ficaram abaixo do VMP (0,1 mg/L), bem como da condição do *baseline* sazonal

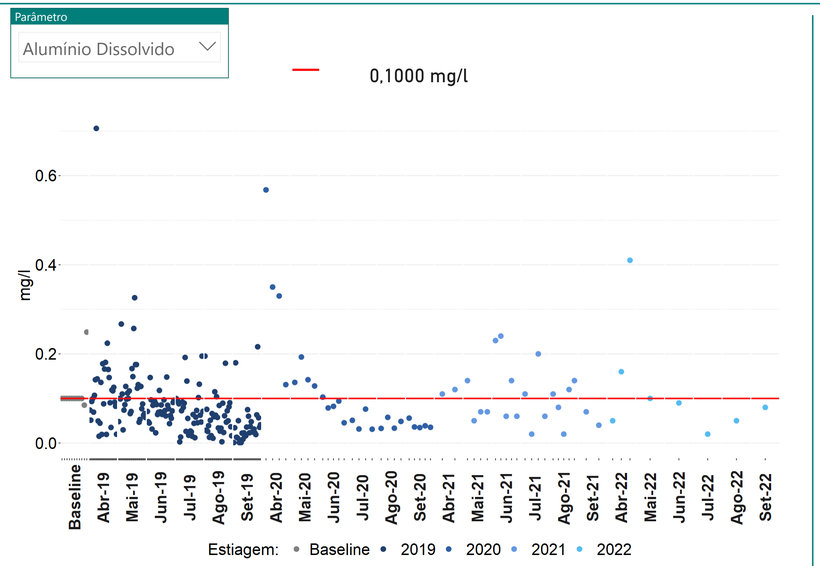
Nesse contexto, em geral, observou-se teores próximos dos parâmetros majoritários de qualidade da água na fração total entre os períodos de estiagem avaliados, com exceção do ano de 2019, para os quais os resultados apresentaram-se mais elevados. Esse comportamento, em geral, também foi observado para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, destacando-se menores concentrações destes analitos no atual período de análise. Por vezes, em termos dos percentuais de violação, houve oscilação entre os períodos analisados com maiores percentuais no período de estiagem/2022 para Ferro e Alumínio dissolvido, redução para Manganês total e ausência de violações para Turbidez.

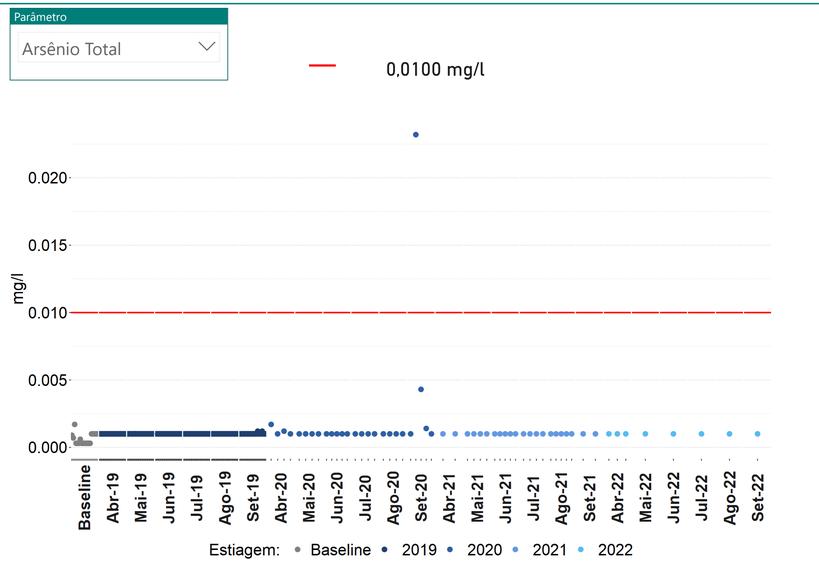
Na comparação entre os períodos de chuva para este trecho, conforme indicado no último relatório de Fechamento de Ciclo protocolado (ARCADIS, 2022b), foram observados maiores resultados dos parâmetros majoritários na fração total e parâmetros traço nos dois primeiros períodos, chuva/2019 e chuva 2019/2020, com destaque para este último mencionado, quando o volume precipitado também foi bastante elevado. Por outro lado, para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, assim como observado no trecho anterior e em outros pontos monitorados na bacia do rio Paraopeba, notou-se incremento das concentrações entre os períodos de chuvas sucessivos, com 100% dos resultados do período de chuva 2021/2022 acima dos limites legais estabelecidos na legislação vigente. Essa condição, por outro lado, não se manteve no período de estiagem vigente.

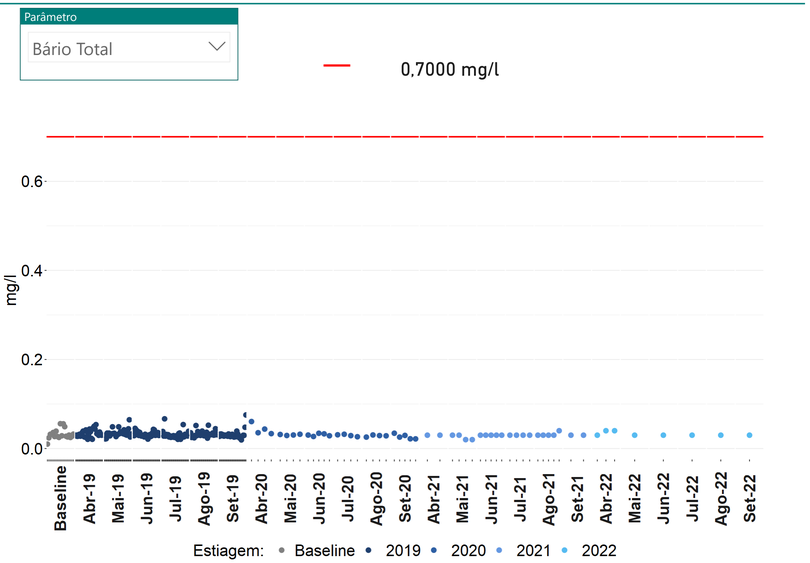
Gráfico 7.3.2-1:Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

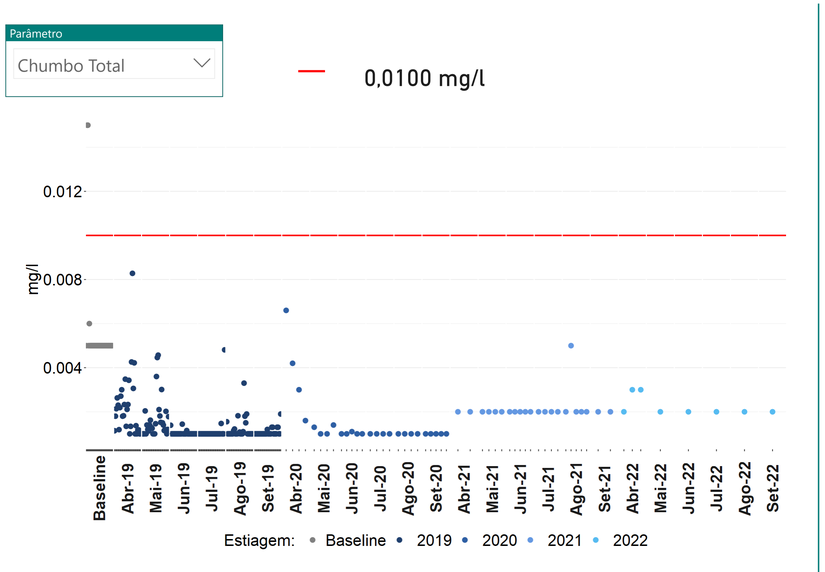
Tabela 7.3.2-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

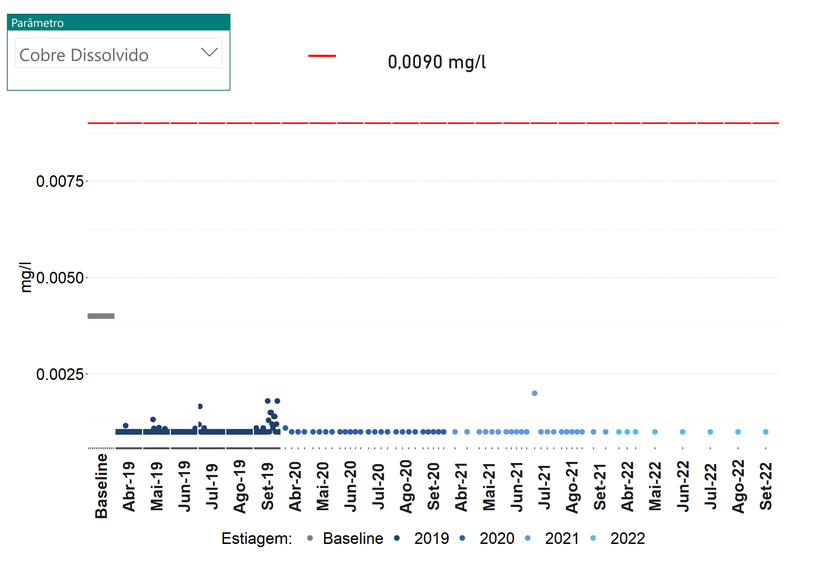
Análise do período de Estiagem- Baseline IGAM(BP082)x(BPE03) e Vale(PT-43)

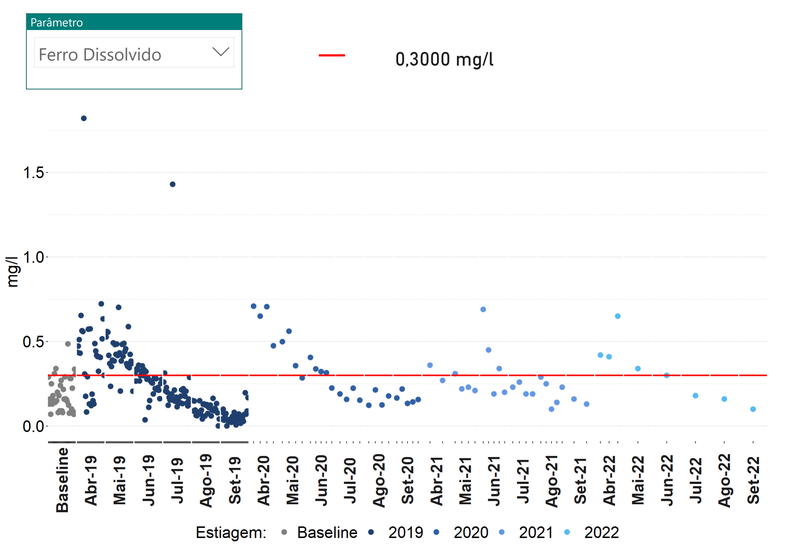






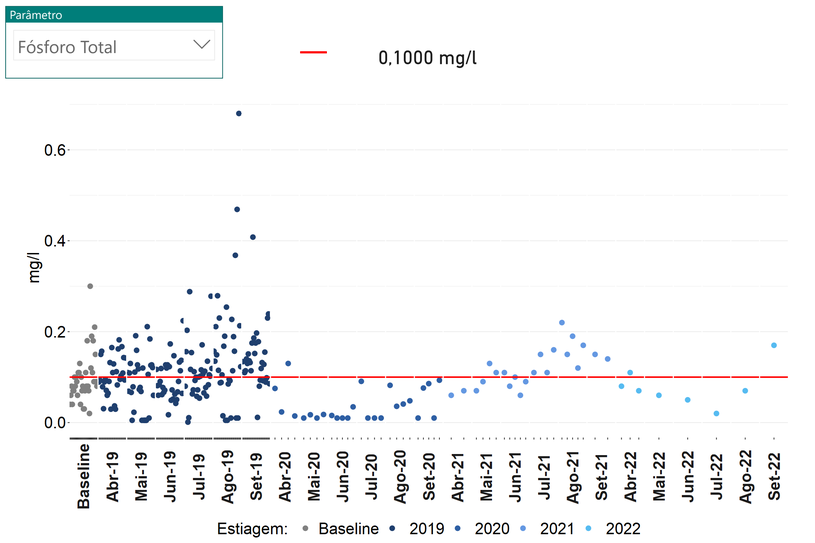




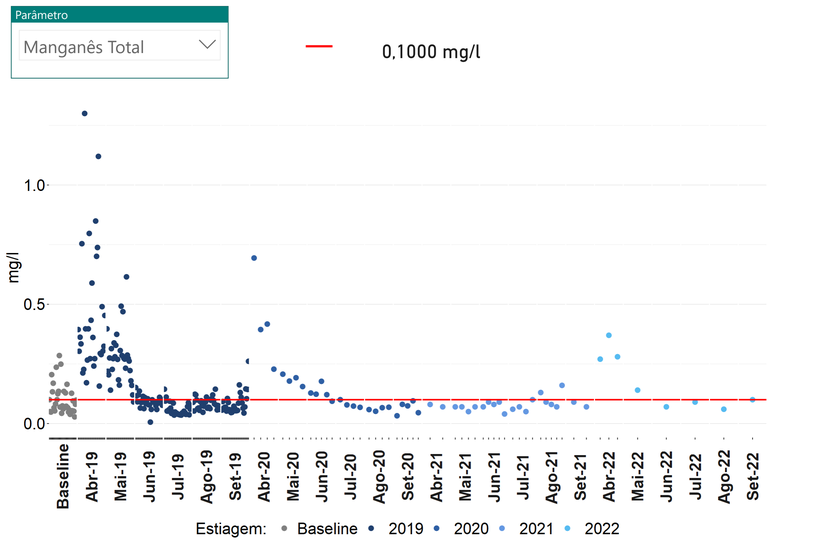


Análise do período de Estiagem- Baseline IGAM(BP082)x(BPE03) e Vale(PT-43)

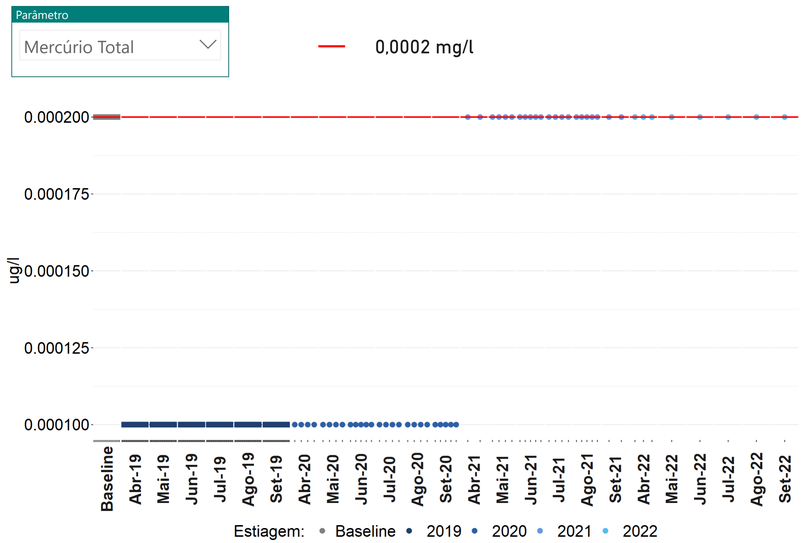
Parâmetro: Fósforo Total



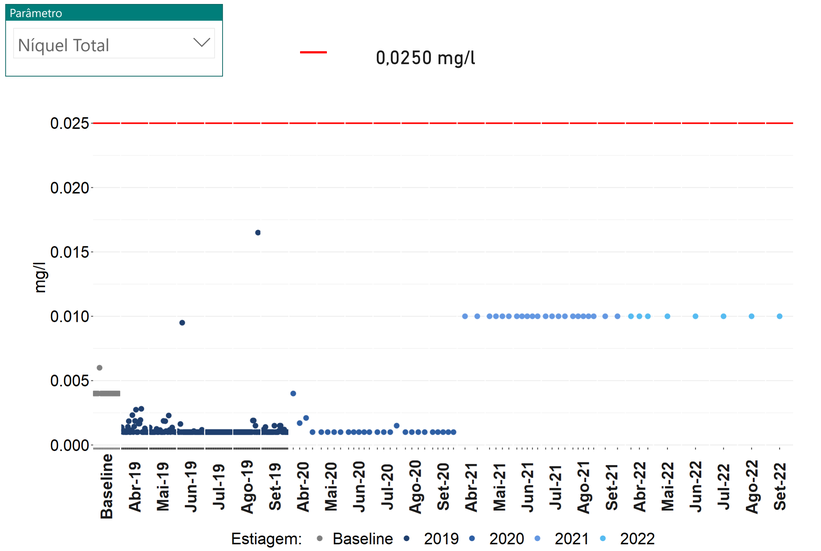
Parâmetro: Manganês Total



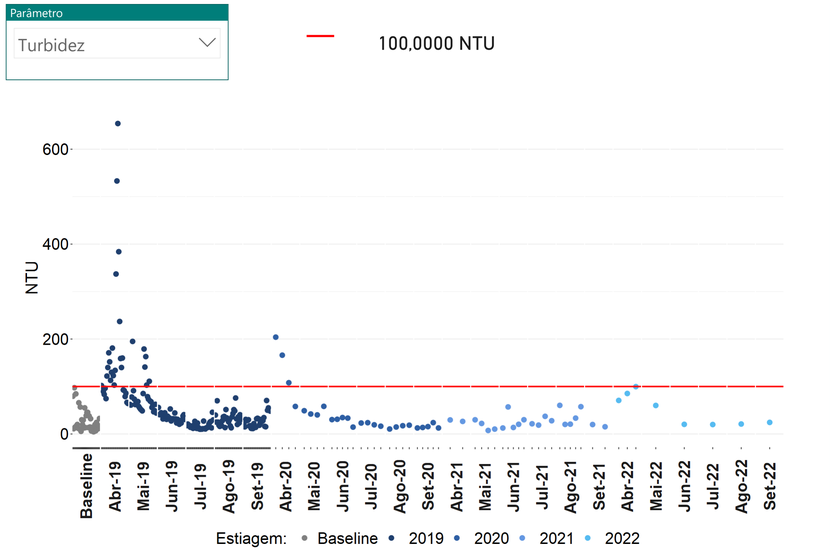
Parâmetro: Mercúrio Total



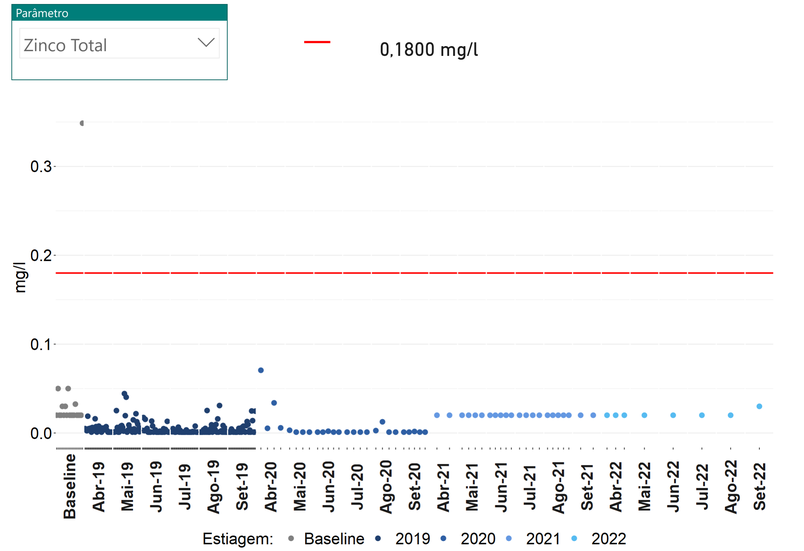
Parâmetro: Níquel Total



Parâmetro: Turbidez



Parâmetro: Zinco Total



BP082, BPE03 e PT-43															
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
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
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	1	9,1 %	183	42	↗ 23,0 %	26	9	↗ 34,6 %	22	11	↗ 50,0 %	8	2	↓ 25,0 %
Ferro Dissolvido	37	5	13,5 %	183	59	↗ 32,2 %	26	11	↗ 42,3 %	22	5	↓ 22,7 %	8	4	↗ 50,0 %
Manganês Total	36	12	33,3 %	183	85	↗ 46,4 %	26	12	↓ 46,2 %	22	2	↓ 9,1 %	8	4	↗ 50,0 %
Turbidez	37	0	0,0 %	183	25	↗ 13,7 %	26	3	↓ 11,5 %	22	0	↓ 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	29	3	10,3 %	183	5	↓ 2,7 %	26	1	↗ 3,8 %	22	0	↓ 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	183	2	↗ 1,1 %	26	1	↗ 3,8 %	22	0	↓ 0,0 %	8	3	↗ 37,5 %
pH	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	2	↗ 25,0 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	1	2,7 %	182	6	↗ 3,3 %	26	0	↓ 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	1	↗ 12,5 %
Outros															
Cianeto livre	10	0	0,0 %	181	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
DBO	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	21	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	13	35,1 %	183	16	↓ 8,7 %	26	5	↗ 19,2 %	22	0	↓ 0,0 %	8	4	↗ 50,0 %
Fenóis Totais	20	1	5,0 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Fósforo Total	37	12	32,4 %	183	100	↗ 54,6 %	26	1	↓ 3,8 %	22	14	↗ 63,6 %	8	2	↓ 25,0 %
Nitrato	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	182	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	1	↗ 3,8 %	22	0	↓ 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Chumbo Total	37	2	5,4 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	14	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	0	— 0,0 %
Zinco Total	19	1	5,3 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %	8	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.

7.3.3. Município de Paraopeba – Captação COPASA

Nas imediações da captação da COPASA no município de Paraopeba (PT-49 x BP083), observou-se, em linhas gerais, predominância de teores mais elevados para os parâmetros majoritários no atual período de análise, estiagem/2022, se comparado ao período anterior, estiagem/2021, o que pode estar atrelado ao elevado volume de chuva do período chuvoso precedente (chuva 2021/2022), reverberando os efeitos ainda na estiagem/2022. Por outro lado, os valores do período atual mantiveram-se mais reduzidos se comparados aos dois primeiros períodos de estiagem avaliados, 2019 e 2020, mais próximo ao rompimento e quando foram registrados maiores índices pluviométricos, respectivamente. Os resultados brutos dos parâmetros avaliados estão indicados no Gráfico 7.3.3-1. Adicionalmente, na Tabela 7.3.3-1 são apresentados os percentuais de violação registrados nos referidos pontos de monitoramento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

Para o parâmetro Manganês total, assim como observado nos trechos avaliados anteriormente, em geral, as concentrações são mais elevadas nos meses de abril e maio, característicos do período de transição sazonal. Considerando a distribuição dos dados, em todos os períodos avaliados essa condição se manteve, destacando-se a ocorrência de maiores concentrações em 2019 e 2020 e condições inferiores e mais próximas do *baseline* sazonal nos períodos seguintes. Especificamente em relação ao período de estiagem/2021, os resultados do período atual, estiagem/2022 foram mais elevados. Entretanto, em termos de violação, houve acréscimo do percentual no atual período de análise (40%), em relação aos períodos anteriores: estiagem/2019 (27,9%), estiagem/2020 (34,6%), estiagem/2021 (0%). Contudo, cabe ressaltar que, para todos os períodos pós-rompimento, os percentuais ficaram abaixo da condição do *baseline* sazonal de estiagem (41,7%), já indicando alterações do corpo hídrico para este parâmetro na condição histórica.

Para Ferro dissolvido, no ponto PT-49, também é possível observar o incremento sucessivo dos resultados ao longo dos períodos de estiagem avaliados, destacando a ocorrência dessa condição nos períodos de chuva avaliados no relatório anterior (ARCADIS, 2022b) e no ponto PT-52, localizado a montante. Entretanto, ressaltam-se concentrações máximas mais elevadas nos períodos de 2019 e 2020. Em termos de violação, também foi possível notar incremento entre os períodos monitorados, com maior percentual de inconformidades na estiagem/2022 em relação aos períodos de estiagem precedentes: estiagem/2019 (30,6%), estiagem/2020 (30,8%), estiagem/2021 (16,7%) e estiagem/2022 (60%). Em todos os períodos de estiagem, os percentuais foram substancialmente mais elevados que a condição do *baseline* (2,7%).

Comportamento semelhante foi observado para parâmetro Alumínio dissolvido, com incremento das concentrações ao longo dos períodos sucessivos de estiagem, apesar de resultados máximos mais elevados nos dois primeiros períodos de estiagem monitorados. Em termos de percentual de violação, em geral, também houve incremento entre os períodos de estiagem sucessivos: estiagem/2019 (23,5%), estiagem/2020 (50%), estiagem/2021 (79,2%) e estiagem/2022 (70%). Destaca-se o *baseline* de chuva substancialmente inferior para este analito, correspondente a 9,1% de inconformidades.

Para Turbidez, o comportamento foi semelhante ao registrado para Manganês total, com teores mais reduzidos no período de estiagem atual se comparados aos períodos de 2019 e 2020, porém mais elevados em relação a 2021. Essa condição pode ser justificada pelos volumes precipitados de chuva, com maiores índices na estiagem/2022 em relação a estiagem/2021, bem como refletir os efeitos do período chuvoso antecedente, chuva 2021/2022, quando foram registrados elevados índices pluviométricos. Em relação ao limite legal, destaca-se que nos dois últimos períodos de estiagem não houve registro de desvios, indicando melhor condição frente ao *baseline* de estiagem (5,4%). Já nos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020 foram registrados os percentuais de 6,0% e 11,5%, respectivamente.

Em relação aos parâmetros traço, assim como nos outros trechos avaliados, os resultados mantiveram-se reduzidos e pouco variáveis nos períodos de estiagem monitorados, em grande parte abaixo dos respectivos limites de quantificação do método analítico. No atual período de análise não houve violação para nenhum dos parâmetros listados. E nos períodos precedentes, foram registradas violações pontuais apenas para Chumbo total (1,1%) e Mercúrio total (0,5%), sendo ambos os percentuais acima do *baseline* sazonal de estiagem (ausência de violações).

Para os parâmetros físico-químicos listados, no período de estiagem/2022 não houve registro de violação, indicando para este caso melhor condição da qualidade da água em relação aos períodos anteriores, incluindo a condição do *baseline* sazonal.

Para os parâmetros associados às contribuições difusas e de origem sanitária, ocorreu registro de inconformidades apenas para *E. coli,* com percentual de 10% no período de estiagem/2022, superior ao registrado nos períodos anteriores, mas abaixo do *baseline* (24,3%). Logo, para Fósforo total, destaca-se a ausência de desvios no atual período de análise, estiagem/2022, condição inferior ao *baseline* (8,1%).

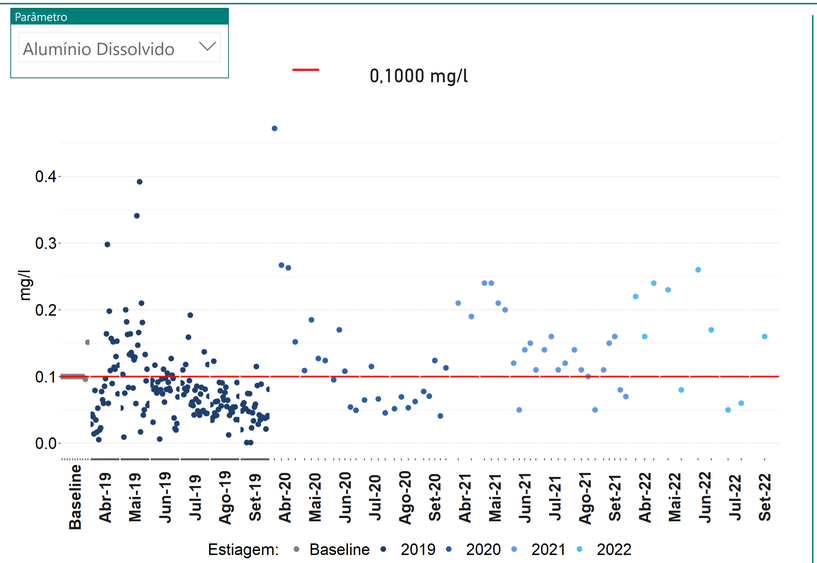
Nesse contexto, destacam-se, no geral, resultados das frações totais próximos e mais reduzidos no atual período de estiagem e no período de estiagem/2021 em relação aos períodos de estiagem/2019 e 2020. Enquanto para a fração dissolvida, especificamente de Ferro e Alumínio, os resultados apresentaram-se mais elevados na estiagem/2022, refletindo também em percentuais de violação maiores. Para os demais parâmetros, os resultados foram, em geral, reduzidos e abaixo dos respectivos VMPs.

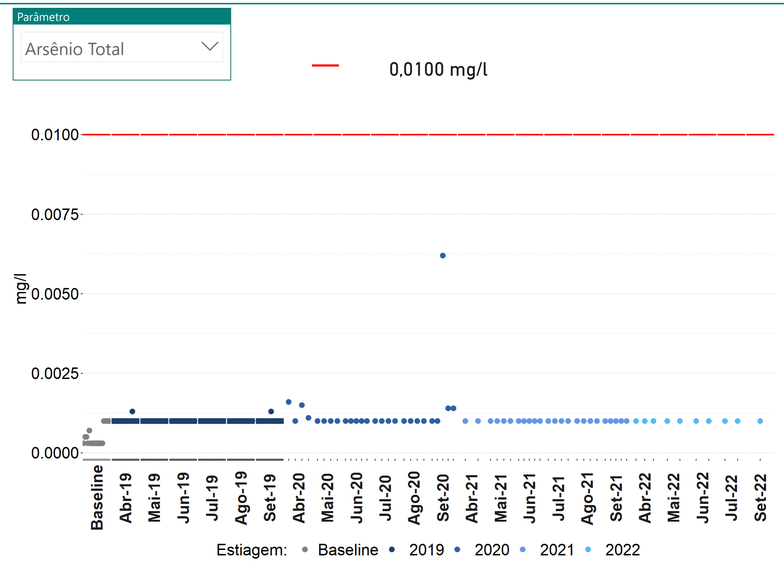
De forma complementar, nos períodos de chuva monitorados (ARCADIS, 2022b), os resultados foram mais elevados no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, em relação aos períodos anteriormente analisados, mas com magnitude de acordo com as condições já observadas. Além disso, os percentuais de violação, para a maioria dos parâmetros discutidos, também foram maiores no período de chuva 2021/2022. Destaca-se que, neste período, foram registrados elevados índices pluviométricos, bem como um menor número de coletas, o que pode ter refletido nos percentuais de inconformidades registrados. De todo modo, os efeitos das chuvas deste período podem ainda ter reverberado no período de estiagem/2022, principalmente nos meses iniciais do período sazonal, dada a manutenção dos níveis e vazões elevadas ao longo do Paraopeba.

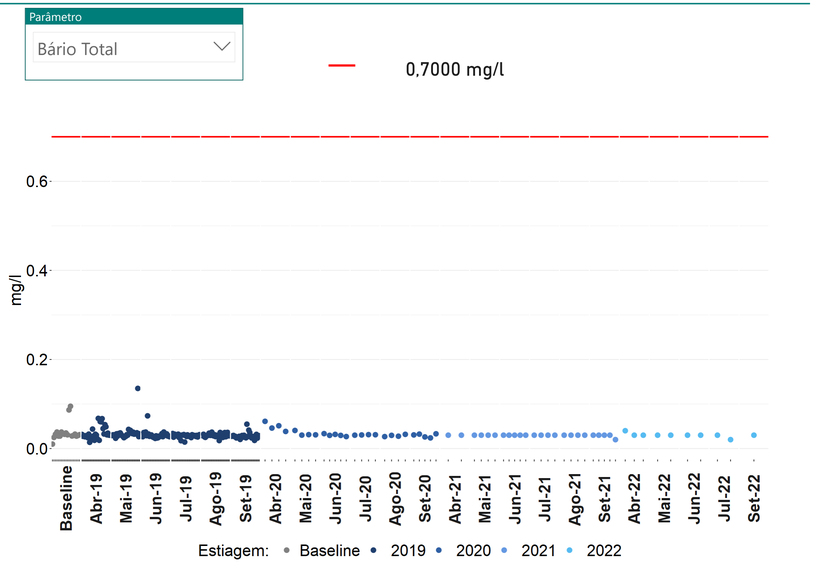
Gráfico 7.3.3-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

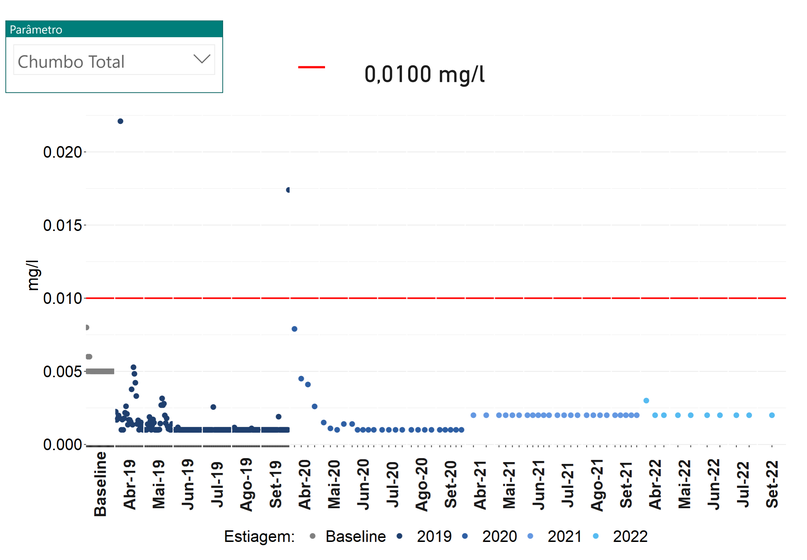
Tabela 7.3.3-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.

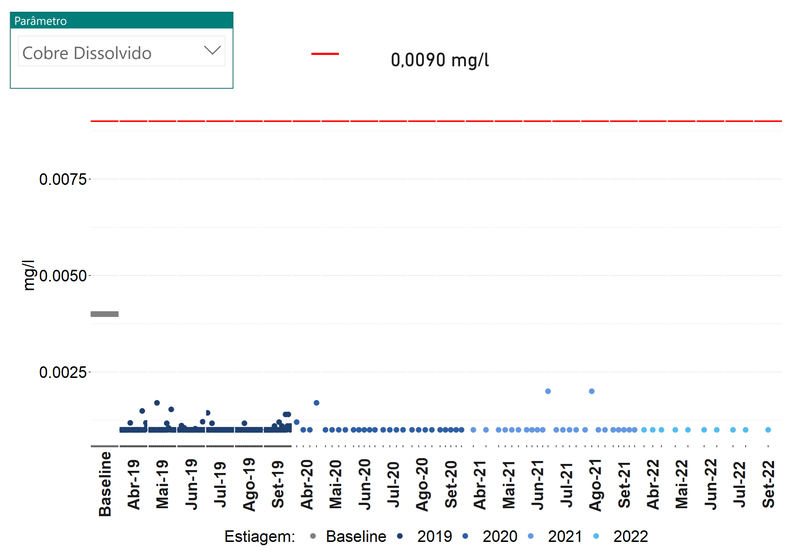
Análise do período de Estiagem- Baseline IGAM(BP083) e Vale(PT-49)

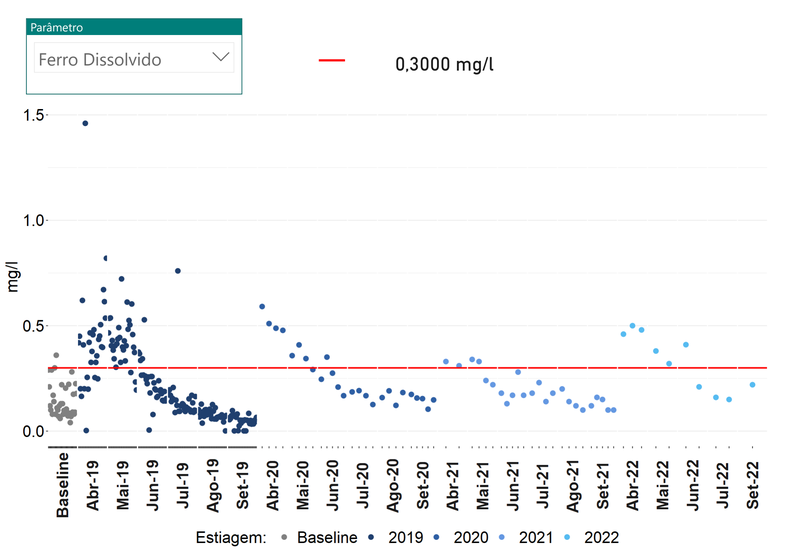




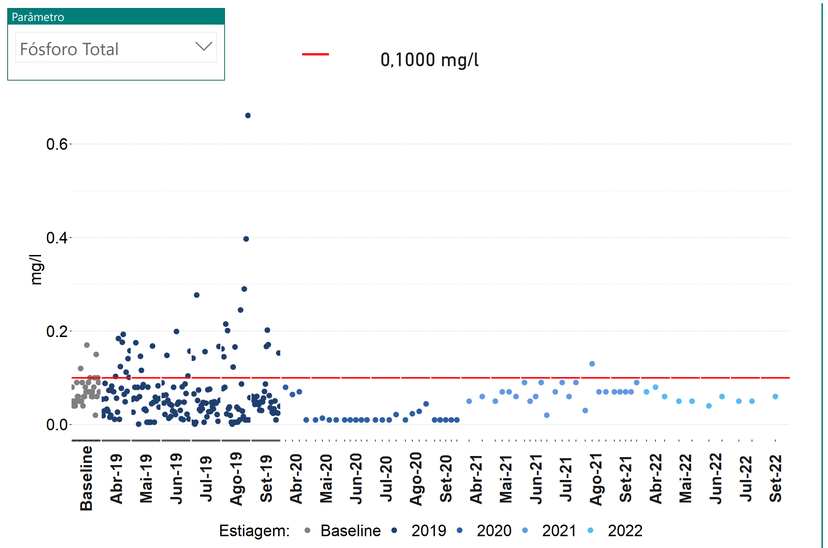


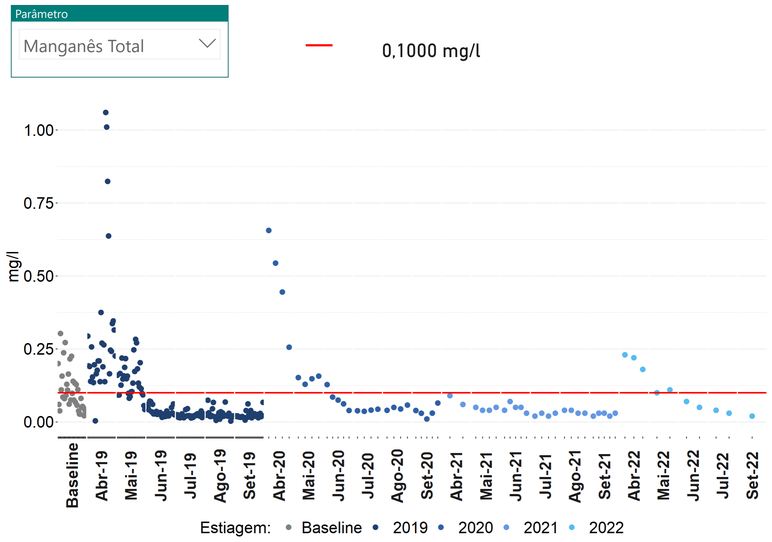


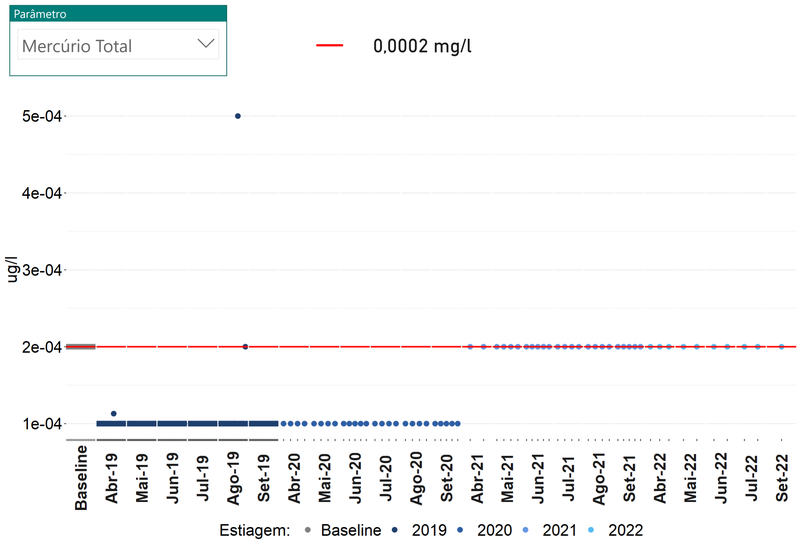


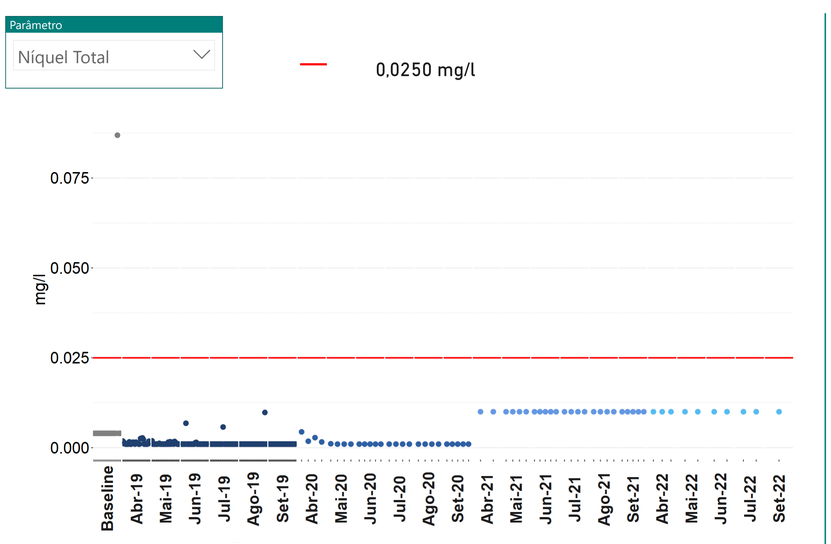


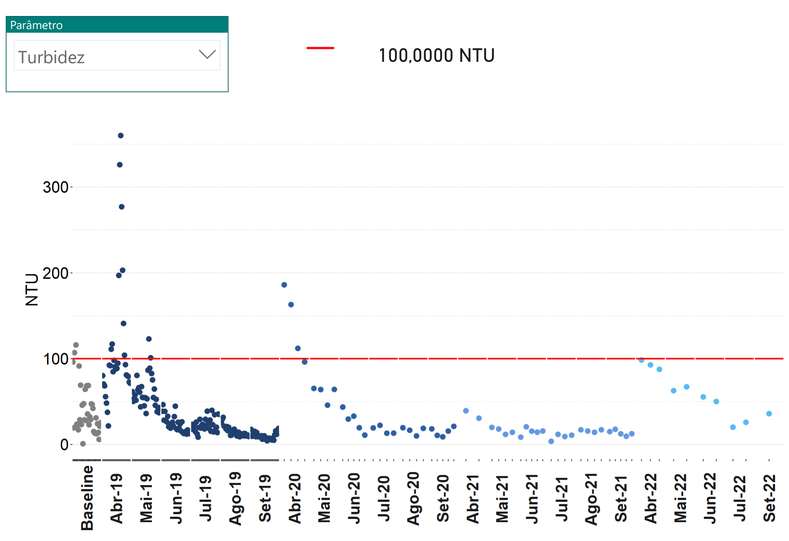
Análise do período de Estiagem- Baseline IGAM(BP083) e Vale(PT-49)

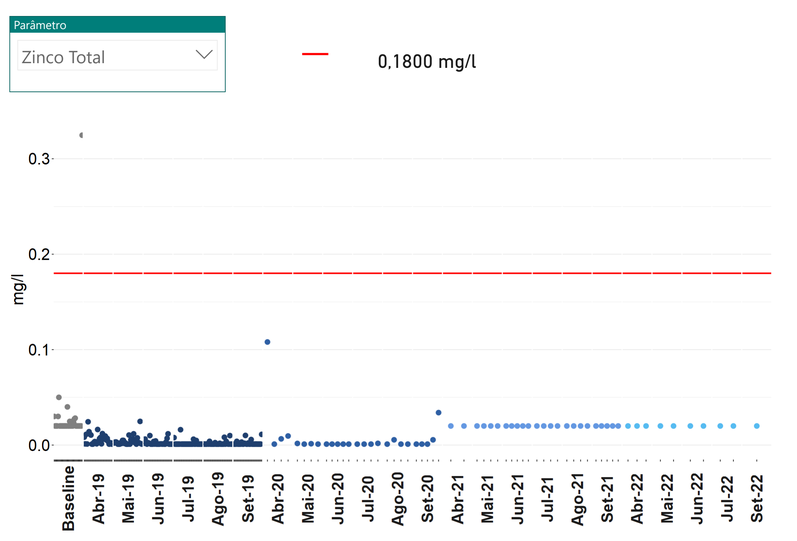












BP083 e PT-49															
-	Baseline estiagem IGAM			Estiagem - Abril a Setembro/2019			Estiagem - Abril a Setembro/2020			Estiagem - Abril a Setembro/2021			Estiagem - Abril a Setembro/2022		
Grupo de parâmetros	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas	N° amostras	N° violadas	% violadas
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	1	9,1 %	183	43	↗ 23,5 %	26	13	↗ 50,0 %	24	19	↗ 79,2 %	10	7	↓ 70,0 %
Ferro Dissolvido	37	1	2,7 %	183	56	↗ 30,6 %	26	8	↗ 30,8 %	24	4	↓ 16,7 %	10	6	↗ 60,0 %
Manganês Total	36	15	41,7 %	183	51	↓ 27,9 %	26	9	↗ 34,6 %	24	0	↓ 0,0 %	10	4	↗ 40,0 %
Turbidez	37	2	5,4 %	183	11	↗ 6,0 %	26	3	↗ 11,5 %	24	0	↓ 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Físico-químico															
Cor verdadeira	29	3	10,3 %	182	3	↓ 1,6 %	26	3	↗ 11,5 %	24	0	↓ 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	183	5	↗ 2,7 %	26	0	↓ 0,0 %	24	1	↗ 4,2 %	10	0	↓ 0,0 %
pH	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	30	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	1	2,7 %	183	3	↓ 1,6 %	26	0	↓ 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Outros															
Cianeto livre	18	2	11,1 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
DBO	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Escherichia/Coliformes	37	9	24,3 %	183	3	↓ 1,6 %	26	1	↗ 3,8 %	24	0	↓ 0,0 %	10	1	↗ 10,0 %
Fenóis Totais	37	2	5,4 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Fósforo Total	37	3	8,1 %	183	35	↗ 19,1 %	26	0	↓ 0,0 %	24	1	↗ 4,2 %	10	0	↓ 0,0 %
Nitrato	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Nitrito	31	0	0,0 %	183	1	↗ 0,5 %	26	0	↓ 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Cádmio Total	37	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Chumbo Total	37	0	0,0 %	183	2	↗ 1,1 %	26	0	↓ 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	26	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Cromo Total	23	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	183	1	↗ 0,5 %	26	0	↓ 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Níquel Total	19	1	5,3 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	183	0	— 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	0	— 0,0 %
Zinco Total	37	1	2,7 %	183	0	↓ 0,0 %	26	0	— 0,0 %	24	0	— 0,0 %	10	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.

7.4. Considerações

Quanto às análises realizadas no trecho de captação de água para consumo humano no município de Brumadinho, observaram-se, maiores teores dos parâmetros majoritários na fração total na estiagem/2022 em relação a estiagem/2021, destacando-se os meses de abril e maio/2022. Mas, em ambos os períodos, os resultados foram inferiores se comparados aos períodos de estiagem/2019 e estiagem/2020. Para Manganês total e Turbidez os percentuais de violação também foram mais elevados no período atual se comparado ao período anterior, estiagem/2021, o que pode estar atrelado aos maiores índices pluviométricos da estiagem/2022, bem como as chuvas intensas que ocorreram no período chuvoso antecedente, chuva 2021/2022. Especificamente para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, os resultados apresentaram-se mais elevados no período de estiagem/2022, destacando-se os meses iniciais de abril e maio/2022, assim como, em geral, ocorreram maiores percentuais de violação. Para os parâmetros traço, as concentrações mantiveram-se majoritariamente baixas ao longo dos períodos de estiagem, sem indicativo de desvios no período de estiagem/2022.

No trecho de captação do município de Pará de Minas, o comportamento dos parâmetros majoritários na fração total, bem como dos parâmetros traço, se assemelha ao trecho de Brumadinho, com resultados mais atenuados no período de estiagem/2022 se comparado aos dois primeiros períodos monitorados. Por outro lado, para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio a distribuição dos resultados foi mais próxima entre os períodos de estiagem analisados com, em geral, redução das violações para Alumínio dissolvido e incremento para Ferro Dissolvido.

Do mesmo modo, no último trecho analisado, no município de Paraopeba, no atual período de análise, estiagem/2022, os resultados de Manganês total foram mais elevados se comparado ao período anterior, estiagem/2021, o que pode estar atrelado ao elevado volume de chuva do período chuvoso precedente (chuva 2021/2022). Por outro lado, os valores do período atual mantiveram-se mais reduzidos se comparados aos dois primeiros períodos de estiagem avaliados, 2019 e 2020. Para este parâmetro, os percentuais de violação também foram mais elevados na estiagem/2022. Para Turbidez, por outro lado, os percentuais de violação foram mais reduzidos, com ausência de desvios no período de estiagem/2022. Para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, os resultados apresentaram-se mais elevados na estiagem/2022, refletindo também em maiores percentuais de violação. Com exceção de *E. coli*, para os demais parâmetros não houve registro de desvios no atual período de estiagem, incluindo os parâmetros traço monitorados.

Em termos dos parâmetros vinculados às contribuições difusas e de origem sanitária, houve permanência de percentuais de violação para *Escherichia coli* nos três pontos avaliados referentes aos trechos de captação, superando as condições do *baseline* nos pontos PT-43 e PT-49. Dentre os três pontos, destaca-se o PT-02, com maiores percentuais de violação para este parâmetro, incluindo a condição do *baseline* sazonal, equivalente a 100%. Para Fósforo total as violações ocorreram apenas nos pontos PT-02 e PT-43, mas com superação do *baseline* apenas no PT-02, ainda que com percentual aproximado.

8. Comportamento dos rios tributários ao longo dos diferentes períodos sazonais

8.1. Objetivo

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

8.2. Metodologia

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

- Análise das violações aos padrões legais de classe de enquadramento, conforme a DN COPAM-CERH 08/2022;
- Análise espacial e temporal dos parâmetros de qualidade das águas superficiais por meio de gráficos *boxplot* (**ANEXO IV-B**)
- Análise estatística inferencial.

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.

No que diz respeito às análises das violações aos padrões legais de classe de enquadramento, estas foram realizadas mediante a utilização de gráficos que indicam os percentuais de violação e número de amostras para os períodos sazonais de estiagem subsequentes.

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/afluentes compreendem um conjunto representativo de uso e ocupação de solo e envolvem, dentre diferentes atividades, a exploração minerária, as práticas agropecuárias e a intensa ocupação urbana. Assim, os tributários da bacia do rio Paraopeba foram incorporados ao plano de monitoramento com a finalidade de avaliar seu comportamento e eventuais influências nas alterações de qualidade da água ao longo do curso hídrico principal. Nesse sentido, focou-se nas análises dos seguintes tributários:

- Ribeirão Sarzedo (TT-02)
- Rio Betim (TT-01)
- Ribeirão das Abóboras (TT-05)
- Ribeirão dos Gomes (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, compreendido entre o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A em 25/01/2019 a 30 de junho de 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 8.2-1, podem ser verificados os pontos de monitoramento localizados nos referidos 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 8.2-1: 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 *baseline*	Ponto montante	Ponto jusante	Região
TT-02	Ribeirão Sarzedo	II	BP068	PT-05	PT-03	1 A 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	I	BP099	PT-57	CE-02	

*Elaboração: Arcadis, 2022. * 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 (α=0,05) para comparação dos resultados dos parâmetros nos pontos do rio Paraopeba a montante e jusante das confluências dos tributários e verificação de sua potencial influência. Esse teste é aplicado com o objetivo

de comparar duas amostras independentes entre si (HELSEL; HIRSCH, 2002), indicando se há (valor-p ≤ 0,05) ou não (valor-p >0,05) diferença estatística significativa entre elas.

8.3. 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 (CE-01) e os respectivos pontos de monitoramento de montante e jusante no rio Paraopeba.

8.3.1. 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 (Plano Diretor Sarzedo, 2017).

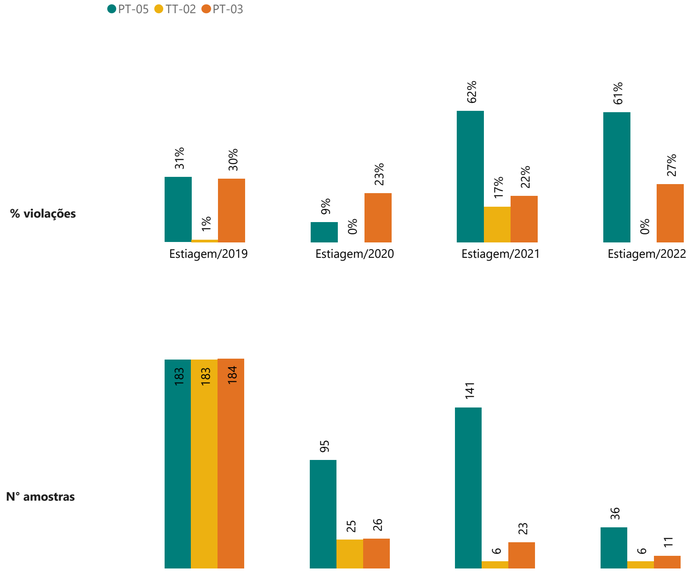
No Gráfico 8.3.1-1, podem ser observados os percentuais de violação dos parâmetros analisados para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 para o ponto TT-02 e para os pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) localizados no rio Paraopeba.

Para o período atual, estiagem/22, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Nitrogênio amoniacal e Oxigênio dissolvido. Entretanto, dentre estes parâmetros, violações mais expressivas no tributário ribeirão Sarzedo em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas apenas para Fósforo total (montante: 6%, tributário: 100%, jusante: 0%), Manganês Total (montante: 67%, tributário: 100%, jusante: 73%) e Nitrogênio amoniacal (montante: 0%, tributário: 17%, jusante: 0%), destacando-se Manganês total com elevação do percentual se comparados os pontos de montante e jusante. Temporalmente, percebe-se proximidade dos percentuais de violação no TT-02 para os parâmetros Fósforo total e Manganês total; para Ferro dissolvido observa-se redução temporal de violações, com maiores violações na estiagem/2019; para Nitrogênio amoniacal a porcentagem de violações foi próxima à da estiagem/2020 e ambas as inferiores às estiagens de 2019 e 2021.

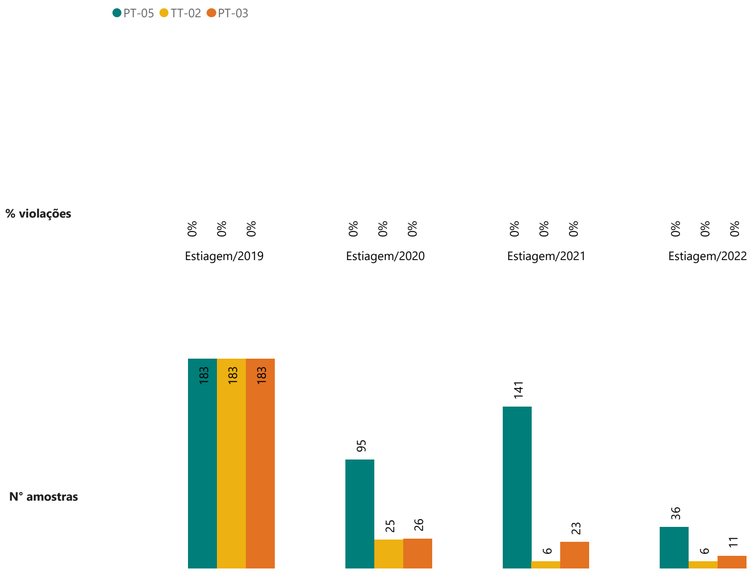
Gráfico 8.3.1-1: Percentuais de violações nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no TT02 (ribeirão Sarzedo) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba.

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

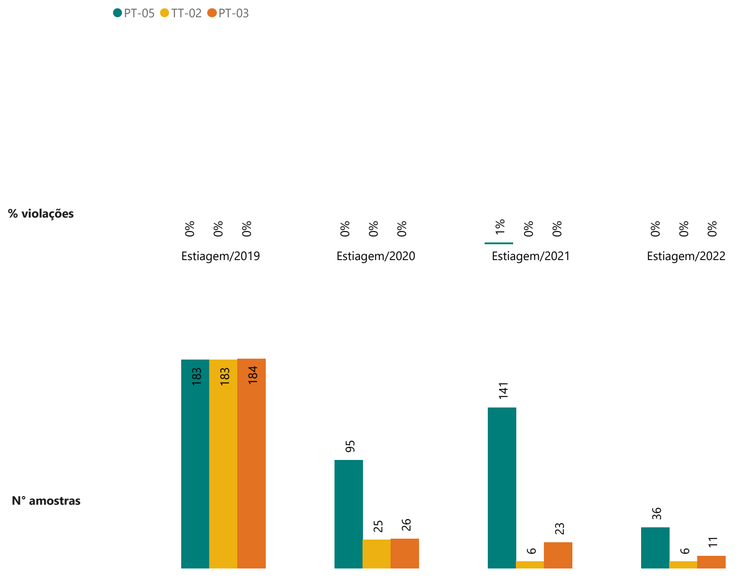
Parâmetro: Alumínio Dissolvido



Parâmetro: Arsênio Total



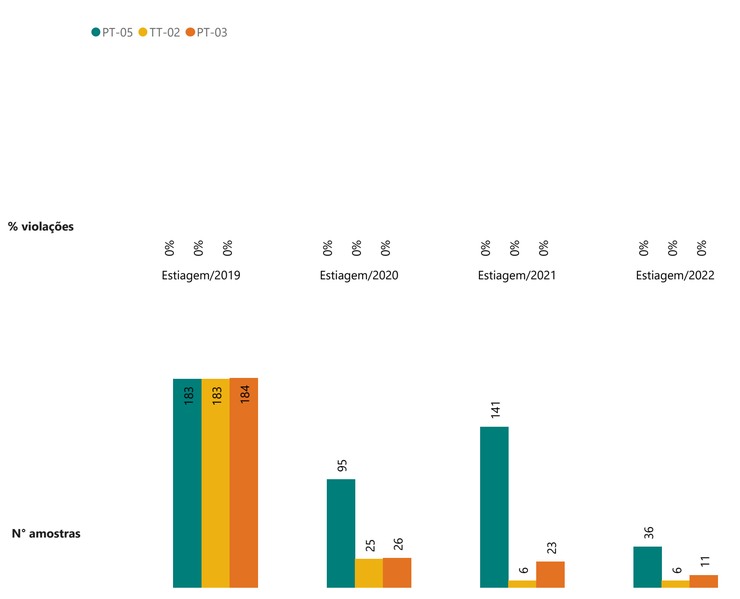
Parâmetro: Cádmio Total



Parâmetro: Chumbo Total

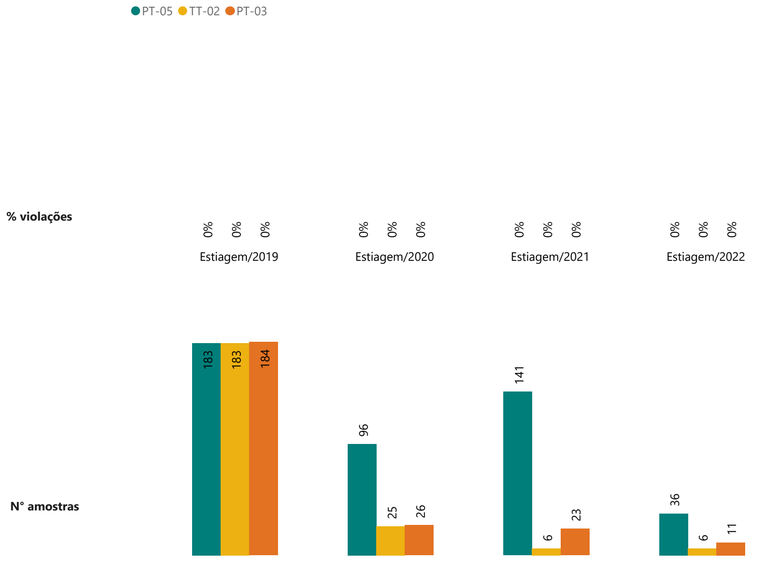
Parâmetro: Cobalto Total

Parâmetro: Cobre Dissolvido

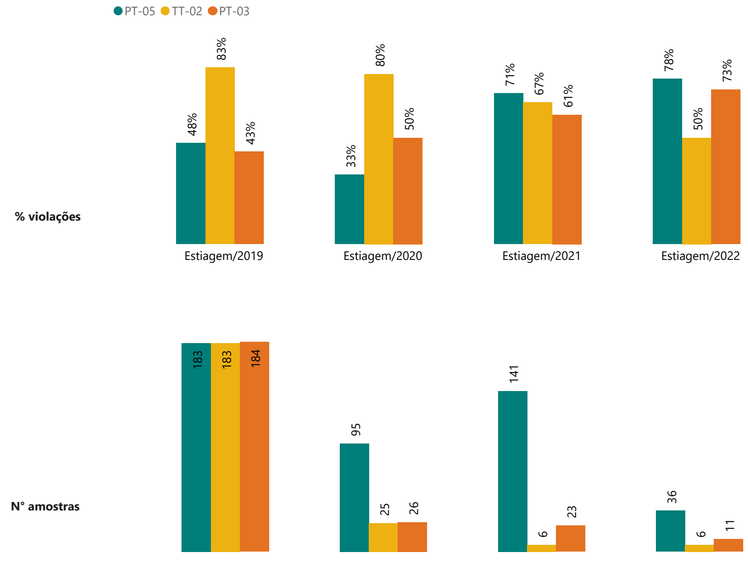


% Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante

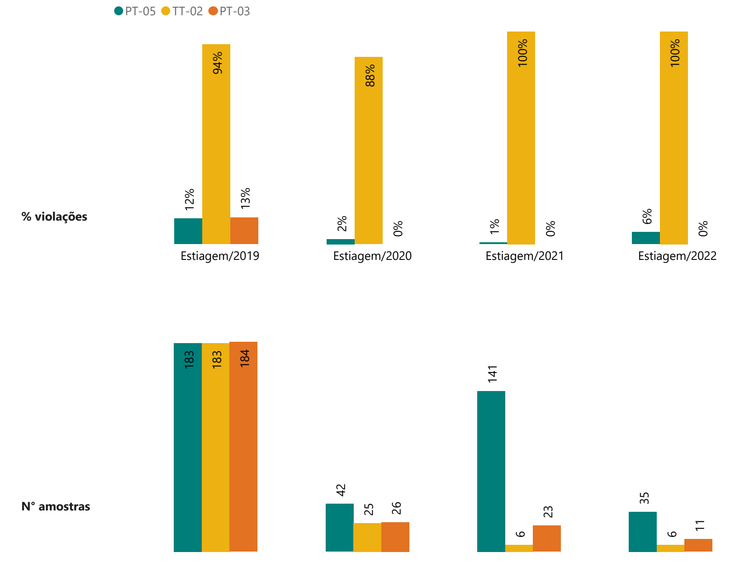
Parâmetro: Cromo Total



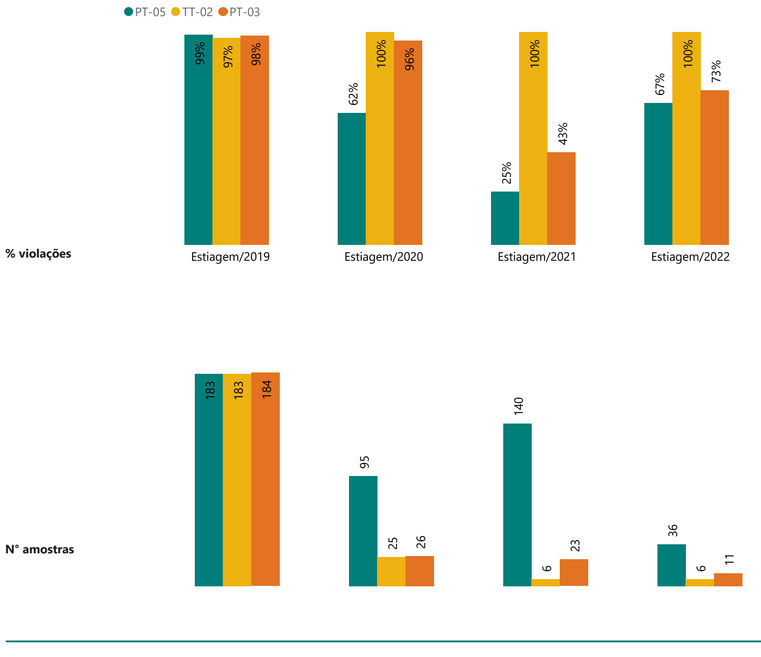
Parâmetro: Ferro Dissolvido



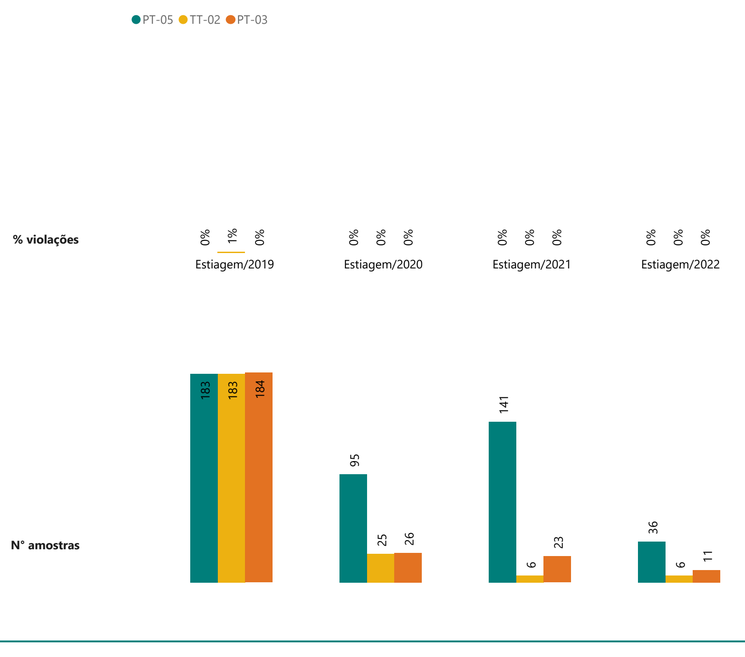
Parâmetro: Fósforo Total



Parâmetro: Manganês Total

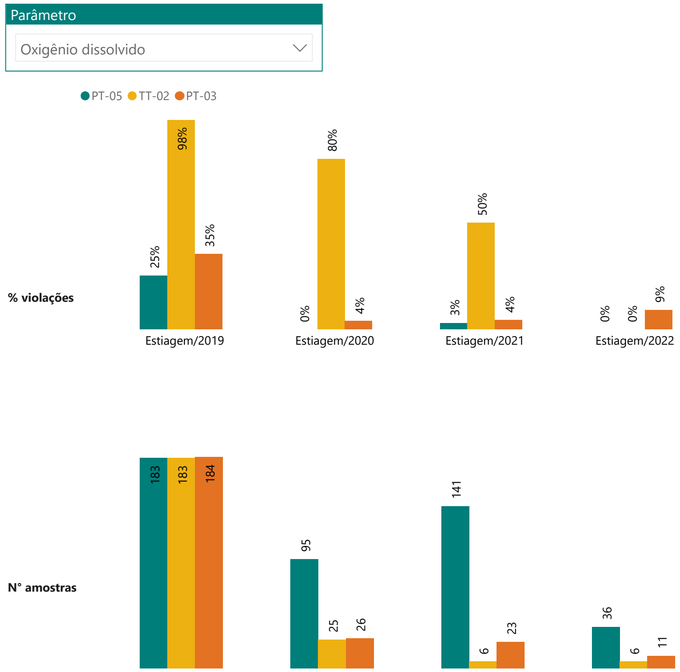


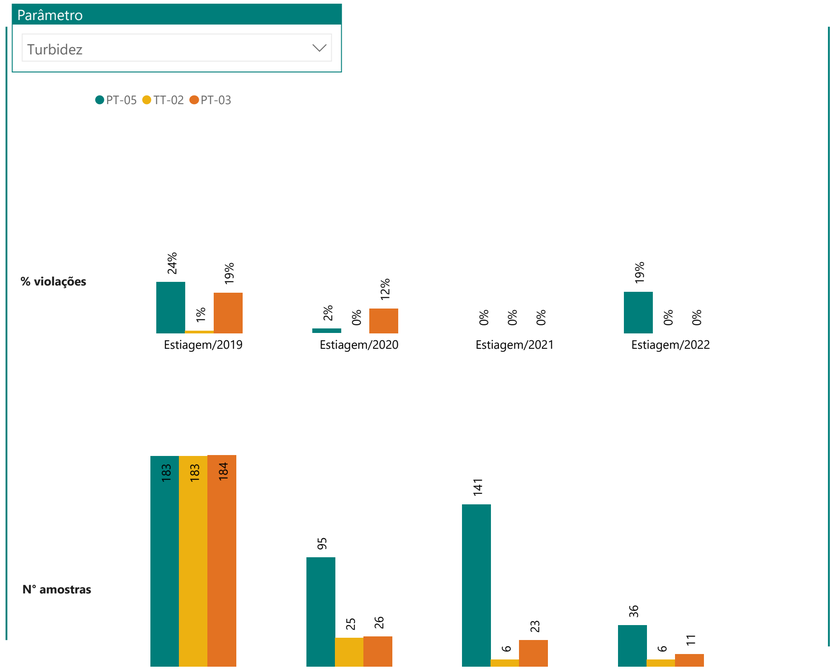
Parâmetro: Mercúrio Total



Parâmetro: Níquel Total

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





No Gráfico 8.3.1-2 são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 (abril a setembro/2019), estiagem/2020 (abril a setembro/2020), estiagem/2021 (abril a setembro/2021) e estiagem/2022 (abril a setembro/2022) 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, visto que a energia hidráulica resultante dos períodos chuvosos e a consequente elevação das vazões/escoamento superficial são forças propulsoras que favorecem arraste e ressuspensão de materiais acomodados no leito do rio Paraopeba e/ou carreados difusamente das áreas de contribuição adjacentes, com consequente aumento dos teores. Entretanto, ainda assim, é possível notar variabilidade dos resultados entre os diferentes períodos de estiagem, ao longo dos tributários, sem um padrão temporal definido.

Em termos de comparação com o *baseline* sazonal do Igam (BP068), observou-se que os teores medianos para os pontos de montante, tributário e jusante foram, em geral, próximos ou superiores ao *baseline*. Além disso, 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 Manganês total, Fósforo total, DBO e *E. coli* se comparado aos pontos PT-05 e PT-03, 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 mais baixos, refletindo pior condição da qualidade das águas em termos de oxigenação.

Para Alumínio dissolvido, ao longo dos períodos de estiagem monitorados, as concentrações foram pouco variáveis no tributário ribeirão Sarzedo e, apesar do incremento no período de estiagem/2022, não superou o VMP (0,1 mg/L). Por outro lado, nos pontos PT-03 e PT-05, os resultados deste analito foram mais variáveis e apresentaram-se mais elevados no período de estiagem/2022, como também observado para outros pontos monitorados no rio Paraopeba.

Para Manganês total, notou-se que os teores medianos no tributário tiveram ligeiro incremento ao longo dos períodos de estiagem de 2019 para 2022. Com exceção do ano de 2019, para os demais períodos de estiagem todos os resultados ficaram acima do VMP (0,1 mg/L) e do *baseline* sazonal. Já nos pontos do rio Paraopeba, notou-se decréscimo das concentrações deste analito entre os anos de 2019 e 2021, seguida de elevação em 2022 e, com exceção da estiagem/2021, mais de 75% dos resultados ultrapassaram o VMP e, em geral, mantiveram-se acima do *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 estiagem comparados. Em todos os casos, a maior parte dos resultados foram superiores ao VMP (0,3 mg/L) e ao *baseline* de estiagem.

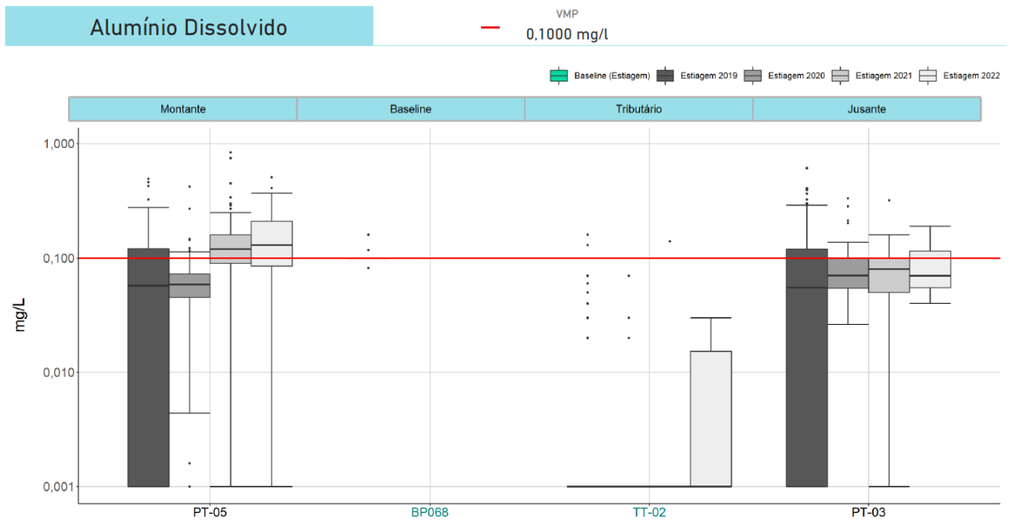
Para Turbidez, notou-se comportamento semelhante ao identificado para Manganês total nos pontos localizados no rio Paraopeba, com decréscimo dos teores entre 2019 e 2021, seguido de elevação em 2022. No TT-02, os teores de Turbidez oscilaram entre os diferentes períodos, mas permaneceram inferiores aos registrados nos pontos de montante e jusante, bem como na condição do *baseline* de estiagem. Além disso, com exceção de alguns valores pontuais, os resultados nos três pontos e nos quatro períodos analisados permaneceram abaixo do VMP (100 NTU).

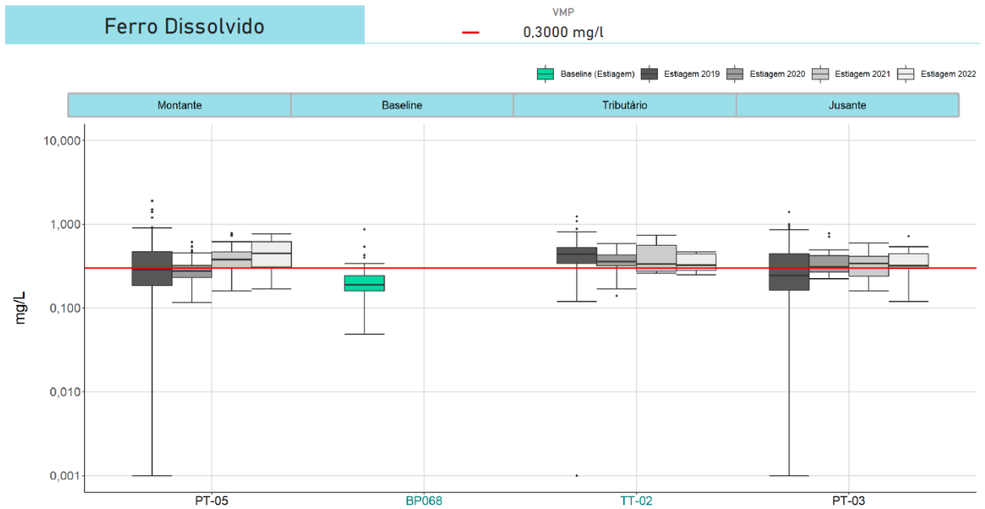
Para Fósforo total, destaca-se as concentrações mais elevadas no tributário em todos os períodos se comparadas àquelas registradas nos pontos de montante e jusante da confluência. Além disso, no tributário, em geral, todos os resultados ultrapassaram o VMP e a referência do *baseline* sazonal. Tal condição denota a importância das contribuições difusas e pontuais, como o lançamento de efluentes domésticos, para o incremento deste parâmetro nos cursos d´água da região.

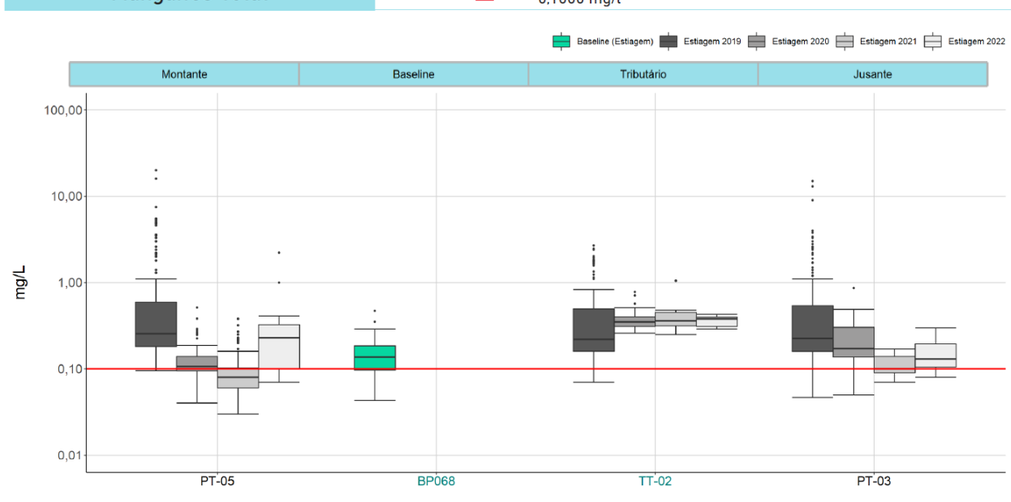
Situação semelhante foi identificada para os parâmetros sanitários *E.coli*/Coliformes Termotolerantes e DBO, com resultados mais elevados e, em geral, acima dos respectivos VMPs e *baselines* no ponto TT-02 se comparado aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba. Do mesmo modo, as concentrações de Oxigênio dissolvido foram inferiores no tributário e, até 2020, em grande parte abaixo da concentração mínima de 5 mg/L exigida pela legislação. Tal condição ressalta a poluição orgânica presente no ribeirão Sarzedo.

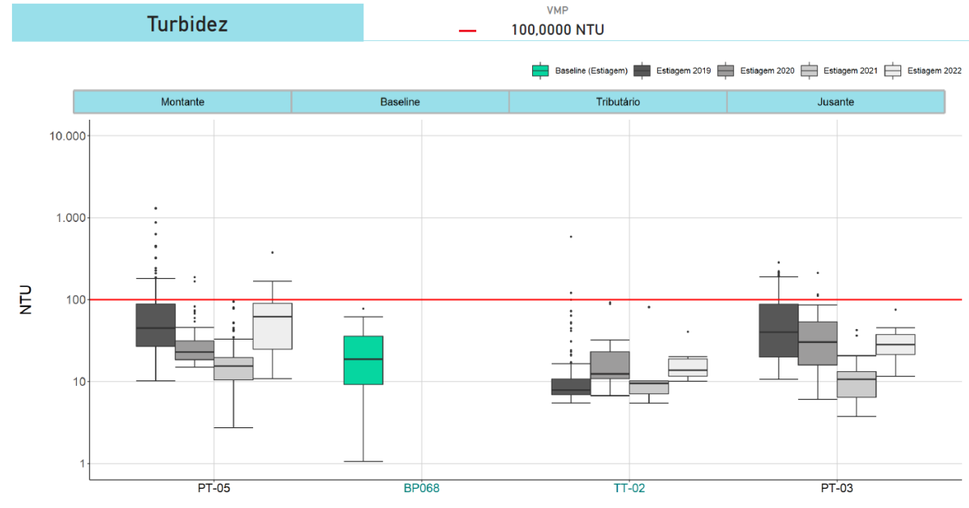
Por fim, é importante destacar que a variabilidade nas concentrações entre os pontos de montante, jusante e *baseline* pode estar associada, dentre outros aspectos, às diferentes frequências e abrangências temporais adotadas entre os monitoramentos Igam e VALE. O monitoramento pretérito oficial disponível 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/mensal, permitiu gerar um conjunto de dados significativamente superior em um intervalo de tempo menor (janeiro/2019 a setembro/2022), 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).

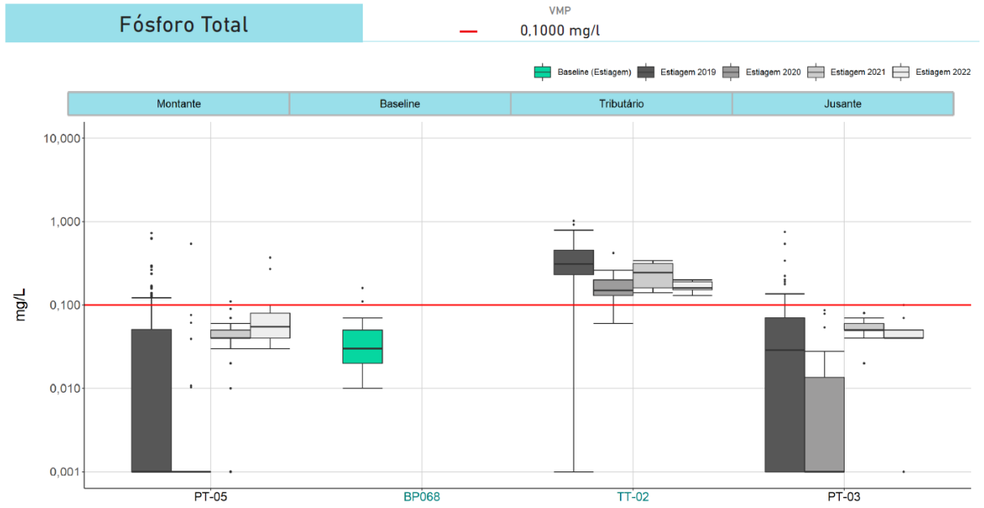
Gráfico 8.3.1-2: *Boxplots* - TT02.

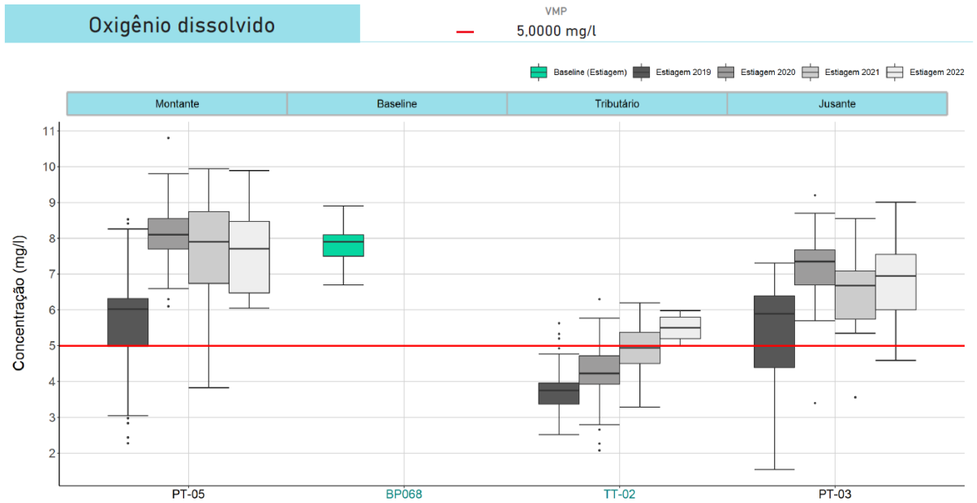


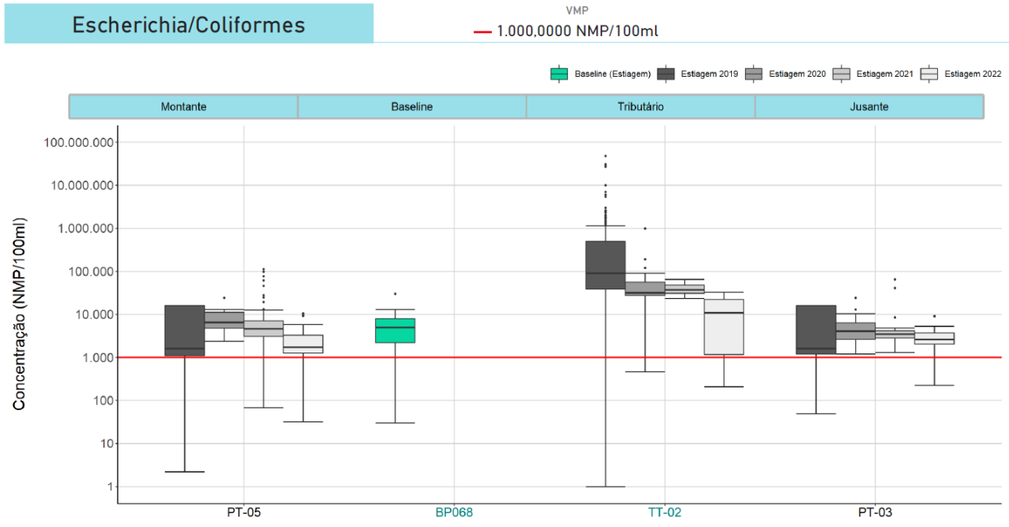


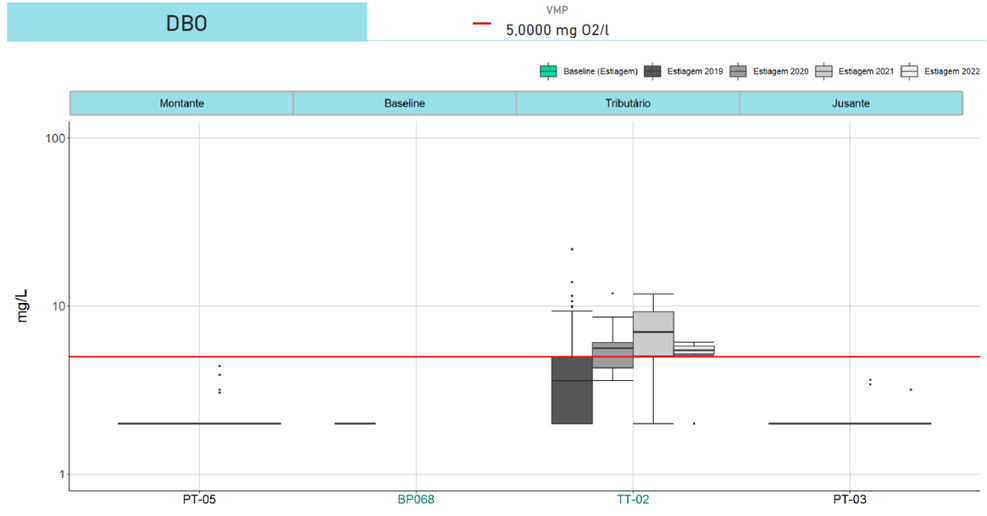












Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.1-1 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 e OD entre os pontos de montante e jusante da confluência nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. Os resultados nos quais foram verificadas diferenças significativas (valor-p ≤ 0,05), foram destacados em vermelho para melhor visualização.

Tabela 8.3.1-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-05/PT-03) - Ribeirão Sarzedo.

PT-05 (Mont.) X PT-03 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022
Manganês Total	0,246	**0,000**	**0,000**	0,246
Ferro Dissolvido	0,263	**0,017**	0,117	0,202
Alumínio Dissolvido	0,669	**0,036**	**0,001**	**0,020**
Turbidez	0,095	0,227	**0,002**	**0,037**
Fósforo Total	**0,005**	0,118	**0,000**	0,213
DBO	1,000	1,000	0,175	0,940
E.Coli / ColiTermot.	0,626	0,060	0,072	0,176
Nitrogênio Amoniacal	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,001**
Oxigênio Dissolvido	0,204	**0,000**	**0,000**	0,092

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05) Elaboração: Arcadis, 2022.

De modo geral, notou-se que, dentre os períodos de estiagem analisados, em 2021 houve maior número de parâmetros (seis) com diferença estatística significativa entre os resultados do monitoramento do ponto de montante e de jusante, indicando, provável maior contribuição do tributário neste período, quando os índices pluviométricos foram, em geral, mais baixos. Os parâmetros que apresentaram diferença significativa neste período e que, portanto, indicaram maior possibilidade de influência do tributário TT-02 na qualidade da água do rio Paraopeba foram Manganês total, Alumínio dissolvido, Turbidez, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal e Oxigênio dissolvido. Já no período de estiagem/2019 um menor número de parâmetros apresentou diferença significativa entre os pontos de montante e jusante, com destaque para Fósforo total e Nitrogênio amoniacal. Por fim, especificamente no período de estiagem mais recente, estiagem/2022, apenas para três parâmetros houve indicativo de diferença significativa entre os pontos de montante e jusante, sendo eles Alumínio dissolvidos, Turbidez e Nitrogênio Amoniacal. Logo, tais resultados possivelmente indicam que nos períodos de estiagem/2020 e estiagem/2021, o ribeirão Sarzedo se mostrou mais influente na qualidade do rio Paraopeba. Apesar dos resultados de *E.coli*/C.Termotolerantes e DBO terem sido mais elevados no ponto TT-02, verifica-se por meio dos resultados do teste de Mann-Whitney que não há evidências suficientes para concluir que a diferença entre as medianas dos pontos de montante e jusante é estatisticamente significativa e que o tributário influencia na qualidade da água do rio Paraopeba nos períodos avaliados em relação a estes parâmetros. Nos períodos de chuva, essa condição de ausência de diferença significativa entre montante e jusante foi identificada apenas para Turbidez (ARCADIS, 2022b).

8.3.2. Rio Betim (TT-01)

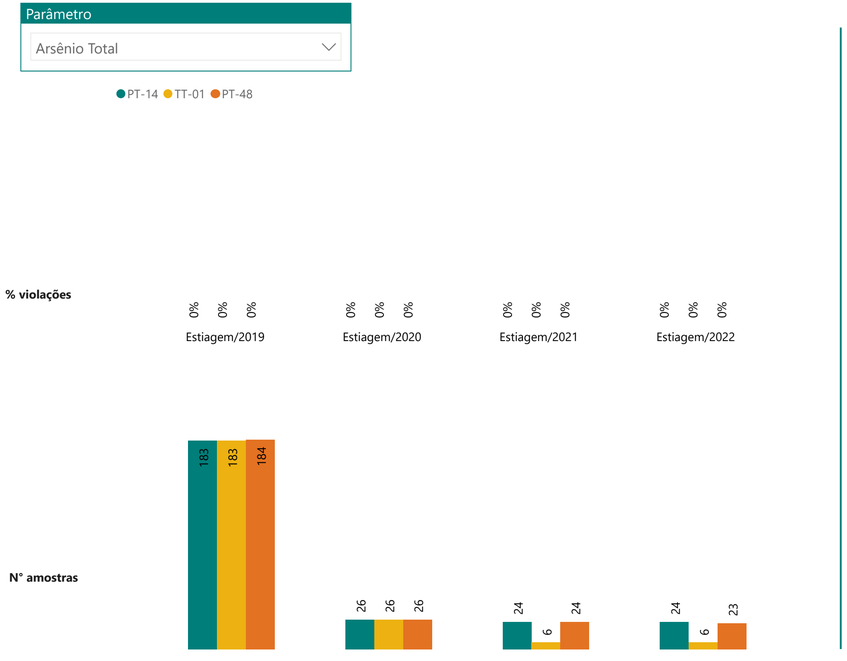
O tributário rio Betim é monitorado por meio do ponto TT-01 localizado na região 1B e as análises dos pontos de montante e jusante no rio Paraopeba foram realizadas através dos pontos PT-14 e PT-48, respectivamente. A bacia do rio Betim corta o município homônimo e parte dos municípios de Contagem e 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.

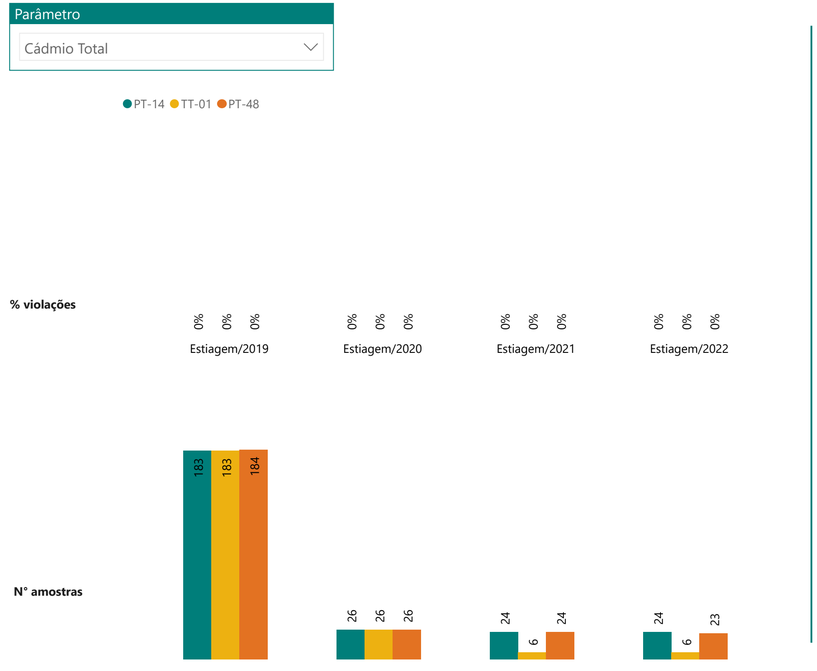
No Gráfico 8.3.2-1, podem ser observados os percentuais de violação dos parâmetros analisados para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 para o ponto TT-01 e para os pontos de montante (PT-14) e jusante (PT-48) localizados no rio Paraopeba.

Para o período atual, estiagem/22, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Alumínio dissolvido, Chumbo total, Fósforo total, Nitrogênio amoniacal, Oxigênio dissolvido e Turbidez. Para todos esses parâmetros as violações foram mais expressivas no tributário rio Betim em relação aos pontos de montante e jusante da confluência, entretanto apenas Fósforo total e Turbidez apresentaram aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário para estes parâmetros. Temporalmente, para o período de estiagem/2022 foram observados percentuais de violações mais elevados aos observados para os demais períodos. Exceção se deu para Fósforo total para o qual o percentual se manteve equivalente a 100% nos períodos de 2020, 2021 e 2022 e próximo do período de 2019 (90%) e para Oxigênio dissolvido em que o percentual de violações do período atual foi superior aos períodos de 2019 e de 2020, mas inferior a 2021.

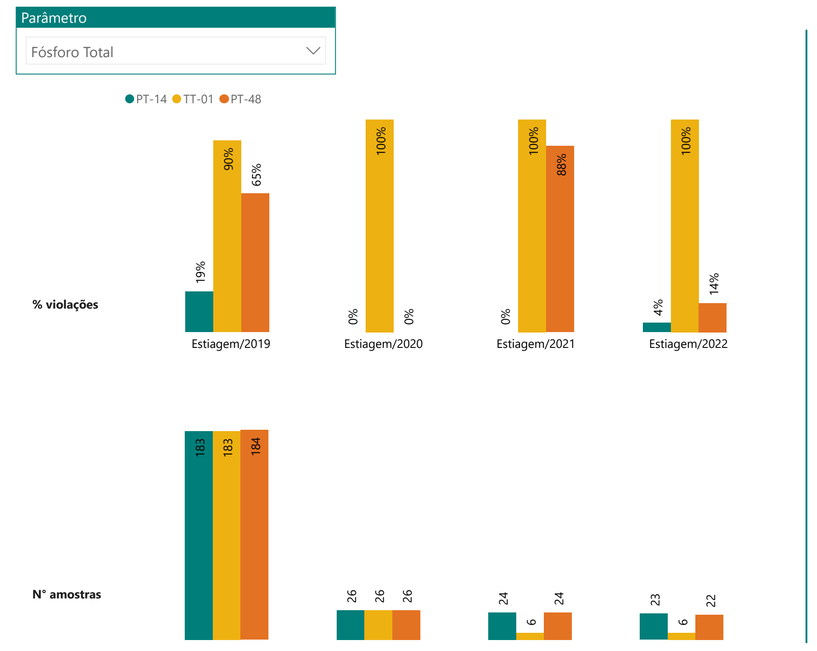
Gráfico 8.3.2-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no TT01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba.

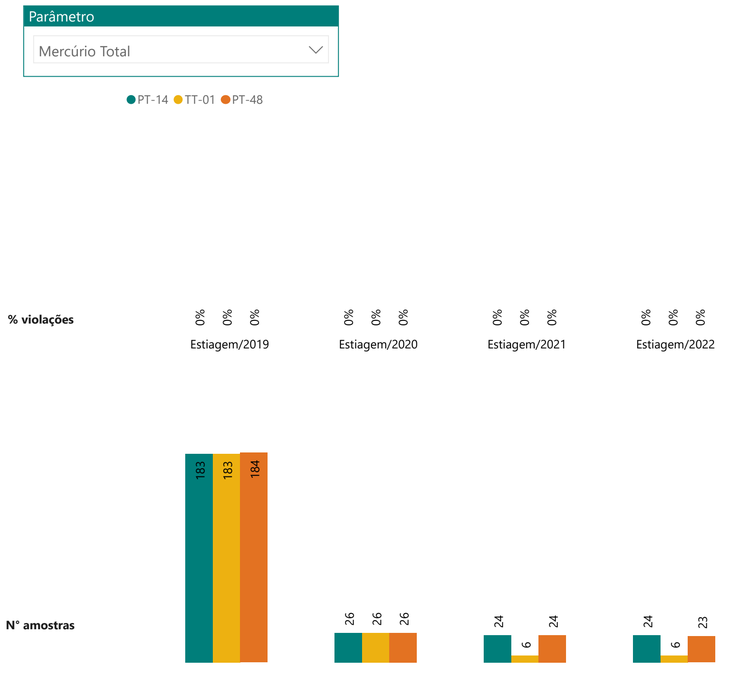
% Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante



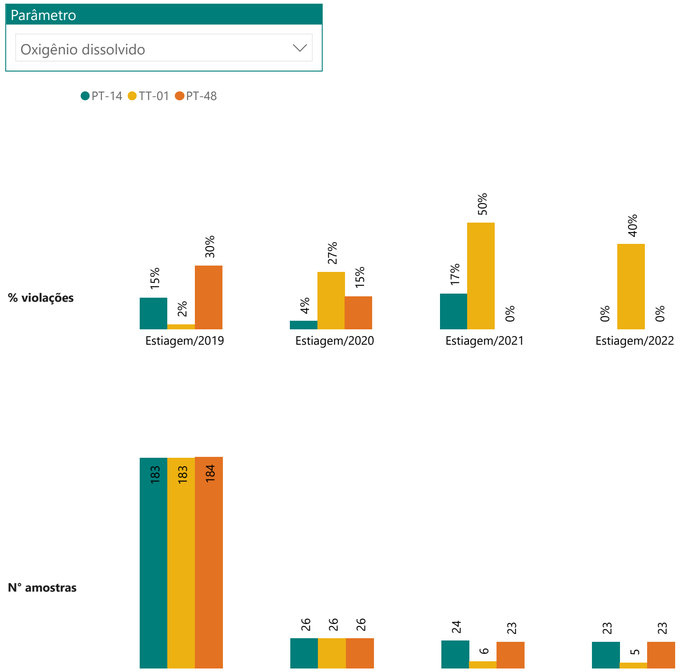


% Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante





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



No Gráfico 8.3.2-2 são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 (abril a setembro/2019), estiagem/2020 (abril a setembro/2020), estiagem/2021 (abril a setembro/2021) e estiagem/2022 (abril a setembro/2022) 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. Nos períodos de estiagem, os resultados são mais reduzidos, mas ainda assim apresentam desvios para estes parâmetros. Do mesmo modo, destaca-se que, conforme abordado, o rio Paraopeba já é caracterizado por violações aos padrões legais.

Em termos de comparação com o *baseline* sazonal do Igam (BP068), observou-se que os teores medianos no tributário foram, em geral, próximos ou inferiores à condição do *baseline* sazonal para os parâmetros marcadores. Os pontos localizados no rio Paraopeba também apresentaram relativa proximidade com os resultados do *baseline* de estiagem. Além disso, para grande parte dos parâmetros analisados, os teores medianos do ponto de jusante (PT-14) permanecem próximos ao indicado para o ponto de montante da confluência (PT-48). O ponto TT-01 apresentou concentrações mais elevadas de Manganês total, 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 estiagem monitorados as concentrações oscilaram no rio Betim, e permaneceram, em geral, abaixo do VMP (0,2 mg/L). Por outro lado, nos pontos PT-14 e PT-48 houve incremento nos resultados deste analito ao longo dos períodos de estiagem, como também observado para outros pontos monitorados no rio Paraopeba, mas ainda assim, a maioria dos resultados mantiveram-se abaixo do VMP (0,1 mg/L).

Para Manganês total, os resultados oscilaram entre os períodos analisados, com maior concentração mediana na estiagem/2022. Entretanto, com exceção de um valor pontual em 2019, os resultados ficaram abaixo do VMP (0,5 mg/L). Já nos pontos do rio Paraopeba, notou-se decréscimo das concentrações deste analito entre os anos de 2019 e 2022, mas ainda com grande parte dos resultados acima do VMP (0,1 mg/L), incluindo a condição do *baseline* sazonal.

Já para Ferro dissolvido, os resultados apresentaram-se mais próximos entre os diferentes períodos de estiagem comparados para os pontos de montante e de jusante localizados no rio

Paraopeba. Com exceção do período de estiagem/2019, mais de 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*. Já no TT-01 os resultados foram mais reduzidos que nos pontos do rio Paraopeba, sendo todos eles inferiores ao VMP (5 mg/L).

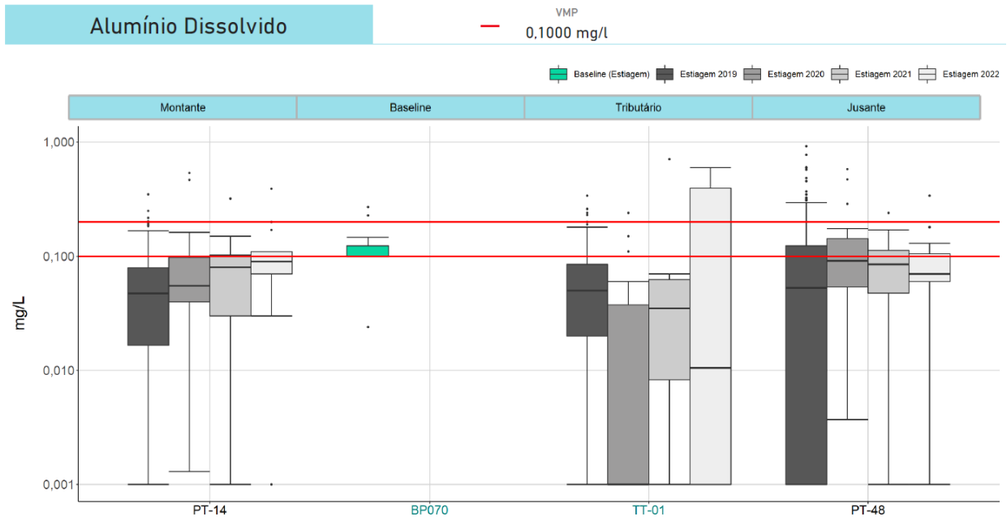
Para Turbidez, notou-se decréscimo dos teores entre 2019 e 2021 seguido de elevação em 2022 nos três pontos. Com exceção do período de estiagem/2021, nos demais, os teores medianos superaram o *baseline* de estiagem. Além disso, com exceção de alguns valores pontuais, os resultados nos três pontos e nos quatro períodos analisados permaneceram abaixo do VMP (100 NTU).

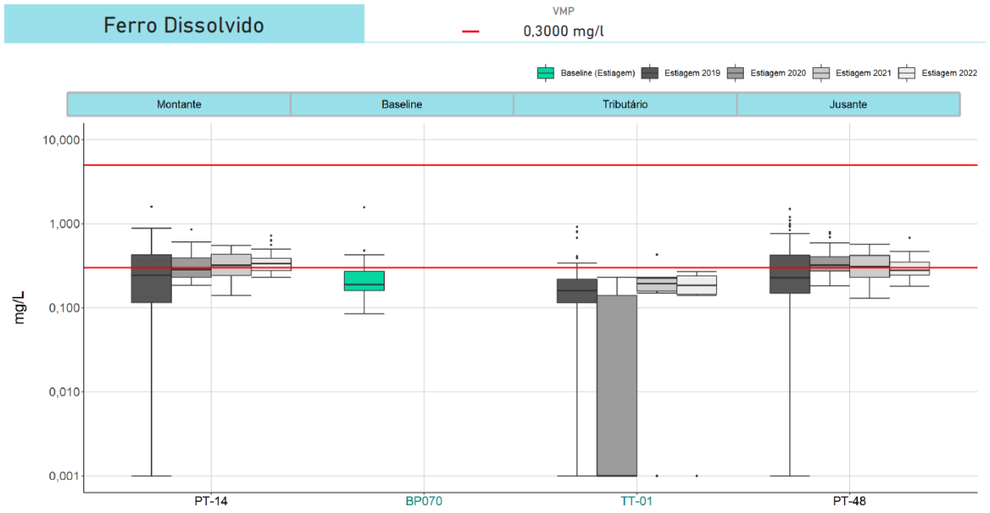
Para Fósforo total, destacam-se as concentrações mais elevadas no tributário rio Betim em todos os períodos se comparadas àquelas registradas nos pontos de montante e jusante da confluência. Além disso, no tributário, em geral, todos os resultados ultrapassaram o VMP e a referência do *baseline* sazonal. Tal condição denota a importância das contribuições difusas e pontuais, como o lançamento de efluentes domésticos, para o incremento deste parâmetro nos cursos d´água da região.

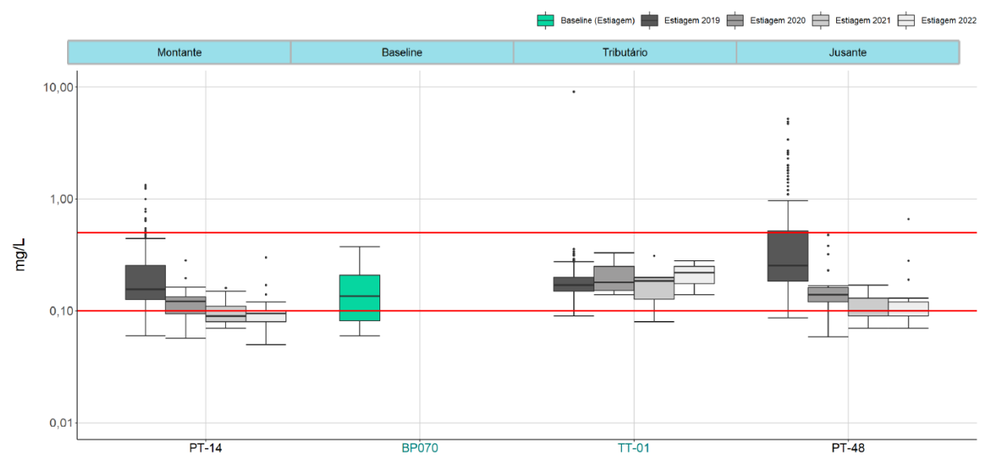
Situação semelhante foi identificada para os parâmetros sanitários *E.coli*/Coliformes termotolerantes e DBO, com resultados mais elevados e, em geral, acima dos respectivos VMPs e *baselines* no ponto TT-01 se comparado aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba. Do mesmo modo, as concentrações de Oxigênio dissolvido foram inferiores no tributário e majoritariamente abaixo da concentração mínima de 4 mg/L exigida pela legislação para cursos d'água Classe 3, conforme enquadramento do rio Betim. Tal condição ressalta a poluição orgânica presente nesse rio.

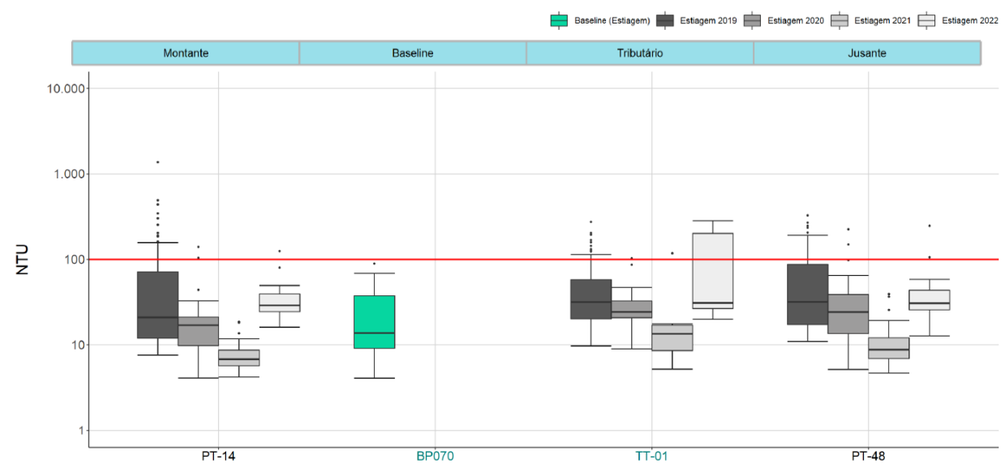
Além disso, cabe ressaltar que a variabilidade nas concentrações entre os pontos de montante, jusante e *baseline* pode estar associada, dentre outros aspectos, às diferentes frequências e abrangências temporais adotadas entre os monitoramentos Igam e VALE, conforme mencionado no tópico anterior.

Gráfico 8.3.2-2: *Boxplots*- TT01.

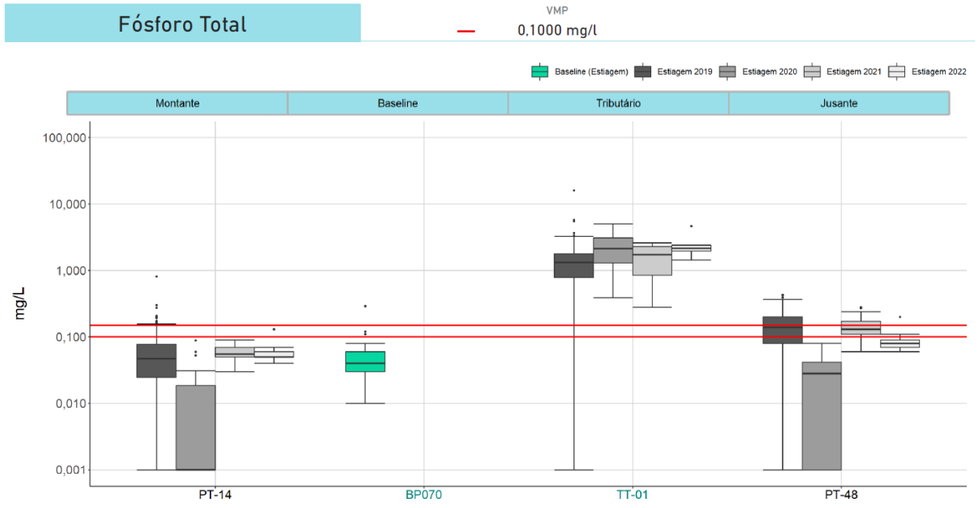




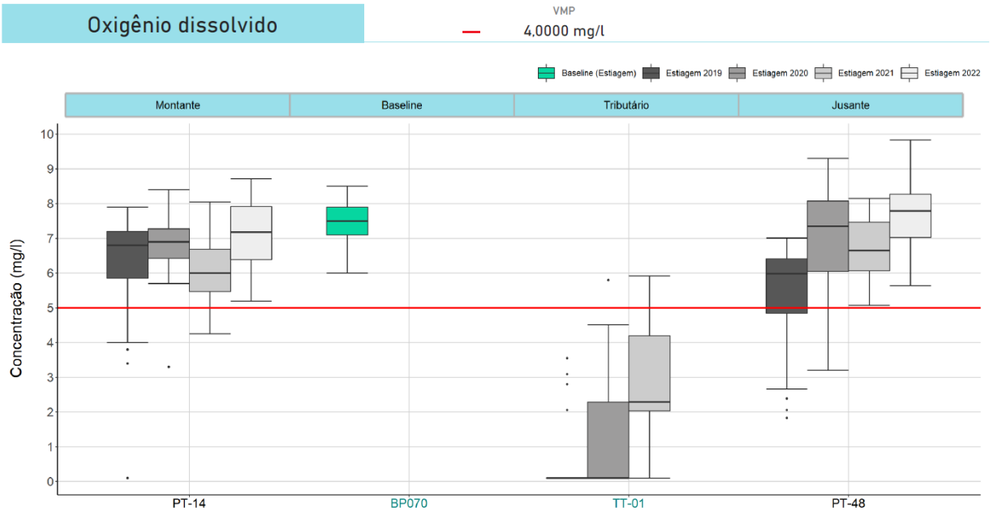




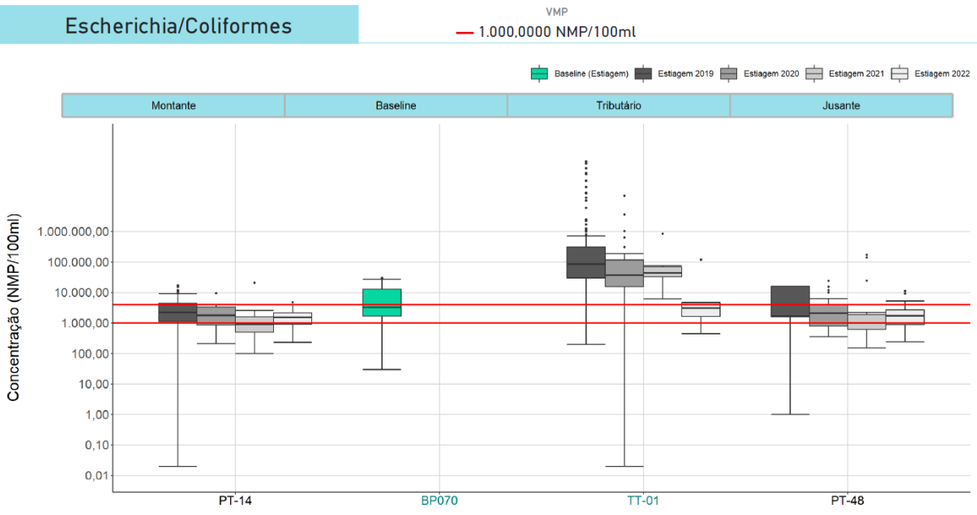
Fósforo Total



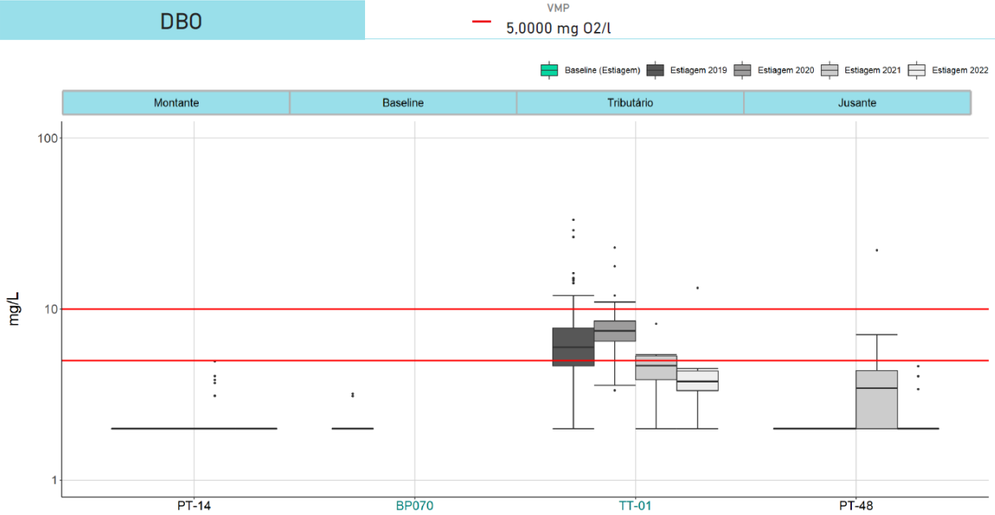
Oxigênio dissolvido



Escherichia/Coliformes



DBO



Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.2-1 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 entre os pontos de montante e jusante da confluência nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. Os resultados para os quais foram verificadas diferenças significativas (valor-p ≤ 0,05) foram destacados em vermelho para melhor visualização.

Tabela 8.3.2-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim.

PT-14 (Mont.) X PT-48 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022
Manganês Total	**0,000**	**0,008**	0,251	0,118
Ferro Dissolvido	0,447	0,173	0,942	0,136
Alumínio Dissolvido	0,259	**0,044**	0,555	0,500
Turbidez	**0,000**	0,069	**0,018**	0,544
Fósforo Total	**0,000**	**0,007**	**0,000**	**0,000**
DBO	1,000	1,000	**0,026**	0,960
E.Coli / ColiTermot.	**0,015**	0,516	0,544	0,609
Nitrogênio Amoniacal	0,623	**0,000**	**0,000**	**0,000**
Oxigênio Dissolvido	**0,000**	0,187	**0,042**	0,065

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05) Elaboração: Arcadis, 2022.

De modo geral, nos períodos de estiagem analisados, notou-se que os parâmetros mais recorrentes com diferença estatística significativa entre os resultados do monitoramento do ponto de montante e de jusante foram: Fósforo total e Nitrogênio amoniacal, sendo ambos os parâmetros relacionados a origem sanitária. Essa condição também foi verificada nas comparações dos períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). Em todos os casos, as concentrações deste analito apresentaram-se mais elevadas no tributário e no ponto de jusante se comparado ao ponto de montante. Tal condição reflete a 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. Para o parâmetro Ferro dissolvido, não foi identificada diferença significativa entre os pontos nos diferentes períodos de estiagem, enquanto nos períodos de chuva, o indicativo de diferença estatística significativa para este parâmetro ocorreu apenas na chuva/2019, (ARCADIS, 2022b), sendo este parâmetro característico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Em termos dos períodos de estiagem analisados, destacam-se os períodos de estiagem/2019 e estiagem/2021, com maior número de parâmetros com diferença significativa, enquanto o último período, estiagem/2022, apresentou menos diferenças significativas nas comparações estabelecidas.

8.3.3. 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, 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.

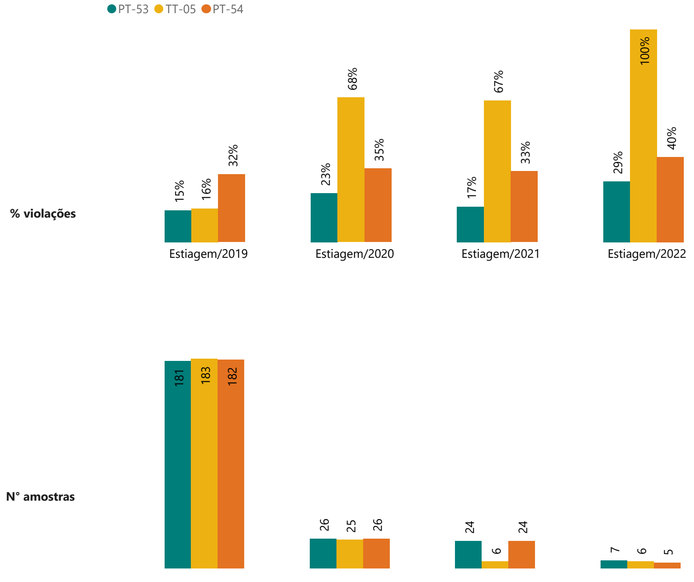
No Gráfico 8.3.3-1, podem ser observados os percentuais de violação para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 para o ponto TT-05 e para os pontos de montante e jusante localizados no rio Paraopeba.

Para o período atual, estiagem/22, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Alumínio dissolvido, Chumbo total, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Oxigênio dissolvido e Turbidez. Dentre esses parâmetros, para Alumínio Dissolvido (montante: 29%, tributário: 100%, jusante: 40%), Chumbo total (montante: 0%, tributário: 17%, jusante: 0%), Ferro dissolvido (montante: 43%, tributário: 83%, jusante: 80%), Oxigênio dissolvido (montante: 0%, tributário: 20%, jusante: 0%) e Turbidez (montante: 14%, tributário: 67%, jusante: 0%) as violações foram mais expressivas no tributário ribeirão das Abóboras em relação aos pontos de montante e jusante da confluência. Entretanto apenas para Alumínio e Ferro dissolvido ocorreu elevação do percentual entre montante e jusante, indicando possível contribuição do tributário para estes parâmetros. Temporalmente, apenas para Alumínio dissolvido e Turbidez foi possível observar elevação dos percentuais de violação no período de estiagem/2022 em relação aos demais períodos de estiagem. Para Chumbo total, o percentual de violações do período atual se manteve equivalente ao período anterior, mas superior em relação aos períodos de 2019 e 2020. Para Ferro dissolvido e Manganês total os percentuais oscilaram entre os períodos, destacando-se maiores percentuais na estiagem/2020 seguida da estiagem/2022. Já para Fósforo total e, em geral, para Oxigênio dissolvido os percentuais de violação foram mais reduzidos no período atual, estiagem/2022.

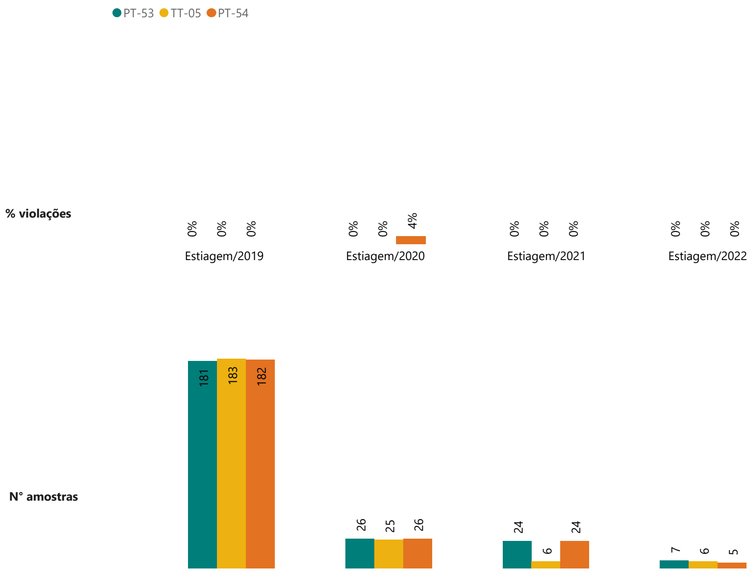
Gráfico 8.3.3-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no TT05 (ribeirão Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

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

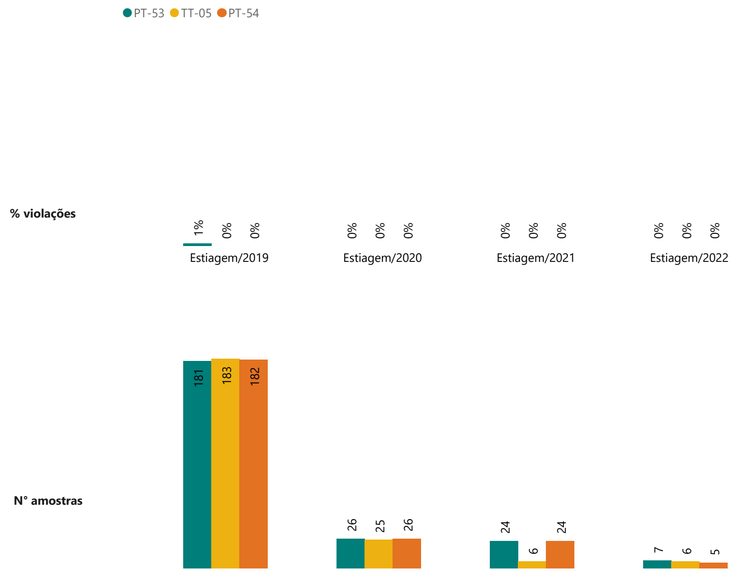
Parâmetro: Alumínio Dissolvido



Parâmetro: Arsênio Total



Parâmetro: Cádmio Total



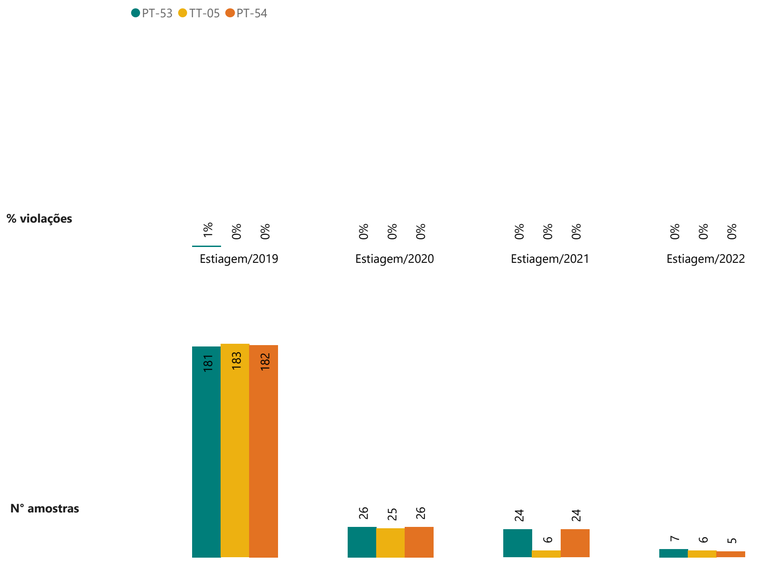
Parâmetro: Chumbo Total

Parâmetro: Cobalto Total

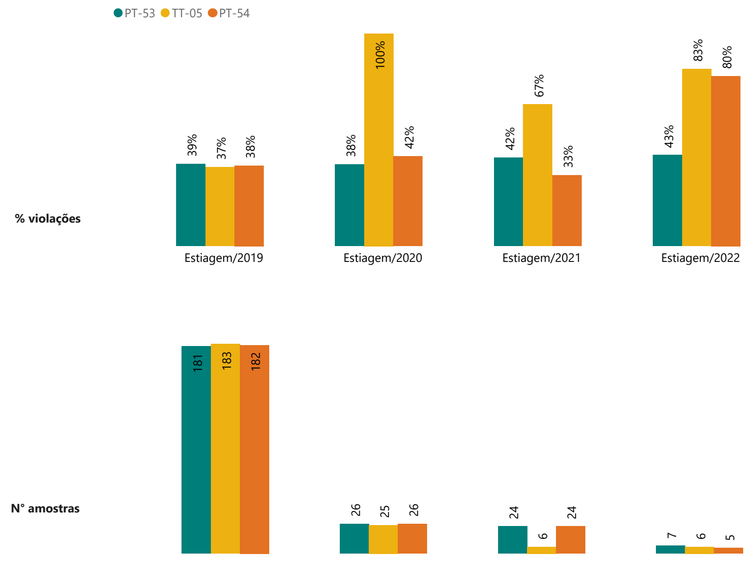
Parâmetro: Cobre Dissolvido

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

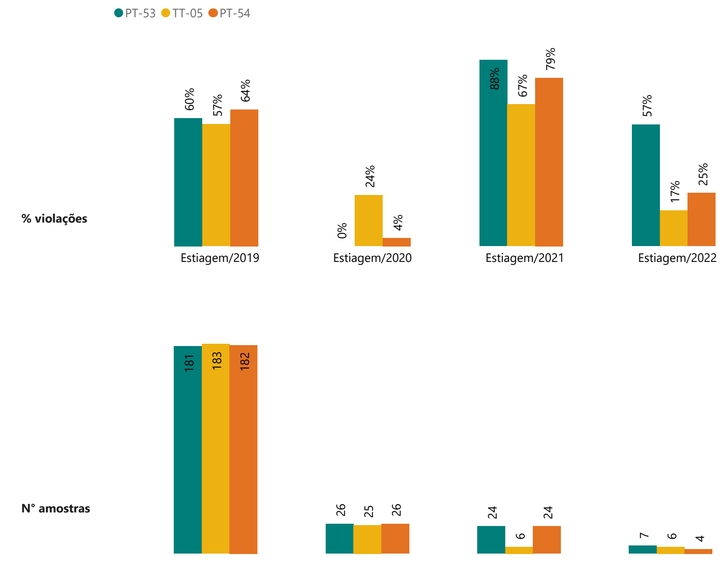
Parâmetro: Cromo Total



Parâmetro: Ferro Dissolvido



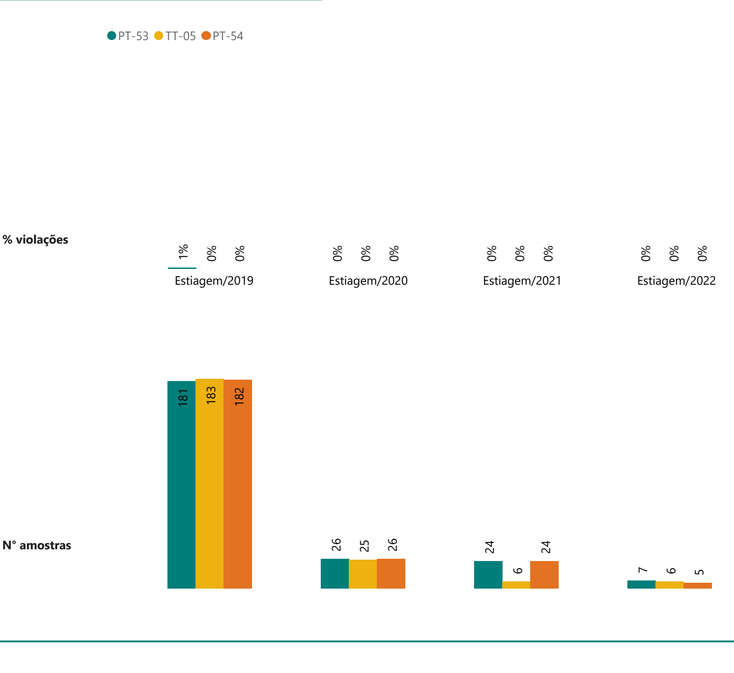
Parâmetro: Fósforo Total



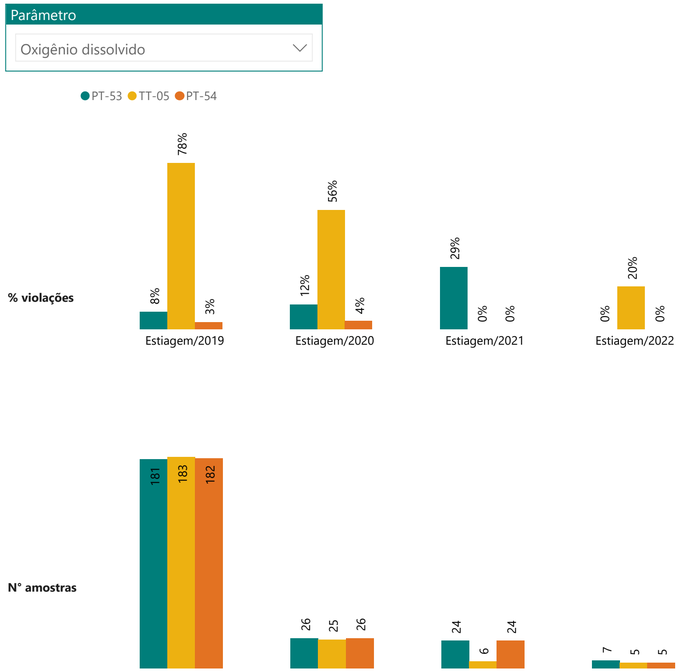
Parâmetro: Manganês Total

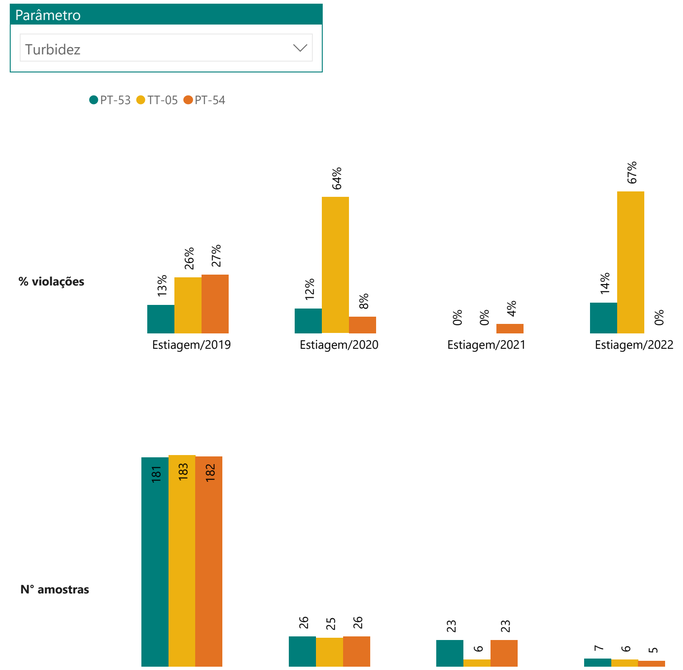
Parâmetro: Mercúrio Total

Parâmetro: Níquel Total



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





No Gráfico 8.3.3-2, são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*/Coliformes termotolerantes, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 (abril a setembro/2019), estiagem/2020 (abril a setembro/2020), estiagem/2021 (abril a setembro/2021) e estiagem/2022 (abril a setembro/2022) 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. Conforme indicado nos gráficos anteriores, o N amostral do PT-54 na estiagem/2022 foi equivalente a 5 amostras e por este motivo, não está representado nos gráficos *boxplot*, visto que o gráfico apresenta as métricas da estatística descritiva para no mínimo 6 resultados.

De modo geral, observam-se resultados medianos do *baseline* inferiores aos valores máximos permitidos segundo a classe de enquadramento para todos os parâmetros no período sazonal analisado. Para a maioria dos parâmetros, os teores medianos no tributário foram mais elevados que dos pontos de montante e jusante bem como acima do *baseline* do Igam (BP072).

As concentrações medianas de Alumínio dissolvido no tributário aumentaram entre os períodos de estiagem 2019 e 2022 e, com exceção do ano de 2019, mais de 75% dos resultados ultrapassaram o VMP (0,1 mg/L). Além disso, a partir da estiagem/2020, as concentrações deste analito foram maiores no TT-05 se comparadas aos pontos PT-53 e PT-54. Nos pontos do rio Paraopeba, as concentrações deste analito mantiveram-se mais próximas entre os períodos, mas ainda assim, nota-se elevação no último período de monitoramento no PT-53.

De modo similar ao verificado para Alumínio dissolvido, as concentrações medianas de Ferro dissolvido no tributário também aumentaram entre os períodos de 2021 e 2022 e foram superiores aos pontos do rio Paraopeba e a condição do *baseline* sazonal. Com exceção do período de estiagem/2019, nos demais, mais de 75% dos resultados ficaram acima do VMP (0,3 mg/L). Nos PT-53 e PT-54, as concentrações deste analito mantiveram-se mais próximas entre os períodos, mas ainda assim, nota-se elevação no último período de monitoramento no PT-53. Para estes dois pontos as medianas apresentaram-se mais elevadas em relação ao *baseline* de estiagem.

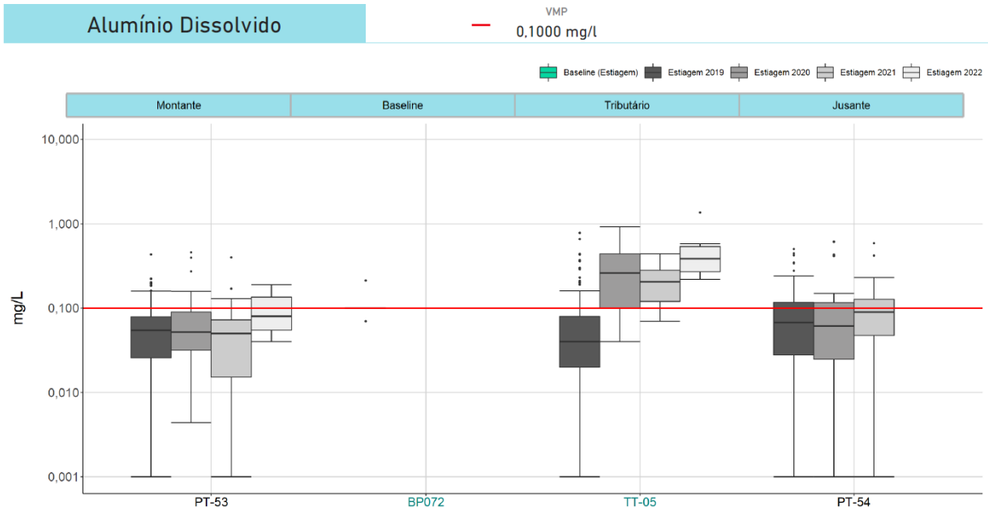
Já para o Manganês total, comportamento contrário foi observado. Maiores concentrações deste analito ocorreram nos pontos situados no rio Paraopeba em relação ao ponto do tributário TT-05. Além disso, nos pontos PT-53 e PT-54, os resultados ficaram majoritariamente acima do VMP (0,1 mg/L) e do respectivo *baseline* de estiagem. No ribeirão das Abóboras, em geral, mais de 75% dos resultados deste analito ficaram abaixo do limite legal, bem como da mediana do *baseline* de estiagem.

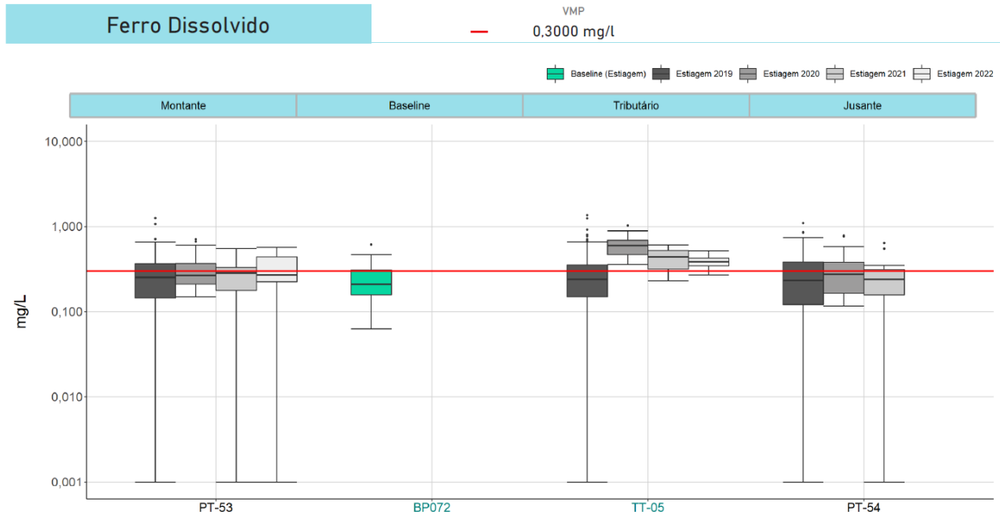
Para Turbidez, notou-se decréscimo dos teores entre 2019 e 2021 nos pontos do rio Paraopeba, enquanto no TT-05, os teores de Turbidez oscilaram entre os períodos. Em todos os períodos, os resultados deste analito no TT-05 ficaram acima dos registrados nos pontos PT-53 e PT-54, mas com exceção dos períodos de estiagem/2020 e estiagem/2022, mantiveram-se majoritariamente abaixo do VMP (100 NTU), mas ainda assim acima da condição do *baseline* sazonal.

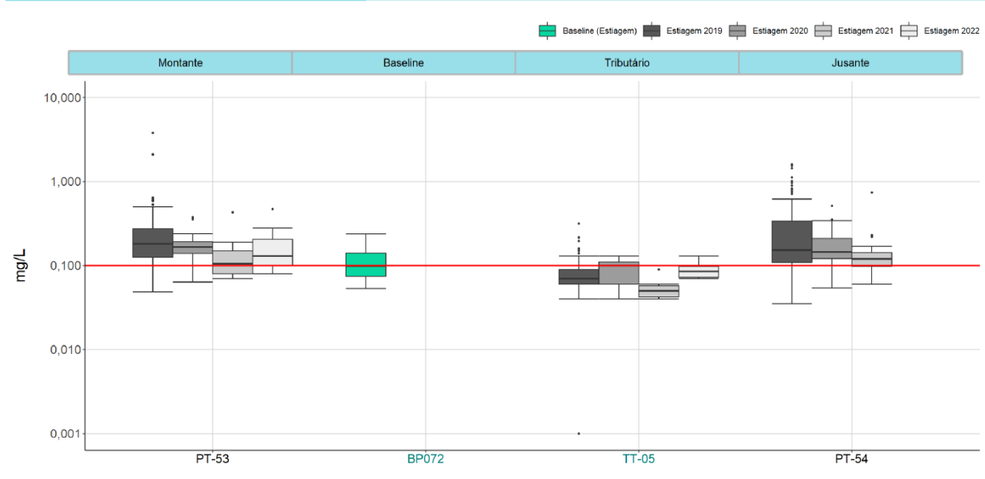
Para Fósforo total, as concentrações oscilaram entre os períodos considerados e entre os pontos analisados. Nos três pontos, com exceção do período de estiagem/2020 e da estiagem/2022 para o TT-05, os resultados medianos foram superiores ao *baseline* sazonal e ao VMP (0,1 mg/L).

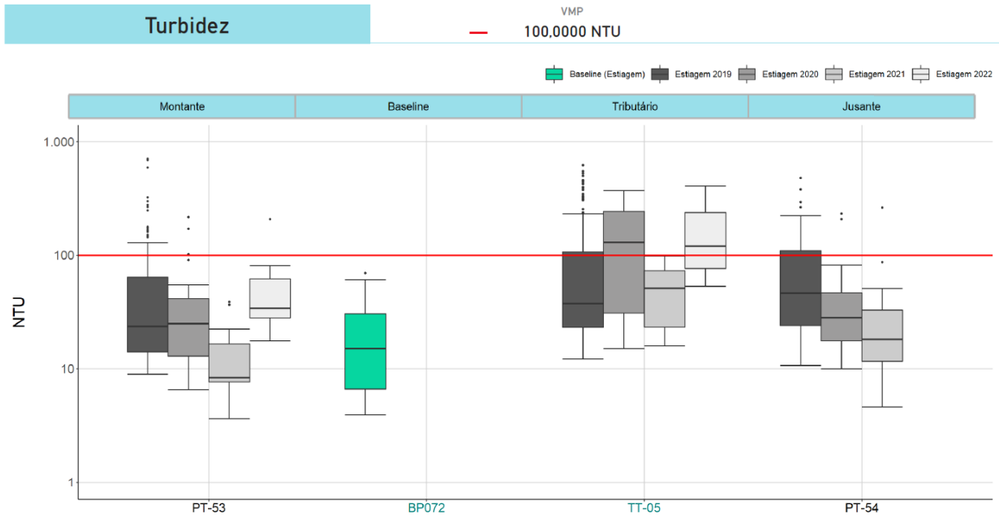
Já para *E. coli*/Coliformes termotolerantes, os maiores resultados foram verificados no ponto de montante, mas ainda assim permaneceram inferiores ao *baseline.* Neste ponto, houve elevação dos resultados no período atual, estiagem/2022. No TT-05 e no ponto de jusante (PT-54) os resultados oscilaram entre os períodos de estiagem, mas permaneceram, em geral, em mais de 75% dos casos, abaixo do VMP (1000 NMP/100 mL). Para DBO, nos três pontos, os resultados foram pouco variáveis, destacando-se o TT-05 com a maior parte dos resultados inferiores ao limite de quantificação do método analítico. Ainda assim, piores condições de oxigenação foram identificadas no ribeirão das Abóboras, principalmente nos anos de 2019 e 2020, quando mais de 50% das concentrações ficaram abaixo do limite legal (5 mg/L).

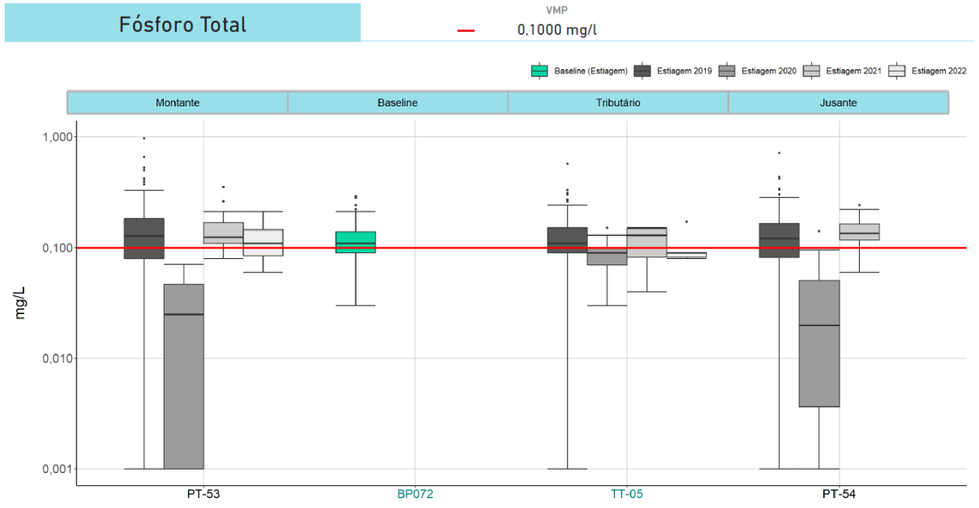
Gráfico 8.3.3-2: *Boxplots* - TT05.

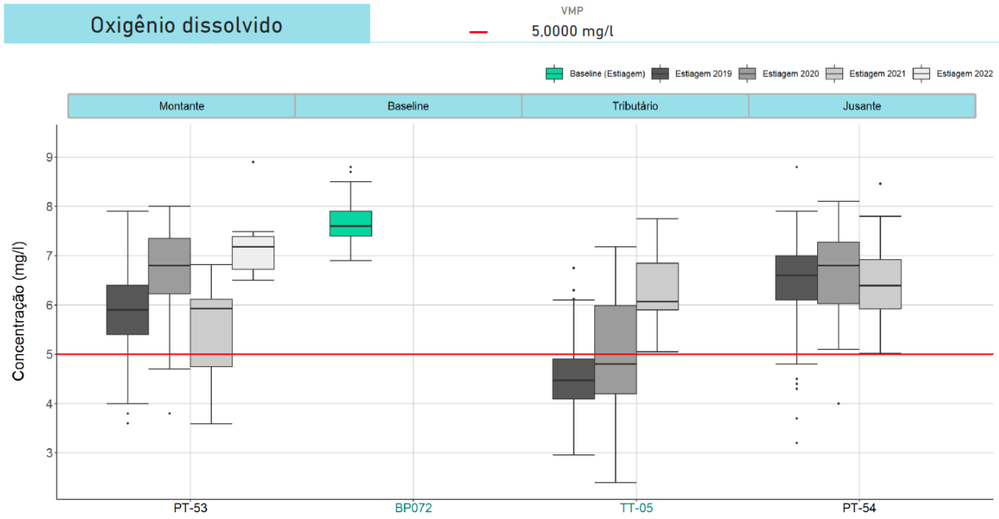


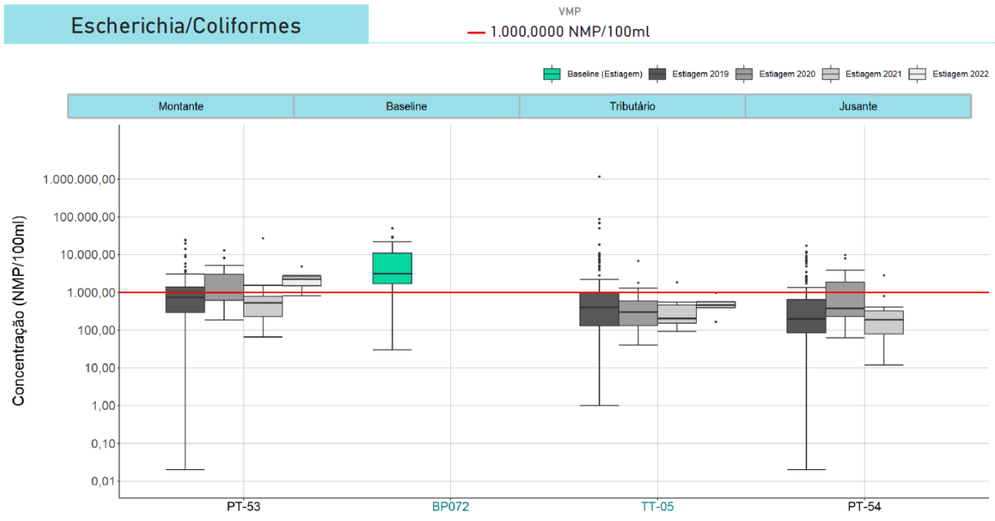












Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.3-1 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 e OD entre os pontos de montante e jusante nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. Os resultados para os quais foram verificadas diferenças significativas (valor-p ≤0,05), foram destacados em vermelho para melhor visualização.

Tabela 8.3.3-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras.

PT-53 (Mont.) X PT-54 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022
Manganês Total	0,442	0,421	0,379	0,744
Ferro Dissolvido	0,427	0,728	0,509	0,568
Alumínio Dissolvido	**0,006**	0,891	**0,018**	0,807
Turbidez	**0,000**	0,621	**0,008**	1,000
Fósforo Total	0,456	0,689	0,860	0,439
DBO	1,000	0,920	**0,039**	**0,000**
E.Coli / Coli.Termot.	**0,000**	**0,018**	**0,004**	0,051
Nitrogênio Amoniacal	**0,000**	**0,001**	0,052	0,256
Oxigênio Dissolvido	**0,000**	0,985	**0,004**	0,256

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05) Elaboração: Arcadis, 2022.

Nos períodos de estiagem analisados, maiores indicativos de diferenças significativas entre os pontos de montante e jusante ocorreram nos anos de 2019 e 2021, com destaque para os parâmetros Alumínio dissolvido, Turbidez, *E.coli*/C.termot. e Oxigênio dissolvido. Já no período de estiagem/2022, apenas para DBO houve indicativo de diferença significativa. Observa-se que o parâmetro *E.coli*/Coli.termot. se destacou com indicativo de maior possibilidade de influência do tributário ribeirão das Abóboras na qualidade da água do rio Paraopeba, condição também observada nos períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). Por outro lado, para Manganês total, Ferro dissolvido e Fósforo total 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.

8.3.4. 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 lêntico do reservatório, mas sob influência exclusivamente das vazões turbinadas da

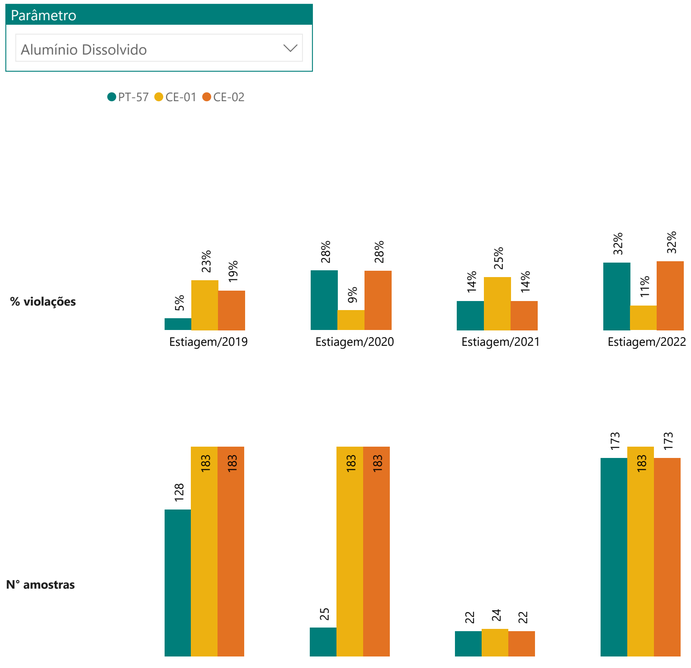
usina, o que seria a condição mais comum, uma vez que as vazões vertidas tendem a ser menos permanentes no tempo, especialmente nos períodos de estiagem.

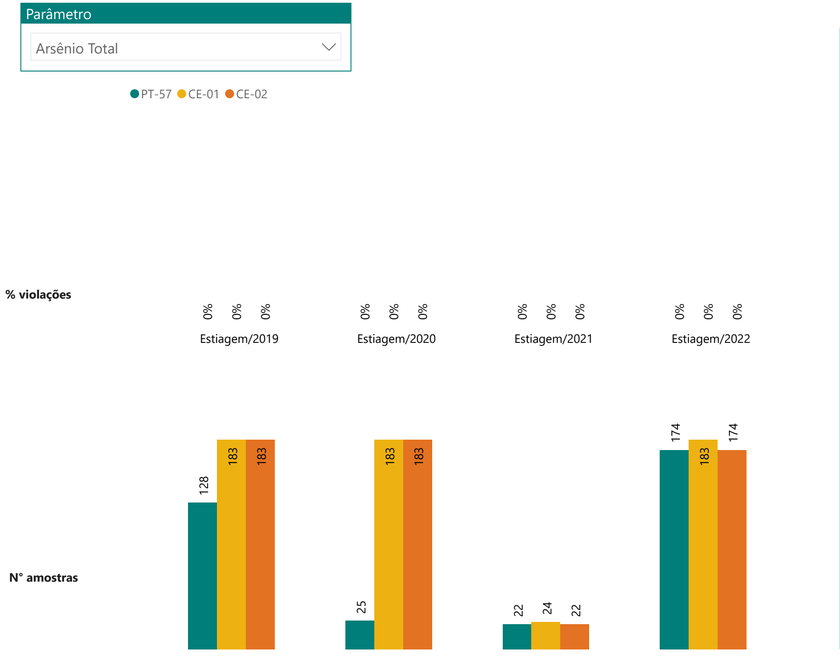
No Gráfico 8.3.4-1, podem ser observados os percentuais de violação para os períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 para o ponto CE-01 e para os pontos de montante e jusante localizados no rio Paraopeba.

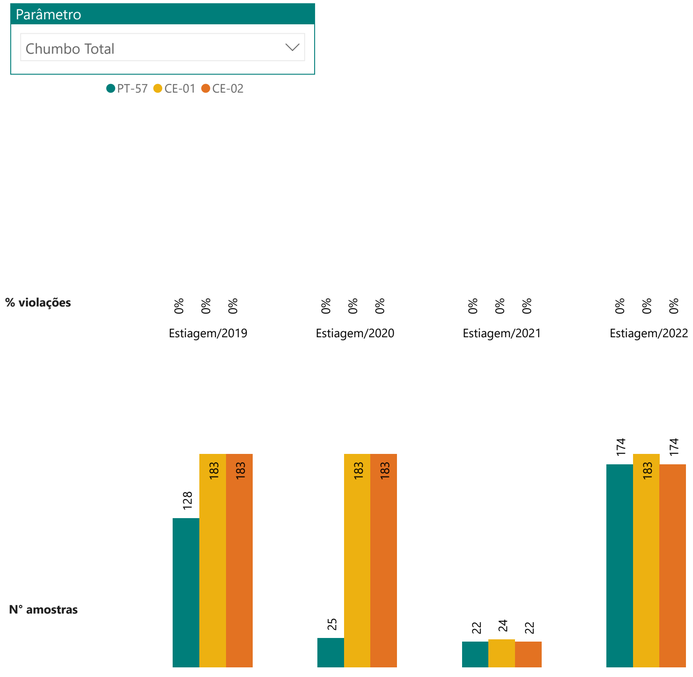
Para o período atual, estiagem/22, percebe-se que neste tributário, considerando os parâmetros apresentados, houve violação apenas para Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Oxigênio dissolvido e Turbidez. Dentre esses parâmetros, com exceção do Alumínio Dissolvido, as violações foram mais expressivas no tributário ribeirão dos Gomes em relação aos pontos de montante e jusante da confluência. Contudo apenas para Oxigênio dissolvido houve acréscimo de violações de montante para jusante, em percentual ínfimo. Temporalmente, os percentuais de violação oscilaram, mas mantiveram-se próximos entre os períodos comparados. Especificamente para Manganês total e Oxigênio dissolvido, os percentuais de violações na estiagem/2022 foram inferiores em relação aos demais períodos de estiagem. Enquanto para Ferro dissolvido o percentual de violação no período atual foi mais elevado se comparado aos períodos de estiagem anteriores, mas bem próximo do registrado na estiagem/2020.

Gráfico 8.3.4-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 no CE01 (ribeirão do Gomes) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba.

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



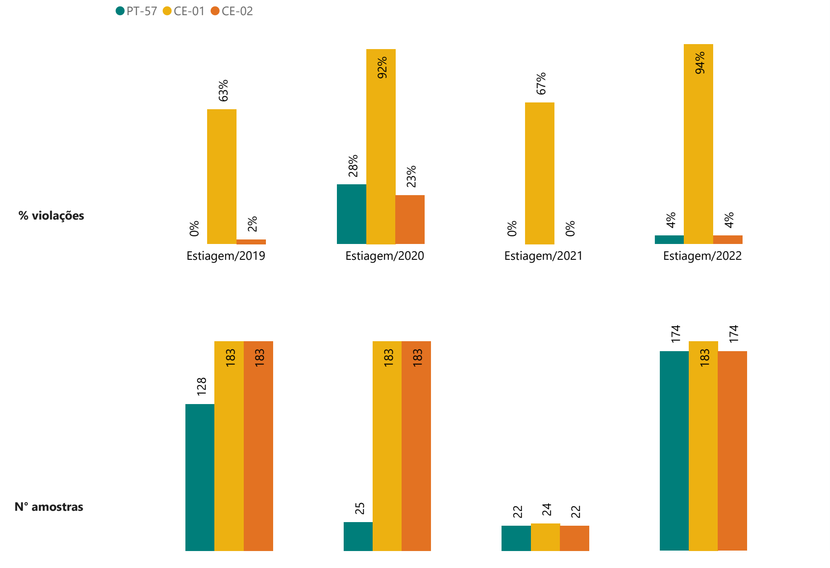




% Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante

Parâmetro: Cromo Total

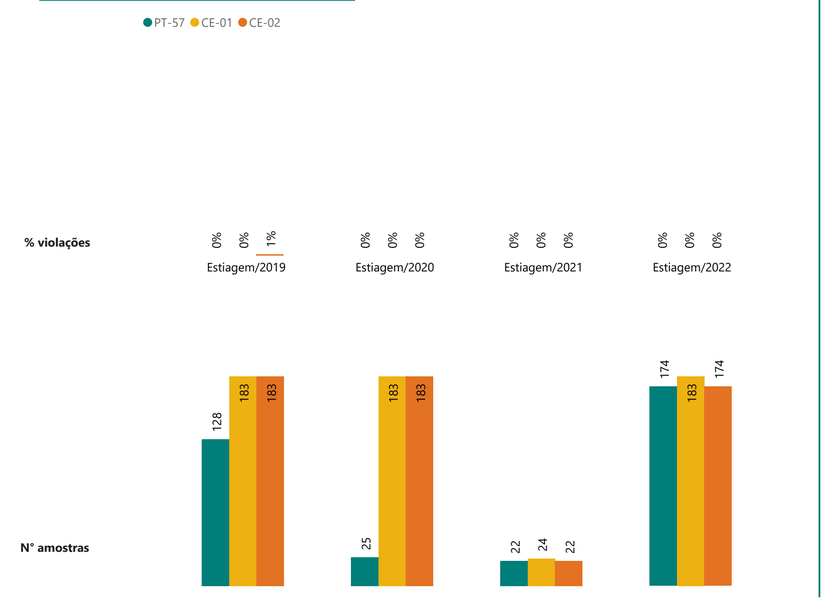
Parâmetro: Ferro Dissolvido



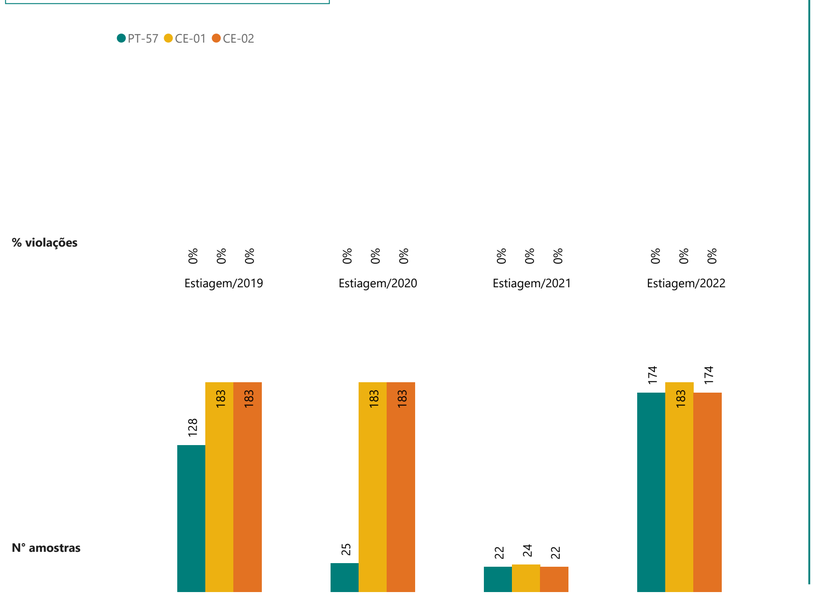
Parâmetro: Fósforo Total

Parâmetro: Manganês Total

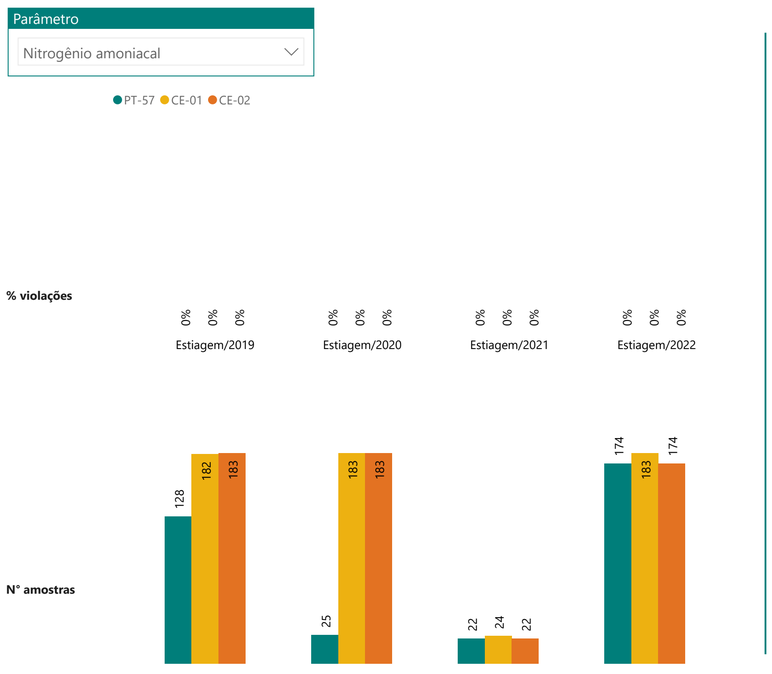
Parâmetro: Mercúrio Total

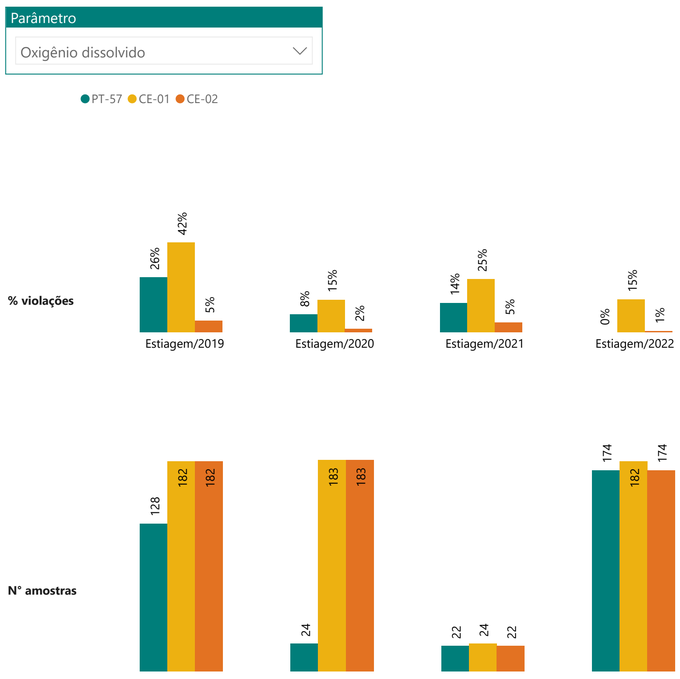


Parâmetro: Níquel Total



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





No Gráfico 8.3.4-2 são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*/Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Oxigênio dissolvido e DBO ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 (abril a setembro/2019), estiagem/2020 (abril a setembro/2020), estiagem/2021 (abril a setembro/2021) e estiagem/2022 (abril a setembro/2022) 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, observam-se teores medianos inferiores aos valores máximos permitidos segundo a classe de enquadramento (DN COPAM-CERH nº 08/2022), com exceção do parâmetro Ferro dissolvido no CE-01, no qual as concentrações foram mais elevadas que nos pontos do rio Paraopeba e majoritariamente acima do VMP (0,3 mg/L). Além disso, nos três pontos monitorados, para a maior parte dos parâmetros, os teores medianos foram próximos ao *baseline* do Igam (BP099). Com exceção dos parâmetros Fósforo total e DBO, ambos com variabilidade reduzidas nos pontos analisados, para os demais, os valores medianos no tributário ribeirão dos Gomes foram maiores em relação aos pontos de montante e jusante. No entanto, dentre esses parâmetros, apenas para Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez, houve certa elevação dos teores medianos no ponto de jusante se comparado a montante, demonstrando a possível influência do tributário na qualidade da água do rio Paraopeba.

Para Alumínio dissolvido, ao longo dos períodos de estiagem monitorados, as concentrações oscilaram no ribeirão dos Gomes, e permaneceram, em geral, abaixo do VMP (0,1 mg/L). Situação similar foi observada nos pontos de montante (PT-57) e jusante (CE-02), porém com concentrações mais reduzidas se comparadas aos resultados do CE-01.

Para Manganês total, nos pontos do rio Paraopeba, notou-se decréscimo das concentrações deste analito entre os anos de 2019 e 2022, e com exceção de alguns resultados pontuais, não houve superação do VMP (0,1 mg/L), incluindo a condição do *baseline* sazonal. No ribeirão dos Gomes, os resultados deste analito oscilaram entre os períodos considerados, e apesar de superiores em relação aos dos pontos localizados no rio Paraopeba, também permaneceram majoritariamente abaixo do VMP (0,1 mg/L).

Já para Ferro dissolvido, os resultados apresentaram-se mais próximos entre os diferentes períodos de estiagem comparados para os pontos de montante e de jusante localizados no rio Paraopeba, com reduzida variabilidade e maior parte dos resultados abaixo do VMP (0,3 mg/L). Situação similar foi observada para o *baseline* de estiagem. Por outro lado, no CE-01 os resultados oscilaram entre os períodos e foram substancialmente mais elevados que nos pontos do rio Paraopeba, e majoritariamente acima do VMP.

Para Turbidez, os teores oscilaram entre os períodos de estiagem nos três pontos considerados e foram, em geral, mais elevados no CE-01. Entretanto, com exceção de desvios pontuais, em todos os pontos os resultados permaneceram abaixo do limite legal.

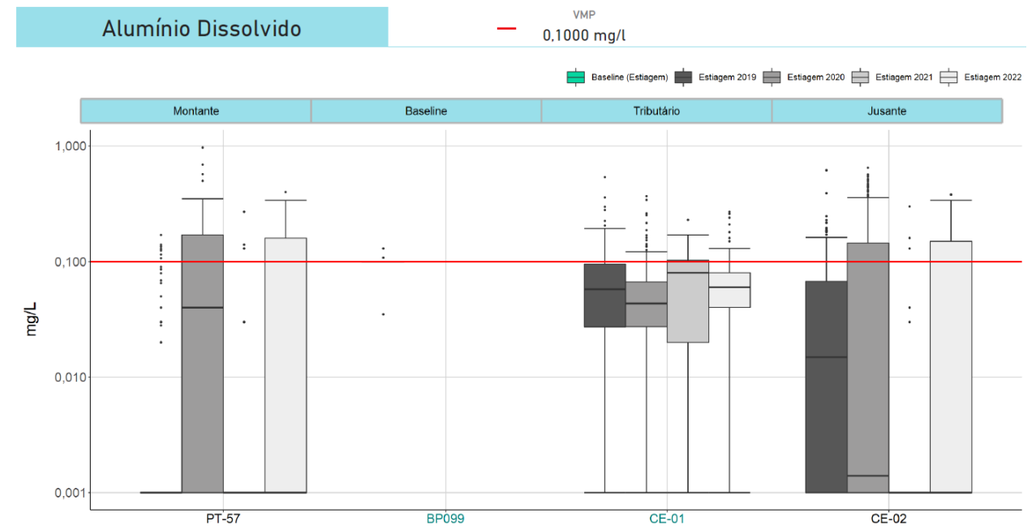
Para Fósforo total, os resultados apresentaram baixa variabilidade nos três pontos avaliados, incluindo a condição do *baseline* sazonal. Com exceção de resultados pontuais, as concentrações

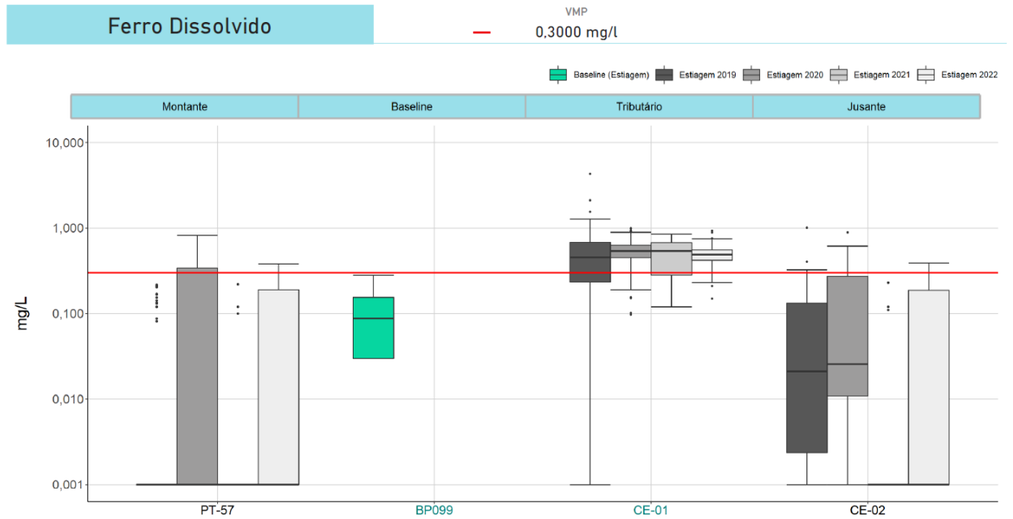
deste analito permaneceram abaixo do limite legal. Situação semelhante foi identificada para o parâmetro sanitário DBO.

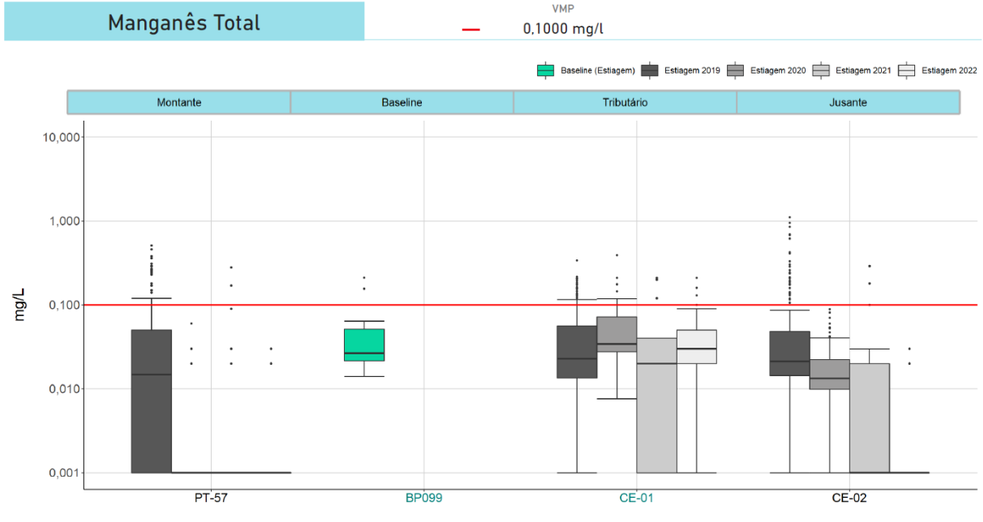
Já para *E.coli*/Coliformes termotolerantes, os resultados foram mais elevados no CE-01 se comparados aos pontos de montante e jusantes situados no rio Paraopeba, mas ainda assim permaneceram próximos do *baseline* e majoritariamente abaixo do VMP (200 NMP/100 Ml) para a Classe 1, conforme enquadramento do ribeirão dos Gomes.

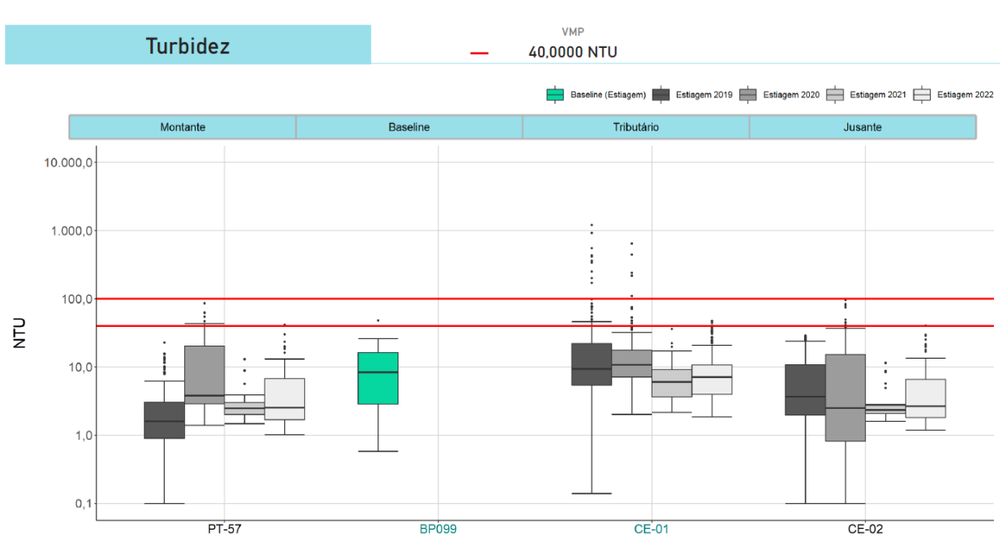
Além disso, cabe ressaltar que a variabilidade nas concentrações entre os pontos de montante, jusante e *baseline* pode estar associada, dentre outros aspectos, às diferentes frequências e abrangências temporais adotadas entre os monitoramentos Igam e VALE, conforme já mencionado.

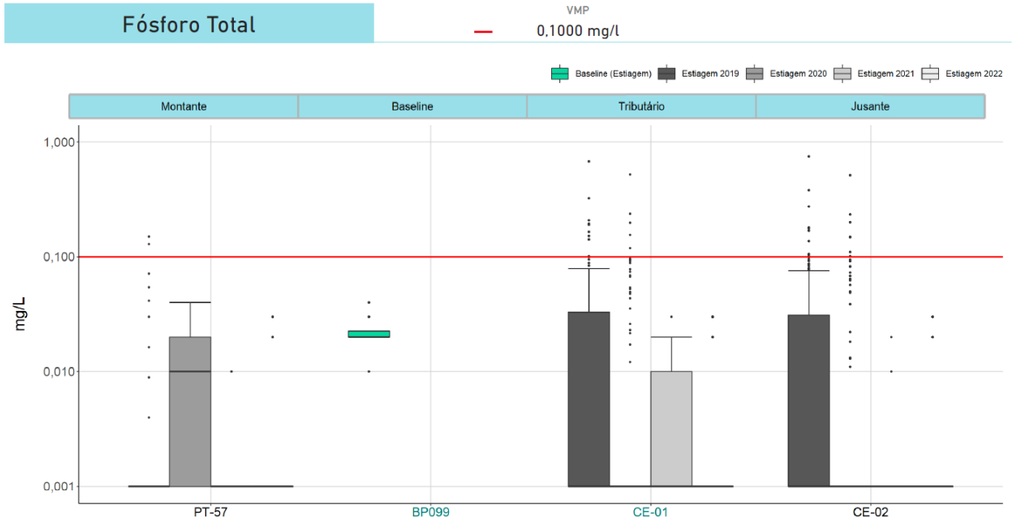
Gráfico 8.3.4-2: *Boxplots*- CE-01.

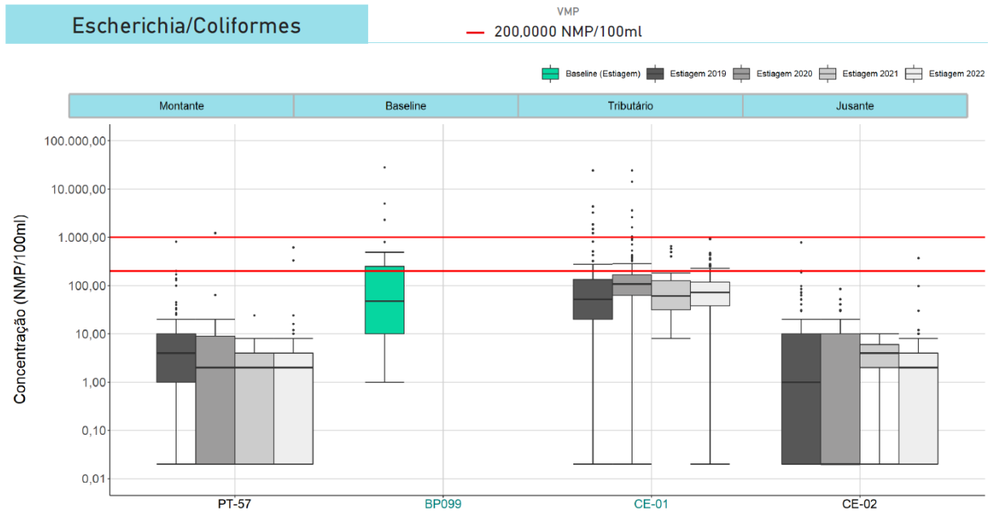












Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.4-1 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 e OD entre os pontos de montante e jusante nos períodos sazonais de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. Os resultados para os quais foram verificadas diferenças significativas (valor-p ≤ 0,05), foram destacados em vermelho para melhor visualização.

Tabela 8.3.4-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes.

PT-57 (Mont.) X CE-02 (Jus.)	Est. 2019	Est. 2020	Est. 2021	Est. 2022
Manganês Total	**0,000**	**0,000**	0,415	0,555
Ferro Dissolvido	**0,000**	**0,003**	0,984	0,873
Alumínio Dissolvido	**0,000**	0,391	0,962	0,603
Turbidez	**0,000**	**0,009**	0,760	0,595
Fósforo Total	**0,000**	**0,000**	0,555	0,214
DBO	0,890	1,000	1,000	0,970
E.Coli / Coli.Termot.	**0,000**	0,375	0,225	0,747
Nitrogênio Amoniacal	**0,000**	**0,000**	0,199	0,611
Oxigênio Dissolvido	0,170	0,938	**0,031**	0,186

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05). Elaboração: Arcadis, 2022.

De modo geral, nos períodos de estiagem analisados, notou-se que os parâmetros mais recorrentes com diferença estatística significativa entre os resultados do monitoramento do ponto de montante e de jusante foram Manganês total, Ferro dissolvido, Turbidez, Fósforo total e Nitrogênio amoniacal, condição também verificada nas comparações estabelecidas para os períodos de chuva (ARCADIS, 2022b). Essas diferenças ocorreram majoritariamente no período de estiagem/20219 e estiagem/2020. No período de estiagem/2021, houve indicativo de diferença significativa apenas para Oxigênio dissolvido, enquanto, especificamente para o período mais recente, estiagem/2022, não houve diferença significativa entre montante e jusante para os parâmetros considerados, não sendo possível inferir sobre a influência do ribeirão dos Gomes no ponto a jusante localizado no rio Paraopeba. Condição de ausência de diferenças significativas entre as comparações estabelecidas também foi identificada para o último período chuvoso avaliado (chuva 2021/2022), conforme detalhado no último relatório de fechamento de ciclo protocolado (ARCADIS, 2022b).

8.4. Considerações

No TT-02, ribeirão Sarzedo, os parâmetros que apresentaram maiores concentrações se comparado aos pontos localizados no rio Paraopeba foram Manganês total, Fósforo total, *E.coli* e DBO. Enquanto Alumínio dissolvido, Oxigênio dissolvido e Turbidez, destacaram-se com resultados mais reduzidos no ponto do tributário. Manganês total e Fósforo total apresentaram 100% de violações no período de estiagem/2022, sendo este valor próximo do registrado nos anos anteriores.

Do mesmo modo, no TT-01 – rio Betim, os parâmetros Manganês total, Fósforo total, *E.coli* e DBO apresentaram maiores concentrações se comparado aos pontos localizados no rio Paraopeba. Enquanto Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido e Oxigênio dissolvido destacaram-se com resultados mais reduzidos no ponto do tributário. O parâmetro Fósforo total foi o que apresentou maior percentual de violação no TT-01 no período de estiagem/2022, com 100% de violações, sendo este percentual próximo ao registrado nos anos anteriores e, em geral, acima dos percentuais dos pontos de montante e jusante da confluência.

Já no ribeirão das Abóboras, monitorado pelo TT-05 e localizado em bacia mais rural, os parâmetros que se sobressaíram com concentrações mais elevadas foram Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido e Turbidez, bem como Oxigênio dissolvido com menores concentrações em relação aos pontos do rio Paraopeba. O parâmetro Alumínio dissolvido foi o que apresentou maior percentual de violação no TT-05 no período de estiagem/2022, com 100% de violações, sendo este percentual superior ao registrado nos anos anteriores e bem acima dos percentuais dos pontos de montante e jusante da confluência.

Por fim no CE-01, localizado no ribeirão dos Gomes, os parâmetros que apresentaram maiores concentrações se comparado aos pontos localizados no rio Paraopeba foram Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez e *E.coli.* Destaca-se o Ferro dissolvido com maior percentual de violação na estiagem/2022 em relação aos períodos anteriores, bem como se comparado aos pontos de montante e jusante da confluência.

Logo, as alterações mais expressivas nos tributários estão relacionadas aos parâmetros mais característicos da própria geologia/pedologia da 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. Em geral, as alterações observadas nos tributários acompanharam aquelas notadas na bacia como um todo, e tiveram comportamentos próximos entre os períodos de estiagem analisados.

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. 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.

Em relação à comparação dos resultados dos parâmetros nos pontos do rio Paraopeba a montante e jusante das confluências com seus tributários, efetuada por meio do teste estatístico de Mann-Whitney, notou-se variabilidade dos resultados estatísticos para os parâmetros entre os períodos sazonais em cada um dos tributários analisados, refletindo as diferentes características das bacias nos quais os mesmos estão inseridos.

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

9.1. Objetivo

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

9.2. Metodologia

A fim de compreender a qualidade da água superficial nos reservatórios da UHE Retiro Baixo e UHE Três Marias ao longo dos períodos estiagem (2019, 2020, 2021 e 2022), elaboraram-se os seguintes elementos para eventuais avaliações:

- Gráficos de interpolação do perfil estratigráfico do ponto RB-02 (inserido no PMQS-TM) para os parâmetros de interesse (Temperatura, OD, Mn total, Fe total e Al total);
- Gráfico de Resistência Térmica Relativa (RTR) no ponto RB-02, obtido a partir da densidade específica da água em diferentes temperaturas;
- 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 *boxplot*.

Os valores máximos permitidos pela legislação seguem o enquadramento previsto pela DN COPAM-CERH 08/2022.

Nesse capítulo, além dos pontos PME (PT-21, PT-57, CE-01, CE-02, PT-22 e PT-23), 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 (região central do reservatório da UHE Retiro Baixo próxima ao maciço da barragem);
- 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);

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. O citado relatório em sua versão mais recente está referenciado como ARCADIS, 2022a.

9.3. Resultados e discussão

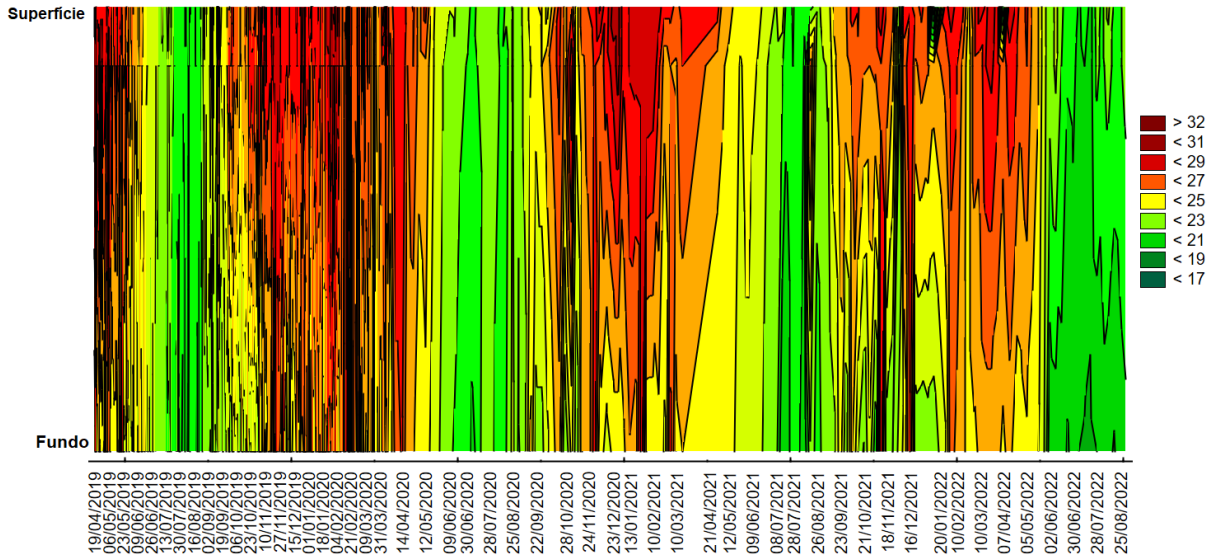
Especificamente para o rio Paraopeba, o reservatório da UHE Retiro Baixo representa mudança no regime hidráulico de escoamento (lótico para lêntico), favorecendo os efeitos de decantação/sedimentação, diluição e outros processos de decaimento intrínsecos ao aumento do tempo de detenção hidráulica (TDH) 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 consequente circulação vertical da massa d'água.

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 perfil de 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).

9.3.1. Acompanhamento da hidrodinâmica vertical do reservatório de Retiro Baixo

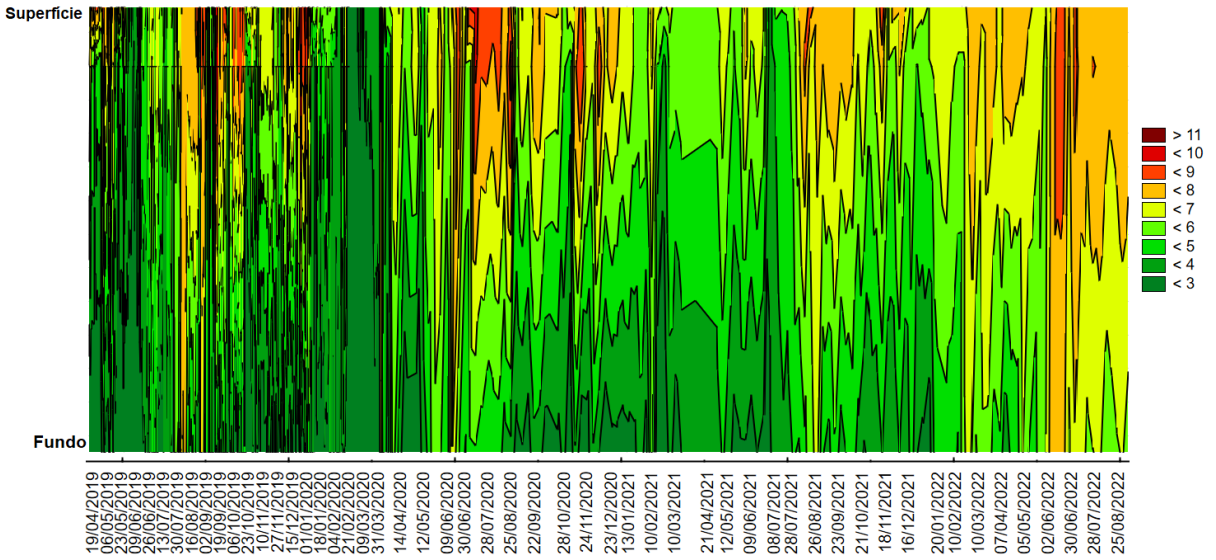
A dinâmica comportamental do reservatório de Retiro Baixo pode ser verificada pelos diagramas mostrados a seguir (Gráfico 9.3.1.1 e Gráfico 9.3.1.5) especificamente para o ponto de monitoramento RB-02. Este ponto foi considerado para a presente análise por ser efetivamente representativo de trecho de escoamento mais lêntico e, assim, mais sujeito aos fenômenos de circulação e estratificação térmica. Os referidos gráficos representam o perfil de profundidade com destaque para interpolação dos resultados entre camadas superficiais, intermediárias e de fundo do reservatório.

Gráfico 9.3.1-1: Diagrama da variação da Temperatura (°C) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.



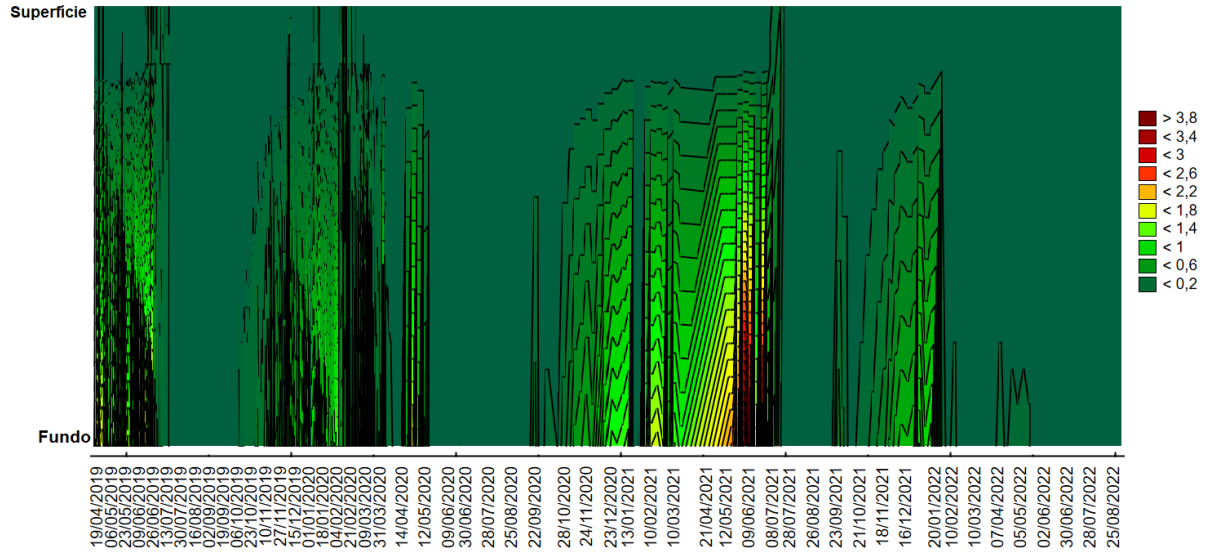
Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 9.3.1-2: Diagrama da variação de Oxigênio dissolvido (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.



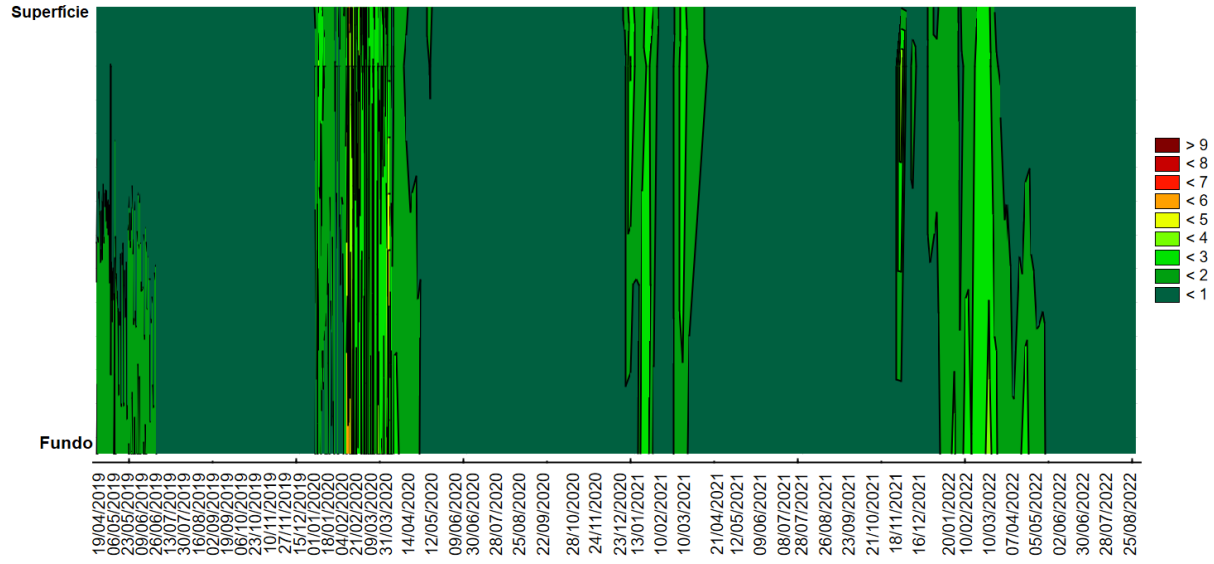
Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 9.3.1-3: Diagrama da variação de Manganês total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.



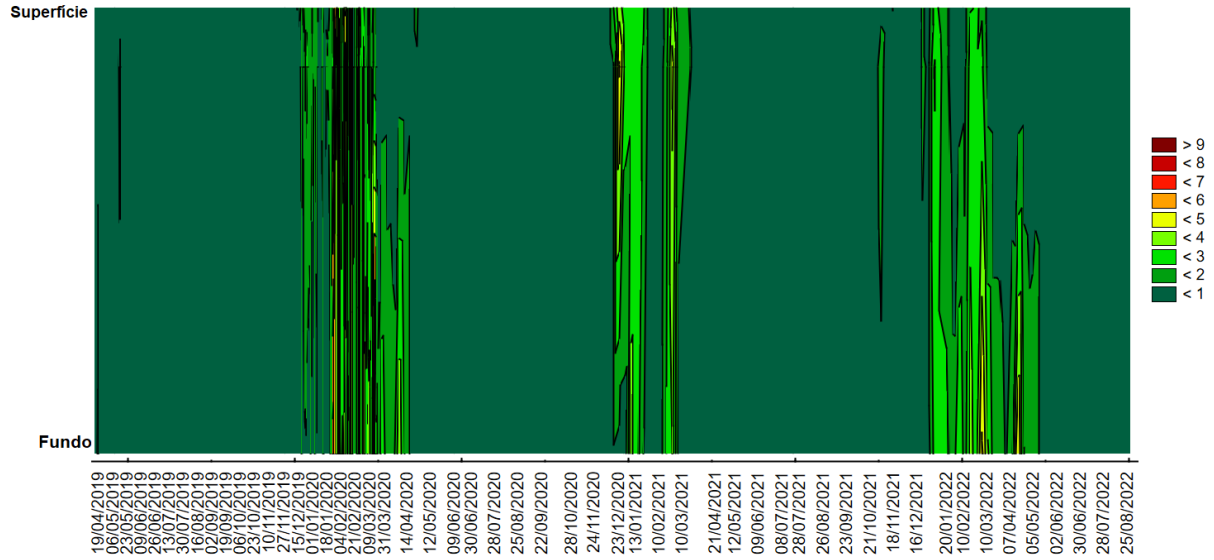
Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 9.3.1-4: Diagrama da variação de Ferro total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.



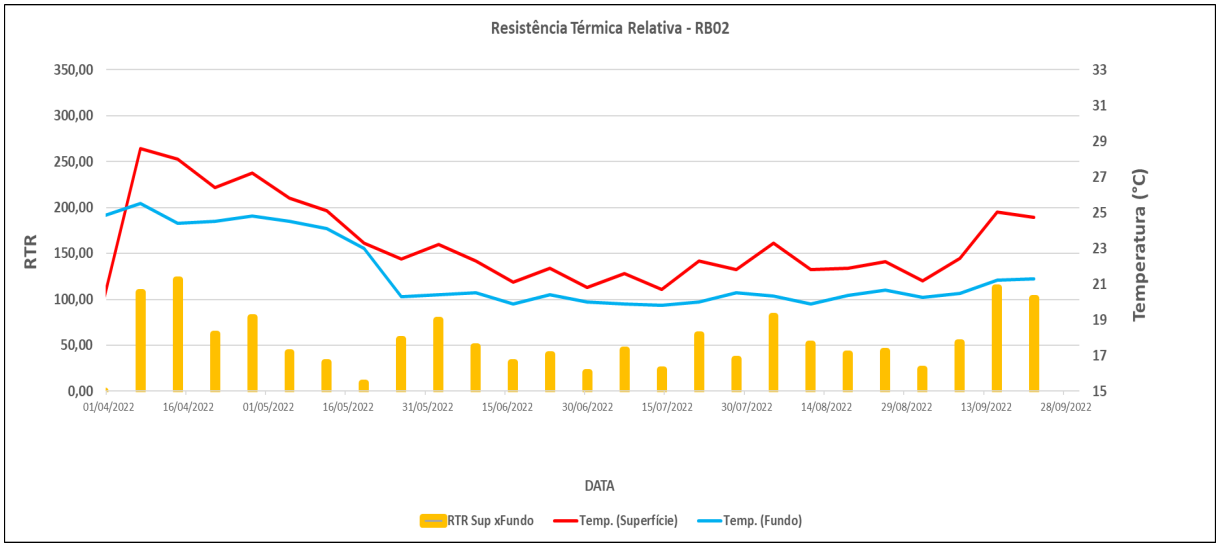
Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 9.3.1-5: Diagrama da variação de Alumínio total (mg/L) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 9.3.1-6: Variação da resistência térmica relativa no ponto RB-02, na UHE Retiro Baixo, no período de estiagem 2022.



Fonte: Arcadis,2022.

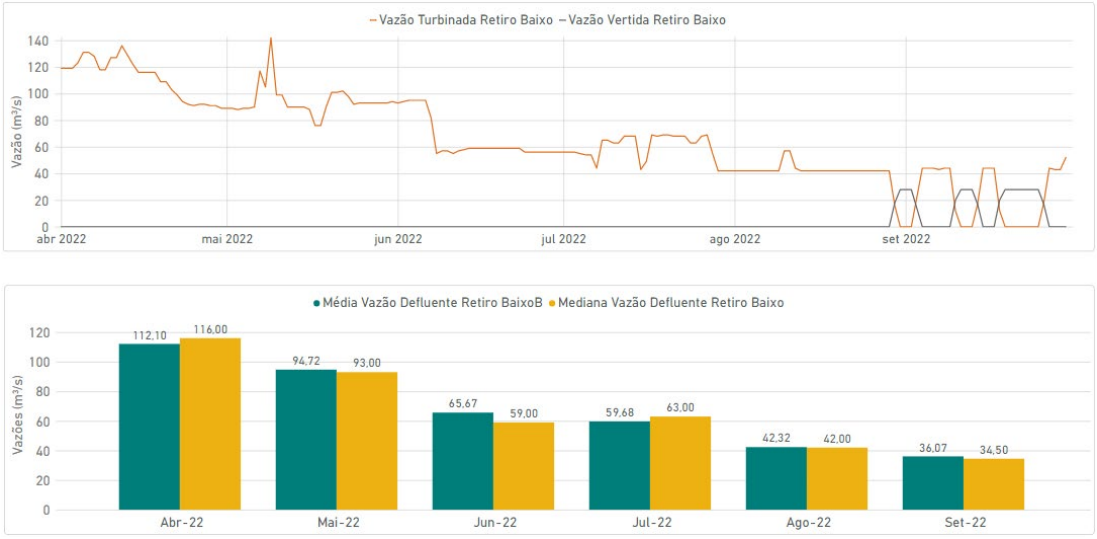
Ao longo do período de monitoramento são observadas, periodicamente, alterações na qualidade da água no ponto RB-02 em decorrência de fenômenos inerentes à localização desse ponto. Os fenômenos observados em períodos anteriores ao atual são descritos de forma detalhada em ARCADIS, 2022a. Para um entendimento mais específico sobre o comportamento térmico no reservatório da UHE Retiro Baixo, elaborou-se o Gráfico 9.3.1-6 evidenciando-se a variação da Resistência Térmica Relativa (RTR) no ponto RB-02 (ponto do

PMQS-TM) localizado entre os pontos PT-28 e PT-21. O valor da RTR indica o quão favorável à mistura está a massa d'água naquele ponto (KALFF, 2002; TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 2008 *apud* SILVA, 2016). O cálculo é realizado a partir da razão entre a diferença dos pesos específicos da água superficial e da água de fundo sobre a diferença dos pesos específicos da água à 5ºC e 4ºC. Sendo assim, quanto maior o valor de RTR, maior a resistência da água à mistura, ao passo que quanto menor o valor, maior a vulnerabilidade da massa d'água à mistura. Tal comportamento é percebido majoritariamente no inverno.

Com foco no período de estiagem mais recente, 2022, percebe-se que há episódios de evidência de desestratificação térmica, que podem ser observados principalmente entre os meses de maio e agosto, quando por vezes são observados baixos valores de RTR ao longo do período monitorado (Gráfico 9.3.1-6), favorecendo um ambiente de potencial circulação e mistura, visto a redução do RTR, como efeito direto da aproximação das temperaturas de superfície e fundo. Pelo diagrama de variação de ara OD (Gráfico 9.3.1-2), percebe-se que as regiões mais profundas apresentam redução de concentração, porém se percebe indícios de homogeneidade dos teores no perfil de profundidade, refletindo na redução das concentrações dos metais (Gráfico 93.1-3 a Gráfico 9.3.1-5), possivelmente em função de processos químicos de oxidação e precipitação desses analitos.

No que diz respeito às regras de operações do período de estiagem/2022, no Gráfico 9.3.1-7, pode ser verificado que a operação de turbinamento se reduziu ao longo do tempo, com valores máximos registrados entre abril e maio. A respeito do vertimento, esta operação só foi realizada entre o fim de agosto e o mês de setembro e tal comportamento pode estar relacionado com a redução de nível do reservatório e manutenção da vazão natural do curso d'água, além de manutenção periódica das estruturas envolvidas com a geração de energia. As análises completas dos períodos anteriores podem ser consultadas em ARCADIS, 2022a.

Gráfico 9.3.1-7: Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período de estiagem/2022.



Fonte: ANA, 2022. Elaboração: Arcadis, 2022.

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

Em caráter complementar, os resultados do monitoramento 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 e estiagem desde o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A. Levou-se em conta o comportamento dos principais analitos 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, conforme já apresentado no item 8.3.4, pode influenciar a qualidade da água do rio Paraopeba, devido a características fisiográficas 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 PT-22 e a confluência do rio São Francisco.

Destaca-se, como já premissado 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 (2022a), são apresentadas as análises temporal e espacial completas para todos os pontos do reservatório de Três Marias, além dos parâmetros que não possuem VMP.

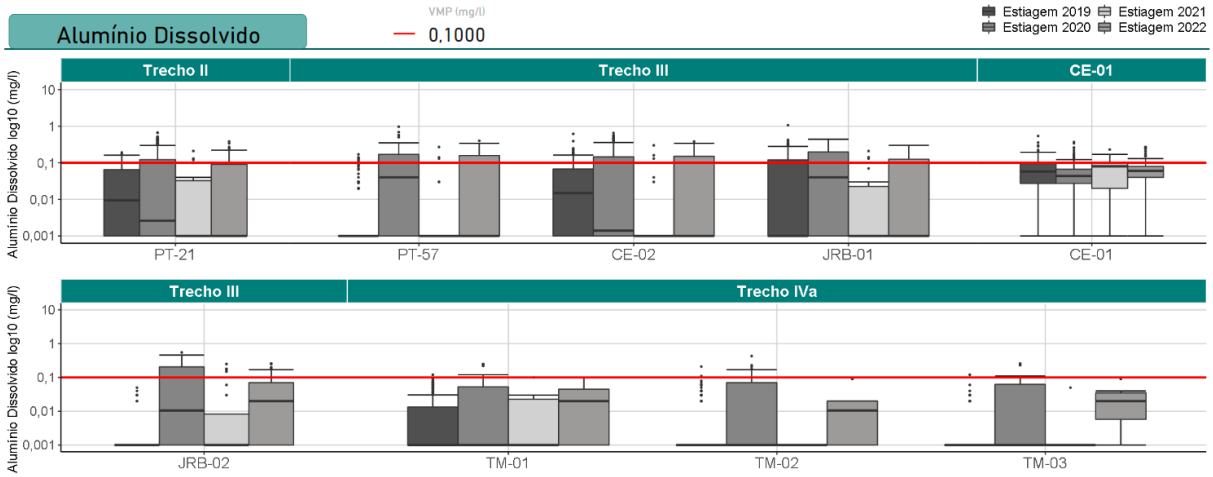
Alumínio dissolvido

No Gráfico 9.3.2.1 podem ser visualizados os resultados de Alumínio dissolvido nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem. Em uma análise temporal do parâmetro apresentado, observa-se diferença de comportamento entre os pontos do reservatório de Três Marias e os pontos localizados a montante deste, exceto JRB-02. Enquanto é observado que os maiores valores medianos são reportados na estiagem/2022 para os pontos do reservatório de Três Marias: TM-01, TM-02 e TM-03 e no JRB-02, para os demais pontos os maiores valores medianos são observados ou na estiagem/2019 ou na estiagem/2020. Excepcionalmente no ribeirão dos Gomes (CE-01), os valores de todos os períodos de

estiagem mantiveram-se próximos entre si. Além disso, percebem-se concentrações aproximadas, ao longo do tempo, entre os pontos PT-21 e JRB-02.

No atual período de estiagem 2022, é possível verificar que os resultados de medianas e máximas apresentaram concentrações aproximadas em todos os pontos, exceto nos TM-01 a TM-03 e no CE-01. Além disso, maior parte dos resultados apresentaram concentrações abaixo de 0,1 mg/L, ademais, as concentrações mais elevadas são observadas a montante do reservatório da UHE Três Marias. Destaca-se que a região imediatamente a montante da UHE Retiro Baixo (PT-19 e PT-55) apresenta elevados valores deste analito em água, em decorrência da geoquímica local que é naturalmente rica em alumínio.

Gráfico 9.3.2-1: Boxplot dos resultados de Al dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.



Elaboração: Arcadis, 2022. 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).

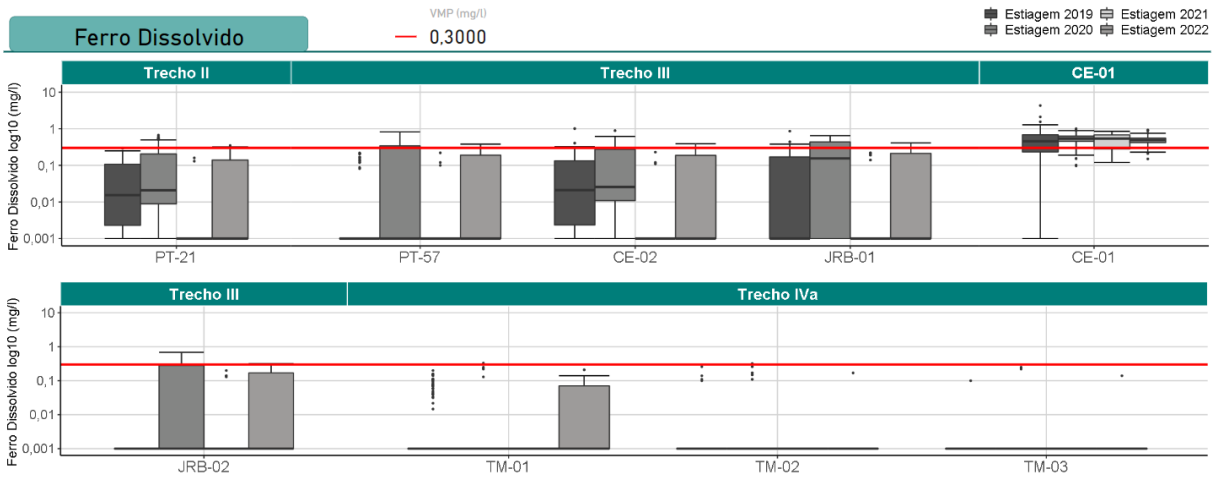
Ferro Dissolvido

O Gráfico 9.3.2.2 apresenta os resultados para o Ferro dissolvido nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem. Em um recorte temporal, percebe-se que os maiores valores foram observados no período de estiagem 2020 entre os pontos PT-21 e JRB-02, bem como maiores variações desse parâmetro. No reservatório de Três Marias são observadas variações temporais apenas no PT-22/TM-01, e somente na estiagem/22, contudo com valores sempre abaixo do VMP.

Além disso, as maiores concentrações são observadas no ribeirão dos Gomes (CE-01) e que mantém menor variabilidade de teores ao longo do tempo, com resultados muito próximos entre os diferentes anos. Este ponto ainda apresenta resultados historicamente mais elevados do que os pontos localizados no rio Paraopeba (CE-02, JRB-01 e JRB-02), comportamento também observado para o período de estiagem/2022.

Apesar da estiagem/2022 apresentar maior oscilação das máximas e do P75 no trecho entre o PT-21 e PT-22/TM-01, as concentrações medianas deste período se mantiveram aproximadas ao período de estiagem/2021. Tal comportamento, pode estar relacionado com o reflexo das chuvas no início da estiagem/2022, que apresentou concentrações elevadas para este analito até meados de maio/2022.

Gráfico 9.3.2-2: *Boxplot* dos resultados de Fe dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.



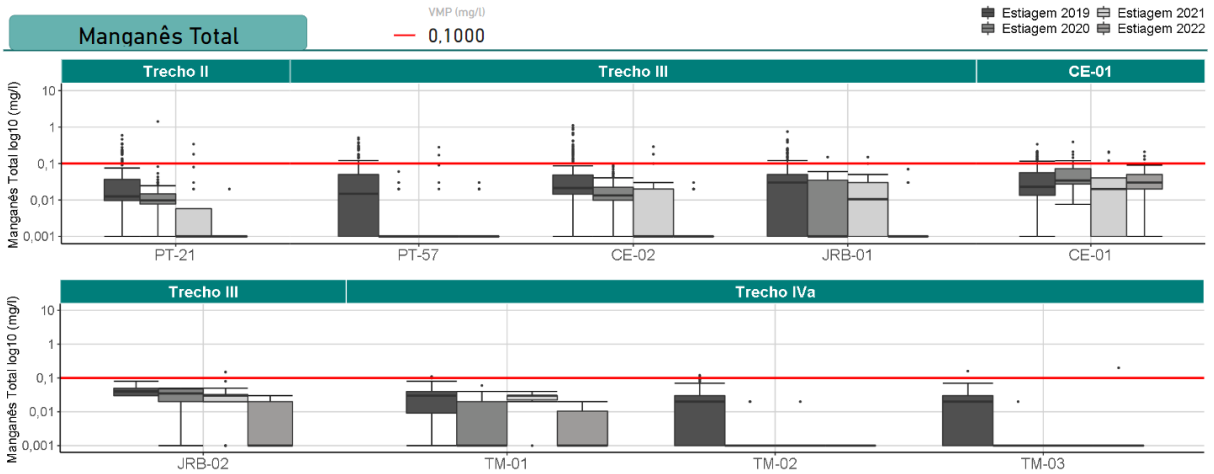
Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

Manganês Total

O Gráfico 9.3.2.3 apresenta os resultados para o Manganês total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos estiagem. Em relação à evolução temporal do parâmetro, no trecho analisado, observa-se redução da concentração ao longo do tempo em todos os pontos em relação aos valores medianos, salvo CE-01, que apresentou relativa estabilidade ao longo dos anos.

No período de estiagem 2022, as concentrações medianas mais elevadas são observadas no ponto CE-01. De uma maneira geral, as concentrações na maioria dos pontos apresentaram valores próximos ao limite quantitativo, exceto nos pontos CE-01, JRB-02 e TM-01, que apresentaram um maior número de resultado com variações mais significativas. Por fim, os resultados mostram uma aparente atenuação temporal e espacial desse analito.

Gráfico 9.3.2-3: *Boxplot* dos resultados de Mn total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.



Elaboração: Arcadis, 2022. 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).

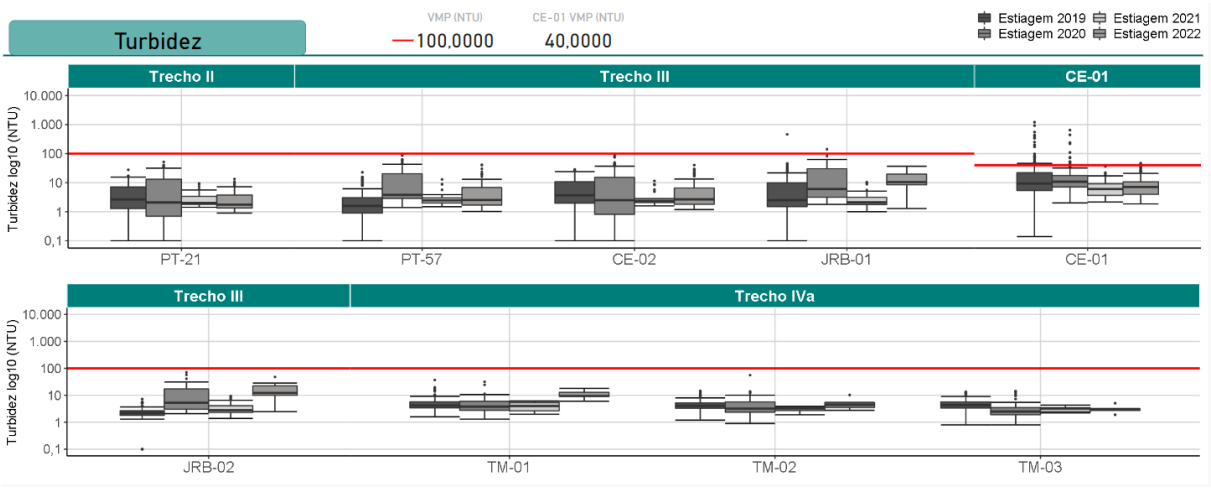
Turbidez

Em uma análise temporal, percebe-se que a maior parte dos valores mais elevados são observados no período de estiagem/2020, embora seja possível verificar que as medianas, de forma geral, apresentaram valores aproximados em todos os períodos analisados, com exceção dos pontos JRB-01, JRB-02, TM-01 e TM-02, que apresentaram ligeiro aumento nos valores medianos de turbidez no período de estiagem/2022. Por fim, destaca-se que, na maior parte das vezes, os resultados se encontram na faixa de 1 a 10 NTU, correspondendo a valores notadamente reduzidos desse parâmetro, com resultados mais elevados em pontos de trecho lótico (CE-01, CE-02, JRB-01 e JRB-02).

Especificamente para o período de estiagem/2022, percebem-se maiores valores nos pontos JRB-01, JRB-02 e CE-01, localizados em regiões mais sujeitas a alterações de Turbidez quando ocorrem chuvas, tendo em vista o uso e ocupação do solo da área (Anexo II) e a condição lótico do curso de água Além disso, é possível observar que esses valores mais altos foram observados no mês de abril/2022, caracterizado como período de transição e com reflexos das chuvas antecedentes. De toda forma, os valores observados no período atual mantiveram-se próximos aos observados nos períodos anteriores.

No Gráfico 9.3.2.4, podem ser observados os resultados para Turbidez nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de estiagem analisados.

Gráfico 9.3.2-4: *Boxplot* dos resultados de Turbidez dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.



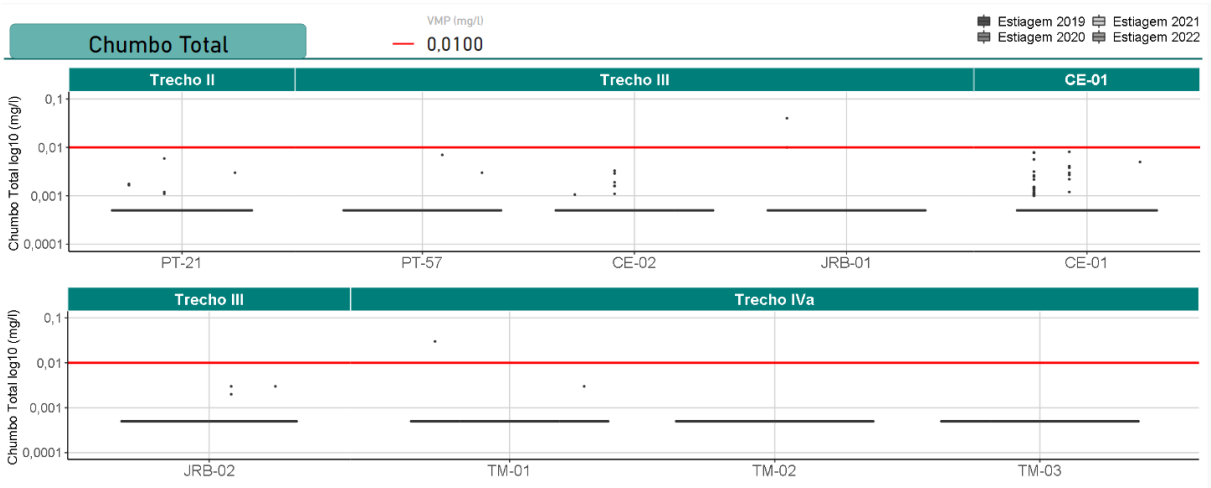
Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

Chumbo Total

O parâmetro Chumbo total, ao longo de todo monitoramento, apresenta baixos valores nos pontos dessa região. Observa-se que, em todos os períodos de estiagem, grande parte dos resultados encontram-se com valores similares ao limite quantitativo, e com esporádicos *outliers* (que apesar dessa qualificação ainda se encontram abaixo do VMP). Em suma, tais valores são observados majoritariamente no CE-01, no período de estiagem 2019 e 2020. Destaca-se, por fim, que em nenhum ponto foi observado valor acima do VMP no período de estiagem atual (2022).

Os resultados para o Chumbo total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos sazonais podem ser observados no Gráfico 9.3.2.5.

Gráfico 9.3.2-5: *Boxplot* dos resultados de Pb total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.



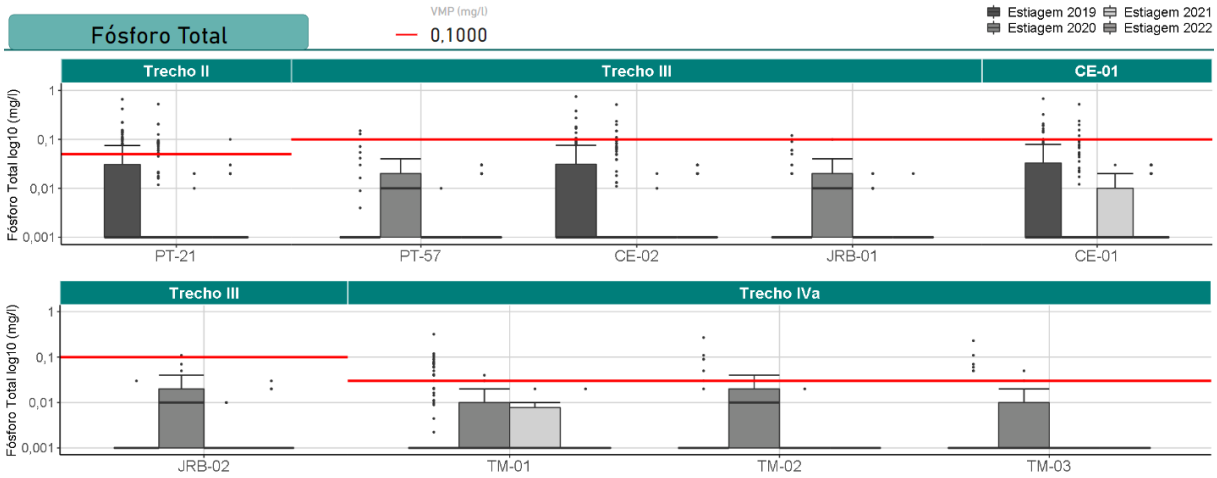
Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas) e Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba).

Fósforo Total

Para o parâmetro Fósforo total, do ponto de vista da evolução temporal de seus teores, percebe-se que as maiores variações de concentração são observadas na estiagem 2020, enquanto, especificamente, para os pontos PT-21, CE-02 e CE-01, as maiores variações são observadas na estiagem 2019. Já na estiagem 2022, em todos os pontos, os valores foram próximos ao limite quantitativo, com esporádicos *outliers* observados entre os pontos PT-21 e TM-01. Destaca-se, por fim, que na região de análise, grande parte dos valores são relativamente baixos em comparação com os encontrados no trecho do alto Paraopeba.

Os resultados para o Fósforo total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos sazonais podem ser observados no Gráfico 9.3.2.6.

Gráfico 9.3.2-6: *Boxplot* dos resultados de P total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, dos pontos da região dos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, em unifilar.



Elaboração: Arcadis, 2022. 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).

9.4. Considerações

As alterações observadas para o trecho a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo podem estar associadas a vários fatores isolados e ou combinados que podem abranger as alterações sazonais da bacia do rio Paraopeba. Tais fatores podem estar relacionados com o aumento do escoamento superficial das áreas de drenagem da bacia e das vazões fluviais, com o consequente carreamento de material. Essas condições, possivelmente, estão sendo detectadas com elevado grau de detalhe, uma vez que se acumula um conjunto substancial de dados com alta frequência de monitoramento. Na região de jusante da UHE Retiro Baixo, observam-se regiões com elevado grau de exposição do solo, propiciando aumento da contribuição difusa, sendo esta mais susceptível de acontecer em eventos pluviométricos nessas localidades.

Além disso, percebe-se, também, que além do ribeirão dos Gomes (principal tributário analisado do rio Paraopeba nessa região), são observados outros cursos d'água a jusante do ponto CE-02 que podem contribuir para a alteração da qualidade da água superficial do rio Paraopeba. Ademais, vale ressaltar as eventuais contribuições do próprio tributário, cuja fisiografia da bacia e suas características de uso e ocupação do solo podem favorecer o carreamento de materiais para o rio Paraopeba, conforme apresentado no item 8.3.4.

Da mesma forma, como já destacado, condições peculiares do comportamento do reservatório da UHE Retiro Baixo podem eventualmente favorecer a disponibilização de parâmetros e o aumento de seus teores, dada sua capacidade de retenção de material, estratificação no perfil de profundidade, movimentações eventuais da massa d'água e regra

de operação hidráulica da qual derivam o turbinamento e vertimento da estrutura. No período de estiagem/2022, houve vertimento nulo até o fim de agosto/2022, enquanto o turbinamento apresentou redução ao longo deste período, com valores nulos registrados no fim de agosto e no mês de setembro/2022, concomitantes com a ocorrência do vertimento. No que diz respeito a circulação de inverno e suas consequências, no período de estiagem atual apesar de existirem momentos em que ocorre a estratificação térmica, não é observada resposta causal na qualidade superficial para os metais analisados.

Especificamente sobre o período de estiagem/2022, os parâmetros analisados, principalmente Alumínio e Ferro dissolvido, apresentaram maior variabilidade quando comparados ao período de estiagem/2021, porém com valores medianos, de maneira geral, inferiores à estiagem/2020. Assim observa-se, portanto, uma estabilidade temporal oscilando de acordo com as condições momentâneas do período. Tal condição se torna mais evidente na região entre o barramento da UHE Retiro Baixo e o remanso do reservatório da UHE Três Marias, onde pode ser observada atenuação dos analitos ao longo do tempo. No ponto CE-01 (ribeirão dos Gomes/Almas), percebe-se estabilidade temporal em todos os analitos, com variações naturais relacionadas possivelmente às características intrínsecas de cada período de estiagem.

Por fim, é importante frisar que a análise completa de todos os parâmetros, de água superficial e sedimentos para os pontos localizados nos reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias, pode ser consultada, também, no relatório mensal do PMQS-TM setembro/2022 (ARCADIS,2022a) e, ademais, em outros documentos no âmbito do PMQS (Programa Especial de Monitoramento da qualidade de águas e dos sedimentos do reservatório de Três Marias e entorno).

10. Qualidade da água nas regiões do reservatório de Três Marias (região 2D) e no trecho a jusante (região 3)

10.1. Objetivo

Avaliar o comportamento da qualidade hídrica e as violações frente aos padrões legais na matriz de água superficial do reservatório da UHE Três Marias e a jusante deste até a confluência com rio Abaeté, ao longo dos ciclos sazonais correspondentes aos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022.

10.2. Metodologia

A fim de compreender a qualidade da água superficial no reservatório da UHE Três Marias e trecho a jusante ao longo dos períodos estiagem (2019, 2020, 2021 e 2022), foram realizadas as seguintes avaliações:

- Análise espacial e temporal dos parâmetros de qualidade das águas superficiais por meio de gráficos *boxplot* da região 2D (PT-23 e PT-29) e região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32);
- Comparação estatística entre os períodos de estiagem;
- Avaliação do percentual de violação por ponto.

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. Para a avaliação dos percentuais de violação foram considerados os limites estabelecidos pela DN COPAM-CERH 08/2022 para Classe 2 de enquadramento. Além disso, foi considerado o *baseline* Igam com a finalidade de comparar os resultados do monitoramento com os dados históricos.

Assim como apresentado no item 5.2, a comparação estatística entre os períodos de estiagem foi realizada por meio do teste de Kruskal Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn, ao nível de significância de 5%. Essa comparação foi realizada para os parâmetros majoritários que possuem VMP definido (Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido e Turbidez), Fósforo total e para o metal traço Zinco total, dada a maior ocorrência de violações na Região 3.

10.3. Resultados e discussão

Especificamente para o rio Paraopeba, o reservatório da UHE Três Marias (região 2D), da mesma forma que o reservatório da UHE Retiro Baixo, representa mudança no regime hidráulico de escoamento (lótico para lêntico), 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 de água. Além disso, características específicas relacionadas à morfometria do referido

reservatório favorecem sua capacidade de estratificação térmica e, da mesma maneira, a ocorrência de desestratificação, com consequente circulação vertical da massa d'água.

Já a região 3, localizada a jusante do reservatório, já no rio São Francisco, envolve um trecho lótico sob influência do reservatório. Essa região é marcada por apresentar condições distintas de uso e ocupação do solo em relação as demais regiões de montante do rio Paraopeba, destacando a presença de áreas industriais.

Nessas regiões a qualidade da água vem sendo rotineiramente avaliada pelos pontos em sequência PT-23 e PT-25 (região 2D) e PT-25, PT-27 e PT-32 (região 3), com amostragens em superfície.

10.3.1. Comportamento da qualidade da água nos diferentes períodos sazonais

Os resultados do monitoramento Vale em termos de qualidade hídrica no reservatório da UHE Três Marias e do trecho de jusante do rio Paraopeba foram agregados e avaliados para os diferentes períodos de estiagem.

Destaca-se, como já premissado no presente documento, que as análises feitas consideram os limites legais conforme a classe de enquadramento definidas pela DN COPAM-CERH nº 08/2022, sendo, especificamente, os pontos avaliados como Classe 2. Os resultados agregados para os diferentes períodos de estiagem nos citados pontos estão apresentados em gráficos do tipo *boxplot,* que evidenciam a distribuição dos resultados (máximos, mínimos, medianas, percentis 25% e 75% e *outliers*). Nestes gráficos é apresentado um recorte visual dos dados com o objetivo de melhorar a apresentação dos dados nas duas regiões. No Anexo IVa consta os gráficos *boxplot* por ponto e para os demais parâmetros, com todos os resultados, incluindo *outliers*, dos períodos avaliados. Ressalta-se que, em ARCADIS (2022a), são apresentadas as análises temporal e espacial completas para todos os pontos do reservatório de Três Marias, além de outros parâmetros.

Alumínio dissolvido

No **Gráfico 10.3.1.1** podem ser visualizados os resultados de Alumínio dissolvido nas regiões 2D e 3 ao longo dos períodos de estiagem e na **Tabela 10.3.1.1** consta os resultados da comparação estatística temporal entre os períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Em uma análise temporal do parâmetro apresentado, observa-se diferença de comportamento entre os pontos do reservatório de Três Marias (região 2D) e os pontos localizados a jusante deste (região 3). Na região 2D os resultados foram mais reduzidos e pouco variáveis, sem indicativo de diferença significativa entre os períodos avaliados (**Tabela 10.3.1.1)**, o que pode ser justificado pela condição lêntica do ambiente. Enquanto a região 3, os resultados foram mais variáveis (**Gráfico 10.3.1.1** e **Tabela 10.3.1.1**), com concentrações significativamente superiores no período de estiagem/2022, assim como observado para demais regiões já avaliadas. De modo geral, notam-se baixas concentrações de Alumínio dissolvido, abaixo de 0,1 mg/L (valor orientador) principalmente para a região 2D, em todos os períodos de

estiagem, enquanto a região 3 mais de 75% dos resultados em geral permanecem abaixo deste limite, com exceção do último período avaliado.

No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e máximas apresentaram concentrações aproximadas e maiores na região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32) que na região 2D (PT-23 e PT-29). Ou seja, as concentrações mais elevadas são observadas a jusante do reservatório da UHE Três Marias, região esta que apresenta naturalmente um enriquecimento em Alumínio, em decorrência da geoquímica local, bem como diferentes tipologias de uso e ocupação do solo, como área industrial.

Gráfico 10.3.1-1 Boxplot dos resultados de Alumínio Dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

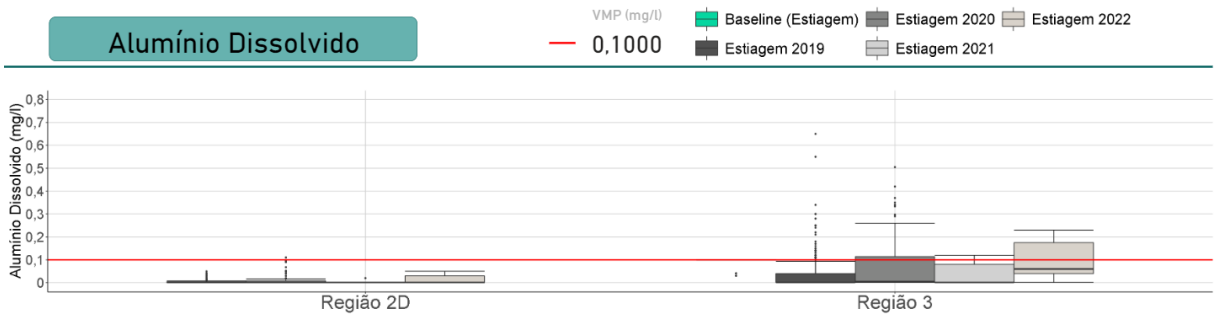


Tabela 10.3.1-1 Comparação temporal do parâmetro Alumínio dissolvido ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2021	~	>
Est-2022 x Est-2020	~	>
Est-2022 x Est-2019	~	>
Est-2022 x Est-*Baseline*	NA	>
Est-2021 x Est-2020	~	~
Est-2021 x Est-2019	~	~
Est-2021 x Est-*Baseline*	NA	~
Est-2020 x Est-2019	~	>
Est-2020 x Est-*Baseline*	NA	>
Est-2019 x Est-*Baseline*	NA	~

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Ferro Dissolvido

No **Gráfico 10.3.1.2** podem ser visualizados os resultados de Ferro dissolvido nas regiões 2D e 3 ao longo dos períodos de estiagem e na **Tabela 10.3.1.2** consta os resultados da comparação estatística temporal entre os períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Do mesmo modo que para Alumínio dissolvido, percebe-se que a região 3 apresentou valores maiores que a região 2D para Ferro dissolvido. Em relação a comparação temporal, para a região 2D, em geral não houve diferença estatística entre os períodos avaliados, com exceção do período de estiagem/2021 para o qual as concentrações deste analito foram significativamente inferiores em relação aos períodos de 2019 e 2020. Já a região 3 não mostrou diferença significativa entre os períodos analisados (**Tabela 10.3.1.2**). Além disso, os gráficos mostram, de modo geral, baixas concentrações de Ferro dissolvido, abaixo de 0,3 mg/L (VMP), com exceção de valores pontuais.

A estiagem/2022 apresenta maior oscilação das medianas e P75 entre a região 2D e 3, com a região 2D mostrando valores notadamente baixos, enquanto a região 3 exibiu maior variação no trecho entre o PT-25 e PT-27. Tal comportamento pode estar relacionado a contribuições difusas da região a jusante do reservatório da UHE Três Marias, quando da ocorrência de chuvas, bem como a ocorrência de atividades industriais.

Gráfico 10.3.1-2 Boxplot dos resultados de Ferro Dissolvido dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

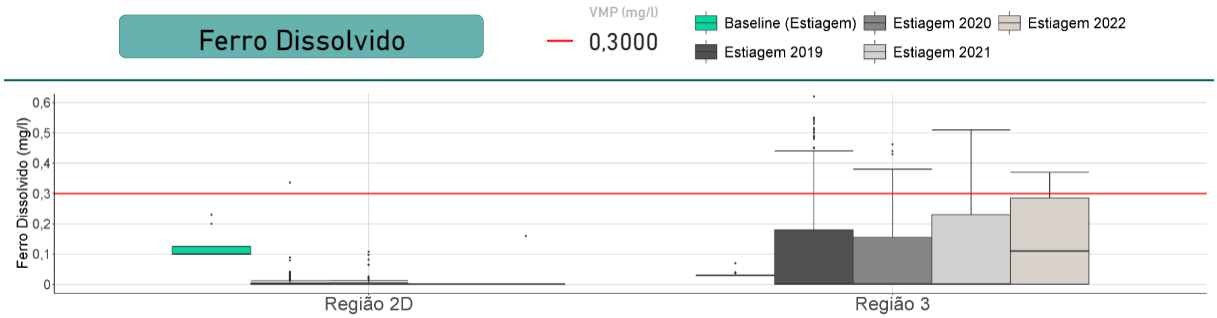


Tabela 10.3.1-2 Comparação temporal do parâmetro Ferro dissolvido ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2021	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	~
Est-2022 x Est-2019	~	~
Est-2022 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2021 x Est-2020	<	~
Est-2021 x Est-2019	<	~
Est-2021 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2020 x Est-2019	~	~

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2020 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2019 x Est-*Baseline*	~	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Manganês Total

No **Gráfico 10.3.1.3** podem ser visualizados os resultados de Manganês total nas regiões 2D e 3 ao longo dos períodos de estiagem e na **Tabela 10.3.1.3** consta os resultados da comparação estatística temporal entre os períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Em termos espaciais, no trecho analisado, observou-se que a região 3 apresentou valores medianos maiores que a região 2D, conforme indicado para os parâmetros discutidos anteriormente. A região 2D mostrou, de modo geral, uma redução da concentração mediana ao longo do tempo em todos os pontos, onde somente em 2019 a concentração foi significativamente superior em relação ao *baseline* (**Tabela 10.3.1.3)**. Já a região 3, evidenciou maior oscilação de valores, com concentrações significativamente inferiores em 2020 e em 2022 em relação a 2019. Os gráficos mostram baixas concentrações medianas de Manganês total, abaixo de 0,1 mg/L (VMP), com apenas desvio pontual na região 2D e, em geral, mais de 75% inferiores na região 3.

Gráfico 10.3.1-3 Boxplot dos resultados de Manganês total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

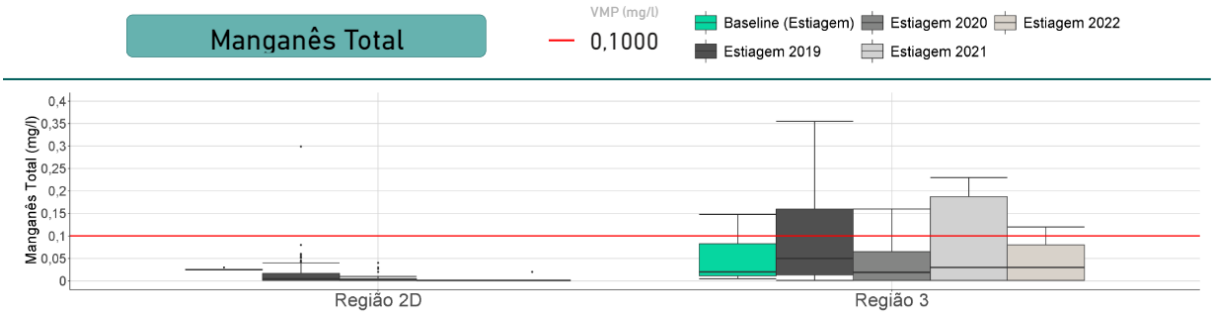


Tabela 10.3.1-3 Comparação temporal do parâmetro Manganês total ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2021	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	~
Est-2022 x Est-2019	<	<
Est-2022 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2021 x Est-2020	<	~
Est-2021 x Est-2019	<	~

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2021 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2020 x Est-2019	<	<
Est-2020 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2019 x Est-*Baseline*	>	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Turbidez

No **Gráfico 10.3.1.4** podem ser visualizados os resultados de Turbidez nas regiões 2D e 3 ao longo dos períodos de estiagem e na **Tabela 10.3.1.4** consta os resultados da comparação estatística temporal entre os períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Em uma análise espacial, percebe-se que, para ambas as regiões, os valores medianos e P75 foram mais elevados na região 3 em relação a região do reservatório de Três Marias (2D) (**Tabela 10.3.1.4**). As regiões 2D e 3 mostraram diferenças na distribuição dos dados entre os pontos e entre os períodos avaliados. Em ambas as regiões nota-se prevalência de resultados significativamente superiores no período de estiagem/2022, o que possivelmente está relacionado ao período chuvoso anterior, chuva 2021/2022, conforme observado para as demais regiões discutidas nos itens anteriores. Para as comparações estabelecidas entre os demais períodos não houve diferença estatística significativa. Ainda assim, os gráficos mostram, de modo geral, baixos valores de Turbidez, abaixo de 100 NTU (VMP), para ambas as regiões ao longo dos períodos de estiagem. Destaca-se que, na maior parte das vezes, os resultados se encontram na faixa de 1 a 10 NTU, correspondendo a valores notadamente reduzidos desse parâmetro, com resultados mais elevados em pontos de trecho lótico (PT-25, PT-27 e PT-32).

Gráfico 10.3.1-4 Boxplot dos resultados de Turbidez dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

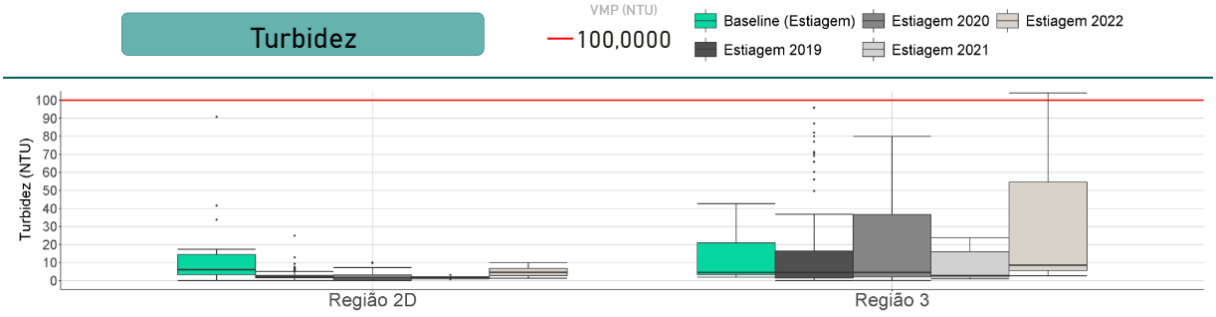


Tabela 10.3.1-4 Comparação temporal do parâmetro Turbidez ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2021	>	>

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2020	>	~
Est-2022 x Est-2019	>	>
Est-2022 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2021 x Est-2020	~	~
Est-2021 x Est-2019	~	~
Est-2021 x Est-*Baseline*	<	~
Est-2020 x Est-2019	~	~
Est-2020 x Est-*Baseline*	<	~
Est-2019 x Est-*Baseline*	<	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Fósforo Total

No **Gráfico 10.3.1.5** podem ser visualizados os resultados de Fósforo total nas regiões 2D e 3 ao longo dos períodos de estiagem e na **Tabela 10.3.1.5** consta os resultados da comparação estatística temporal entre os períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Em relação a comparação espacial, do mesmo modo os resultados de Fósforo total apresentaram-se mais elevados na região 3, localizada em ambiente lótico, e sob influência de diferentes tipos de uso e ocupação do solo, como áreas de plantio e industrial.

Do ponto de vista da evolução temporal de seus teores, percebe-se que, para ambas as regiões não houve indicativo de diferença significativa dos resultados entre os diferentes períodos de estiagem comparados. A região 2D mostrou, de modo geral, manutenção dos valores ao longo dos períodos com medianas baixas, com valores próximos ao limite quantitativo. Pontualmente, apresentou certa variação somente nos valores P75 em 2020 e 2021 para o PT-23, e em 2019 para o PT-29, com diminuição significativa dos dados de 2019 e 2022 em relação ao *baseline* (**Tabela 10.3.1.5**). Já a região 3 mostrou, apesar de exibir maior oscilação de valores P75, também certa constância de valores medianos, em grande parte inferiores ao LQ. Os gráficos mostram, de modo geral, baixas concentrações medianas de Fósforo Total, abaixo de 0,1 mg/L (VMP para região 3) e 0,03 mg/L (VMP para região 2D).

Gráfico 10.3.1-5 Boxplot dos resultados de Fósforo total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

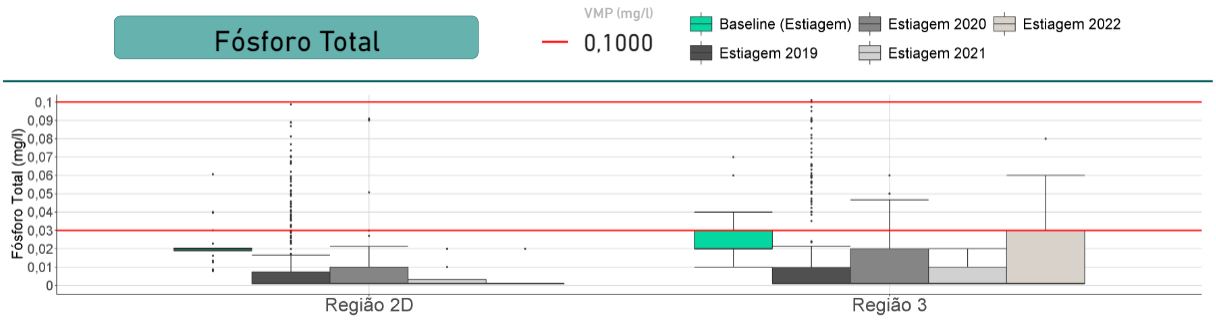


Tabela 10.3.1-5 Comparação temporal do parâmetro Fósforo Total ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2021	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	~
Est-2022 x Est-2019	~	~
Est-2022 x Est-*Baseline*	<	~
Est-2021 x Est-2020	~	~
Est-2021 x Est-2019	~	~
Est-2021 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2020 x Est-2019	~	~
Est-2020 x Est-*Baseline*	~	~
Est-2019 x Est-*Baseline*	<	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Zinco Total

No **Gráfico 10.3.1.6** podem ser visualizados os resultados de Zinco total nas regiões 2D e 3 ao longo dos períodos de estiagem e na **Tabela 10.3.1.6** consta os resultados da comparação estatística temporal entre os períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Em termos espaciais, assim como para os demais parâmetros analisados, nota-se prevalência de maiores concentrações deste analito na região 3 em relação a região 2D. Considerando a análise temporal de seus teores, percebe-se que, de modo geral, a maioria dos pontos apresentou valores medianos próximos ao limite quantitativo em diferentes períodos de estiagem. A região 2D mostrou manutenção dos valores ao longo dos períodos com medianas próximas ao limite quantitativo. Apenas no período de estiagem/2019 foram quantificados resultados mais elevados, com concentrações significativamente superiores em relação aos períodos de estiagem/2020, 2021 e 2022. Já a região 3, apesar de exibir maior oscilação de valores P75, também mostrou, para a maioria dos pontos, certa constância de valores medianos, próximos ao limite quantitativo, e, em geral, sem diferença significativa entre os diferentes períodos analisados. Apenas o período de estiagem/2021 apresentou resultados significativamente mais reduzidos, 100% abaixo do LQ. Os gráficos mostram, de modo geral, baixas concentrações medianas de Zinco Total, abaixo de 0,18 mg/L (VMP), para ambas as regiões ao longo dos períodos de estiagem. Especificamente no período de estiagem/2022, violação pontual ocorreu apenas na região 3, relacionada possivelmente a contribuições difusas e locais, características dessa região. Por fim, grande parte dos valores da região de análise são relativamente baixos em comparação com os encontrados no trecho do alto Paraopeba.

Gráfico 10.3.1-6 Boxplot dos resultados de Zinco total dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

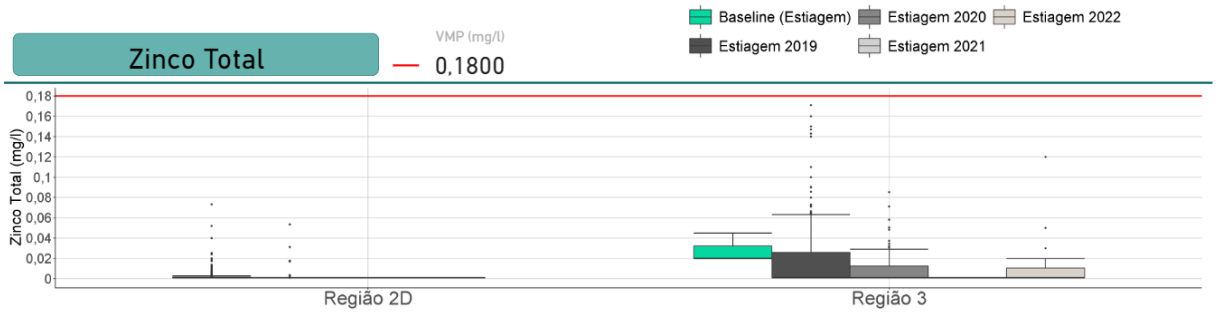


Tabela 10.3.1-6 Comparação temporal do parâmetro Zinco total ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022.

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 x Est-2021	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	~
Est-2022 x Est-2019	<	~
Est-2022 x Est-*Baseline*	NA	~
Est-2021 x Est-2020	~	<
Est-2021 x Est-2019	<	<
Est-2021 x Est-*Baseline*	NA	<
Est-2020 x Est-2019	<	~
Est-2020 x Est-*Baseline*	NA	~
Est-2019 x Est-*Baseline*	NA	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

10.3.2. Evolução das violações aos limites legais ao longo do tempo

Na **Tabela 10.3.2**, são indicados os parâmetros que violaram os padrões legais previstos pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08/2022, para as regiões 2D e 3 no período de estiagem de 2022, bem como os respectivos percentuais de violação por ponto e parâmetro.

De acordo com a **Tabela 10.3.1-7**, constatou-se que, para a estiagem/2022, os metais majoritários apresentaram violações somente na região 3, incluindo Manganês total e Alumínio e Ferro dissolvido. Em relação à Turbidez, observaram-se desvios apenas para a região 3, trecho lótico a jusante do reservatório de UHE Três Marias, condicionado por

influências locais e diferentes tipologias de uso e ocupação do solo. Com relação ao Fósforo total, não houve violações nos pontos monitorados. Nos pontos de *baseline* também foram registrados desvios dos parâmetros majoritários ao longo das regiões avaliadas, com percentuais próximos aos resultados do monitoramento da estiagem/2022, com destaque para a Turbidez e Fósforo total que ocorreram somente na região 2D e Manganês total na região 3. O Fósforo total, de maneira geral, apresenta também associação a contribuições de origem sanitária ao longo da bacia, conforme indicado para os pontos de *baseline*. Tais resultados apontam para condições históricas já alteradas em relação aos padrões de qualidade da água estabelecidos na legislação vigente.

Em relação aos parâmetros traço, somente a região 3 apresentou violação para a estiagem/2022, porém de forma pontual no PT-25, condição que pode estar atrelada ás condições locais, como a presença de indústrias no entorno. Para os parâmetros Físico-químicos, somente o Oxigênio dissolvido apresentou desvios na região 2D (PT-29) e na região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32), mas com percentuais próximos ao indicado nos pontos de *baseline*.

Tabela 10.3.1-7 Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco na estiagem/2022.

Parâmetro	COPAM 08/22	UHE TRÊS MARIAS						Rio São Francisco			
		Região 2D						Região 3			
	VMP	TM10/M07	TM30/M03	PT-23	TM35	TM40/M01	PT-29	SF054	PT-25	PT-27	PT-32
MAJORITÁRIOS											
Manganês Total	0,1	-	-	-	-	-	-	14	14	17	-
Ferro Dissolvido	0,3	-	-	-	-	-	-	-	14	33	17
Alumínio Dissolvido	0,1	NA	NA	-	NA	NA	-	-	29	67	33
Turbidez	100	33	-	-	-	-	-	-	14	17	17
Fósforo Total	0,1(Lót); 00,03(Lênt.)	25	13	-	-	9	-	-	-	-	-
TRAÇOS											
Zinco Total	0,18	NA	NA	-	NA	NA	-	-	14	-	-
FÍSICO-QUÍMICOS											
Oxigênio dissolvido	5	-	-	-	-	8	17	24	29	33	17
N coletas realizadas		8	12	6	4	16	6	21	7	6	6

10.4. Considerações

As alterações observadas para a região do reservatório da UHE Três Marias e o trecho a jusante, apesar de estarem incluídas no escopo de análise e avaliação do Plano de Monitoramento Emergencial (PME), são regiões distantes e não afetadas pelo rompimento das barragens B1, B4 e B4A. Neste sentido, essas regiões podem apresentar influência de outros fatores locais, isolados e ou combinados, que podem abranger as alterações sazonais da bacia, neste trecho. Tais fatores podem envolver o aumento do escoamento superficial das áreas de drenagem da bacia e das vazões fluviais, com carreamento de material. Além disso, as regiões avaliadas apresentam porções com elevado grau de exposição do solo, o que pode contribuir para o aumento de contribuições difusas para o sistema, ainda mais durante ou após períodos de grandes precipitações nessas localidades. Destaca-se também a presença de áreas de plantio e industriais na região 3.

Condições específicas e locais de regiões lênticas, incluindo o comportamento do reservatório da UHE Três Marias podem, eventualmente, favorecer a disponibilização de parâmetros e o

aumento de seus teores. Condições essas relacionadas à capacidade de retenção de material, estratificação no perfil de profundidade, movimentações eventuais da massa d'água e regra de operação hidráulica da qual derivam o turbinamento e o vertimento da estrutura.

Especificamente sobre o período de estiagem/2022, os parâmetros analisados para água superficial no presente item variaram conforme as regiões avaliadas. A região 2D mostrou valores inferiores à região 3. Tal condição pode estar relacionada ao fato da região 3 envolver um trecho lótico, a jusante do trecho de reservatório de UHE Três Marias (região 2D), onde há fatores locais (precipitações, dinâmica fluvial, contribuições locais dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo) que apresentam uma influência e resposta mais evidente. Em ambas as regiões, em geral, as concentrações mantiveram-se atenuadas e menos variáveis, em acordo com o esperado para períodos de estiagem, com prevalência de ausência de diferenças significativas entre os períodos comparados. Em alguns casos, como para Alumínio dissolvido e Turbidez, os resultados apresentaram-se mais elevados no período de estiagem mais recente, estiagem/2022, o que pode ser reflexo do período chuvoso anterior, chuva 2021/2022, conforme constatado para outras regiões a montante na bacia do rio Paraopeba.

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

11.1. Objetivo

A qualidade da água do rio Paraopeba é monitorada pela VALE por meio da coleta realizada 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 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.

11.2. 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 reportou 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 BI. 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 o mesmo pode, guardadas as devidas peculiaridades, indicar alterações importantes.

Os dados das leituras dos parâmetros são coletados pelas sondas telemétricas, sendo transmitidos para o banco de dados da empresa CLEAN na forma horária para todas as estações, com exceção da sonda AUT-EP que apresenta transmissão a cada dez minutos dos dados quando há vertimento na estaca prancha. Já no servidor da CLEAN, estes 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 Tabela 11.2.1, são considerados inconsistentes. Essas faixas estão relacionadas à limitação de registro do dispositivo.

Tabela 11.2-1: Faixas mínima e máxima dos parâmetros para classificação dos dados inconsistentes como inválidos.

Parâmetro	Min	Máx
Alimentação	0	20
Profundidade	0	200
Temperatura	-100	100
Condutividade	0	6500
pH	0	20
ORP	-600	600
OD	0	300
Turbidez	0	6500
Nível	0	200
Temperatura do Ar	-100	100
Umidade do Ar	0	300
Pluviosidade	0	655
Pluv. Diária	0	500000

Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: CLEAN, 2021.

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, 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 analisadas 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 11.2.2.

Tabela 11.2-2: 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

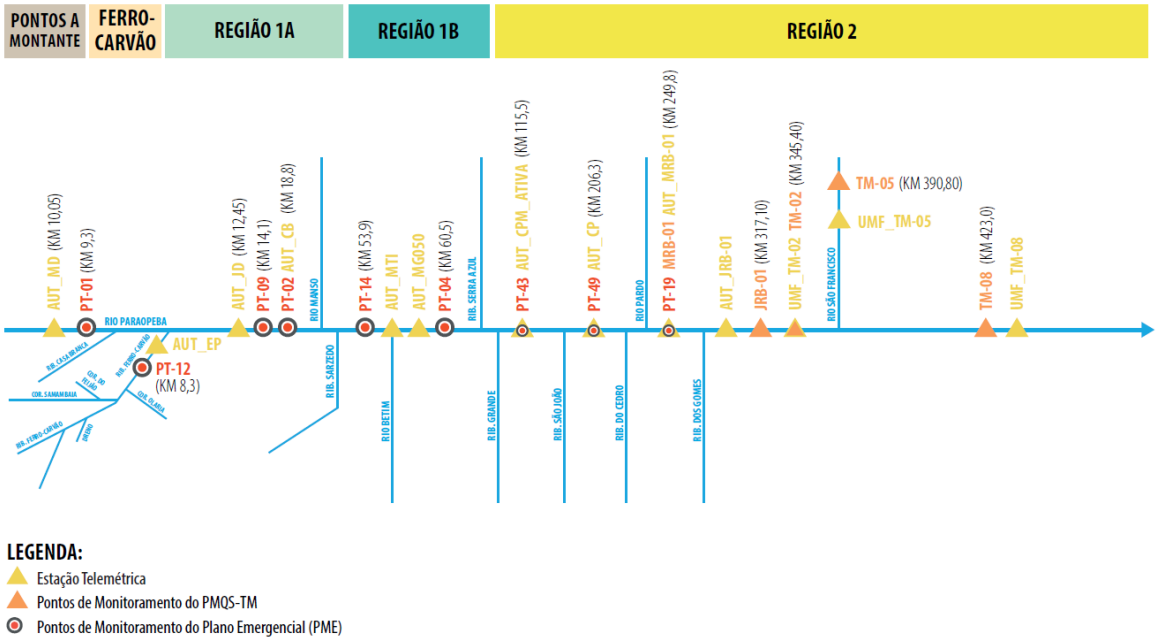
Área	Estação telemétrica	Ponto de monitoramento
	UMF-TM 05	TM-05
	UMF-TM 08	TM-08

Elaboração: Arcadis, 2022.

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 a data e ao horário mais próximo do horário de coleta dos pontos.

Na Figura 11.2.1 é apresentado um diagrama unifilar no qual podem ser observadas as localizações das estações telemétricas analisadas, bem como dos pontos de monitoramento de qualidade da água.

Figura 11.2-1 Diagrama unifilar das estações telemétricas juntamente com os pontos de monitoramento de qualidade de água.



Elaboração: Arcadis, 2021.

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 e o respectivo ponto de monitoramento até a data do dia 30/09/2022 (final do período de estiagem/2022). Ressalta-se que os valores nulos foram excluídos do banco de dados.

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 a 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 e negativa, respectivamente (AKOGLU, 2018). Neste estudo, considerou-se que valores do coeficiente de correlação, em módulo, maiores ou iguais a 0,6 indicam correlação forte (CALLEGARI-JACQUES, 2003).

Posteriormente os resultados do monitoramento (valores observados) dos metais marcadores nos pontos da Vale na estiagem/2022, foram comparados com os resultados previstos pelos modelos de regressão linear para o mesmo período.

11.3. Resultados e discussão

Os resultados das análises gráficas 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, em todos os casos inferiores a 0,5, conforme indicado na Tabela 11.3.1. Tais resultados eram esperados, tendo em vista que a turbidez da água está relacionada a 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 0,19. Ou seja, apenas 19% 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 0,44 e 0,49, respectivamente.

Logo, em todos os casos, caso fosse adotado 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 11.3-1: Resultados de R² para as relações de turbidez com a fração dissolvida dos metais.

Área	Estação x ponto	R² Mn dissolvido	R² Fe dissolvido	R² Al dissolvido
TLM- 1	AUT-MD x PT-01	0,083	0,18	0,13
	AUT-EP x PT-12	0,024	0,018	0,036
	AUT-JD x PT-09	0,081	0,15	0,14
	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,083	0,17	0,17
TLM- 2	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,099	0,02	0,099
	AUT-MG 050 x PT-48	0,037	0,0018	0,046
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,12	0,059	0,12
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,19	0,16	0,12
	AUT-Betim x TT-01	0,14	0,21	0,26
TLM- 3	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,19	0,43	0,024
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,14	0,18	0,17
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,17	0,41	0,26
	UMF-TM 05 x TM-05	0,0022	0,44	0,49
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00000047	0,0048	0,25

Elaboração: Arcadis, 2022.

Já para as frações totais, conforme mostra a Tabela 11.3.2, 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 11.3-2: Resultados de R² das relações de turbidez com as frações totais dos metais traçadores.

Área	Estação x ponto	R² Mn total	R² Fe total	R² Al total
TLM- 1	AUT-MD x PT-01	0,72	0,76	0,71
	AUT-EP x PT-12	0,033	0,092	0,028
	AUT-JD x PT-09	0,65	0,72	0,66
	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,8	0,8	0,75
TLM- 2	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,5	0,69	0,67
	AUT-MG 050 x PT-04	0,46	0,49	0,4
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,71	0,75	0,72
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,72	0,77	0,69
	AUT-Betim x TT-01	0,0022	0,33	0,32
TLM- 3	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,8	0,87	0,8
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,45	0,67	0,73
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,2	0,54	0,51

Área	Estação x ponto	R² Mn total	R² Fe total	R² Al total
	UMF-TM 05 x TM-05	0,017	0,66	0,74
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00088	0,00051	0,0093

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

Nos Gráficos 11.3.1 a 11.3.4, 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 de monitoramento da Vale.

Gráfico 11.3-1 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 11.3.1 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Manganês total no PT-01.

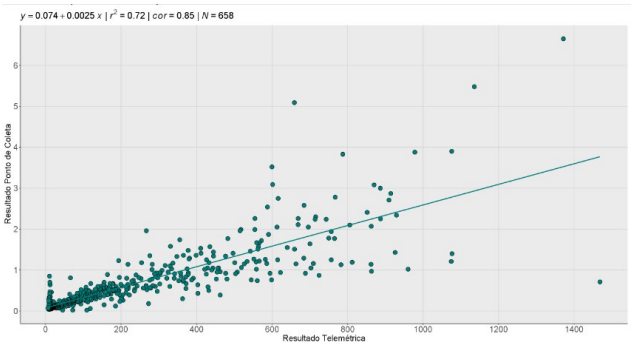


Gráfico 11.3.1 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Ferro total no PT-01.

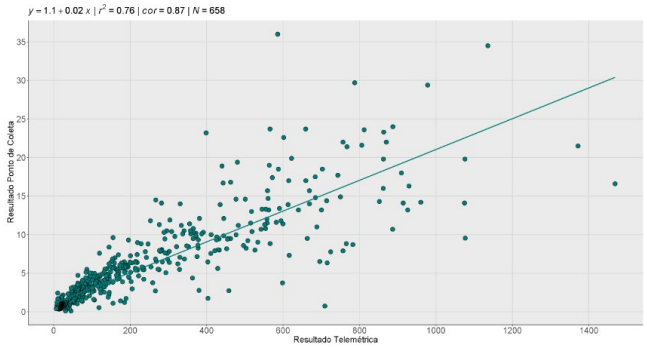


Gráfico 11.3.1 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Alumínio total no PT-01.

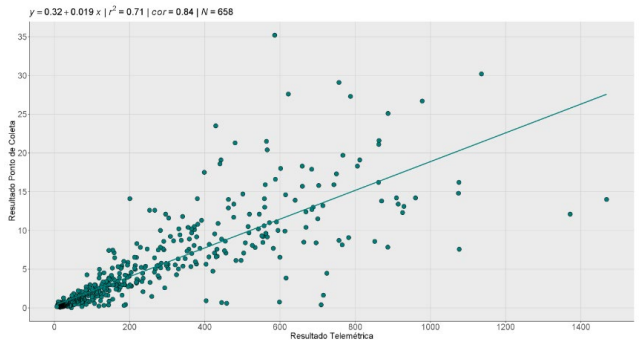


Gráfico 11.3.1 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Manganês total no PT-09.

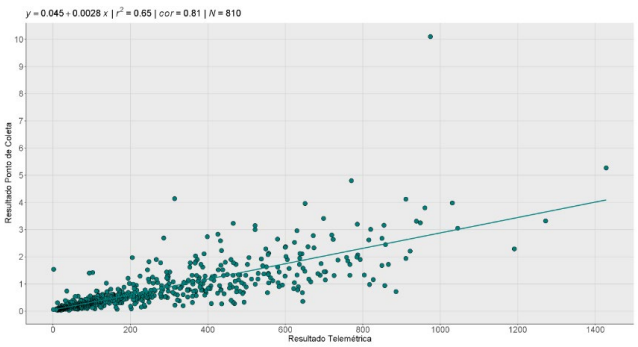


Gráfico 11.3.1 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Ferro total no PT-09.

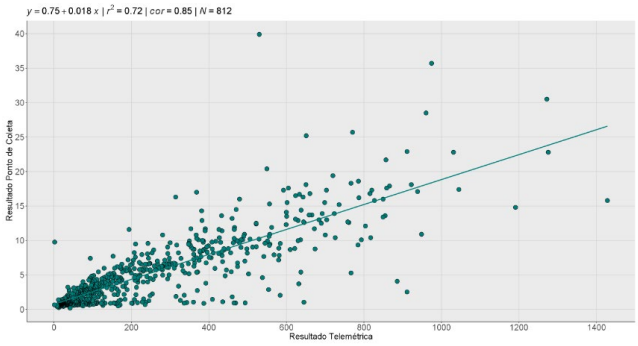
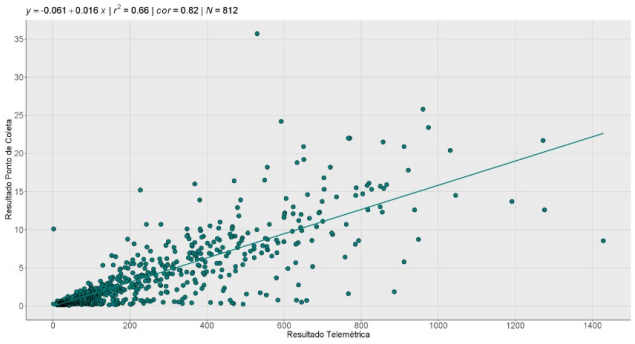


Gráfico 11.3.1 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Alumínio total no PT-09.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 11.3-2 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 11.3.2 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Manganês total no PT-02.

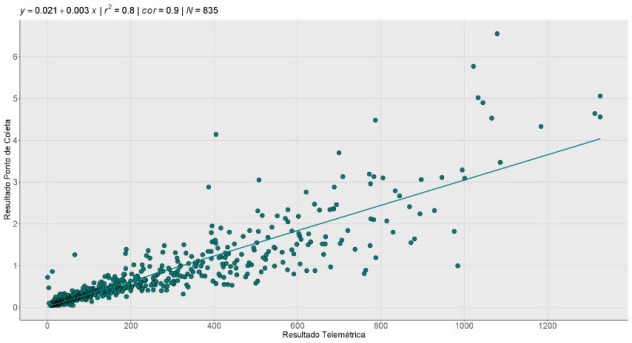


Gráfico 11.3.2 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Ferro total no PT-02.

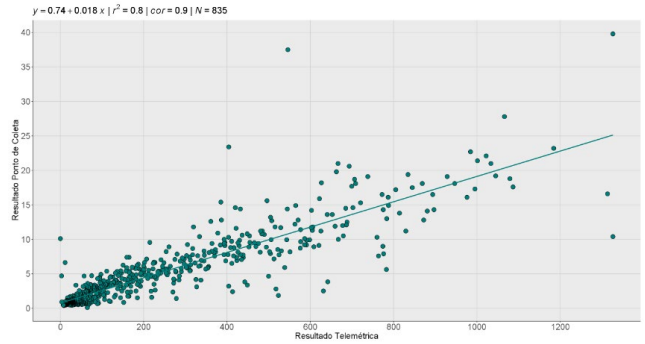


Gráfico 11.3.2 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Alumínio total no PT-02.

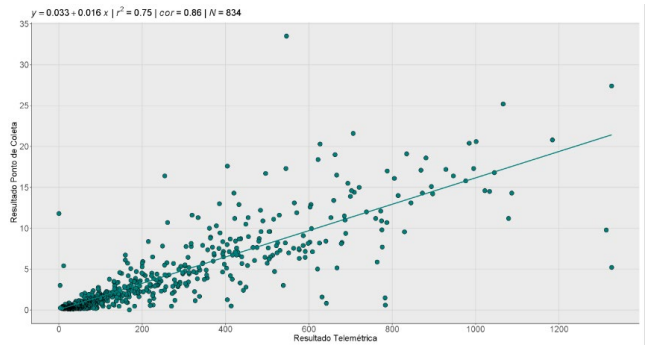


Gráfico 11.3.2 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Ferro total no PT-14.

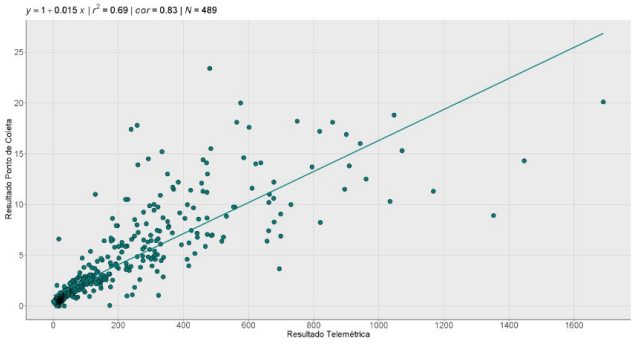


Gráfico 11.3.2 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Alumínio total no PT-14.

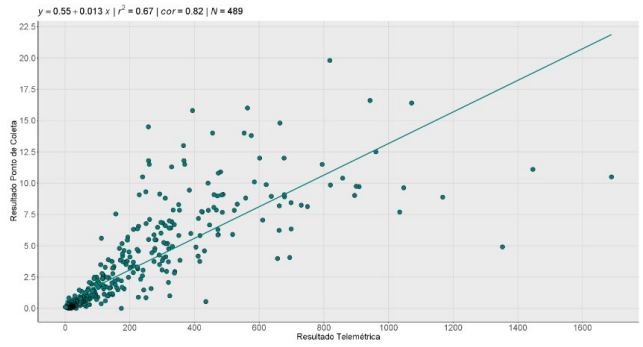
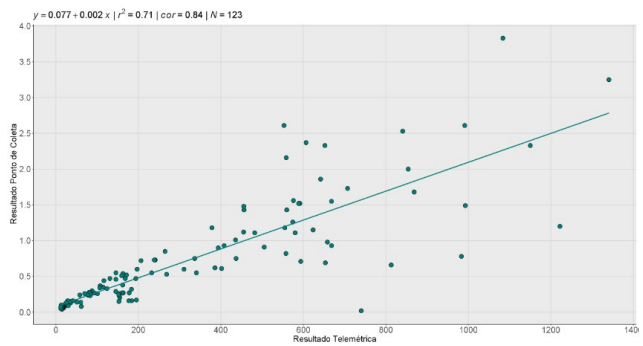


Gráfico 11.3.2 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Manganês total no PT-43.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 11.3-3: 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 11.3.3 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Ferro total no PT-43.

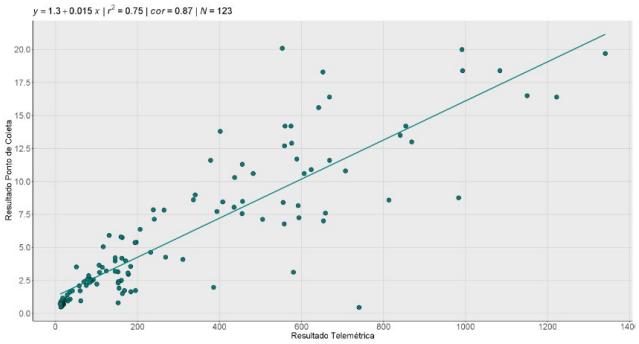


Gráfico 11.3.3 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Alumínio total no PT-43.

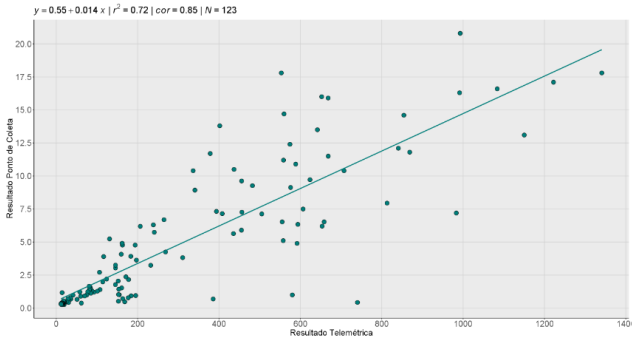


Gráfico 11.3.3 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Manganês total no PT-49.

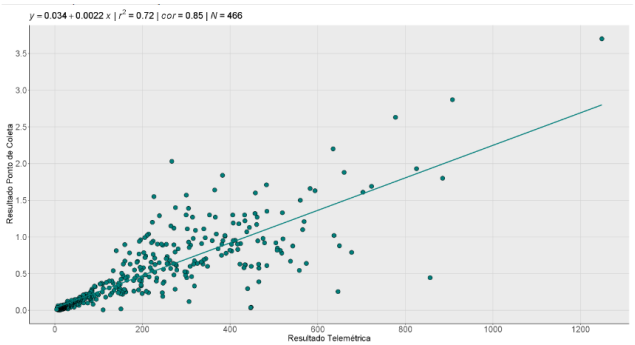


Gráfico 11.3.3 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Ferro total no PT-49.

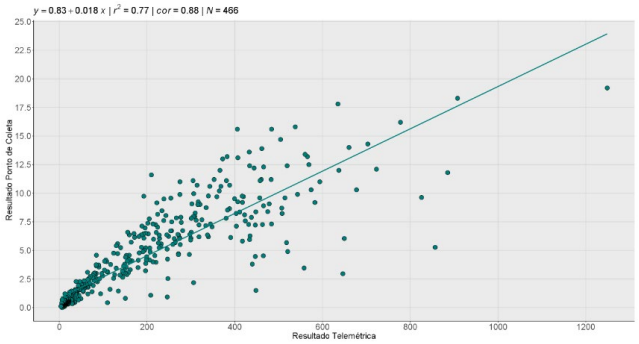


Gráfico 11.3.3 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Alumínio total no PT-49.

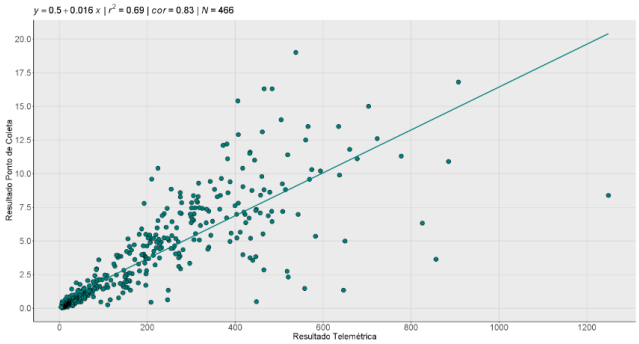
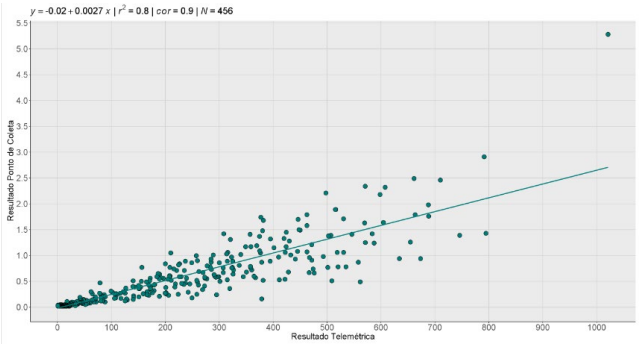


Gráfico 11.3.3 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Manganês total no PT-19.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 11.3-4: 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 11.3.4 (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.

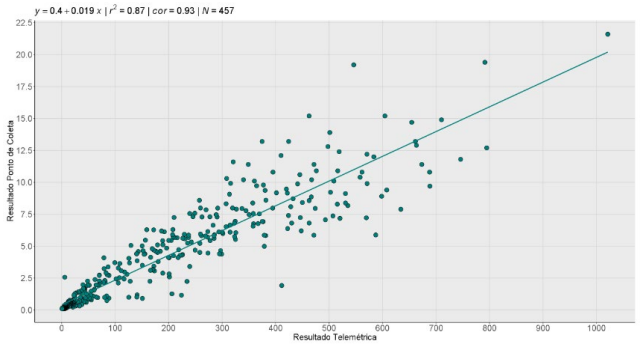


Gráfico 11.3.4 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Alumínio total no PT-19.

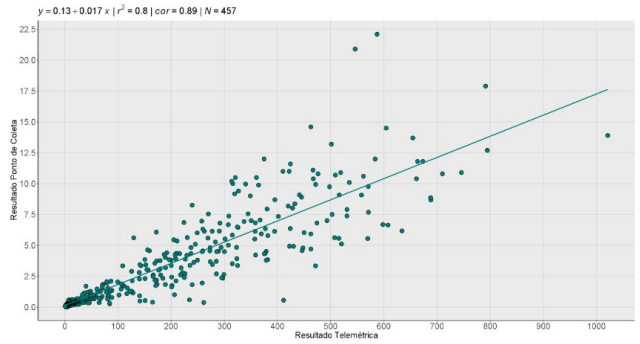


Gráfico 11.3.4 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 (PT-49) e os resultados de Ferro total no JRB-01.

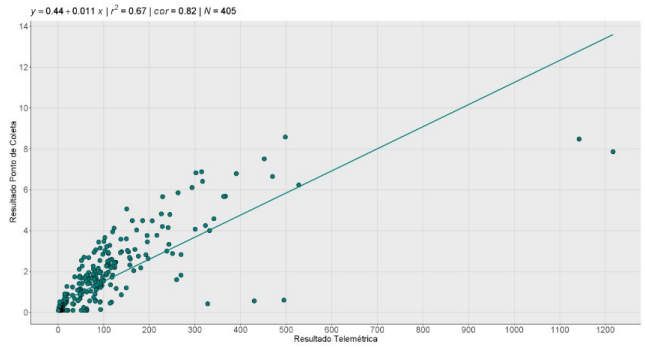


Gráfico 11.3.4 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 (PT-49) e os resultados de Alumínio total no JRB-01.

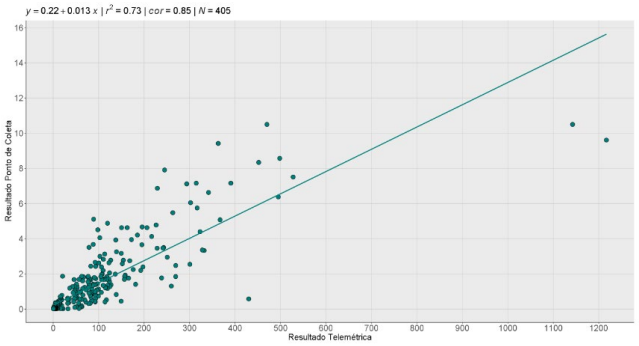


Gráfico 11.3.4 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Ferro total no TM-05.

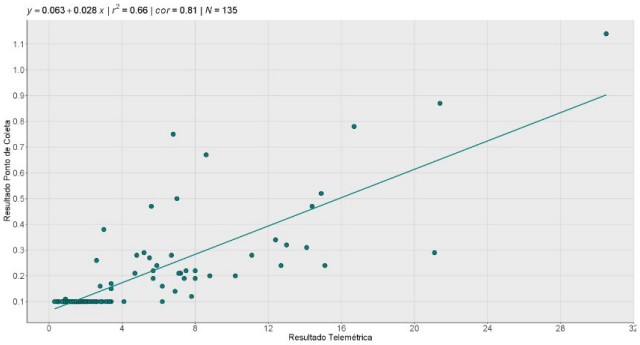
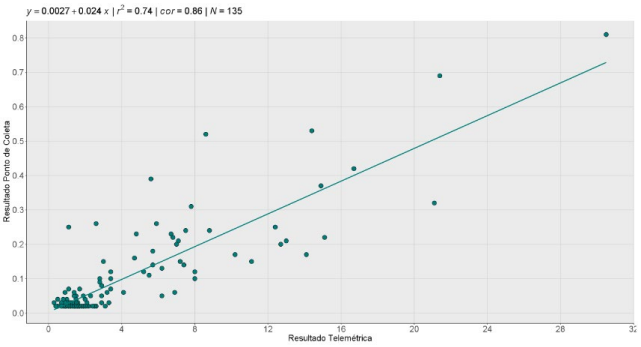


Gráfico 11.3.4 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Alumínio total no TM-05.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nos Gráficos 11.3.1 (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 a reta, indicando um bom ajuste do modelo de regressão linear, capaz de explicar mais de 70% da variabilidade dos dados dos metais traçadores com base nos teores de turbidez.

Nos Gráfico 11.3.1 (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 11.3.2 (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 11.3.2 (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.

Nos Gráficos 11.3.2 (F) a 11.3.3 (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 (R>0,84). Os valores de R^2 foram superiores 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 11.3.3 (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 11.3.3 (F) e 11.3.4 (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 e quase perfeitas (R próximo de 1). 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 11.3.4 (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 superior a 0,8. O coeficiente de determinação (R^2) foi próximo a 0,7 para ambas as relações, sendo o modelo capaz de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais.

Por fim, nos Gráficos 11.3.4 (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 superior a 0,8. Os coeficientes de determinação (R^2) foram próximos ou superiores a 0,7, sendo capaz de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais.

Na sequência, os Gráficos 11.3.5 a 11.3.8 apresentam os resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear apresentados anteriormente.

Gráfico 11.3-5: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 11.3.5 (A) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MD.

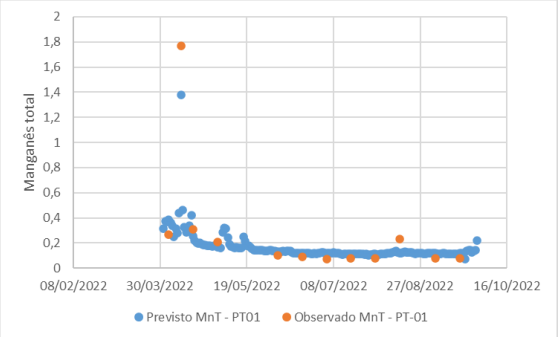


Gráfico 11.3.5 (D) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-JD.

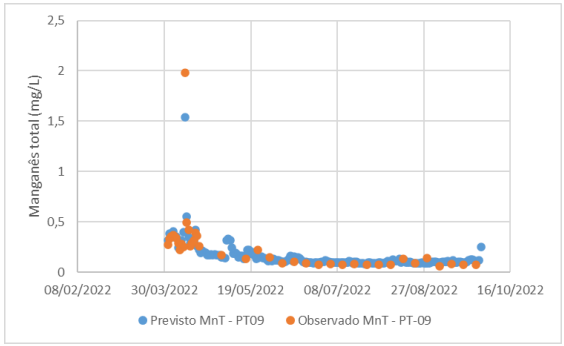


Gráfico 11.3.5 (B) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MD.

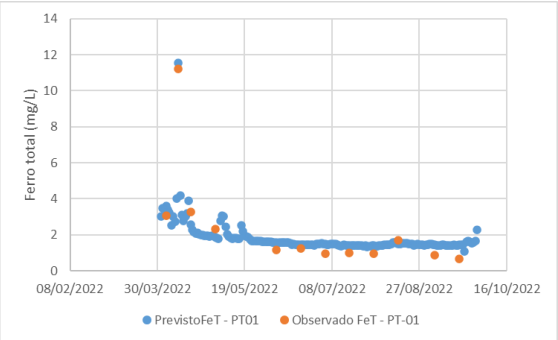


Gráfico 11.3.5 (E) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JD.

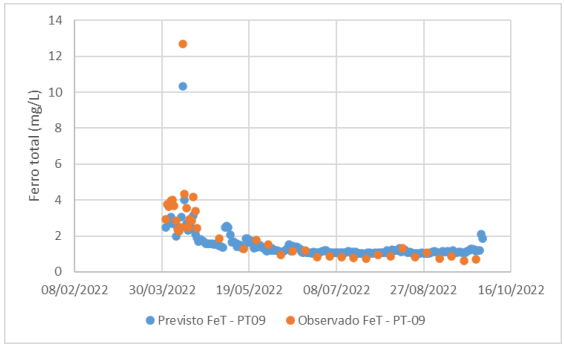


Gráfico 11.3.5 (C) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MD.

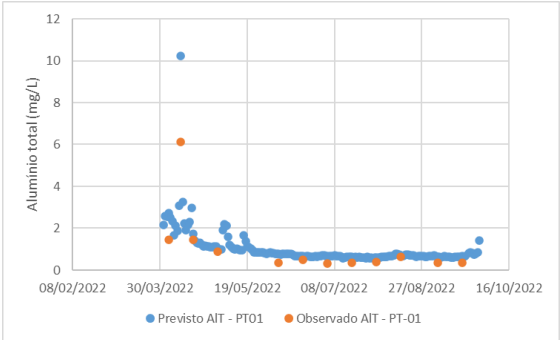
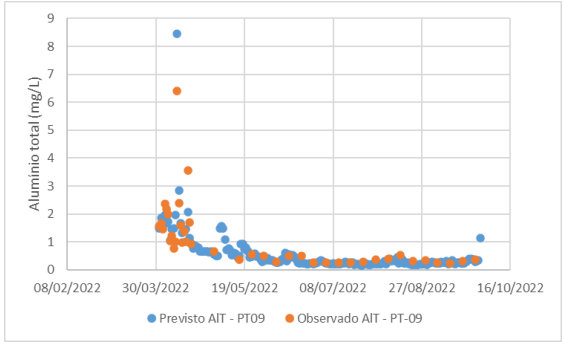


Gráfico 11.3.5 (F) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JD.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 11.3-6: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 11.3.6 (A) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CB (PT-02).

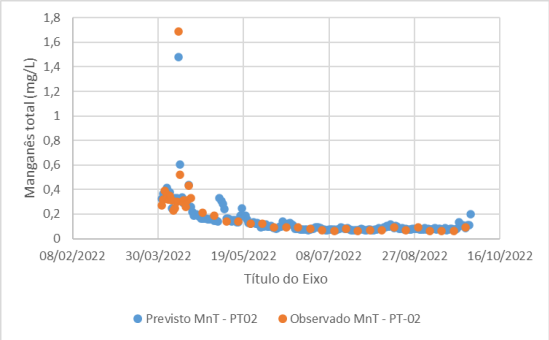


Gráfico 11.3.6 (B) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CB (PT-02).

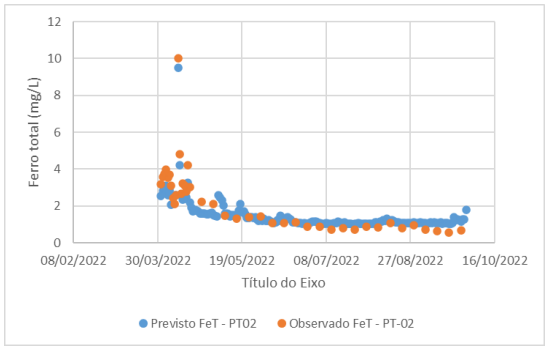


Gráfico 11.3.6 (C) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CB (PT-02).

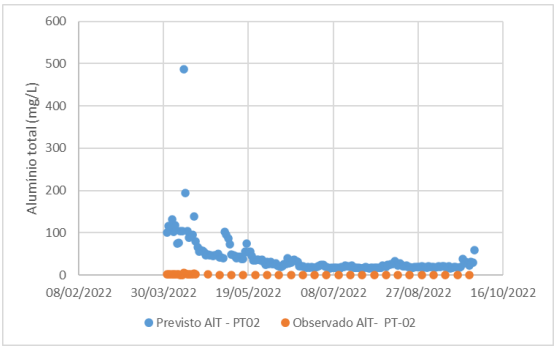


Gráfico 11.3.6 (D) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MTI (PT-14).

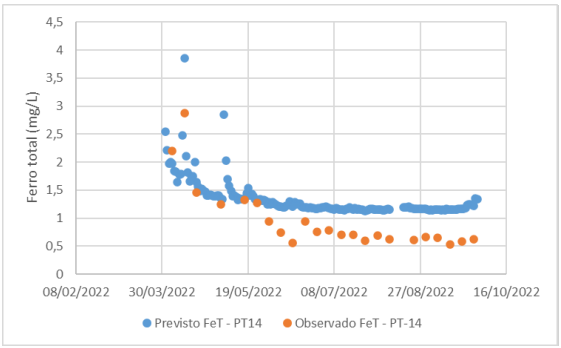


Gráfico 11.3.6 (E) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MTI (PT-14).

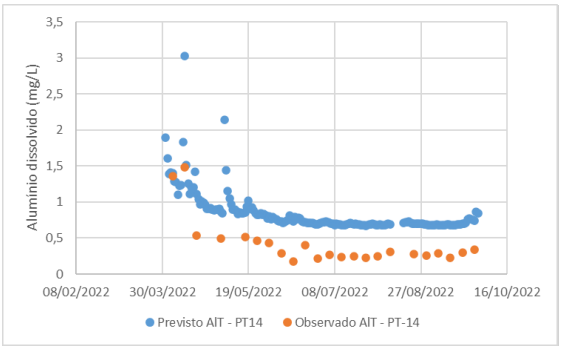
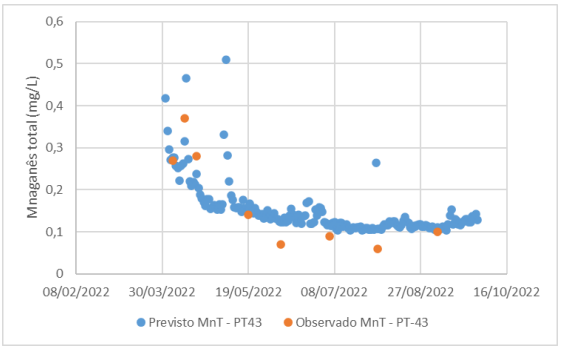


Gráfico 11.3.6 (F) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CPM_Ativa.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 11.3-7: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 11.3.7 (A) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CPM_Ativa.

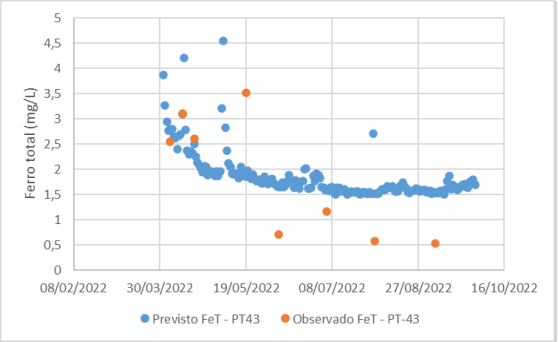


Gráfico 11.3.7 (D) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CP (PT-49).

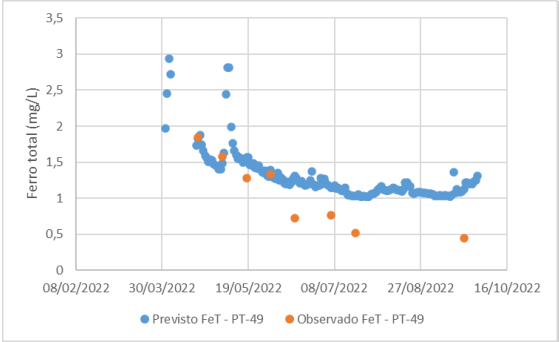


Gráfico 11.3.7 (B) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CPM_Ativa.

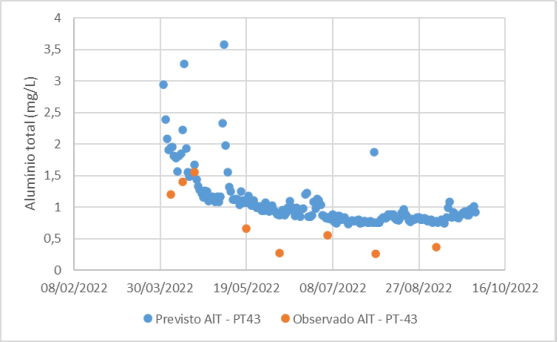


Gráfico 11.3.7 (E) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CP (PT-49).

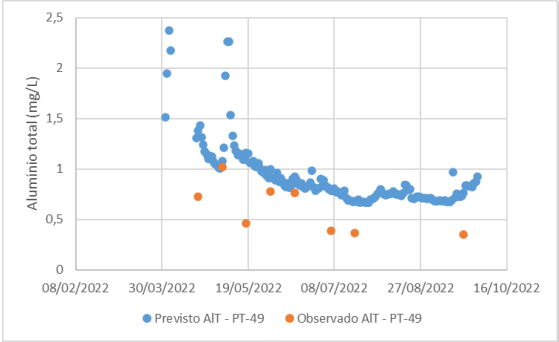


Gráfico 11.3.7 (C) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CP (PT-49).

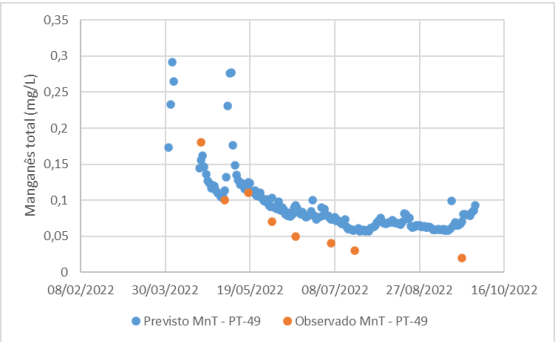
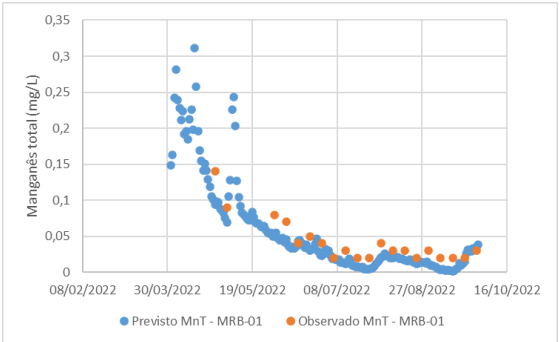


Gráfico 11.3.7 (F) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MRB-01 (PT-19).



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 11.3-8: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de estiagem/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 11.3.8 (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).

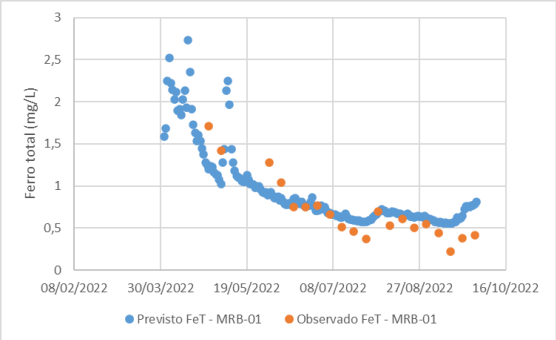


Gráfico 11.3.8 (B) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MRB-01 (PT-19).

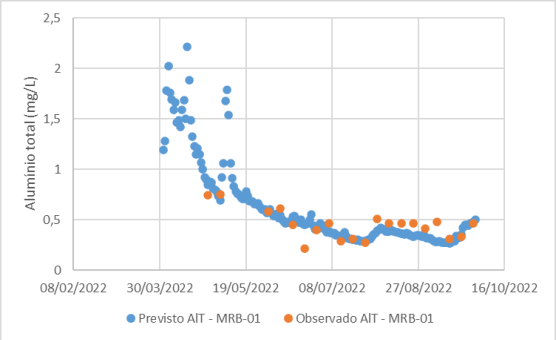


Gráfico 11.3.8 (C) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JRB-01.

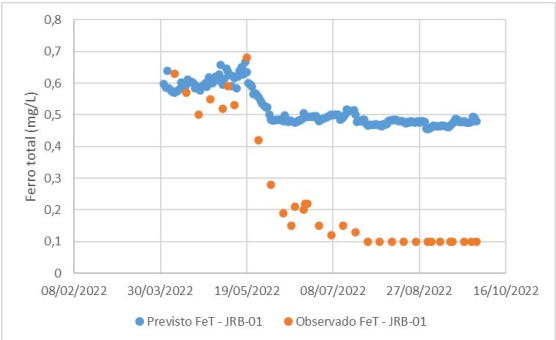


Gráfico 11.3.8 (D) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JRB-01.

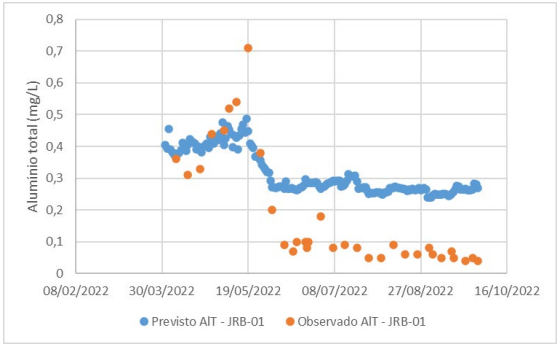


Gráfico 11.3.8 (E) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação UMF-TM-05.

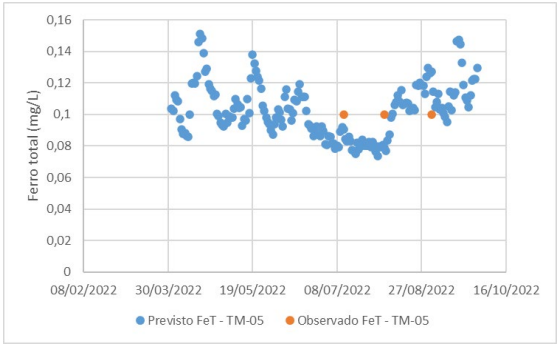
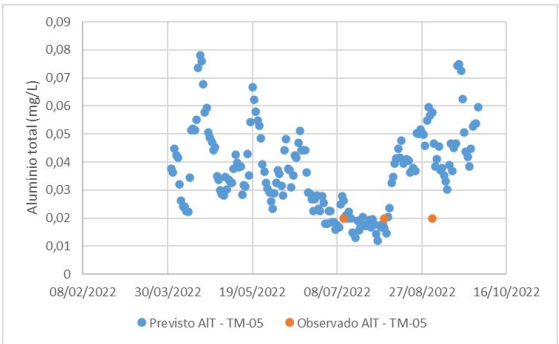


Gráfico 11.3.8 (F) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação UMF-TM-05.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Para a estação AUT-MD, através dos Gráficos 11.3.5 (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 estiagem/2022, indicando um bom ajuste dos dados em função dos valores de turbidez. É importante ressaltar que a estação AUT-MD não reportou dados no dia 22/09/2022 devido à manutenção na sonda que ocorreu nesse dia. A referida estação voltou a reportar dados normalmente em 23/09/2022.

É possível observar que, para a estação AUT-JD, cujos resultados dos modelos podem ser verificados pelos Gráficos 11.3.5 (D, E e F), os parâmetros Manganês e Ferro total apresentaram maior proximidade entre os valores previstos e observados. Para o Alumínio total, os resultados observados também foram próximos aos previstos, porém com comportamento mais distribuído se comparados aos metais referidos anteriormente, com destaque para o mês de abril. Outrossim, observou-se um bom ajuste dos dados nas correlações estabelecidas. Importante ressaltar que, a partir de 20/04/2022, a frequência de amostragem do ponto PT-09 para a matriz água superficial deixou de ser diária e passou a ser quinzenal. A partir de 13/05/2022, a frequência de amostragem do ponto para a matriz água superficial passou a ser semanal.

É possível observar que, para a estação AUT-CB, cujos resultados dos modelos podem ser verificados pelos Gráficos 11.3.6 (A, B e C), o parâmetro Manganês total apresentou maior proximidade entre os valores previstos e observados. Para o Alumínio total, os resultados observados foram de menor magnitude que os previstos, já para o Ferro total, os valores previstos apresentaram comportamento com distribuição semelhante aos observados. Da mesma forma que o ponto PT-09, também houve alterações na frequência do ponto PT-02 ao longo do período de estiagem, sendo que, a partir de 20/04/2022, a frequência de amostragem para a matriz água superficial deixou de ser diária e passou a ser semanal.

Nos Gráficos 11.3.6 (D e E), é possível observar que o comportamento previsto com base nos dados da estação AUT-MTI para os parâmetros Al e Fe é um pouco mais próximo para este último do que para o primeiro citado em relação às concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento PT-14. Ainda assim, a maioria dos resultados previstos foram maiores que os observados para ambos os parâmetros. Ressalta-se que a estação AUT-MTI não apresentou dados a partir de 10/08/2022, pois a sonda foi retirada para manutenção em laboratório. Dessa maneira, não foi possível indicar resultados telemétricos durante o período de 10/08 a 16/08.

Os resultados dos gráficos 11.3.6 (F) e 11.3.7 (A e B) indicam que o comportamento previsto para a estação AUT-CPM_Ativa para o parâmetro Mn total foi o mais aproximado ao encontrado nos resultados do monitoramento do ponto PT-43, se comparados aos parâmetros Fe e Al total. Salienta-se que o PT-43 passou de frequência semanal para mensal em 20/04/2022.

Com os Gráficos 11.3.7 (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 Mn total observados no ponto de monitoramento

PT-49, do que para os outros dois referidos parâmetros. Para os três parâmetros, os resultados observados foram maiores que os previstos. É importante ressaltar que a estação AUT-CP não reportou dados do dia 05/04/2022 ao dia 18/04/2022, devido a uma falha na sonda de transmissão. Tal defeito foi corrigido e a referida estação voltou a reportar dados normalmente às 12:30 do dia 19/04/2022.

Os resultados apresentados pelos Gráficos 11.3.7 (F) e 11.3.8 (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. Em 20/04/2022, o ponto passou de frequência semanal para quinzenal. Em abril, o ponto foi amostrado somente no dia 27/04, pois antes o acesso estava inseguro.

A partir dos gráficos 11.3.8 (C e D), é possível observar que o comportamento previsto para os parâmetros Al e Fe total é no geral, de maior magnitude em relação as concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento JRB-01.

Por fim, os resultados dos gráficos 11.3.8 (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, porém não houve coleta em abril, maio e junho de 2022, pois o acesso do ponto encontrava-se proibido.

11.4. Considerações

Tendo em vista as 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 foram mais semelhantes em relação aos observados para o período de chuva se comparado ao período de estiagem e, dentre as estações analisadas, as que obtiveram uma previsão mais aproximada dos resultados observados foram as estações AUT-JD, AUT-MD e AUT-CB (PT-02) para Ferro e Manganês total, que apresentaram comportamento aproximado entre os resultados previstos e observados e, em sua maioria, resultados de mesma magnitude.

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.

12. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos de estiagem até 2022

12.1. 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 estiagem até 2022.

12.2. Metodologia

12.2.1. 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 estiagem. A avaliação mais detalhada do parâmetro Fósforo neste item foi incluída pelo fato do Fósforo ter sido 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, 2020). A avalição 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 estiagem/2022, ocorreram concentrações acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12 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 estiagem, visando identificar a similaridade entre os pontos de monitoramento contidos nas diferentes regiões monitoradas, foi empregada a Análise de Agrupamentos (AA), em específico a Análise de Cluster (AC) (HAIR *et al.*, 2005). Essa análise agrupa objetos (casos) em classes (clusters) com base nas similaridades dentro da classe e dissimilaridades entre as diferentes classes. Para efetuar esta análise, foram consideradas as medianas mensais dos resultados dos parâmetros majoritários mencionados, desde o início do monitoramento até o final do período de

estiagem/2022. 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 *boxplo*t. 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 estiagem entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de estiagem em cada região (comparação temporal) foi aplicado o teste de hipóteses não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn (quando identificada diferença significativa no teste de Kruskal-Wallis), ao nível de significância de 5% (KRUSKAL; WALLIS, 1952; DUNN, 1964). 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 estiagem separadamente (comparação espacial 2019, 2020, 2021 e 2022).

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 (H0) de que não há diferença significativa entre as amostras comparadas; e da hipótese alternativa (HA) de que existe diferença significativa em pelo menos uma das amostras em relação às demais. No caso de rejeição da hipótese nula do teste de Kruskal-Wallis (valor-p ≤ 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.

12.2.2. 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 quatro 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 estiagem/2022, 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 (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 de estiagem separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de interesse. Neste caso, o teste de Mann-Kendall foi empregado sem necessidade de avaliação prévia da influência da sazonalidade nos dados.

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

12.3. Resultados e discussão

No período de estiagem/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-01, PT-03, PT-05, PT-13, PT-15, PT-16, PT-17, PT-18, PT-19, PT-25, PT-43, PT-48, PT-49, PT-52, PT-53, PT-54. O ponto JRB-02 apresentou poucos resultados no período de estiagem/2022 pois foi inserido somente recentemente (agosto/2022) no escopo desse monitoramento (PME v.24). Os pontos 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.

12.3.1. Análise de cluster

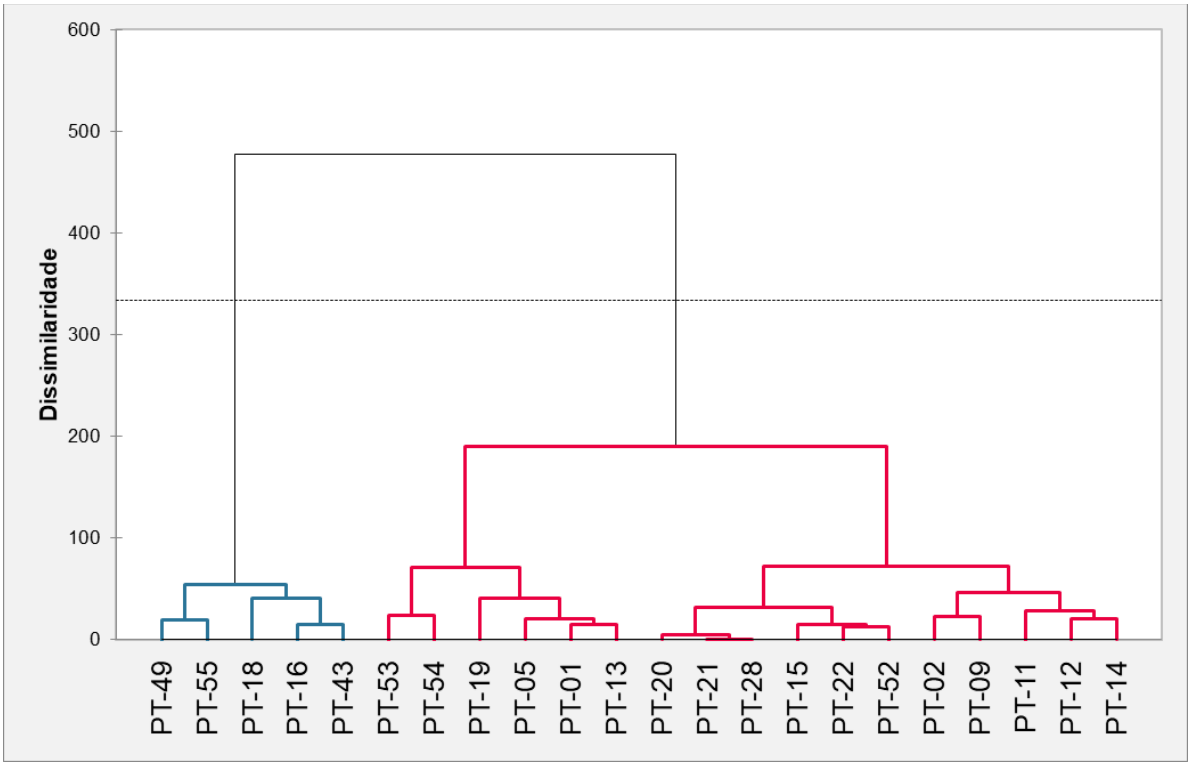
De acordo com o dendrograma (**Figura 12.3.1.1**) evidenciou-se maior distribuição dos pontos de monitoramento no espaço, ou seja, os pontos das regiões Ferro-Carvão, 1A e parte de 1B se distribuíram no agrupamento de PT-02, PT-09, PT-11, PT-12 e PT-14, apresentaram similaridades estatísticas e são os pontos com sedimentos que apresentaram característica química de rejeito. O grupo PT-13, PT-01 e PT-05, que espacialmente tenderia a estar no agrupamento anterior ficaram mais ao centro do cluster, possivelmente por causa da mistura de rejeitos e sedimentos que ocorrem nessa região. O PT-19 está neste mesmo agrupamento (PT-13, PT-01 e PT-05) e apesar da distância espacial, ambos estão em áreas de constantes escavações de areia.

O agrupamento azul indicado na **Figura 12.3.1.1** englobou pontos que estão espacialmente próximos (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 com os sedimentos de corrente de pontos mais próximos ao Quadrilátero Ferrífero. Os pontos da região 2A (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.

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 sedimentos que foram mais afetados pelo rejeito das barragens B1, B4, B4A tendenciaram a se misturarem entre si (Ferro-Carvão, 1A, e parte de 1B), o que pode indicar evolução na característica do sedimento para uma tendência mais transicional entre sedimentos naturais e com característica de rejeitos. Já a maioria dos pontos da região 2A manteve-se agrupado, com característica recorrente e sem evidência de transições ou misturas de materiais no período. Tais características corroboraram com o ciclo anterior (chuvas 2021/2022).

Figura 12.3.1.1: 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.



12.3.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial

A análise estatística descritiva dos resultados de sedimentos dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 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 454/12 de cada elemento, quando disponível. Os elementos avaliados foram os prioritários (Mn, Fe, Al) e os traço (Pb,

Cu, Ni, As, Cr, Cd, Hg e Zn). O fósforo (P) foi incluído especificamente para fins de avaliação de comportamento e sua relação com o rejeito.

Nos **Gráfico 12.3.2.1** até o **Gráfico 12.3.2.20,** estão apresentadas as regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C até o PT-22, no limite com o barramento da UHE Três Marias, na região 2C. 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.

Elementos prioritários

- **Manganês**

A distribuição estatística espacial e temporal do Manganês nos períodos de estiagem encontra-se nos **Gráficos 12.3.2.1** e **2** (*boxplots*) e **Tabelas 12.3.2.1** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.2** (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 (**Gráfico 12.3.2.1** e **Tabela 12.3.2.1**). Na Região Montante, o Manganês (Mn) apresentou variação nas medianas sendo próximo a 2.350 mg/kg na estiagem de 2019; 710 mg/kg na estiagem de 2020 e próximo a 1480 e 1700 mg/kg, respectivamente na estiagem de 2021 e 2022. As variações nessas concentrações podem estar associadas com 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 (**Tabela 12.3.2.1**). As medianas em cada um dos períodos foram de: *ca.* 4.850 mg/kg na estiagem de 2019; *ca.* 9.030 mg/kg na estiagem de 2020; *ca.* 13.260 mg/kg na estiagem de 2021; e *ca.* 13.800 mg/kg na estiagem de 2022 (**Gráfico 12.3.2.2**). Essas variações são consideradas temporalmente significativas com base em análises estatísticas temporais dispostas na **Tabela 12.3.2.2**. 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. A partir de 2022, a instalação de chicanas e um sistema de lagoa de deposição no mesmo sistema do Estaca-Prancha se somaram a logística do processo de tratamento na ETAF-1 e podem ter contribuído para o acúmulo de materiais mais finos. 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 maiores espacialmente que da região Montante e menores que no Ferro-Carvão (**Tabela 12.3.2.1**). Pelos *boxplots* (**Gráfico 12.3.2.2**), verifica-se que, temporalmente, as concentrações medianas foram de 5.031 mg/kg, 1.640 mg/kg, 1.357 mg/kg e 1.254 mg/kg, respectivamente nas estiagens de 2019, 2020, 2021 e 2022, de modo que, entre os períodos de estiagem, ocorreu um decréscimo nas concentrações de Mn nessa região.

Na Região 1B, ao se comparar com a Região 1A, percebeu-se que, espacialmente, as concentrações de Mn foram significativamente maiores (**Tabela 12.3.2.1**), 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 1A (**Gráfico 12.3.2.2**) houve uma maior variação nas concentrações de Mn no primeiro período de estiagem/2019, cuja mediana foi de 13.500 mg/kg, e subsequentes reduções nas medianas ao longo dos períodos estiagem, com valores de 2.980 mg/kg (2020), 1.641 mg/kg (2021) e 2.126 mg/kg (2022). Apesar da estiagem/2022 apresentar leve aumento da mediana, não significativo, mostrando manutenção dos valores e abaixo das concentrações de 2019. Tais reduções nas concentrações se confirmam estatisticamente, indicando a redução significativa entre os períodos sazonais (**Tabela 12.3.2.2**).

Na Região 2A, a concentração mediana no período de estiagem/2019 foi de 640 mg/kg. No período de estiagem/2020, mesmo com os aumentos históricos das vazões no rio Paraopeba, a concentração mediana de Manganês nessa região reduziu (285 mg/kg), ao passo que as na estiagem/2021 (356 mg/kg), houve manutenção das concentrações. A estas alterações atribuiu-se, principalmente, mudanças na granulometria (discretizadas no item 14) 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 estiagem de 2019, que indicaram ocorrência de materiais com composição química de rejeitos. A estiagem/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 estiagem/2022, as concentrações medianas reduziram para 297 mg/kg e são bem inferiores às monitoradas do período de estiagem anterior, mesmo com coleta em posição marginal e que as chuvas de 2021/2022 (1.353 mg/kg). Esse fato é importante visto que, com tais chuvas o rio está em processo de desague e materiais em suspensão ainda foram identificados na água na estiagem de 2022 e os sedimentos mais finos são transportados e a deposição e dissipação é mais lenta.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, entre os períodos de estiagem, apresentou aumento nas concentrações medianas, cujos valores para região foram de 682 mg/kg (2019); 1.150 mg/kg (2020); 1.235 mg/kg (2021); 1.225 mg/kg (2022). 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 estiagem 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 tiveram medianas em torno de 847 mg/kg na estiagem de 2019 e, apesar de maiores que da região 2B, não mostraram diferença significativa. Na estiagem/2020, a diminuição 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 1.352 mg/kg. Essas concentrações foram mantidas na ordem de grandeza aproximada na estiagem/2021 (1.372 mg/kg), com queda dos valores na estiagem/2022 (1.336 mg/kg). 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 estiagem/2022 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores de Mn. A estiagem/2022 apresentou valores ligeiramente maiores, porém a maioria das regiões mostrou distribuição próxima entre os *boxplots* dos dois períodos. As regiões Montante, 2A e 2B mostraram distribuição de dados bastante similar, com valores medianos ligeiramente maiores nas regiões Montante e 2B. Enquanto as regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B, mostraram distribuição próxima para os dois períodos, com valores medianos e P75 maiores para a estiagem/2022. A região 2C mostrou

comportamento mais destoante, com valores mais baixos na chuva 2021/2022 que na estiagem analisada, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2-1: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

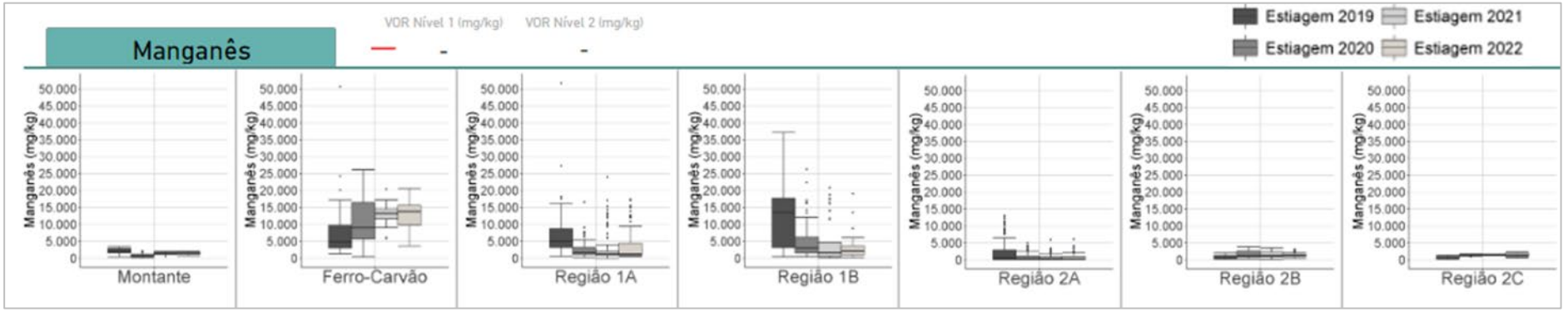


Gráfico 12.3.2-2: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

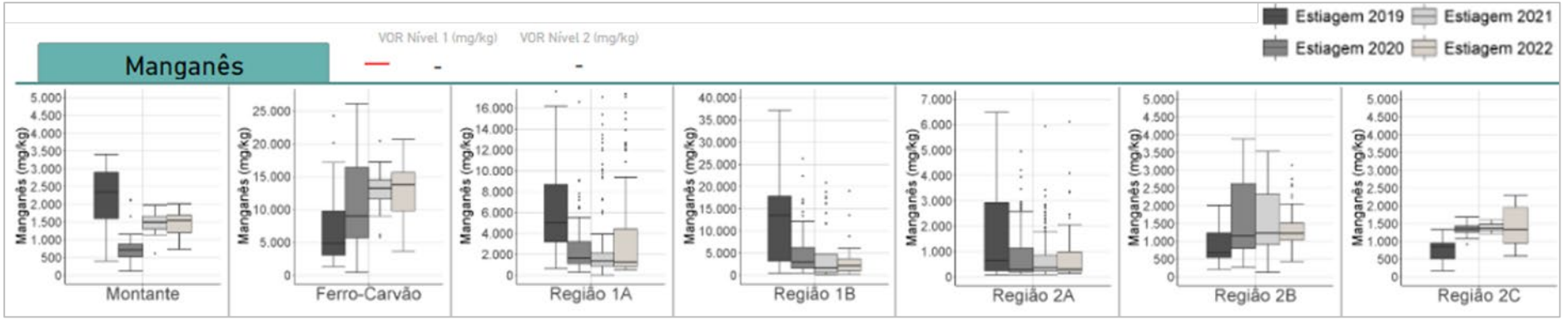


Tabela 12.3.2-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Manganês.

	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 B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
> Os valores da região B (jusante) são significativamente superiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Tabela 12.3.2-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	>	~	~	~	~	~
Est-2022 x Est-2019	>	<	<	<	<	>	>
Est-2021 x Est-2020	~	>	~	~	~	~	~
Est-2021 x Est-2019	>	<	<	<	<	>	>
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	<	<	>	>

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Ferro**

A distribuição estatística espacial e temporal do Manganês nos períodos de estiagem encontra-se nos **Gráficos 12.3.2.3** e **4** (*boxplots*) e **Tabelas 12.3.2.3** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.4** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.3** mostra a evolução do Ferro ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, as concentrações medianas nos períodos de estiagem foram de 91.000 mg/kg em 2019; 79.700 mg/kg em 2020; 57.787 mg/kg em 2021 e 45.755 mg/kg em 2022. Dessa forma, nas estiagens de 2021 e 2022, as concentrações medianas foram menores, 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, as medianas e máximas foram maiores que na Região Montante e o comportamento foi de aumento das medianas entre os períodos de estiagem de 2019 (126.180 mg/kg) e 2020 (333.000 mg/kg). Já nos dois últimos períodos de estiagem (2021 e 2022), verificou-se concentrações menores (206.875 mg/kg em 2021 e 176.901 mg/kg em 2022) do que nos dois períodos pretéritos (2019 e 2020), sugerindo influência do barramento Estaca-Prancha com influência das precipitações 2019/2020 e uma maior contribuição do rejeito, principalmente com Fe, para o trecho. Em 2022, as estações de chuva e estiagem apresentaram padrão e concentrações similares (mediana 197.434 mg/kg na chuva 2021/2022), o que sugere uma tendência de diminuição da presença de Ferro no trecho mais impactado pelo rompimento.

Na Região 1A, constatou-se que as concentrações medianas de Ferro foram maiores durante a estiagem 2019 (140.368 mg/kg), quando comparada ao restante das outras estiagens: 2020 (112.334 mg/kg), 2021 (89.694 mg/kg) e 2022 (59.124 mg/kg). Dessa forma, no atual período de estiagem as concentrações apresentaram diminuição gradativa em relação aos períodos anteriores analisados, o que sugere recuo da região impactada pela pluma de rejeito. Além disso, as chuvas contínuas de 2021/2022, 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, a concentração mediana foi de 166.504 mg/kg na estiagem/2019. Na estiagem/2020, as concentrações medianas aumentaram para 180.000 mg/kg e a esse comportamento associaram-se 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 até a estiagem, com revolvimento, transporte, possíveis erosões marginais e do canal, inclusive do rejeito depositado em trechos a montante, e de sedimentação de materiais. Nas estiagens seguintes, as concentrações medianas diminuíram, com 89.694 mg/kg em 2021, e 68.307 mg/kg em 2022, 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, apesar disso, as concentrações de Ferro não foram afetadas. Em termos temporais, as concentrações tenderam a queda significativa como se observou na **Tabela 12.3.2.4**.

Na Região 2A, a concentração mediana de Ferro na estiagem/2019 foi equivalente a 29.300 mg/kg, reduziu para 9.140 mg/kg na estiagem/2020, seguido de incremento na estiagem/2021 (13.640 mg/kg). Na atual estiagem (2022), a mediana da região novamente reduziu (7.295 mg/kg). Avaliando-se a tendência das concentrações percebeu-se que espacial e temporalmente elas diminuíram significativamente. 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 50.000mg/kg. Além disso, esta região está em ambiente lótico, que não é propicio 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 lêntico 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, as medianas do Ferro na Região 2B (entre 60.000 e 75.000 mg/kg) são maiores que na Região 2A (entre 7.000 e 30.000 mg/kg), que está em ambiente lótico (**Gráfico 12.3.2.3** e **Tabela 12.3.2.3**). De modo geral, os diferentes períodos de estiagem mostraram medianas similares com leve diminuição ao longo do tempo: 63.893 mg/kg (2019), 74.300 mg/kg (2020), 65.620 mg/kg (2021) e 61.936 mg/kg (2022). Somente a estiagem/2020 mostrou aumento significativo em relação a 2019 (**Tabela 12.3.2.4**), período que sucedeu rompimento da barragem e o de grandes precipitações.

A Região 2C, mais distante da área do rompimento, foi a única região em que as medianas apresentaram aumento das concentrações medianas com o tempo, com 36.779 mg/kg em 2019, 39.768 mg/kg em 2020, 41.289 mg/kg em 2021, e 47.810 mg/kg em 2020; com uma diferença de aproximadamente 5.000mg/kg entre a maior e a menor medianas (**Gráfico 12.3.2.4**). A tendencia de elevação de concentrações de Ferro nesta região se confirma estatisticamente apenas para as estiagens de 2020 e 2022 em relação a 2019, para o restante não há diferença significativa (**Tabela 12.3.2.4**).

Em comparação com o período sazonal anterior (Chuva 2021/2022), a estiagem/2022 mostrou, de modo geral, redução dos valores de Fe. A estiagem/2022 apresentou valores menores para a maioria das regiões, somente as regiões 1B, 2A, 2B mostraram distribuição próxima entre os *boxplots* dos dois períodos. 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 de UTE Igarapé e UHE Retiro Baixo. As regiões Montante, Ferro-Carvão e 1A tiveram valores medianos e P75 maiores na chuva 2021/2022. Já a região 2C mostrou comportamento mais destoante, com valores mais baixos na chuva 2021/2022 que na estiagem analisada, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2-3: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

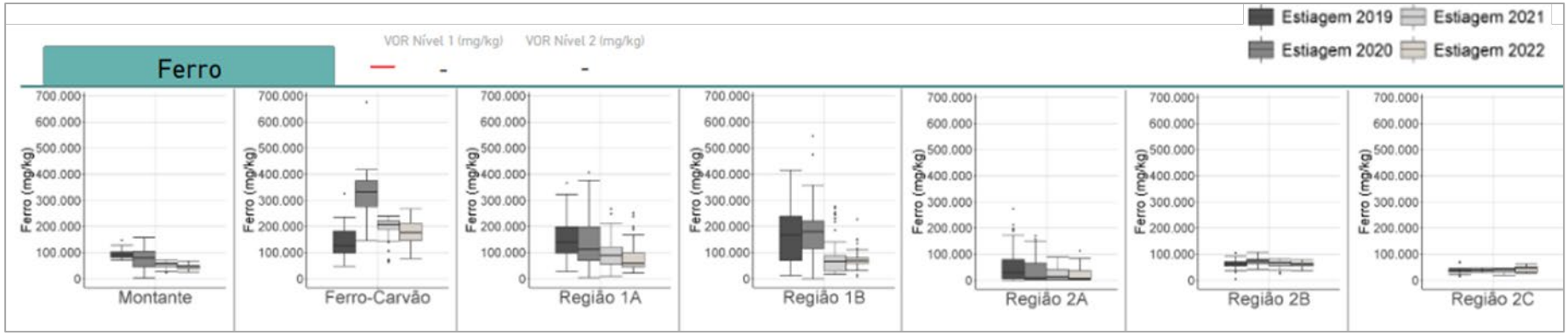


Gráfico 12.3.2-4: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

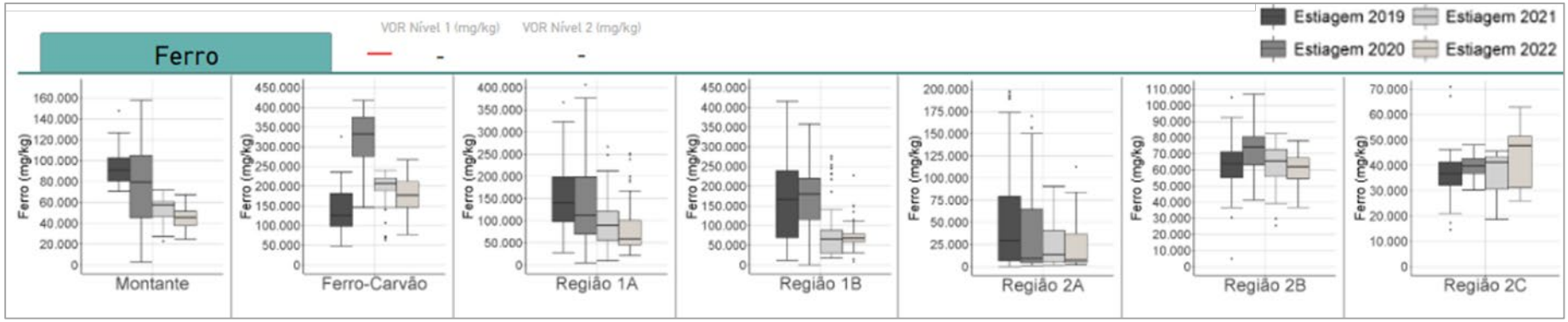


Tabela 12.3.2-3 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Ferro.

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

Tabela 12.3.2-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	~	~
Est-2022 x Est-2020	<	<	<	<	~	<	~
Est-2022 x Est-2019	>	<	<	<	<	~	>
Est-2021 x Est-2020	<	<	<	<	~	<	~
Est-2021 x Est-2019	>	<	<	<	<	~	~
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	~	<	>	>

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Alumínio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Alumínio nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.5** e **6** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.5** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.6** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.5** mostra a evolução do Alumínio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

De modo geral, percebeu-se que espacialmente, as concentrações de Alumínio têm maior concentração 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 nestas elevadas concentrações de alumínio nesta região.

Na Região Montante, o Alumínio apresentou concentrações P75 decrescentes os períodos de estiagem sazonais, porém com medianas que mostraram diminuição em 2020 e aumento em 2021, com manutenção até 2022. A maior mediana observada foi na estiagem/2019 (26.900 mg/kg) e a menor mediana foi na estiagem/2020 (7.350 mg/kg), como pode ser observado no **Gráfico 12.3.2.5**. Na estiagem de 2021 e 2022, não houve diferenças significativas entre as medianas, com 15.836 mg/kg e 14.373 mg/kg, respectivamente. O Alumínio, nesta região, pode estar relacionada aos granitoides e gnaisses do Complexo Bonfim.

A Região do Ferro-Carvão foi a única em que se observou significativa elevação contínua das medianas entres as estiagens observadas, como disposto na **Tabela 12.3.2.6**. A estiagem/2019 apresentou mediana de 7.927 mg/kg, na estiagem/2020 a mediana do alumínio foi de 13.000 mg/kg, na estiagem/2021 a mediana foi de 22.341mg/kg e na estiagem/2022 a mediana foi de 22.744 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 lênticas 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 estiagem e indicando sedimentação *in loco*. Além disso, a influência de chuvas, como as de 2019/2020 e 2021/2022, podem ter repercutido nos períodos de estiagem subsequentes, com maior aporte de material.

Na Região 1A, as concentrações medianas de Al nas quatro estiagens comparadas foram menores (faixa de 5.000 mg/kg a 10.000 mg/kg) que as concentrações medianas identificadas na Região Montante (que variaram de 7000 a 27.000 mg/kg) e Ferro-Carvão (que variaram de 7000 a 23.000 mg/kg). A mediana da estiagem/2019 na Região 1A foi de 9.369 mg/kg, semelhante a observada na Região Ferro-Carvão, contudo as medianas das estiagens de 2020 (5.672 mg/kg) e de 2021 (6.863 mg/kg) foram menores que as observadas na Região Ferro-Carvão, sugerindo que as estiagens de 2020 e 2021 apresentaram mudança no comportamento da distribuição das concentrações de Alumínio. 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 17), 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 nas estiagens de 2020 e 2021 em relação a 2019, como pode-se observar na **Tabela 12.3.2.6**.

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 (**Tabela 12.3.2.5**). 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 consequente variações nos resultados. Na avaliação temporal dos ciclos de estiagem percebeu-se uma certa gradação de redução significativa a partir de 2019. A estiagem/2020 mostrou a maior mediana (27.000 mg/kg), significativamente maior que em 2019 (18.227 mg/kg), onde as demais estiagens mostraram diminuição significativa das medianas em 2022 (15.093 mg/kg) e com a menor (17.091 mg/kg) em 2021 (**Tabela 12.3.2.6**).

Na Região 2A, as concentrações medianas de Al apresentaram comportamento com tendencia de redução, entre 2019 e 2022 e foram menores todas as regiões a montante (**Tabela 12.3.2.5**). A mediana do Alumínio para os diferentes períodos de estiagens foi de 4.540mg/kg (2019), 2.150mg/kg (2020), 2.367 mg/kg (2021) e 1.509 mg/kg (2022). Na análise inferencial temporal (**Tabela 12.3.2.6**), o que se observou foi que as reduções nas concentrações foram significativas na estiagem/2022 quando comparadas as estiagens de 2019 e 2020, e a estiagem/2020 em relação a estiagem/2019.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, constatou-se oscilação entre as medianas e P75 de Al entre os períodos sazonais, com diminuição ao longo do tempo, a partir de 2019. As medianas da Região 2B são as maiores de todo o rio Paraopeba, ou seja, são significativamente maiores que as das demais regiões (**Tabela 12.3.2.6**). O comportamento do Alumínio nesta região é semelhante a observada na região 1B (**Gráfico 12.3.2.4**), com aumento dos valores entre 2019 (50.895 mg/kg) e 2020 (69.300 mg/kg), que apresentou a maior mediana, seguido de diminuição em 2021 (44.740 mg/kg) até 2022 (38.877 mg/kg). 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, tem-se que as medianas de Alumínio apresentaram estabilidade entre as estiagens monitoradas, sem variações significativas entre as estiagens monitoradas (**Tabela 12.3.2.6**). Assim, as estiagens mostraram medianas em 2019 de 20.750 mg/kg, em 2020 de 20.127 mg/kg, em 2021 de 19.977 mg/kg, e em 2022 de 21.121 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.4**). Na

análise inferencial percebeu-se que espacialmente houve variações em relação as concentrações de áreas a montante, tendo a região 2C medianas significativamente superiores às regiões entre Ferro-Carvão até a 1A, com a região 1B que não mostrou diferença.

Em comparação com o período sazonal anterior (Chuva 2021/2022), a estiagem/2022 mostrou, de modo geral, oscilação dos valores de Al. As regiões Montante, 1B e 2B mostraram redução das concentrações medianas e P75 na estiagem/2022. Enquanto as demais regiões (Ferro-Carvão, 1A e 2A) mostraram manutenção dos valores, com distribuição similar entre os *boxplots* dos dois períodos. A manutenção dos teores nessas regiões pode estar relacionada a baixa ocorrência natural de Al nestes trechos e também 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 na estiagem analisada, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2-5: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

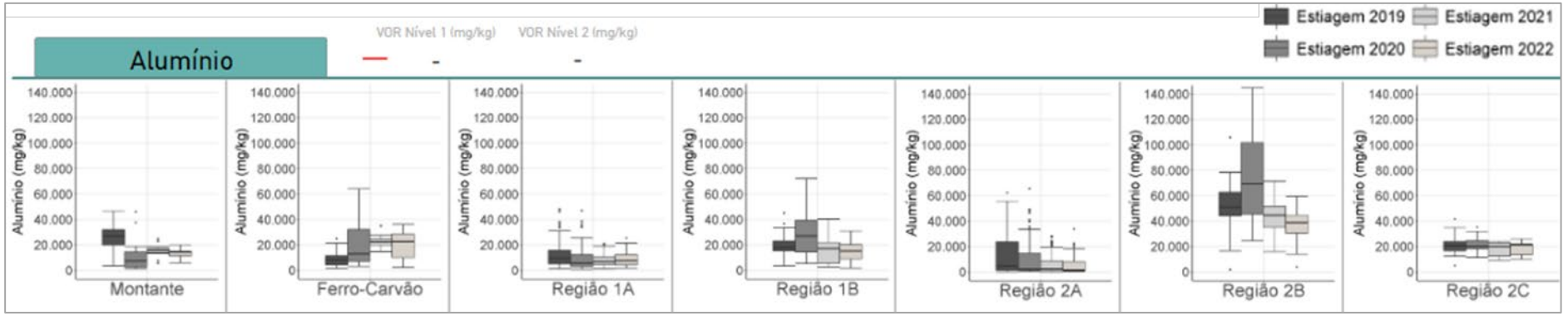


Gráfico 12.3.2-6: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

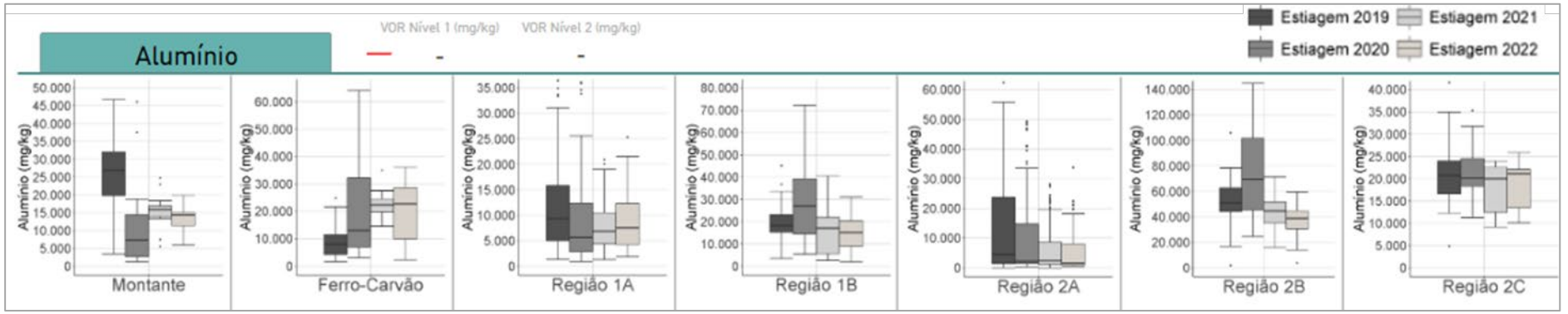


Tabela 12.3.2-5: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Alumínio.

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

Tabela 12.3.2-6: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	<	~
Est-2022 x Est-2020	~	~	~	<	<	<	~
Est-2022 x Est-2019	>	<	~	<	<	<	~
Est-2021 x Est-2020	>	>	~	<	~	<	~
Est-2021 x Est-2019	>	<	<	<	<	<	~
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	>	~	>	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

Elementos traço

- **Chumbo**

A distribuição estatística espacial e temporal do Chumbo nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.7** e **8** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.7** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.10** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.7** mostra a evolução do Chumbo ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, o Chumbo teve uma variação baixa para todos os períodos sazonais e os valores máximos não ficaram acima dos valores orientadores, em nenhum dos períodos analisados (estiagens de 2019, 2020 e 2021). Apesar da baixa variação, há significativo comportamento de redução de concentrações medianas entre a estiagem/2019 (*ca.* 19,4 mg/kg) e a estiagem/2020 (*ca.* 12,3 mg/kg), com manutenção das concentrações na estiagem/2021 (*ca.* 14,1 mg/kg) e na estiagem/2022 (*ca.* 12,15 mg/kg), indicando baixa variabilidade de Chumbo nesta parte da bacia do rio Paraopeba.

Na Região Ferro-Carvão, assim como observado para outros metais (Mn e Al), tem-se propensão a elevação das medianas ao longo das estiagens comparadas. Esse comportamento reflete em um número maior de concentrações (P75) acima do VOR nível 1 da legislação nas estiagens de 2020, 2021 e 2022. As estiagens de 2020, 2021 e 2022 mostraram aumento significativo em relação a estiagem/2019 (**Tabela 12.3.2.8**). Como mencionado, as obras de engenharia e contenção geram o represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão e a consequência é a deposição de sedimentos finos na localidade, sendo esta fração fina a que adsorve mais metais. As medianas observadas nas estiagens foram de 15 mg/kg (2019), 30 mg/kg (2020), 32,9 mg/kg (2021) e 33 mg/kg (2022) (**Gráfico 12.3.2.8**).

Na Região 1A, observou-se uma diminuição significativa e gradativa das concentrações medianas de Chumbo ao longo dos períodos de estiagem (**Tabela 12.3.2.8**). A estiagem/2019 mostrou valores superiores, de 38 mg/kg, seguido de uma redução nas concentrações, com 15,7 mg/k (2020), 10,7 mg/kg (2021), até 9,64 mg/kg em 2022 (**Gráfico 12.3.2.8**). Na última estiagem observou-se a manutenção dos valores, em que, as variações máximas ficaram predominantemente abaixo do valor orientador e próximos aos valores de Montante. Ou seja, nestes últimos períodos apesar da região 1A mostrar valores significativamente maiores em relação a região Montante, as concentrações foram menores que nas últimas estiagens. Apesar da constatação de Chumbo no rejeito da barragem B1, as concentrações medianas nas estiagens foram inferiores as concentrações detectadas no rejeito original (até 50 mg/kg; Geoenviron, 2019), além de qualitativamente inferiores as maiores concentrações reportadas nos mapas da CPRM (2018; 32,8 mg/kg) e Arcadis (2020a).

Na Região 1B, as variações das concentrações apresentaram redução significativa das medianas ao longo do monitoramento: 34 mg/kg em 2019; 23,3 mg/kg em 2020; e 14,6 mg/kg em 2021; com manutenção dos valores na estiagem/2022 (13,85 mg/kg). 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 estiagem de 2019, provavelmente por conta das contribuições naturais da bacia, mas também relacionado a presença do rejeito das barragens. Nas demais estações (estiagens) 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 estiagens de 2020, 2021 e 2022, que ficou abaixo do VOR nível 1 nos referidos períodos.

A Região 2A mostrou, na análise inferencial espacial, concentrações significativamente menores que as regiões a montante (Montante, Ferro-Carvão, 1A e 1B). A temporal mostrou que houve redução significativa das medianas ao longo do monitoramento: com redução significativa das medianas das estiagens de 2020, 2021 e 2022 em relação a de 2019. Os *boxplots* mostram redução gradativa entre as estiagens, tendo em 2019 medianas de 7,7 mg/kg; em 2020 de 3,94 mg/kg; em 2021 de 4,58 mg/kg; e em 2022 de 3,04 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.10**). Esse aumento, mesmo que observado no *boxplot*, não é considerado significativo (**Tabela 12.3.2.10**). 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.

Na Região 2B, as concentrações entre as estiagens apresentaram similaridade dos valores de medianas: com 28,65 mg/kg em 2019; 31,7 mg/kg em 2020, 29,35 mg/kg em 2021, e 29,5 mg/kg em 2022 (**Gráfico 12.3.2.8**). A análise estatística espacial mostrou que a região 2B apresenta valores significativamente superiores às demais regiões (**Tabela 12.3.2.7**). Enquanto a temporal, mostrou que na estiagem/2020, a concentração de chumbo foi significativamente maior que a observada na estiagem/2019, as medianas das estiagens de 2021 e 2022 foram significativamente menores que a de 2020 (**Tabela 12.3.2.8**). O fato dos teores de Pb 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 ressupender sedimentos.

Na Região 2C, percebeu-se redução significativa nas concentrações nesta estiagem em relação as regiões Ferro-Carvão e 2B, com aumento somente em comparação com região Montante e 2A. Além disso, observou-se uma diminuição significativa e gradativa das concentrações medianas de Chumbo ao longo dos períodos de estiagem (**Tabela 12.3.2.8**),

com redução na estiagem/2020 (mediana de 16,5 mg/kg) em relação a estiagem/2019 (23 mg/kg) e manutenção das concentrações nas estiagens de 2021 (16mg/kg) e 2022 (18,7 mg/kg). Percebeu-se que as concentrações medianas de Pb foram menores que no reservatório da UHE Retiro Baixo, sugerindo contribuição local proveniente de escoamento superficial de materiais das áreas desnudas.

Em comparação com o período sazonal anterior (Chuva 2021/2022), a estiagem/2022 mostrou, de modo geral, oscilação dos valores de Pb. As regiões Montante e 1B mostraram redução das concentrações medianas e P75 na estiagem/2022. Enquanto as demais regiões (Ferro-Carvão, 1A, 2A e 2B) mostraram distribuição próxima entre os *boxplots* dos dois períodos, com manutenção dos valores. A manutenção dos teores nessas regiões pode estar relacionada ao acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e de retenção hidráulica, como o reservatórios Estaca-Prancha e UHE Retiro Baixo. Já a região 2C, da mesma forma que para os metais majoritários, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2.7: Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

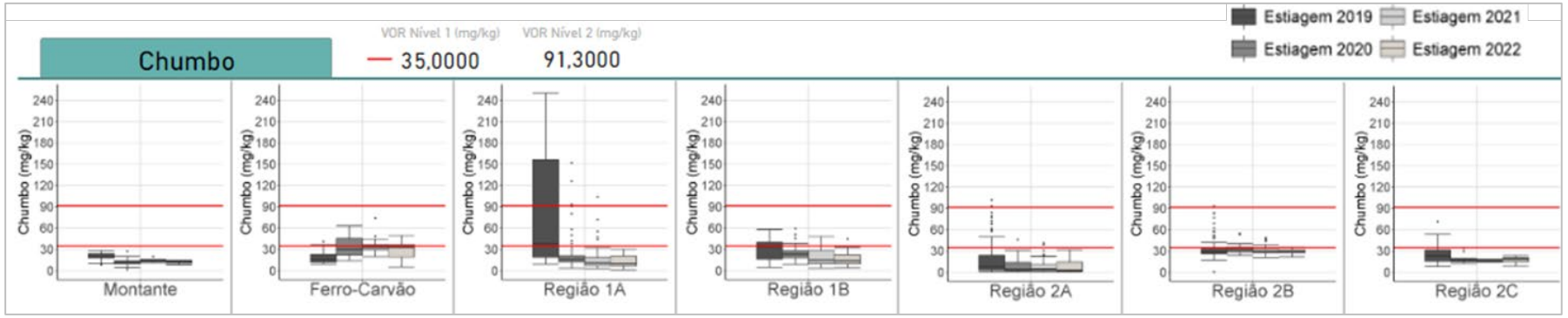


Gráfico 12.3.2.8: Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

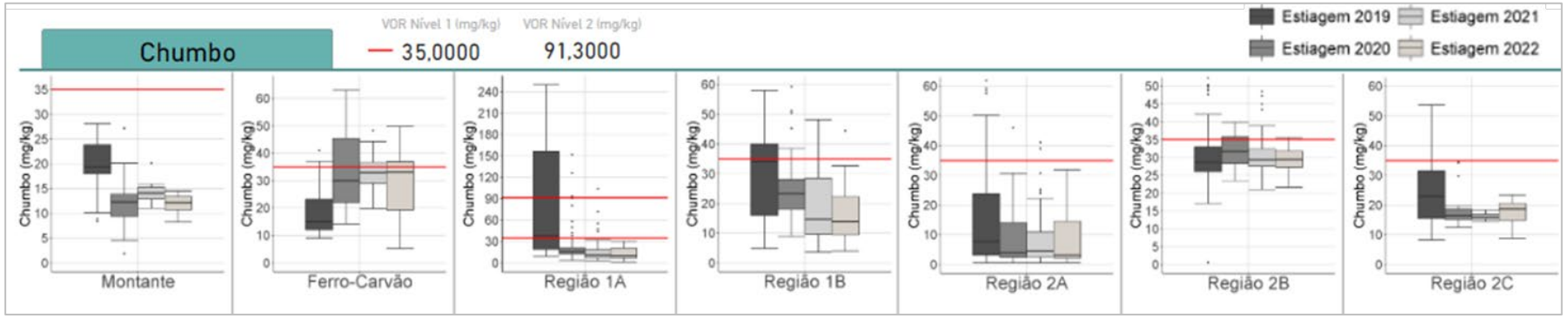


Tabela 12.3.2.7: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Chumbo.

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

Tabela 12.3.2.8: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Chumbo em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	~	<	<	~	<	~
Est-2022 x Est-2019	>	<	<	<	<	~	~
Est-2021 x Est-2020	~	~	<	<	~	<	~
Est-2021 x Est-2019	>	<	<	<	<	~	<
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	<	<	>	<

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Cobre**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cobre nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.9** e **10** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.9** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.10** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.9** mostra a evolução do Cobre ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, o Cobre teve medianas de concentração na estiagem/2019 de 43 mg/kg, na estiagem/2020 houve redução e a mediana da concentração foi de 10,8 mg/kg, na estiagem/2021 ocorreu elevação e a mediana foi de 18,45 mg/kg, e nova elevação na estiagem/2022, com mediana de 20,35 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.10**). Do ponto de vista temporal, a região Montante mostrou reduções significativas nas estiagens de 2020, 2021 e 2022 em relação a de 2019 (**Tabela 12.3.2.10**). As concentrações do Cobre são relativamente baixas na Região Montante (**Tabela 12.3.2.9**) 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 do tempo (**Gráfico 12.3.2.10**) e foram as maiores em comparação com as demais regiões (**Tabela 12.3.2.10**). As concentrações medianas apresentaram elevação significativa nas concentrações entre as quatro estiagens comparadas (**Tabela 12.3.2.10**), com manutenção dos valores nas estiagens de 2021 e 2022, que foi resultado das obras de contenção de avanço de rejeitos no Ribeirão já citado. Com isso as medianas de concentração que na estiagem/2019, que foram de 32 mg/kg, na estiagem/2020 foram de 47,1 mg/kg, na estiagem/2021 de 98,1 mg/kg e na estiagem/2022 foram semelhantes ao período anterior e de 93,95 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.10**). 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.

Na Região 1A, os *boxplots* mostraram diminuição das concentrações ao longo do tempo (**Gráfico 12.3.2.10**). A análise temporal mostrou que a estiagem/2019 foi significativamente superior que as estiagens de 2020, 2021 e 2022. A estiagem/2019 apresentou a maior mediana de concentração (32 mg/kg), e as três estiagens seguintes apresentaram estabilidade no comportamento das medianas, na estiagem/2020 (13 mg/kg), na estiagem/2021 (12,6 mg/kg) e na estiagem/2022 (12,6 mg/kg) (**Tabela 12.3.2.10**). Considerando a presença de Cobre no sedimento natural, estes mais empobrecidos nesta região (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. Nesse sentido, é possível que a sugestão da estabilidade de medianas (**Tabela 12.3.2.10**) entre a estiagem/2020 e estiagem/2022 em função das características litológicas dessa região, solo e da dinâmica fluvial pos chuva 2021/2022.

Na Região 1B, o *boxplot* mostrou uma diminuição das concentrações (**Gráfico 12.3.2.10**), com as concentrações medianas mais altas que nas regiões Montante e 1A (**Tabela 12.3.2.10**). A análise temporal mostrou significativa tendencia de redução de concentrações: na estiagem/2019 (mediana de 86 mg/kg), na estiagem/2020 (mediana de 34,8 mg/kg), na estiagem/2021 (mediana de 22,8 mg/kg) e na estiagem/2022 (mediana de 26,9 mg/kg) (**Tabela 12.3.2.10**). Essa região recebeu contribuições dos rejeitos das barragens e, dos materiais lixiviados de rochas máficas/ultramáficas do Grupo Nova Lima presentes na porção oeste do rio Paraopeba, além das erosões de solo marginal. Destaca-se que nesta região está o PT-14, que está localizado próximo a usina de Igarapé com um barramento que causa retenção hidráulica e existe maior propensão a deposição de sedimentos, o que, juntamente com as condições citadas de materiais lixiviados, pode estar relacionado a esse incremento nas concentrações de cobre, observadas nas estiagens.

Na região 2A, as concentrações medianas de Cobre foram menores significativamente que as regiões a montante (**Tabela 12.3.2.13**). Na análise temporal, a estiagem/2019 foram as maiores (12,8 mg/kg), seguida de reduções significativas na estiagem/2020 (mediana de 4,08 mg/kg) e a manutenção, com tendencia de redução, nas estiagens de 2021 (mediana de 4,52 mg/kg) e 2022 (mediana de 2,74 mg/kg). Apesar da estiagem/2019 apresentar as maiores medianas, as concentrações em desacordo com a 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 estiagens (**Gráfico 12.3.2.10**). Assim na estiagem/2019 a mediana foi de 44,5 mg/kg, na estiagem/2020 de 42,4 mg/kg, na estiagem/2021 de 41,2 mg/kg e na estiagem/2022 de 40,5 mg/kg. As estiagens de 2020, 2021 e 2022 mostraram redução significativa em comparação com 2019, com estabilidade entre as estiagens 2020, 2021 e 2022 (**Tabela 12.3.2.10**).

Na Região 2C, o *boxplot* mostrou oscilação das medianas com aumento ao longo do tempo (**Gráfico 12.3.2.10**) Apesar dessa oscilação, a análise estatística temporal não mostrou diferenças significativas entre os diferentes períodos sazonais, sugerindo estabilidade ao longo do tempo. De forma semelhante, as concentrações foram significativamente maiores somente que a região 2A, onde o restante mostrou manutenção ou redução dos valores. Na

estiagem/2019 a mediana foi de 19 mg/kg, na estiagem/2020 de 16 mg/kg e na estiagem/2021 de 21,15 mg/kg e na estiagem/2022 a mediana foi de 25,3 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 estiagem/2022 mostrou, de modo geral, oscilação dos valores de Cu. As regiões Montante e Ferro-Carvão mostraram redução das concentrações medianas e P75 na estiagem/2022. Enquanto as demais regiões (1A, 1B, 2A e 2B) mostraram distribuição próxima entre os *boxplots* dos dois períodos, com manutenção dos valores. 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. Já a região 2C, da mesma forma que para os metais majoritários e Pb, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2-9: Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

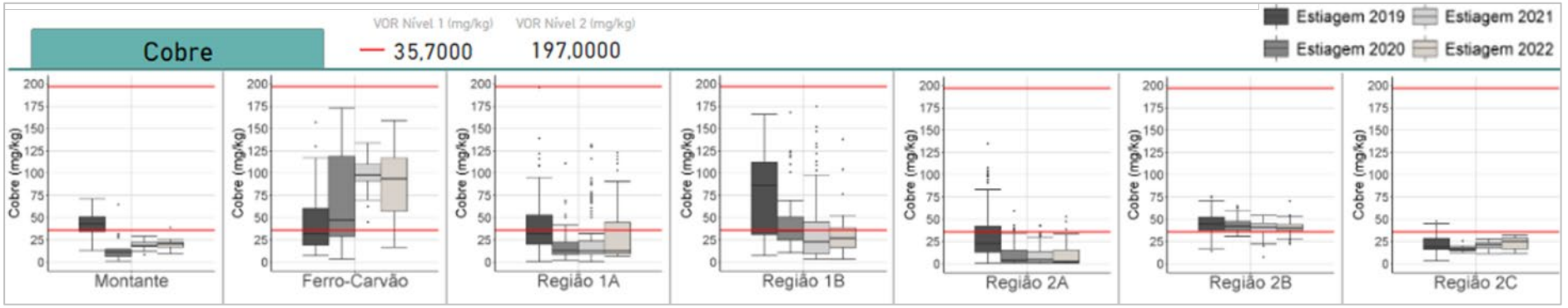


Gráfico 12.3.2-10: Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

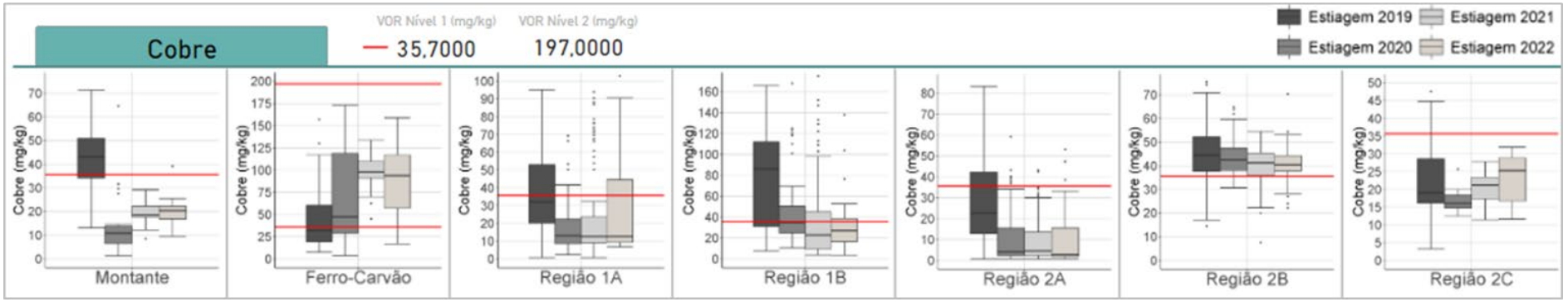


Tabela 12.3.2-9: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Cobre.

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

Tabela 12.3.2-10: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cobre em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Mont.	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	~	>
Est-2022 x Est-2020	>	~	~	<	~	~	>
Est-2022 x Est-2019	>	<	<	<	<	<	>
Est-2021 x Est-2020	>	~	~	~	~	~	>
Est-2021 x Est-2019	>	<	<	<	<	<	~
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	<	<	~	<

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Níquel**

A distribuição estatística espacial e temporal do Níquel nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.11** e **12** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.11** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.12** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.11** mostra a evolução do Níquel ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, o Níquel teve uma variação baixa para todos os períodos sazonais, estando com as concentrações medianas com valor de 21,6 mg/kg na estiagem/2019, 15,2 mg/kg na estiagem/2020, 18,3 mg/kg na estiagem/2021 e 16,9 mg/kg na estiagem/2022 (**Gráfico 12.3.2.12**). Estes resultados foram significativamente menores quando comparados a estiagens de 2020 e 2022 com a estiagem/2019, sugerindo tendencia de redução de concentrações (**Tabela 12.3.2.12**). 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, 2020a).

Na Região Ferro-Carvão, o comportamento do Níquel segue o mesmo dos demais metais, com elevação entre os períodos de estiagem, fruto da alteração do ambiente em decorrência das obras de engenharia na região. Assim na estiagem/2019 a mediana foi de 13,5 mg/kg, na estiagem/2020 a mediana foi de 27,25 mg/kg, na estiagem/2021 a mediana foi de 37,15 mg/kg e na estiagem/2022 a mediana foi de 35,15 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.12**). Estes resultados foram significativamente maiores entre as demais regiões (**Tabela 12.3.2.11**), e temporalmente, quando comparada a estiagens de 2020, 2021 e 2022 com a estiagem/2019, sugerindo tendencia de aumento de concentrações (**Tabela 12.3.2.12**). Nos rejeitos originais avaliados pela Geoenviron (2019), as concentrações medianas de Níquel chegaram a 50 mg/kg, ou seja, os valores nos sedimentos detectados no ribeirão Ferro-Carvão 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 de redução significativa das medianas nos períodos de estiagem comparados (**Tabela 12.3.2.12**). Na estiagem/2019 a mediana foi de 23 mg/kg, acima do VOR nível 1 da legislação. Na estiagem/2020 a mediana foi de 17 mg/kg, já abaixo do VOR nível 1 da legislação, na estiagem/2021 a mediana foi de 10,6 mg/kg, e por fim, na estiagem/2022 a mediana foi de 12,2 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.12**). A análise espacial mostrou que a região 1A teve redução significativa nas concentrações ao se comparar com região Ferro-Carvão.

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 estiagem/2019 (36 mg/kg), estiagem/2020 (24,2 mg/kg), estiagem/2021 (16,1

mg/kg) e estiagem/2022 (16,2 mg/kg), observadas no *boxplot* do **Gráfico 12.3.2.12**. A análise espacial mostrou que a região 1B teve valores significativamente maiores de Ni que as regiões Montante e 1A (**Tabela 12.3.2.11**). As diferenças estatísticas da **Tabela 12.3.2.12** sustentam a sugestão de comportamento de redução gradual e significativa de concentrações de Níquel entre as estiagens comparadas.

Na Região 2A, as concentrações medianas se assemelharam, em valores e comportamento, com a região 1A, ambas 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 (**Tabelas 12.3.2.11 e 12.3.2.12**). Na estiagem/2019 a mediana do Níquel foi de 19,7 mg/kg, na estiagem/2020 a mediana foi de 12,1 mg/kg, na estiagem/2021 a mediana foi de 0,5 mg/kg e na estiagem/2022, a mediana foi de 0,5 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.12**).

A Região 2B apresenta comportamento das medianas de Níquel diferente das demais regiões, com concentrações significativamente maiores (**Gráfico 12.3.2.11** e **Tabela 12.3.2.12**). O *boxplot* mostrou que a estiagem/2020 apresenta a maior mediana (30,3 mg/kg), enquanto a estiagens de 2019 (25,3 mg/kg), 2021 (25,7 mg/kg) e 2022 (22 mg/mg) são inferiores, apesar de mostrarem valores similares em ordem de grandeza e 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 consequente aumento da deposição, que poderiam sugerir este aumento de concentração apenas na estiagem/2020.

Para a Região 2C, as variações nas concentrações foram baixas e equilibradas nos períodos de estiagem com sutil elevação na estiagem/2022 (**Gráfico 12.3.2.12**). A análise espacial mostrou que a região 2C apresenta valores significativamente maiores somente que região 2A, sendo menores para as demais (**Tabela 12.3.2.11**). A análise temporal mostrou estabilidade das medianas entre as estiagens, com aumento significativo somente para em 2022 em relação a 2020 e redução em 2020, quando comparado com 2019 (**Tabela 12.3.2.12**). As estiagens apresentaram medianas em 2019 de 12,1 mg/kg; em 2020 de 11,25 mg/kg; em 2021 de 11,6 mg/kg; e em 2022 de 16,5 mg/kg.

Em comparação com o período sazonal anterior (Chuva 2021/2022), a estiagem/2022 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores de Ni. Todas as regiões, com exceção da Montante 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 a região 2C, da mesma forma que para os demais metais, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2.11 Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

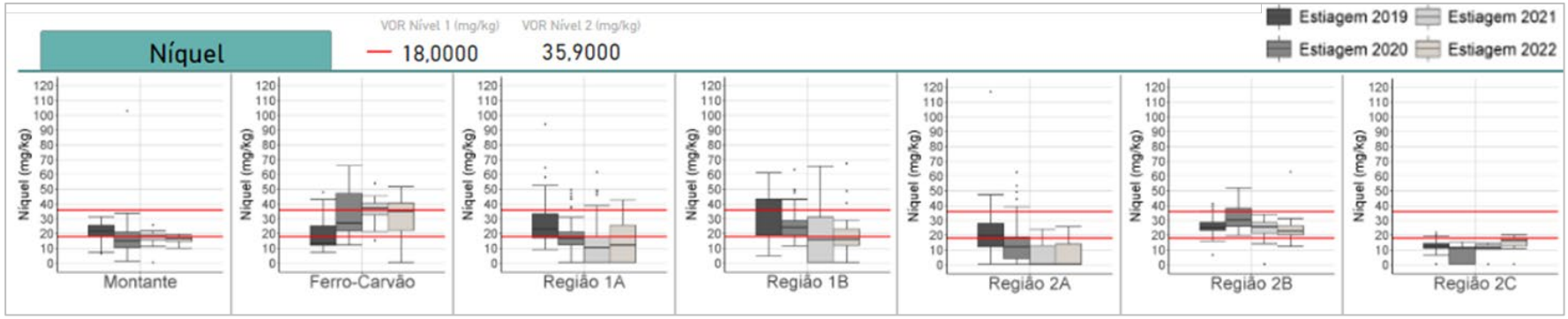


Gráfico 12.3.2.12: Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

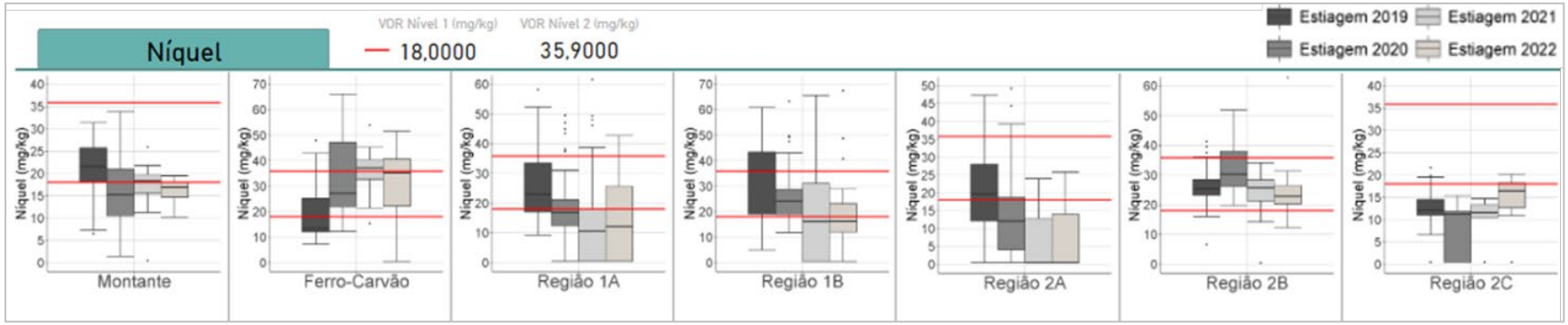


Tabela 12.3.2.11: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Níquel.

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

Tabela 12.3.2.12: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Níquel em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Mont.	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	<	>
Est-2022 x Est-2020	~	~	<	<	<	<	>
Est-2022 x Est-2019	>	<	<	<	<	<	>
Est-2021 x Est-2020	~	~	<	<	<	<	>
Est-2021 x Est-2019	>	~	<	<	<	~	~
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	<	<	>	<

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
>	Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Cádmio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cádmio nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.13** e **14** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.13** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.14** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.13** mostra a evolução do Cádmio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Ao se avaliar o gráfico *boxplot* do Cádmio 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.

Na estiagem/2021, as concentrações mais elevadas foram pontuais (dados brutos e valores P75) em algumas regiões, sendo predominantes os valores abaixo do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, com mediana igual ao LQ (<0,1 mg/kg). No atual período de estiagem (2022), verificam-se valores pontuais de Cádmio superiores ao VOR (0,06 mg/kg), com medianas e valor P75 superiores as estiagens antigas. As regiões em que há maior ocorrência de resultados acima do LQ, portanto, detectáveis, de cádmio são a Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C.

A região do Ferro-Carvão apresenta os maiores valores significativos de Cádmio, com tendência de aumento gradual a partir de 2021 (**Gráfico 12.3.2.13**). Esse comportamento foi observado apenas nas estiagens de 2021 e 2022, com medianas de 0,43 mg/kg e 0,51 mg/kg, respectivamente. Como a região é represada, os sedimentos finos tendem a se dissipar e se acumularem na lagoa de decantação, aumentando as concentrações associadas a estes finos.

Na Região 1A, mostrou manutenção das concentrações ao longo do tempo (**Gráfico 12.3.2.14**), com medianas baixas e iguais ao LQ (LQ<0,1 mg/kg) ao longo das estiagens de 2019, 2020 e 2021 e 2022. Ressalta-se que apesar disso, a partir de 2020, há maior quantidade de dados detectáveis com valores P75 0,14 (2020), e 0,21 mg/kg (2021 e 2022). Na Região 1B, apesar das medianas nas estiagens de 2020, 2021 e 2022 serem iguais, as estiagens mostraram valores de P75, em 2020, de 0,14 mg/kg e, nas estiagens de 2021 e 2022, de 0,21 mg/kg. Tais resultados indicam a baixa ocorrência do Cádmio, como já citado, uma vez que além dos poucos resultados detectados, as concentrações observadas estão abaixo do nível 1 da CONAMA 454, que é de 0,6 mg/kg.

Nas regiões 2B e 2C, as concentrações medianas na estiagem/2022 foram maiores que os demais períodos avaliados (mediana igual ao LQ), com tendência de elevação significativa e valores abaixo do nível 1 da CONAMA 454 (**Tabela 12.3.2.14**). A região 2B mostrou medianas até a estiagem/2021 iguais ao LQ, contudo, nas estiagens de 2021 mostrou valores P75 de

0,14 mg/kg e, em 2022, medianas maiores de 0,17 mg/kg. Já a região 2C mostrou valores detectáveis somente na estiagem/2022, com medianas de 0,77 mg/kg.

A avaliação estatística espacial mostrou que na estiagem/2022, as concentrações de Cd foram significativamente maiores na região Ferro-Carvão em relação às demais, enquanto as regiões a jusante apresentaram aumento em relação às regiões a montante (**Tabela 12.3.2.14**). Em relação a estatística temporal, apesar dos resultados mostrarem aumentos significativos ao longo dos últimos ciclos de estiagem, eles são menores que o valor de referência da 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 ou até mesmo por acúmulo de materiais finos no ribeirão Ferro-Carvão.

Em comparação com o período sazonal anterior (Chuva 2021/2022), a estiagem/2022 mostrou, de modo geral, diminuição dos valores de Cd para maioria das regiões. As regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 2A e 2B mostraram redução das concentrações medianas e P75 na estiagem/2022, com muitos valores medianos próximos do LQ. Enquanto a região 1B mostrou distribuição próxima entre os *boxplots* dos dois períodos, porém com aumento dos valores medianos e P75. A aumento dos teores na região 1B pode estar relacionada ao acúmulo de sedimentos finos e metais em trechos sinuosos e, principalmente, no reservatório UTE Igarapé. Já a região 2C, da mesma forma que para os outros metais, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2.13: Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

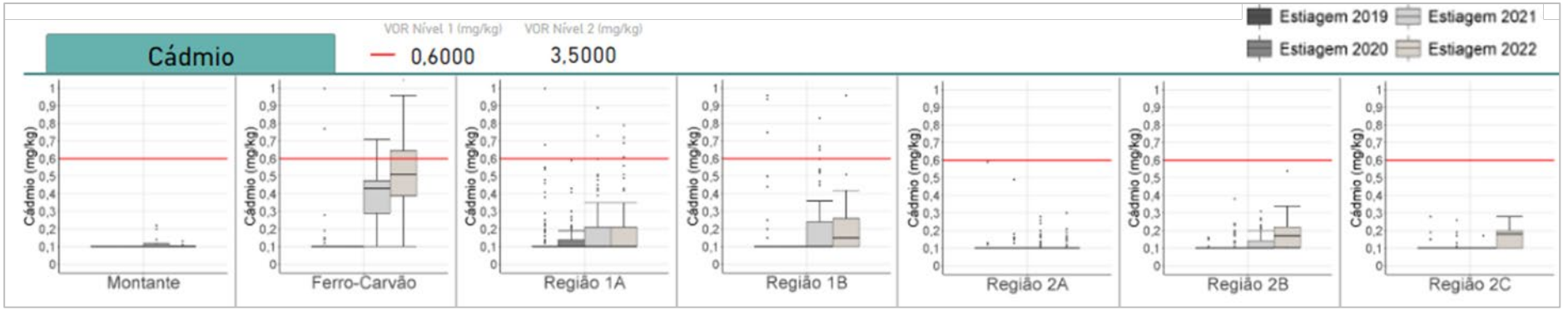


Gráfico 12.3.2.14: Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

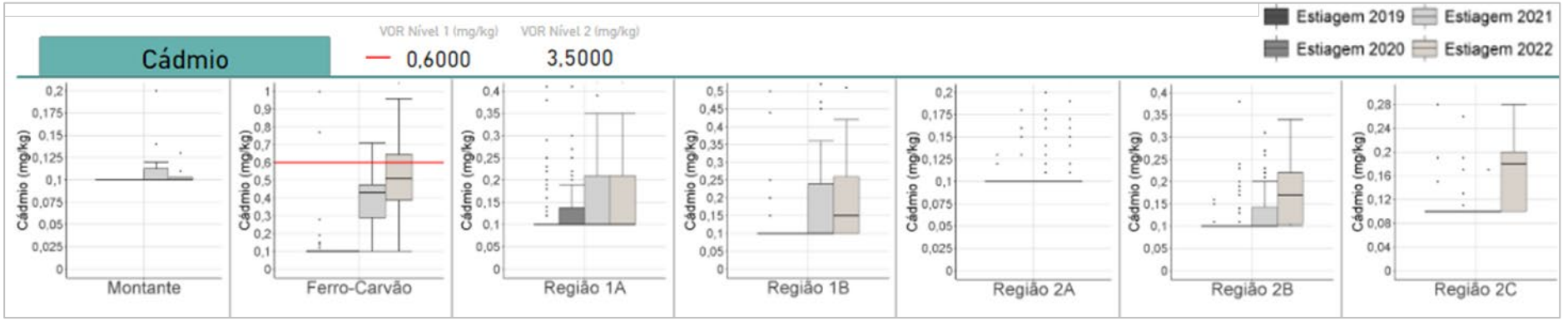


Tabela 12.3.2.13: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Cádmio.

	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 B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
> Os valores da região B (jusante) são significativamente superiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Tabela 12.3.2.14: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cádmio em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	>	>	>	>
Est-2022 x Est-2020	>	>	>	>	>	>	>
Est-2022 x Est-2019	>	>	>	>	>	>	>
Est-2021 x Est-2020	>	>	~	>	>	>	~
Est-2021 x Est-2019	>	>	~	>	>	>	~
Est-2020 x Est-2019	~	~	~	~	~	~	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Arsênio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Arsênio nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.15** e **16** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.15** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.16** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.15** mostra a evolução do Arsênio ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

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 do VOR nível 1 e o nível 2 da CONAMA 454, fruto da ocorrência deste elemento na área do córrego Casa Branca (Arcadis, 2020c).

Na estiagem/2019 a mediana de Arsênio foi de 11,7 mg/kg, seguido de redução na estiagem/2020, que teve mediana de 7,12 mg/kg, com nova elevação na estiagem/2021, em que a mediana foi de 10,55 mg/kg, seguido de nova redução em 2022 com 10,3 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.16**). As oscilações de concentrações observadas foram estatisticamente significativas entre as estiagens de 2020/2019 e 2021/2020 (**Tabela 12.3.2.16**).

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 estiagens avaliadas (**Gráfico 12.3.2.16**). Nas estiagens de 2019, a mediana foi de 2,4 mg/kg; em 2020, de 8,61 mg/kg; em 2021, de 15,75 mg/kg; e em 2022, de 13,90 mg/kg (**Gráfico 12.3.2.16**). A análise temporal mostrou, da mesma forma que para os outros parâmetros, aumento significativo entre os períodos de estiagem de 2020, 2021 e 2022 em relação a 2019 (**Tabela 12.3.2.16**). 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 *bloxplots* exibiram concentrações medianas similares ao longo do período (Gráfico 13.3.2.17 e 13.3.2.18) e similares com os valores da região Montante (**Tabela 12.3.2.15**). As estiagens avaliadas não mostraram diferença significava entre as medianas ao longo dos anos de 2019 (7,21 mg/kg), 2020 (7,27 mg/kg), 2021 (8,71 mg/kg) e 2022 (8,29 mg/kg) com valores similares e acima do nível 1 da CONAMA (5,9 mg/kg).

Na Região 1B, as concentrações medianas se mantiveram relativamente próximas ao longo dos períodos sazonais, e apresentaram incremento nas estiagens de 2020 e 2022 em comparação a 2019. As concentrações medianas para os diferentes períodos de estiagem foi 8,9 mg/kg (2019), 10,7 mg/kg (2020), 10 mg/kg (2021) e 13,55 mg/kg (2022). Na avaliação estatística espacial percebeu-se valores mais elevados somente para as regiões 1B, 2A e 2C (**Tabela 12.3.2.15**). 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 quatro períodos de estiagens analisados, foram semelhantes entre si (**Gráfico 12.3.2.16**). A análise temporal não mostrou diferença significativa entre as estiagens, o que mostra manutenção das concentrações ao longo do tempo (**Tabela 12.3.2.16**). As medianas, para os diferentes períodos de estiagem, foram de 4,6 mg/kg (2019), de 3,67 mg/kg (2020), de 3,82 mg/kg (2021) e 2,93 mg/kg (2022). Já na análise espacial, a região 2A mostrou os menores valores significativos dentre as regiões (**Tabela 12.3.2.15**). Além disso, 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 estiagem de 2020 e diminuição em 2021 (**Gráfico 12.3.2.16**). As concentrações foram elevadas, acima do VOR nível 1 (5,9 mg/kg) e quase próximo ao limite com o VOR nível 2 (17 mg/kg), mostrando ser a região com a maior concentração significativa (**Tabela 12.3.2.15**). A análise temporal mostrou aumento significativo entre as estiagens de 2019 e 2020, e diminuição das estiagens de 2021 e 2022 em relação a 2020 (**Tabela 12.3.2.16**). As medianas, para os diferentes períodos de estiagem, foram de 13,15 mg/kg (2019), de 15,3 mg/kg (2020), de 13,65 mg/kg (2021) e 13,7 mg/kg (2022). 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 lêntico, 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 estiagens avaliadas (**Gráfico 12.3.2.16**). A análise temporal mostrou elevação significativa das concentrações medianas entre as estiagens de 2022 (9,47 mg/kg) e as de 2019 (4,35 mg/kg), 2020 (6,08 mg/kg) e 2021 (5,97 mg/kg), para o restante dos períodos houve manutenção do comportamento. Avaliando-se espacialmente, as concentrações da estiagem/2022 da região 2C foram significativamente menores que nas regiões anteriores, com exceção da região 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 estiagem/2022 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores de Arsênio até a região 2A. O trecho entre as regiões Montante 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 2B mostrou incremento das concentrações na estiagem/2022, relacionado ao acúmulo de sedimentos finos e metais no reservatório de UHE Retiro Baixo e a influência das precipitações que reverberaram no período de estiagem. Já a região 2C, da mesma forma que para os outros

metais, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2-15: Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

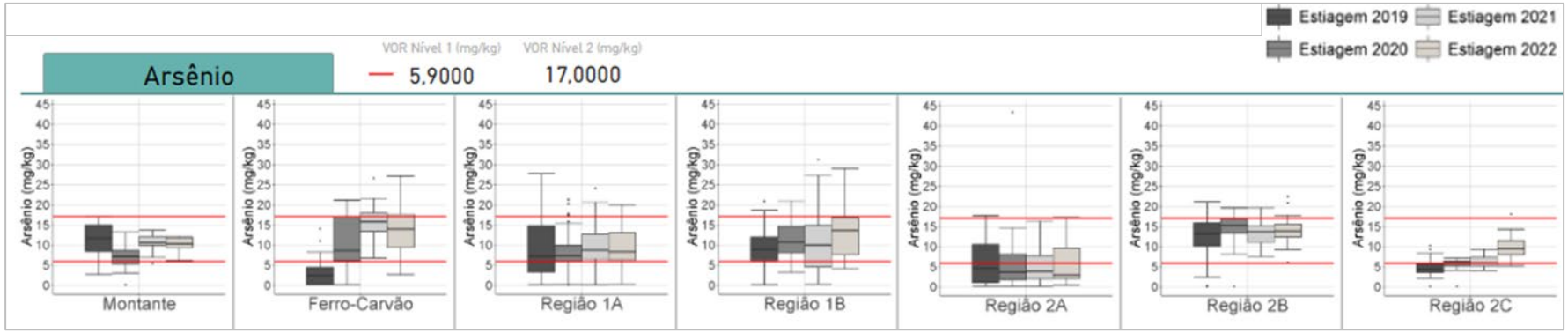


Gráfico 12.3.2-16: Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

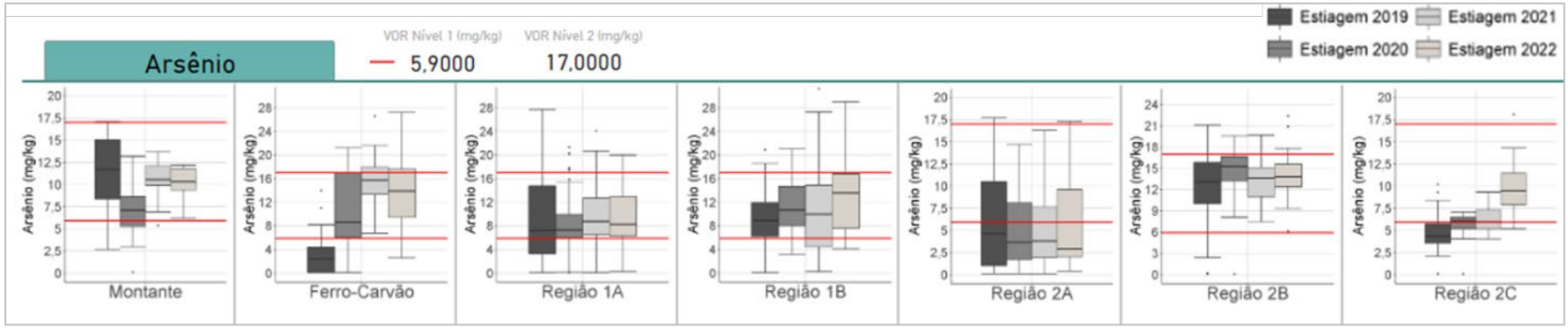


Tabela 12.3.2-15: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Arsênio.

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

Tabela 12.3.2-164: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Arsênio em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Montante	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	~	>
Est-2022 x Est-2020	~	~	~	~	~	<	>
Est-2022 x Est-2019	>	~	~	>	~	~	>
Est-2021 x Est-2020	>	>	~	~	~	<	~
Est-2021 x Est-2019	>	~	~	~	~	~	~
Est-2020 x Est-2019	>	<	~	>	~	>	~

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

- **Cromo**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cromo nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.17** e **18** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.17** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.18** (estatística sazonal temporal). O **Gráfico 12.3.2.17** mostra a evolução do Cromo ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

No **Gráfico 12.3.2.17** 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 12.3.2.18** 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 12.3.2-18** 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 significativamente em relação as demais. Além disso, excluindo-se a região 2B, todas as demais apresentam teores significativamente mais baixos que a região de Montante.

Na Região Montante, tem-se que a estiagem/2019 apresentou as maiores concentrações medianas, 64 mg/kg, ocorrendo redução para 37 mg/kg em 2020, em 2021 ocorre aumento para 54 mg/kg, porém em 2022 há nova redução para 51 mg/kg. Tais valores medianos aproximam-se com os observados pelo mapa geoquímico da CPRM (Arcadis, 2020a) que mostra nessa região variações entre 43 a 86 mg/kg.

A Região Ferro-Carvão, apresenta na estiagem/2019 menores valores medianos históricos, e, portanto, apresenta aumento na estiagem/2020, período que atingiu maior valor mediano (28,60 mg/kg), na estiagem/2021 houve redução desse valor e em 2022, nova redução marcando 21 mg/kg. Tais valores também corroboram com os encontrados no mapa geoquímico (Arcadis, 2020a).

Na Região 1A, as concentrações medianas entre os períodos de estiagem variaram entre 20 e 30 mg/kg, com poucas oscilações entre os anos, porém com maior valor observado na estiagem 2022, 27,90 mg/kg valor bem próximo ao da estiagem 2021, 27,70 mg/kg. Já na Região 1B, a faixa de variação das concentrações medianas foi de 40 a 50 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, 2020a).

Na Região 2A, percebe-se expressiva redução das medianas com o passar dos períodos de estiagem, em 2019 a concentração mediana era de 60,80 mg/kg e o resultado de 2022 foi de 14 mg/kg. Na região 2B é observada certa estabilidade entre os períodos de estiagem, com valores variando entre 70 e 80 mg/kg, com maior mediana ocorrendo na estiagem/2020 (80,3 mg/kg) e a menor ocorrendo em 2022 (75 mg/kg). Em ambas as regiões as concentrações observadas são próximas às observadas no mapa geoquímico da CPRM (Arcadis,2020).

Na Região 2C, observa-se concentrações medianas muito próximas ao VOR nível 1 da legislação (37,3 mg/kg), e com elevação entre as estiagens: 34,95 mg/kg (2019), 36,3 mg/kg (2020), 39,6 mg/kg (2021) e 51,1 mg/kg (2022) (**Gráficos 12.3.2.18**). A mediana em desacordo com o nível 1 da legislação pode estar associada ao transporte de sedimentos que acaba por se depositar 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, mas, não esteve presente de forma relevante no rejeito como se observou nos dados de Geoenviron (2019) e também nos resultados de sedimentos acumulados no Ferro-Carvão.

Em comparação com o período sazonal anterior (Chuva 2021/2022), a estiagem/2022 mostrou, de modo geral, oscilação dos valores de Cromo. O trecho entre as regiões Montante e 1A mostraram diminuição das concentrações na estiagem/2022 relacionada a baixa disponibilidade e aporte de Cr nestes trechos. Já o trecho entre as regiões 1b e 2B mostrou distribuição próxima entre os *boxplots* dos dois períodos, com manutenção das concentrações de Cr relacionadas principalmente a ocorrência de rochas máficas e ultramáficas do grupo Nova Lima, 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. Já a região 2C, da mesma forma que para os outros metais, mostrou comportamento mais destoante, com valores maiores para a estiagem/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2-17: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

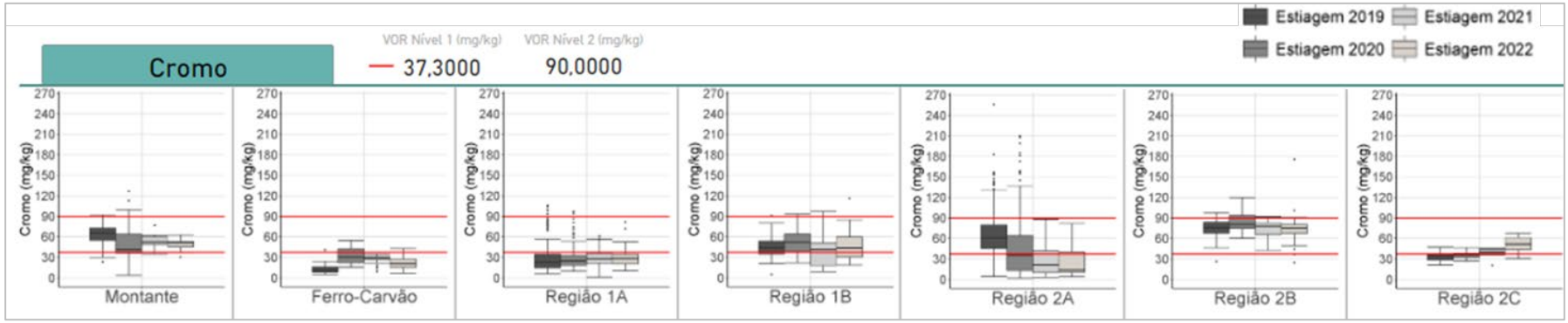
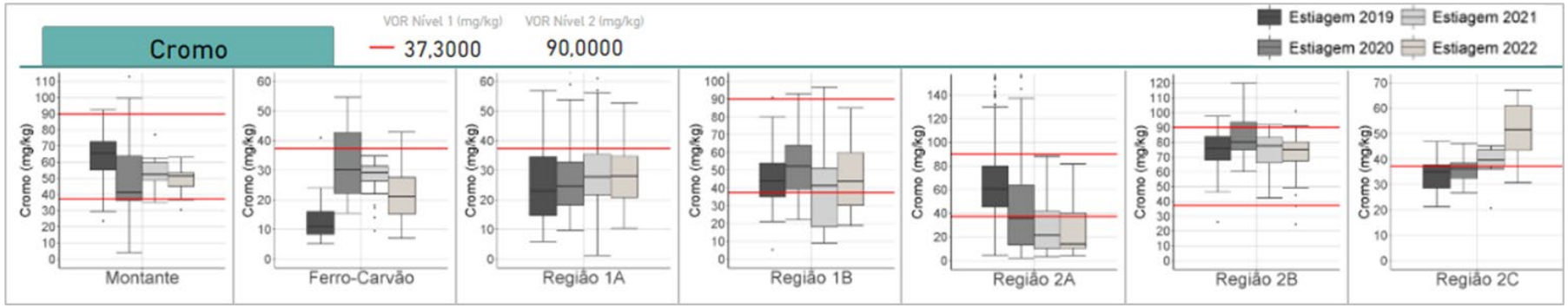


Gráfico 12.3.2-7: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022

Tabela 12.3.2-17 Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) 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 a região A (montante) e B (jusante) (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05)
< Os valores da região B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
> Os valores da região B (jusante) são significativamente superiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Tabela 12.3.2-185: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Cromo em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Mont.	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	<	~	~	~	~	~	>
Est-2022 x Est-2020	<	~	~	~	<	<	>
Est-2022 x Est-2019	>	<	~	~	<	~	>
Est-2021 x Est-2020	~	~	~	<	<	<	>
Est-2021 x Est-2019	>	<	~	~	<	~	>
Est-2020 x Est-2019	>	<	~	>	<	>	~

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 B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
> Os valores da região B (jusante) são significativamente superiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)

Outros

- **Fósforo**

A distribuição estatística espacial e temporal do Fósforo nos períodos de estiagem encontram-se nos **Gráficos 12.3.2.19** e **20** (*boxplots*) e nas **Tabelas 12.3.2.19** (estatística sazonal espacial) e **12.3.2.20** (estatística sazonal temporal). Os **Gráfico 12.3.2.19** mostra a evolução

do Fósforo ao longo dos períodos de estiagem, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

De modo geral, percebeu-se que espacialmente, as concentrações de Fósforo têm maior concentração no trecho Ferro-Carvão até 1B e na 2A. 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 2A (**Tabela 12.3.2.19**). Além disso, o P mostrou oscilação entre os períodos de estiagem, com redução significativa dos valores em 2020 (166 mg/kg), em relação a 2019 (493 mg/kg), seguido por aumento significativo em 2021 (269 mg/kg) e manutenção em 2022 (276,5 mg/kg) (**Gráfico 12.3.2.19** e **Tabela 12.3.2.20**). O P, nesta região, pode estar relacionado a intemperismos de rochas da região, erosões marginais de solo e contribuições locais.

A Região do Ferro-Carvão foi a única região que apresentou aumento significativo em comparação com todas as demais regiões, salvo a região 2B que não mostrou diferença (**Tabela 12.3.2.7**). Além disso, observou-se significativa elevação das medianas das estiagens de 2020 (1.035 mg/kg), 2021 (984 mg/kg) e 2022 (969 mg/kg) em comparação com 2019 (368 mg/kg), conforme disposto na **Tabela 12.3.2.19**. 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 também 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. A influência de chuvas, como as de 2019/2020 e 2021/2022, também podem repercutir nos períodos de estiagem subsequentes, com maior aporte de materiais para o rio.

Na Região 1A, as concentrações medianas de P nas quatro estiagens comparadas foram significativamente menores (faixa de 200 mg/kg a 550 mg/kg) que as concentrações medianas identificadas na Ferro-Carvão (que variaram de 350 a 1.050 mg/kg) (**Tabela 12.3.2.19**). Com a região Montante (que variaram de 150 a 500 mg/kg), a região 1A mostrou valores similares, sem diferenças significativas. O *boxplot* (**Gráfico 12.3.2.20**) mostrou diminuição gradativa das medianas ao longo do tempo, com as estiagens de 2020 (302 mg/kg), 2021 (240 mg/kg) e 2022 (233 mg/kg) mostrando diminuição significativa em relação a de 2019 (536 mg/kg), com manutenção entre os dois últimos períodos (**Tabela 12.3.2.20**). 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 (**Tabela 12.3.2.7**). O *boxplot* (**Gráfico 12.3.2.20**) mostrou diminuição gradativa das medianas ao longo do tempo, com as estiagens de 2020 (726 mg/kg), 2021 (358 mg/kg) e 2022 (408 mg/kg) mostrando diminuição significativa em relação a de 2019 (1.220 mg/kg), com manutenção entre os dois últimos períodos (**Tabela 12.3.2.20**). A região 1B está localizada em ambiente lótico sobre as rochas do Grupo Nova Lima e do Complexo Belo Horizonte (em que há ocorrência natural de Fósforo; CPRM, 2018), e com pontos de acúmulo de materiais finos. As variações nos valores de P tanto entre as regiões, como entre as estiagens, estão possivelmente relacionadas à granulometria e intemperismo de solos e rochas da região e a potencial contribuição do rejeito que alcançou a região 1B.

A Região 2A registrou, significativamente, as menores concentrações medianas dentre as regiões avaliadas (**Tabela 12.3.2.19**), com tendencia de redução, entre 2019 e 2022 (**Gráfico 12.3.2.20** e **Tabela 12.3.2.20**). A mediana do Fósforo para os diferentes períodos de estiagens foi de 167 mg/kg (2019), 60 mg/kg (2020), 101 mg/kg (2021) e 62 mg/kg (2022). Na análise inferencial temporal (**Tabela 12.3.2.20**), o que se observou foi que as reduções nas concentrações foram significativas nas estiagens de 2020, 2021 e 2022 quando comparadas as estiagens de 2019, o restante dos períodos não mostrou diferenças significativas. 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, constatou-se oscilação entre as medianas e P75 de P entre os períodos sazonais, com diminuição ao longo do tempo, a partir de 2020. As medianas da Região 2B são significativamente maiores que as das demais regiões (**Tabela 12.3.2.19**), sendo similar à da região Ferro-Carvão. O comportamento do P nesta região mostrou aumento dos valores entre 2019 (778 mg/kg) e 2020 (846 mg/kg), que apresentou a maior mediana, seguido de diminuição em 2021 (732 mg/kg) até 2022 (738 mg/kg) (**Gráfico 12.3.2.20**). 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 superiores somente em relação a região 2A (**Tabela 12.3.2.19**). O *boxplot* mostrou que as medianas de Fósforo apresentaram incremento ao longo das estiagens monitoradas (**Gráfico 12.3.2.20**), com variações significativas entre as estiagens (**Tabela 12.3.2.20**). Assim, nas estiagens de 2020 (310 mg/kg), 2021 (340 mg/kg) e 2022 (390 mg/kg), as concentrações foram

significativamente maiores quando comparadas a estiagem/2019 (263 mg/kg), onde o restante dos períodos não mostrou diferenças significativas. 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 lênticas e o lóticas, 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 estiagem/2022 mostrou, de modo geral, manutenção dos valores de Fósforo para a maioria das regiões. O trecho entre as regiões Montante e 2A 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 2B mostrou diminuição dos teores na estiagem/2022, 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/2022, possivelmente condicionado por processos locais e influência das precipitações.

Gráfico 12.3.2.19: Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

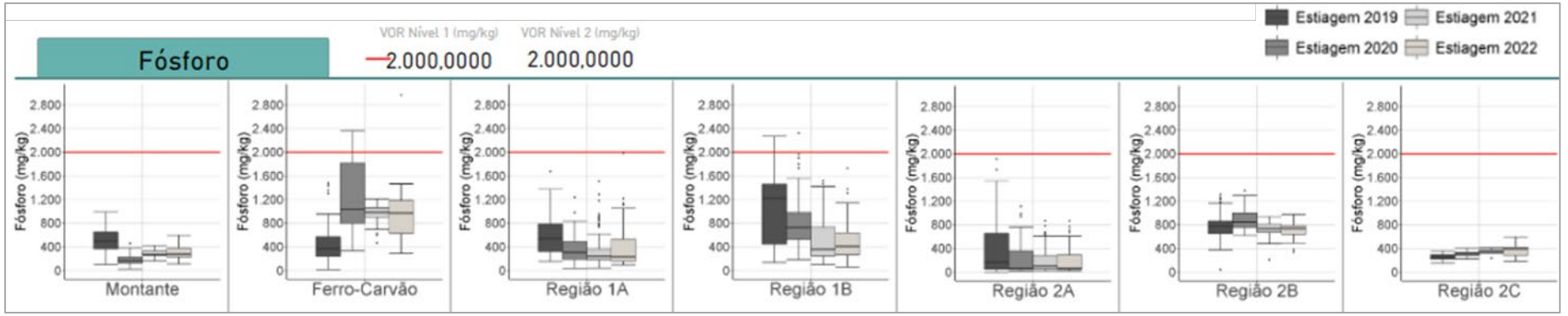


Gráfico 12.3.2.20: Variação do Fósforo ao longo dos períodos sazonais de estiagem/2019 até estiagem/2022 com escala variável.

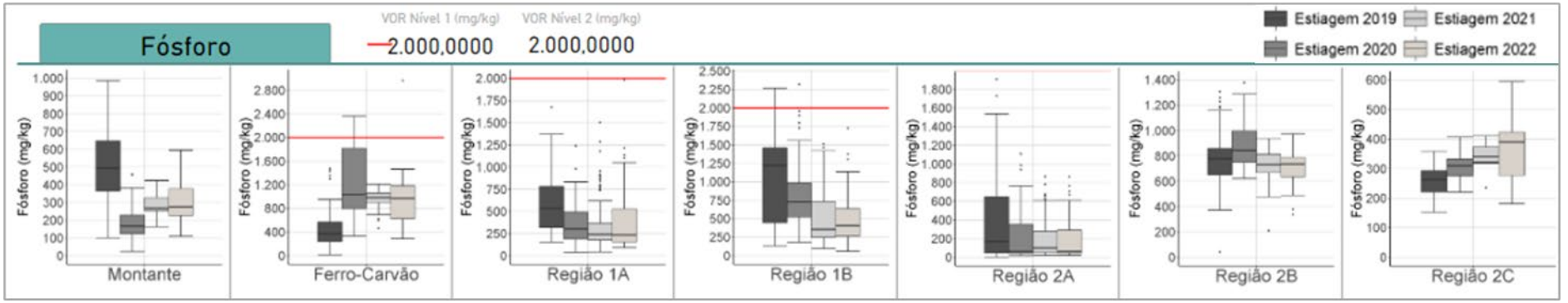


Tabela 12.3.2.19: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de estiagem (estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022) para o parâmetro Fósforo.

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

Tabela 12.3.2.20: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Fósforo em cada região.

Períodos comparados	Ferro Carvão	Mont.	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Est-2022 x Est-2021	~	~	~	~	~	~	~
Est-2022 x Est-2020	~	~	~	<	~	<	~
Est-2022 x Est-2019	>	<	<	<	<	<	>
Est-2021 x Est-2020	~	>	~	<	~	<	~
Est-2021 x Est-2019	>	<	<	<	<	~	>
Est-2020 x Est-2019	>	<	<	~	<	>	>

Legenda:
~ Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas >0,05. Ex: Estiagem 2022 ~ Estiagem 2021
< Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 < Estiagem 2021
> Os valores do período climático mais recente são significativamente superiores aos do período climático anterior - valor p do teste de comparações múltiplas ≤0,05. Ex: Estiagem 2022 > Estiagem 2021

12.3.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann Kendall

Para aplicação do teste de tendência temporal avaliou-se a frequência amostral dos dados. Considerando que desde dezembro/2021, a frequência do monitoramento dos sedimentos tem sido mensal para vários pontos, neste fechamento de ciclo foram avaliados os dados medianos mensais. 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, não foi analisado.

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 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. 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 identificada a tendência de elevação.

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 da barragem B1, B-4, B-4A, bem como fósforo, alumínio, níquel, cobre, chumbo, mercúrio, zinco, arsênio e cromo. Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados nas **tabelas 12.3.3-1 e 12.3.3-2**, que consideram a avaliação da série completa, ou seja, todos os períodos sazonais entre 2019 e 2022 (até setembro) e somente os períodos de estiagem, respectivamente.

Os limites de quantificação (LQ) foram tratados para todo o estudo estatístico, padronizando-os em caso de múltiplos valores (foi considerado o valor mais baixo do intervalo) e, em seguida, o valor foi dividido pela metade do LQ (1/2 LQ).

Os resultados da análise de tendência temporal estão discutidos, a seguir, por cada parâmetro analítico.

Tabela 12.3.3-1 Resultado da análise temporal para a série completa considerando as medianas mensais de cada ponto.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			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	PT-22
MAJORITÁRIOS																									
Manganês	ST	T↑	T↑	ST	T↓	T↓	T↑	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	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	T↑
Alumínio	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST
Fósforo	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↑	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↑
TRAÇOS																									
Arsênio	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	T↑	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑
Chumbo	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST
Cobre	ST	T↑	T↑	ST	T↓	ST	T↑	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	T↑
Cromo	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	T↑
Níquel	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST

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

Tabela 112.3.3-2: Resultados da análise temporal para os períodos de estiagem considerando as medianas mensais de cada ponto.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			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	PT-22
MAJORITÁRIOS																									
Manganês	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	T↑	T↑
Ferro	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST
Alumínio	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓
Fósforo	T↓	T↑	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↑
TRAÇOS																									
Arsênio	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↑	T↑	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑
Chumbo	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↑	T↑	T↓
Cobre	T↓	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST
Cromo	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST
Níquel	T↓	T↑	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	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 estiagem para o manganês evidenciou tendência de aumento nas concentrações nas regiões do Ferro-Carvão, e 2B, enquanto na 2A e 1 houve tendência de aumento pontual. Nas regiões Montante e praticamente toda a região 2A não se verificou tendência definida, indicando equilíbrio/estabilidade nas concentrações de manganês.

O ribeirão Ferro-Carvão possui uma área alagada na altura do PT-12 que serve de pulmão 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.

Nas regiões 1A e1B, houve coincidência entre os pontos que apresentaram tendência de redução nas concentrações de manganês (PT-13, PT-05, PT-03, PT-48), tanto na análise da série completa, quanto exclusivo para os períodos de estiagem, fato que corrobora com as análises do ciclo anterior, reforçando a tendência de redução da concentração do manganês. Essa redução 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.

Nas regiões 2A, com exceção do PT-17 que indicou tendência de aumento no período de estiagem neste ciclo, teve redução no ciclo anterior, mas ao se avaliar a série sazonal completa não apresentou tendência. Nos demais locais não se observou tendência nem para a série completa e nem para a série de estiagem, provavelmente pelo fato de não terem concentrações diferenciadas de manganês quando comparadas com as regiões mais afetadas pelo rompimento da barragem. Na região 2C, a tendência foi de aumento para a série completa e estiagem, que corroborou com os ciclos de estiagem da avaliação anterior.

Na região 2B, constatou-se a tendência de aumento das concentrações de manganês, semelhante ao período anterior tanto na série completa (minoritariamente) quanto para a série de estiagem (majoritariamente). Nos períodos de estiagem, o acúmulo dos sedimentos se dá pela dissipação e deposição de partículas no leito do reservatório, favorecendo o acúmulo de sedimentos finos, o que pode favorecer maior adsorção de metais nessas partículas. Por outro lado, na série completa 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 metais, o que no caso desta etapa praticamente não se percebeu tendência de aumento em um local. 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.

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.

- **Ferro**

A aplicação da análise temporal ponto a ponto completa Mann Kendall mostrou tendência de redução na região Montante (PT-52), região 1A, região 1B e localmente, nas regiões 2A (PT-19) e 2B (PT-28), enquanto no Ferro-Carvão não houve tendência. Esta avaliação demonstrou mais tendência de queda quando comparada com a avaliação do ciclo completo anterior.

Ao se aplicar o teste ponto a ponto para avaliar os períodos sazonais de estiagem não se percebeu tendência na maioria dos pontos, exceto por identificação pontual de tendência de queda nos PT-52, PT-01, PT-14 e PT-19, idêntico ao período sazonal anterior (chuvas 2021/22) e sugeriu equilíbrio nas concentrações nesse período sazonal.

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 taxa de entrada de sedimentos foi maior que a capacidade de transporte do rio. Os materiais mal selecionados (rejeitos do rompimento) e densos foram sendo arrastados e depositados no leito do rio Paraopeba, principalmente até a UTE Igarapé. Com o passar do tempo, o aporte dos sedimentos provenientes da barragem diminuiu e os rejeitos que são densos (aproximadamente 3,1 g/cm3- Arcadis (2020 B) foram se mantendo no leito do rio, enquanto os materiais de granulação fina em suspensão se dissiparam e se depositaram sob vazões e níveis de água dos rios mais baixos e com menor energia de transporte.

Ao se avaliar os *boxplots* e a inferência estatística temporal percebeu-se que os aportes materiais comparativamente ao momento do rompimento foram menores no tempo e no período sazonal de estiagem e tal comportamento, incluindo o Teste Mann Kendall mostrou-se predominantemente sem tendência significativa das concentrações de Ferro. A exceção ocorreu na região 2C que apresentou variação significativa de aumento no teste Kruskal wallis e não apresentou tendência no Teste Mann Kendall.

- **Alumínio**

Para o alumínio, a estatística aplicada ponto a ponto com o método Mann Kendall para a série completa de resultados e sem considerar a sazonalidade, mostrou tendência de aumento nas amostras do PT-12 no ribeirão Ferro-Carvão somente. Já em pontos isolados das regiões 1A (PT-05), 2A (PT-19, PT-49, PT-55) e em toda a região 2B houve tendência de redução. Os demais pontos de todas as regiões não mostraram tendência, corroborando com a tendência geral da análise do ciclo anterior.

Ao se aplicar a estatística ponto a ponto com o método Mann Kendall considerando a sazonalidade dos períodos de estiagem constatou-se tendência de aumento somente para os

pontos PT-11 e PT-12 no ribeirão Ferro-Carvão e redução pontual no PT-05 (região 1A), PT-19 e PT-55 (região 2A) e PT-20 (região 2B), enquanto nas demais regiões não se observou tendência. Ao se comparar com os ciclos de estiagem anteriores também se percebeu que a maioria dos pontos não demonstrou qualquer tendência.

Estes resultados corroboram com a estatística inferencial temporal de estiagem que no geral não indicaram tendência entre 2021 para a estiagem de 2022. Entretanto, neste teste e período, a região 2B teve redução significativa nas concentrações e o mesmo foi observado no teste Mann-Kendall. A diferença foi no Ferro-Carvão, que no teste Mann Kendall há uma tendência temporal de aumento, enquanto no teste inferencial sazonal não se percebeu tendência significativa.

- **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-14 (região 1B) e PT-19 (região 2A). A tendência de aumento também foi pontual no PT-11 (região 2B) e no PT-22 (região 2C), enquanto na grande maioria dos locais não se constatou tendência definida para o fósforo.

Ao se aplicar a estatística ponto a ponto com o método Mann Kendall considerando a sazonalidade dos períodos de estiagem também não se constatou tendência de queda ou aumento de concentrações para a maioria dos pontos monitorados, corroborando com a análise ponto a ponto completa. Pontualmente, verificou-se tendência de queda no PT-52 (Montante), PT-13 e PT-05 (Região 1A), PT-14 e PT-48 (Região 1B), PT-19 (região 2A) e PT-20 (Região 2B) e constatou-se tendência de aumento somente para os pontos PT-11 no ribeirão Ferro-Carvão e PT-22 (região 2C).

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 tendência significativa, ou seja, as concentrações permaneceram em equilíbrio por região.

- **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 454/12 conforme análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020) com os dados de sedimentos de corrente coletados entre 2008 e 2009 pela CPRM (2019).

Na análise de tendência ponto a ponto da série completa de dados, constatou-se tendência de queda nas regiões 1A, 1B, pontualmente na região 2A (PT-49, PT-19), região 2B (PT-20) a

qual abrangeu mais pontos e regiões que no ciclo completo anterior. Já a tendência de aumento foi menor que no ciclo anterior e somente no PT-17 (Região 2A). E os locais sem tendência ficaram nas regiões Ferro-Carvão, 2A e 2C. Comparando-se esses resultados com o do ciclo anterior, percebeu-se um maior número de pontos com tendência de queda nas concentrações, ao passo que no ciclo anterior a predominância foi de sem tendência.

Ao se avaliar a tendência sazonal dos períodos de estiagem e ponto a ponto através da estatística de Mann Kendall, a região 1A foi a que mostrou maior tendência de queda nas concentrações de chumbo neste período e tal condição pode ser relacionada com redução de aporte de sedimentos contendo chumbo para o rio Paraopeba seja proveniente do rejeito da barragem seja da própria bacia. Pontualmente, a mesma tendência de queda se observou para as regiões 1B (PT-14 e PT-48), 2A (PT-49 e PT-19) e 2C (PT-22).

A persistência de aumento das concentrações na região 2B (PT-21 e PT-28) fica em região de dissipação de sedimentos em ambiente de reservatório, o que pode favorecer deposição e acúmulo de sedimentos. Nos demais locais permaneceu a condição de sem tendência, como na avaliação dos ciclos completos.

Os resultados das avaliações dos boxplot mostraram uma variação maior nas concentrações de chumbo nas regiões Fe-Carvão e 1B e equilíbrio nas concentrações para os demais locais. A estatística temporal inferencial indicou que apesar dessas variações, elas não foram significativas e o teste Mann kendall mostrou-se sem tendência sazonal na maior parte das regiões, corroborando com os testes, exceto nas regiões 1A e 1B que mostrou tendência de queda por ponto e a estatística inferencial por região atribuiu como não significativo.

- **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 454/12 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; pontualmente na Região 1B (PT-48), Região 2A (PT-53, PT-54, PT-16), Região 2B (PT-28), mostrando uma menor queda em pontos quando comparados com os resultados avaliados no ciclo anterior.

Na avaliação de tendência sazonal ponto a ponto, constatou-se que nos períodos de estiagem, as concentrações de níquel tiveram tendência de queda e aumento nas mesmas regiões quando comparado à série completa. Somente no PT-11 que se obteve uma tendência local de aumento nas concentrações.

A razão da redução pode ser atribuída a possível mistura ou recobrimento de sedimentos naturais transportados pelo rio sobre os rejeitos das regiões 1A e 1B e sobre os demais trechos, haja vista a dinâmica do rio em transportar materiais em suspensão provenientes de toda a bacia.

A avaliação do método Mann Kendall indicou algumas tendências de queda nas concentrações de cobre na avaliação pontual, mas ao se verificar a predominância por região tem-se que é de equilíbrio, ou seja sem tendência, exceto Montante que reduziu e Ferro-carvão que aumentou. Os resultados da estatística inferencial espacial dos períodos de estiagem não indicaram tendência significativa de aumento ou redução das concentrações da região Montante até a 2B, enquanto na região 2C houve aumento significativo de um período de estiagem de 2021 para o de 2022. Na integração das análises, percebeu-se que a maior diferença foi na região 2C que o teste Mann Kendall não indicou qualquer tendência.

- **Cobre**

O cobre foi encontrado nos sedimentos de corrente da bacia do Paraopeba desde antes do rompimento das barragens B1, B4, B4A e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 na região 1B como se verificou com a análise dos mapas geoquímicos elaborados pela Arcadis (2020) com os dados de sedimentos de corrente coletados entre 2008 e 2009 pela CPRM (2018).

Na análise da série completa constatou-se tendência de aumento nas concentrações de forma pontual nas regiões 1A e 2C, provavelmente por serem locais que recebem maior contribuição de materiais provenientes de áreas desnudas, com solo exposto e ou estão em locais de retenção hidráulica como na região do Ferro-Carvão que devido a obras e contenções locais tende a acumular mais sedimentos finos e no caso, contendo presença de cobre também. Entretanto, notou-se que a tendência maior foi para redução nas concentrações como nas regiões 1B, parte da região 2A e região 2B, enquanto regiões montante e parte da 2A não mostraram tendência para o cobre.

A razão da redução pode ser atribuída a possível mistura ou recobrimento de sedimentos naturais transportados pelo rio sobre os rejeitos das regiões 1A e 1B, haja vista a dinâmica do rio em transportar materiais em suspensão com o tempo.

Na avaliação de tendência sazonal ponto a ponto, constatou-se que pelo menos 01 local de cada região avaliada apresentou tendência de queda nas concentrações e parte dos pontos não apresentaram tendência nos períodos de estiagem. Os locais em que as concentrações de cobre tiveram tendência de aumento foi no PT-12 (região Ferro-Carvão) representado por área represada, que pode acumular os sedimentos finos em seu leito. Ambas as análises corroboram com as avaliações de ciclo completa e sazonal do ciclo anterior.

Ao se comparar essa tendência sazonal por região com a estatística inferencial temporal sazonal, constatou-se que os resultados corroboraram para a maioria das localidades, exceto a região 2C que neste último período sazonal apresentou resultado significativo de aumento e no teste Mann Kendall, não se observou tendência.

- **Arsênio**

A avaliação de tendências ponto a ponto com a aplicação da estatística de Mann Kendall da série completa mostrou predomínio sem tendência. Pontualmente em locais das regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2C houve aumento e em menor parcela, alguns pontos nas regiões 1A (PT-13) e 2A (PT-19) apresentaram tendência de redução das concentrações de arsênio.

Ao se avaliar os dados pontuais de cada região para os períodos de estiagem percebeu-se que, pontualmente, e a semelhança da análise completa, teve-se que em locais das regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2C houve aumento e em menor parcela, alguns pontos nas regiões 1A (PT-01 e PT-13) e 2A (PT-19) apresentaram tendência de redução das concentrações de arsênio. Estas localidades que apresentaram tendência estão predominantes nas regiões 1ª e 1B, enquanto nas demais não se observou tendência alguma neste período. Ao se comparar com o período anterior, a predominância também foi de sem tendência.

O arsênio está presente na bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem B1 e suas concentrações já superavam o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 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.

Ao se comparar os resultados dessa avaliação com o boxplot notou-se semelhança nos comportamentos, mostrando uma pequena variação ascendente nas regiões do Ferro-Carvão, 2C e localmente na região 1B. Ainda, ao se comparar com estatística inferencial temporal para cada região percebeu-se que a variação no boxplot para as regiões Ferro Carvão e 1B não foram significativas, enquanto a região 2C que apresentou aumento significativo nos períodos de estiagem e as demais regiões não apresentaram tendência, corroborando com a análise feita com Mann Kendall.

- **Cromo**

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 o PT-18 na região 2A e mostra tendência de redução entre PT-49 e PT-55 e volta a não apresentar tendência na região 2B. Na região 2C, na entrada do reservatório da UHE Três Marias, a retenção hidráulica identificada no PT-22 tende a dissipar e depositar materiais mais finos, o que auxilia na adsorção de substâncias e aumento nas suas concentrações. Tal comportamento corroborou com a avaliação do ciclo passado.

Na avaliação da tendência sazonal ponto a ponto, a tendência das concentrações de cromo apresentou locais com mais equilíbrio ou sem tendência que na série completa, sendo somente o PT-09 com tendência de aumento e nos PT-16, PT-55 e PT-19 houve a tendência de redução.

Estes resultados corroboram com a estatística inferencial sazonal de predomínio de não haver tendência na maioria das regiões e aumento na região 2C. A diferença foi na região Ferro Carvão visto que o método inferencial sazonal e o *boxplot* indicaram tendência significativa de queda e o método Mann Kendall não registrou tendência para o local.

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 454/12 em toda a sua extensão. O rejeito da barragem B1 apresentou baixa concentração de cromo conforme observado nos resultados das análises realizadas por Geoenviron (2019), de modo que os eventuais aumentos observados estão preferencialmente relacionados a retenção de materiais finos em função de represamento hidráulico e dinâmica dos sedimentos da bacia do que ao próprio rejeito oriundo das barragens B1. B4, B4A.

12.4. 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 são 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 das barragens B1, B4 e B4A. Destaca-se que as maiores concentrações de Manganês, Ferro, Arsênio, Cobre e Níquel estão nas áreas citadas. O Arsênio é presente principalmente nos sedimentos da própria bacia e foi encontrado em menor concentração no rejeito, enquanto os demais elementos foram identificados no rejeito e Mn e Fe são os principais deles.

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, consequentemente, 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 após o período de chuvas.

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 consequente aumento nas concentrações observadas como de Manganês, Ferro, Cobre, Arsênio e o Níquel.

Observadas as concentrações dos metais ao longo das estiagens 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); Fósforo, Chumbo e Cádmio (abaixo dos valores orientadores da resolução CONAMA 454/12); e, Arsênio, Cobre e Níquel (acima dos valores orientadores da resolução CONAMA 454/12). Já a Região 1B, é a região que apresentou maior quantidade de metais com reduções sequenciais entre as quatro estiagens comparadas, sendo eles o Manganês, Ferro, Alumínio, Fósforo, Chumbo, Cobre e Níquel. Enquanto para a região 2B, os parâmetros que apresentaram diminuição sequenciais foram: Alumínio, Fósforo e Níquel. Do todo, o que se percebe é que as concentrações dos sedimentos ao longo dos períodos de estiagem 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 estiagem de 2022, que sucedeu um intenso período de precipitações, mostrou redução das vazões e níveis de água dos rios, com nova diminuição no arraste, dissipação e deposição de materiais em suspensão ao longo da bacia. Nesse sentido, o aumento das concentrações de metais em alguns trechos, pode estar relacionado a influência das precipitações antecedentes, principalmente a de 2021/2022, com deságue do rio ainda no período de estiagem. Nesse sentido, as precipitações favoreceram o aporte e carreamento de sedimentos e metais para o canal fluival, 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, em especial as chuvas intensas de 2021/2022, que acabou por influenciar a dinâmica morfológica e sedimentológica do rio.

13. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba

13.1. Objetivo

O objetivo da avaliação granulométrica foi avaliar a sua distribuição ao longo dos períodos sazonais de estiagem e no espaço, além de servir como referência para verificação das variações das concentrações dos metais em razão do tamanho do grão.

13.2. Metodologia

A distribuição granulométrica dos sedimentos seguiu as orientações da Resolução CONAMA 454/2012 para material a ser dragado, que tem como referência de classificação granulométrica a escala Granulométrica de Wentworth, 1922.

13.3. 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 2022 compreendem, principalmente nos períodos chuvosos, a importantes fatores de influência para o transporte através de arraste/carreamento difuso/supensão de matérias da bacia influenciados escoamento superficial e vazões do rio Paraopeba, enquanto nos períodos de estiagem, a dissipação e deposição de sedimentos em suspensão que predominam ao longo do eixo longitudinal e transversal deste rio.

O início do monitoramento granulométrico foi nas chuvas de 2019, marcadas por uma precipitação regular, não intensa, mas que auxiliou no transporte de materiais pós-rompimento da barragem em janeiro/2019, os quais foram transportados por arraste ou em suspensão e chegaram até os municípios de Pompéu/Curvelo, quando adentraram no reservatório da UHE Retiro Baixo e se dissiparam na estiagem/2019. Com a chegada das chuvas de 2019/2020, 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 intensa 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 rarearam e mais um período de deposição de materiais em suspensão continuou.

Neste documento, focou-se na análise sequencial da granulometria dos sedimentos de corrente nos períodos de estiagem de 2019 até 2022 e verificou-se a evolução dessa granulometria ao longo do rio Paraopeba. Os resultados das análises granulométricas dos sedimentos totais coletados no rio Paraopeba, foram divididos por períodos sazonais de estiagem, incluindo os períodos de 01/04/2019 a 30/09/2019 (**Gráfico 13.3-1**); 01/04/2020 a 30/09/2020 (**Gráfico 13.3-2**); 01/04/2021 a 30/09/2021 (**Gráfico 13.3-3**) e 01/04/2022 a 30/09/2022 (**Gráfico 13.3-4**), 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 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.

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.

Destaca-se ainda que, entre os anos de 2019 e 2022, 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 e 2022.

Os sedimentos foram coletados no rio Paraopeba, entre o ponto PT-52 (em Belo Vale) e o PT-22 (a jusante de Retiro Baixo). A análise mostrou que para o período de estiagem nos diferentes anos (2019 a 2022) houve variação na deposição de sedimentos ao longo do rio Paraopeba. O período de 2019 mostrou a predominância de sedimentos finos (silte e argila) ao longo dos pontos de monitoramento analisados. Para os anos subsequentes (2020 a 2022), foi observado comportamento de aumento na ocorrência de sedimentos mais grossos (areia fina, média e grossa e muito grossa) em alguns pontos monitorados. 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.

No período de estiagem de 2019 (abril/2019 a setembro/2019) percebeu-se predomínio das frações granulométricas siltosas na região Montanteporém sem conteúdo expressivo de argila.

O site também foi encontrado entre o PT-11 na região do Ferro-Carvão até o PT-15 na região 1B, além de uma variação de 2,4% a 18,6% de frações argilosas neste mesmo intervalo. A granulometria fina indicada entre os pontos PT-11 e 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, as frações siltosas foram predominantes nos pontos PT-53, PT-19 e PT-55 e com pouca presença de argila (menos de 5%). Já as frações arenosas que estavam entre o PT-43 e PT-17 no período anterior de chuvas/2019, predominaram num intervalo maior entre o PT-43 a PT-50, que pode ser 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.

Na região 2B, no interior do reservatório de UHE Retiro Baixo, por apresentar característica mais lêntica (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 3,3% a 11,6%. No PT-22 (Região 2C) foi observado um padrão de acúmulo de sedimentos na fração silte.

Na estiagem de 2020 (abril/2020 a setembro/2020), o ponto PT-52, na região Montante, apresentou essencialmente materiais mais grossos (areia, *ca.* 79%), que podem relacionar-se às coletas ao longo da porção central do rio ou a uma mudança na dinâmica natural do rio decorrente das chuvas que atingiram a região no período chuvoso que antecedeu a estiagem. Neste contexto, as chuvas podem ter resultado no aumento da energia no rio (maior turbulência) associado a declividade do rio e, por consequência, em 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 entre os pontos PT-13, PT-05, PT-53 a PT-16 e PT-49, 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) e do reservatório Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21) apresentaram maiores conteúdos de silte e argila para o período. Com exceção da região 2B, que possui condição mais lêntica (intermediária) por conta do reservatório da UHE de Retiro Baixo e que permite a dissipação e deposição dos sedimentos finos, e da Região Ferro-Carvão, cujo ribeirão homônimo foi contido por uma cortina metálica (barramento Estaca-Prancha) nas proximidades da confluência com o rio Paraopeba para conter o aporte de sedimentos para jusante, favorecendo a deposição de sedimentos finos em suspensão na região, 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. Entre o PT-03 e o PT-15, a granulometria se manteve predominante na fração silte e já não se observaram materiais argilosos como na campanha anterior, sugerindo que o rio também transportou materiais mais grossos decorrentes das intensas chuvas de 2019/2020. Já nos trechos entre PT-53 e PT-16; PT-18 a PT-49 e no PT-55, as frações arenosas foram predominantes, mostrando maior presença de frações mais grossas no rio

Paraopeba ao longo da Região 2A. Possivelmente, o transporte de sedimentos mais grossos e deposição no rio pode ter sido resultante das chuvas intensas que ocorreram no verão de 2019/ 2020, quando comparadas às de 2018/2019. Os pontos inseridos na Região 2B, inseridos no contexto da UHE de Retiro Baixo, apresentaram domínio absoluto de silte. No PT-22, inserido no contexto da região 2C, o predomínio de silte se manteve provavelmente por causa da condição do solo desnudo, e consequente facilidade para erosão e acúmulo de sedimentos, além de transporte e deposição de finos provenientes de locais a montante do PT-22.

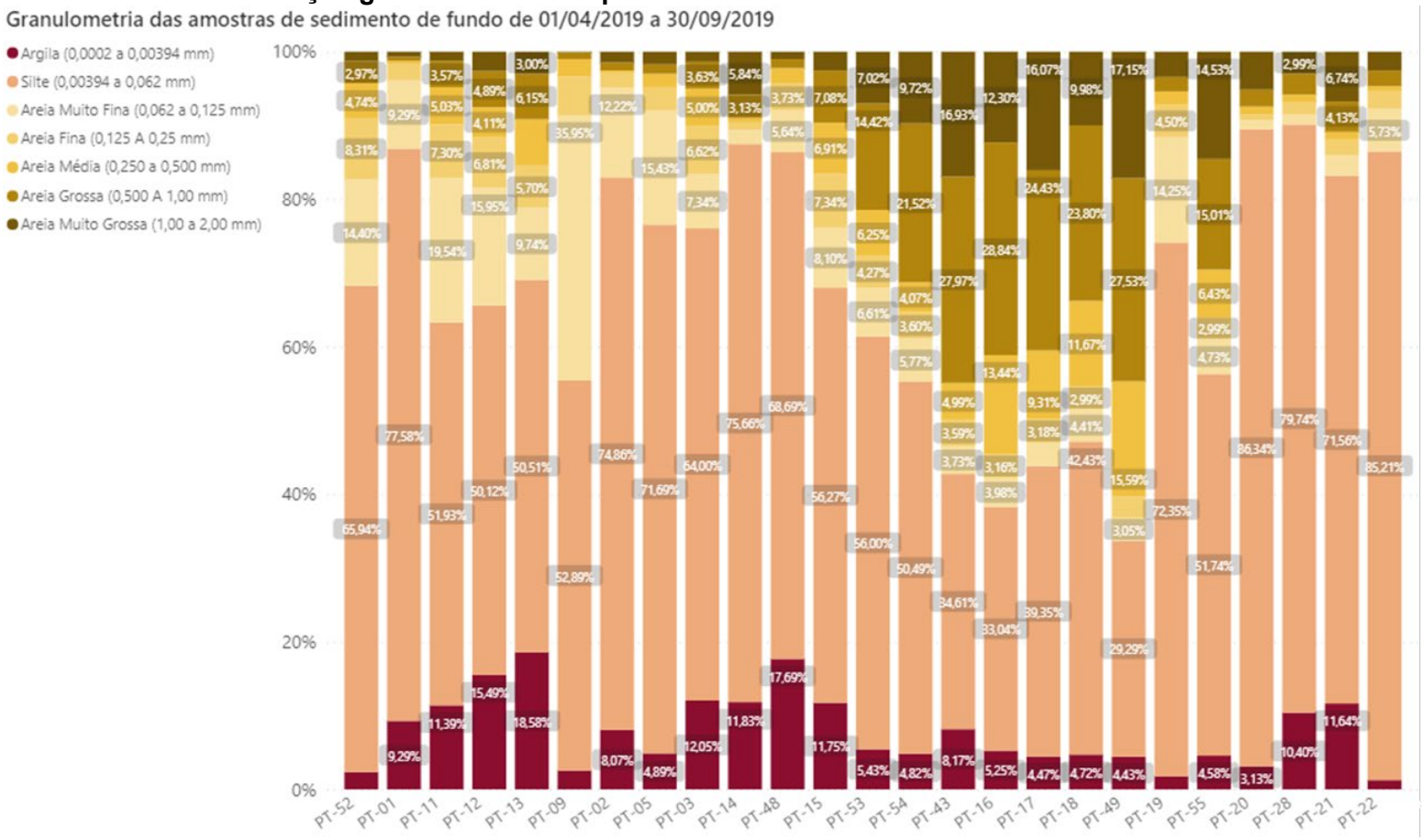
De acordo com as avaliações realizadas nas amostras compostas de sedimentos de fundo coletados por CPRM (2020), entre 2019 e 2020, nas estações de Alberto Flores (próximo ao PT-01), Mário Campos (entre PT-03 e PT-05), Ponte Nova do Paraopeba (próximo ao PT-15) e São Joaquim de Bicas (próximo ao PT-48) 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).

A estiagem/2021 (de abril a setembro/21), ocorreu posteriormente ao cenário de chuvas menos intensas (2020/2021), quando comparadas a 2019/2020. Com a redução da capacidade de transporte de materiais ao longo do rio devido a redução das vazões e do nível de água, constatou-se aumento das frações siltosas nas regiões Montante (PT-52) e Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), enquanto nos demais pontos de monitoramento houve manutenção ou aumento do predomínio das frações arenosas. Amostras coletadas em locais em que há uma contenção hidráulica, como no ribeirão Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), nas proximidades da UTE Igarapé (PT-14), a jusante da UTE Igarapé (PT-15 e PT-53) e no reservatório da UHE Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21) indicaram predominância de silte, comportamento granulométrico que se manteve do período anterior. Os pontos inseridos no contexto da Região 2A (entre os pontos PT-54 e PT-55) apresentaram aumento nas frações mais grossas durante esse período, o que pode estar relacionado aos aspectos morfológicos da drenagem, em trecho de caráter lótico, e ainda, por vezes, a amostragem na porção central do canal do rio, que possui maior energia de transporte e arraste de material de fundo e acumula potencialmente sedimentos mais grossos. Neste período foi observado um aumento na disponibilidade das frações argilosas nos pontos da Região 2B que variaram de 31,5% a 42% no reservatório Retiro Baixo, em função das reduções das precipitações e o aspecto de redução da vazão, ao qual os referidos pontos estão inseridos, onde ocorre dissipação e deposição de materiais em suspensão de natureza mais fina, em função da baixa energia do ambiente deposicional. No PT-22 (Região 2C) também houve predomínio de site, porém este ocorreu em função da condição de solo desnudo, onde a erosão superficial das margens do rio é acentuada e consequente acúmulo de sedimentos na localidade.

O período atual de estiagem/2022 (abril a setembro/2022) foi evidenciado por proceder um período de chuvas intensas (2021/2022), conforme relatado no item 4 deste relatório e, de forma mais detalhada, no documento que versa sobre o fechamento de ciclo anterior (Arcadis,

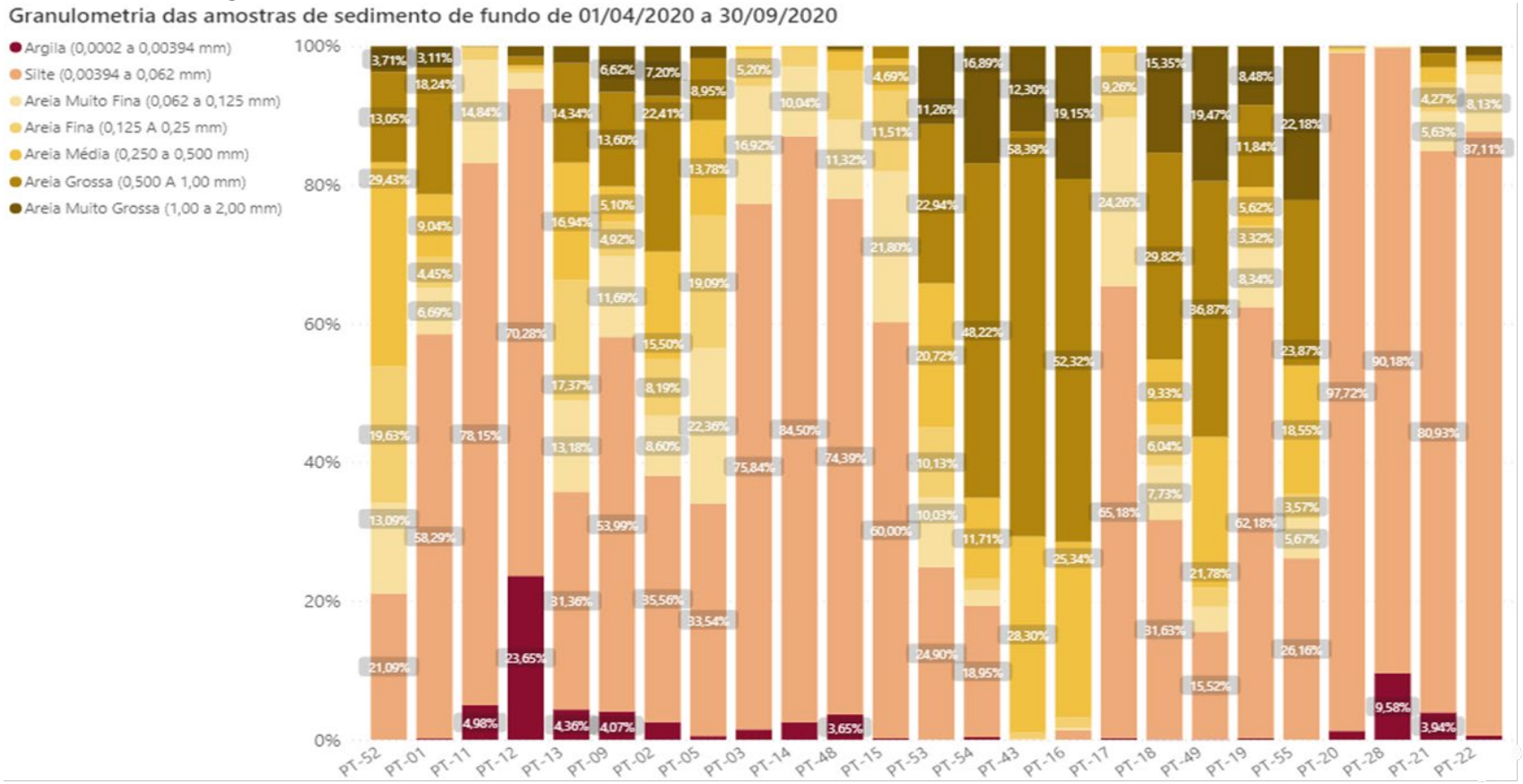
2022b). Neste cenário, os sedimentos apresentaram padrão semelhante ao observado no ciclo de estiagem anterior (estiagem/2021) nos pontos inseridos nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C (PT-22) e diminuição ou manutenção das proporções de sedimentos mais grossos (principalmente areia grossa e muito grossa) nos pontos inseridos no contexto da Região 2A. A Região Montante apresenta manutenção das proporções de finos e sedimentos mais grossos observada no período de estiagem/2021, bem como na região Ferro-Carvão, em que há predomínio de silte e argila, tendo no PT-11 uma redução da proporção de argila (16%) no atual período de estiagem. Da mesma forma que ocorreu em 2021, o PT-52 também apresentou predominância de materiais mais finos (*ca.* 56%), principalmente silte, diferentemente de 2020, que prevaleceu registro de areia. Essa distribuição granulométrica em 2022 pode estar relacionada a uma mudança na dinâmica natural da bacia, com o fim da transição entre as estações de chuva 2021/2022 (mais intensa e constante que as de 2020/2021) para estiagem, o que pode ter contribuído para a deposição e aumento de frações finas, principalmente no ponto PT-52. O ano de 2022 registrou maior precipitação que 2020 e 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. Foi observado a diminuição de materiais mais grossos (areia grossa e muito grossa) em alguns pontos em trechos mais lóticos do rio, como do PT-54 ao PT-55. Apesar disso, o padrão de distribuição sedimentar foi similar aos outros anos, com predominância de materiais mais grossos em trechos lóticos da bacia (PT-01, PT-05, PT-53 a PT-16, PT-49 a PT-55) e maior presença de materiais mais finos nas regiões de comportamento intermediário ou mais lêntico (PT-11 a PT-12 e PT-20 a PT-21), onde a energia é menor (menor turbulência), o que favorece a sedimentação de silte e argila. Destaca-se que pontos PT-02 (próximo a Ponte Nova), PT-11 e PT-12 (Estaca-Prancha), PT-14 (barramento da UTE Igarapé), PT-15 (local sinuoso que acumula sedimentos), bem como os pontos PT-20 a PT-21 (UHE Retiro Baixo) se mantiveram como sendo pontos de ocorrência de acúmulos de sedimentos finos e, dessa forma, apresentam os maiores conteúdos de argila (*ca.* 14-35%) que o restante da sequência.

Gráfico 13.3-1: Variação granulométrica no período de abril/2019 a setembro/2019



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: Os pontos localizados ao longo do rio Paraopeba não amostrados pelo menos uma vez durante o período analisado foram: PT-01, PT-13, PT-09, PT-02, PT-19, PT-20, PT-22. Os principais motivos para as não-coletas foram: ausência de material para coleta, inacessibilidade do ponto ou condição insegura para amostragem.

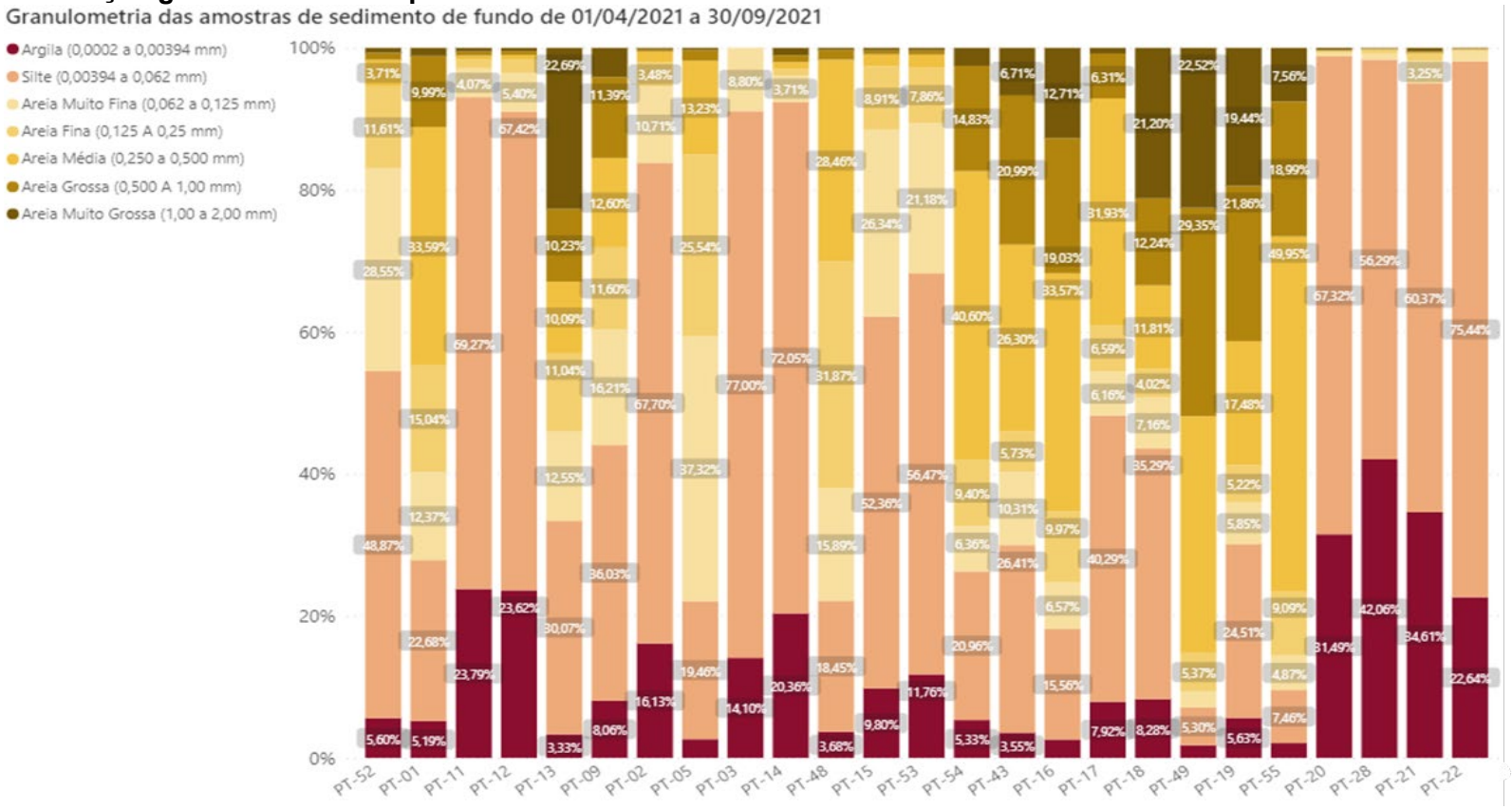
Gráfico 13.3-2: Variação granulométrica no período de abril/2020 a setembro/2020



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nota: Os pontos localizados ao longo do rio Paraopeba não amostrados pelo menos uma vez durante o período analisado foram: PT-03, PT-48, PT-17 e PT-25. Os principais motivos para as não-coletas foram: ausência de material para coleta, inacessibilidade do ponto ou condição insegura para amostragem.

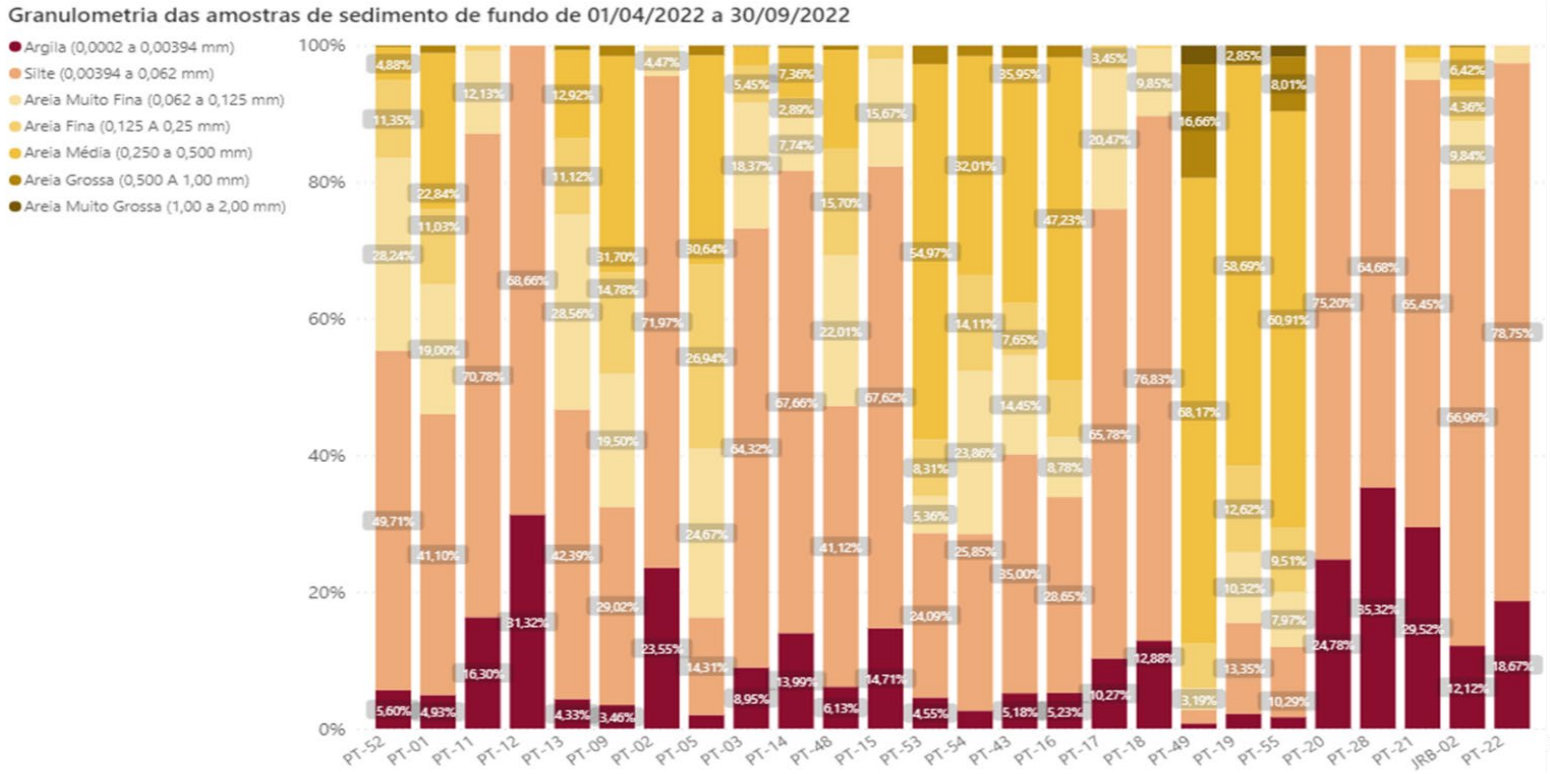
Gráfico 13.3-3: Variação granulométrica no período de abril/2021 a setembro/2021.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nota: Os pontos localizados ao longo do rio Paraopeba não amostrados pelo menos uma vez durante o período analisado foram: PT-52, PT-01, PT-12, PT-13, PT-09, PT-02, PT-05, PT-03, PT-48, PT-15, PT-43, PT-16, PT-19 e PT-55. Os principais motivos para as não-coletas foram: ausência de material para coleta, inacessibilidade do ponto ou condição insegura para amostragem.

Gráfico 13.3-4: Variação granulométrica no período de abril/2022 a setembro/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nota: Os pontos localizados ao longo do rio Paraopeba não amostrados pelo menos uma vez durante o período analisado foram: PT-52, PT-01, PT-11, PT-12, PT-13, PT-09, PT-02, PT-05, PT-03, 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-21, JRB-02 e PT-22. O ponto JRB-02 apresentou poucos resultados no período de estiagem/2022 pois foi inserido somente recentemente (agosto/2022) no escopo desse monitoramento (PME v.24). Os principais motivos para as não-coletas foram: ausência de material para coleta, inacessibilidade do ponto ou condição insegura para amostragem.

13.4. Considerações

A análise da distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo, coletados com draga, ao longo do rio Paraopeba, no decorrer dos períodos de estiagem (abril a setembro) dos anos de 2019 a 2022, permitiu acompanhar a evolução da dinâmica da bacia do rio Paraopeba espacial e temporalmente. A predominância de sedimentos mais finos em todas as regiões da bacia para o início do período de estiagem de 2019 pode estar relacionada ao rompimento das barragens B1, B4 e B4A, em janeiro do mesmo ano, o que pode ter resultado em um acúmulo dos rejeitos, principalmente nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B. Foi observado gradativo aumento das frações arenosas nos pontos da região 2A, entre o PT-53 até o PT-17, onde predominam os gnaisses do Complexo Bonfim, e entre o PT-18 ao PT-55, onde estão os metassedimentos do Grupo Bambuí. A variação granulométrica mais grossa observada nessas localidades pode ser resposta a mudanças nas condições de declividade, velocidade e sinuosidade do corpo fluvial neste trecho, de caráter lótico. Em relação aos sedimentos finos, é possível que sua maior ocorrência seja em função da redução da vazão dos rios, dissipação e deposição de sedimentos em suspensão, bem como mudança na posição de coleta de amostras da posição central (maior energia de transporte) para a marginal (menor energia de transporte). Aspectos como escoamento superficial, erosão das margens e aumento do aporte sedimentar oriundo dos tributários, são fatores que também podem contribuir para o aumento das frações finas, pelas características pedológicas e uso e ocupação do solo nesse trecho.

Os anos subsequentes (2020 a 2022) mostram um padrão sedimentar diferente, com aumento gradativo de frações arenosas nos trechos mais lóticos do rio, preservando sedimentos finos (silte e argila) nas regiões de retenção hidráulica (Ferro-Carvão e na região da UHE Retiro Baixo), onde há consequente redução de velocidade de transporte e potencial aumento de dissipação e deposição de sedimentos. As regiões 1A e 1B, apesar de estarem em ambiente lótico também acumularam sedimentos de frações finas, provavelmente em função do acúmulo de sedimentos contendo rejeitos em sua calha e pela mudança de posição de coleta de amostras do centro para a margem, desde 2021.

Em 2020 foi observada uma maior distribuição das frações arenosas ao longo do perfil longitudinal, mesmo tendo sido constatada ainda uma larga distribuição de sedimentos siltosos nas regiões Ferro-Carvão, 1B e 2B. As regiões Montante, 1A e 2A apresentaram mudança de perfil granulométrico onde a expressão de sedimentos nas frações mais grossas (areia muito grossa, grossa e média) foi notadamente maior que o período anterior (estiagem/2019). Tal fato se correlaciona provavelmente ao intenso período de chuvas 2019/2020, que contribuiu possivelmente para a erosão, remobilização e transporte de materiais de outras porções da bacia e no aumento da turbulência, com deposição e acumulação de materiais mais grossos (areia fina a grossa) na bacia, além de mudanças na posição de coleta.

O ano seguinte (2021) exibe uma distribuição granulométrica semelhante ao ano anterior (2020), porém indicando presença maior presença de materiais bem finos (argila), principalmente na Região 2B, no contexto da UHE Retiro Baixo, além de materiais mais grossos nos trechos lóticos, o que pode estar relacionado ao estágio menos intenso de chuvas (2020/2021). Neste sentido, a distribuição granulométrica identificada poderia relacionar-se

principalmente à dinâmica natural da bacia, com o fim da transição entre as estações de chuva e predomínio de período de seca, conforme visualizado na região Montante, assim como as características morfométricas do rio, possibilitando maior turbilhonamento de materiais nos locais de intensa vazão, mas também de maior declividade.

Por fim, a distribuição granulométrica do período vigente (estiagem/2022) apresenta padrão semelhante ao observado no ciclo de estiagem anterior (estiagem/2021) nos pontos inseridos nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C (PT-22) e diminuição ou manutenção das proporções de sedimentos mais grossos (principalmente areia grossa e muito grossa) nos pontos inseridos no contexto da Região 2A. Essa distribuição granulométrica em 2022 pode estar relacionada a uma mudança na dinâmica natural da bacia, com o fim da transição entre as estações de chuva 2021/2022 (mais intensa e constante que as de 2020/2021) para estiagem, o que pode ter contribuído para a dissipação, deposição de materiais em suspensão e aumento de frações finas. Neste cenário, os sedimentos apresentaram padrão semelhante ao observado no ciclo de estiagem anterior (estiagem/2021) nos pontos inseridos nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C (PT-22) e diminuição ou manutenção das proporções de sedimentos mais grossos (principalmente areia grossa e muito grossa) nos pontos inseridos no contexto da Região 2A.

Nesse sentido, foi possível avaliar que a predominância de sedimentos de frações finas (composto por argila e silte), na região Ferro-Carvão, na Região 2A e na UHE Retiro Baixo, ocorre normalmente associado a maiores concentrações de metais prioritários (Fe, Al, Mn), P e traço (Ni, Cu, As e Pb), comum a esses trechos ao longo do período analisado. Isso ocorre, pois, sedimentos com granulometria mais fina, apesar de mais impermeáveis, são mais porosos, ou seja, possuem maior superfície específica, maior capacidade de troca catiônica, o que resulta em uma maior capacidade de adsorção de elementos, incluindo metais e matéria orgânica. Por este motivo, as concentrações mais elevadas observadas ocorreram relacionadas à presença destes materiais de textura fina.

14. Evolução das concentrações dos metais em relação aos valores orientadores do CONAMA 454/12 e Vicq (2015) nos sedimentos nos períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2022 ao longo do rio Paraopeba

14.1. 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, B4, B4A ao longo dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 em relação a Resolução CONAMA 454/12 para os níveis 1 e 2. Cabe destacar que os parâmetros Manganês, Alumínio e Ferro não estão listados nesta Resolução, mas foram comparados de acordo com Vicq (2015).

14.2. Metodologia

Como não há uma classificação para avaliar a qualidade química de sedimentos de corrente, utilizou-se como referência a Resolução CONAMA 454/2012 que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. A caracterização química foi realizada de acordo com as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais definidos nesta Resolução. Para disposição em águas doces sob jurisdição nacional, os resultados analíticos foram comparados com os níveis 1 e 2 de classificação do material a ser dragado. Os valores orientadores adotados têm como referência a publicação oficial Environmental Canada. *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.Canadian Environmental Quality Guidelines - Summary Tables*, propostos pelo Conselho de Ministérios de Meio Ambiente do Canadá (*Canadian Council of Ministers of the Environment*, CCME, 2002).

A avaliação considerou duas abordagens. A primeira considerou o consolidado dos resultados de estiagem 2022 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 de estiagem, sendo: abril a setembro de 2019, 2020, 2021 e 2022. Em ambas as situações, a avaliação foi para verificar a evolução do percentual de ultrapassagem dos valores orientadores e evolução no tempo.

14.3. Resultados e discussão

Nas **Tabelas 14.3-1 e 14.3-2** estão apresentados os percentis que ultrapassaram os valores orientadores por ponto no período de estiagem 2022, enquanto nas **Tabelas 14.3.3 e 14.3.4**

encontram-se os percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2, para todos os períodos de estiagem avaliados. As discussões são apresentadas por Regiões.

Tabela 14.3-1: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 1 da CONAMA 454/12, ou dos valores propostos por Vicq (2015), para a estiagem 2022.

Parâmetro	CONAMA 454/12 VOR 1 (mg/kg)	Rio Paraopeba																						Reservatório Retiro Baixo			R. 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	-	100	100	15	-	-	100	-	-	55	-	63	-	-	-	-	33	50	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ferro	• 281.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Alumínio	• 45.200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	17	36	-	-	
Fósforo	2.000	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
TRAÇOS																												
Arsênio	5,9	100	88	100	92	33	85	100	78	100	82	75	100	25	50	50	50	100	100	-	-	-	100	100	100	80	100	
Cádmio	0,6	-	12	46	-	-	-	38	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Chumbo	35	-	4	62	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	-	
Cobre	35,7	11	85	100	15	-	-	100	-	18	55	-	63	-	-	-	-	33	25	-	-	-	67	75	84	-	-	
Cromo	37,3	78	-	12	69	-	23	8	-	100	82	25	67	25	50	50	17	100	100	-	-	-	100	100	92	60	100	
Níquel	18	22	73	100	23	11	8	100	-	27	82	8	63	25	-	17	17	67	50	-	-	-	75	83	92	20	33	
Zinco	123	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
N coletas realizadas		9	26	26	13	9	13	13	9	11	11	12	9	4	2	6	6	6	4	8	10	11	12	12	25	5	6	

*NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência; *Vicq (2015) utilizado para comparações com ferro, alumínio e manganês.*
Elaboração: Arcadis (2022).

Tabela 14.3-2: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da CONAMA 454/12 para a estiagem 2022.

Parâmetro	CONAMA 454/12 VOR 2 (mg/kg)	Rio Paraopeba																					Reservatório Retiro Baixo			R. 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	-	4	54	-	-	-	38	-	45	45	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	8	17	4	20	-
Cádmio	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cromo	90	-	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	4	-	-
Níquel	35,9	-	12	77	-	11	8	38	-	-	18	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-
Zinco	315	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N coletas realizadas		9	26	26	13	9	13	13	9	11	11	12	9	4	2	6	6	6	4	8	10	11	12	12	25	5	6

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

Elaboração: Arcadis (2022).

Menor % de resultados acima do VOR — Maior % de resultados acima do VOR

De acordo com as **Tabelas 14.3-1 e 2**, constatou-se que, para o período de estiagem 2022 os parâmetros Manganês e Alumínio superaram os valores orientadores Vicq (2015) em pelo menos um local monitorado. Arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, fósforo 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). Já o cobre também ocorreu em toda a bacia, porém com menores porcentagens de variação acima da Resolução CONAMA 454/12, enquanto as concentrações de chumbo foram maiores nas regiões associadas ao Quadrilátero Ferrífero.
Em relação aos locais que apresentaram maior ocorrência de metais que ultrapassaram esses valores de referência estão o PT-52, PT-11, PT-12, PT-02, PT-03, PT-14, PT-15, PT-17, PT-18, além do PT-20, PT-28, PT-21 e PT-22. Os pontos PT-01, PT-13, PT-09, PT-05, PT-48, PT-53, PT-54, PT-43, PT-16 e JRB-02 ultrapassaram os valores de referência em menor percentual de amostras e/ou parâmetros. Os pontos PT-25, PT-27 e PT-32 são amostrados no leito do rio São Francisco e estes também apresentaram ocorrências de algum metal traço e de manganês em pelo menos 1 desses locais.

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 da barragem B1, justificando os maiores percentuais de resultados em desacordo com o valor orientador de manganês para a estiagem 2022, 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-01, PT-14, PT-15, PT-17 e PT-18 apresentaram resultados em desacordo com a legislação para manganês em menores proporções para a estiagem 2022. 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 estiagem 2022, 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 **Tabelas 14.3-1 e 2**, observou-se que para o período de estiagem 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 possui 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 CONAMA 454/12 para metais traço (As, Cu, Cr e Ni).

Em relação aos resultados em desacordo com o valor orientador do nível 2 (**Tabela 14.3-2**) da CONAMA 454/12, no período de estiagem 2022, houve desvios para: As e Ni no PT-11, PT-12 (Ferro-Carvão), PT-02 (região 1A) e PT-14 (região 1B); As e Cr no PT-03 (região 1B), PT-28 e PT-21 (UHE Retiro Baixo); As, Cr e Ni no PT-20 (UHE Retiro Baixo); As no PT-18 (região 2A) e JRB-02 (região 2C) e por fim, Ni no PT-13, PT-09 (região 1A) e PT-15 (região 1B). Os pontos localizados até a região 1B, estão em área afetada pelo rejeito da barragem B1, 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 estiagem 2022, 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 lêntico, o que favorece o acúmulo contínuo de sedimentos finos, o que favorece a adsorção de metais nessas partículas.

A **Tabela 14.3-3** consolidam a evolução das concentrações dos metais ao longo dos ciclos de estiagem ocorridos entre 2019 e 2022. Estas tabelas contemplam cada região de interesse (montante até 2C) e apresentam os percentuais de concentração de metais e suas comparações com o ciclo de estiagem seguinte. Esta avaliação também foi efetuada utilizando como referência a Resolução CONAMA 454/12, 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 14.14.3-3 Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para a estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 entre as regiões de Montante e 1A.

Regiao	Parâmetro	-			Estiagem - Abril a Setembro/2019					Estiagem - Abril a Setembro/2020					Estiagem - Abril a Setembro/2021					Estiagem - Abril a Setembro/2022				
		VOR N1	VOR N2	Unidade	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2	N° amostras	N° desvios N1	% desvios N1	N° desvios N2	% desvios N2
Montante	Arsênio	5,9	17	mg/kg	27	24	88,9 %	1	3,7 %	23	16	69,6 %	0	0,0 %	16	15	93,8 %	0	0,0 %	8	8	100,0 %	0	0,0 %
Montante	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	27	0	0,0 %	0	0,0 %	23	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %	8	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Chumbo	35	91,3	mg/kg	27	0	0,0 %	0	0,0 %	23	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %	8	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Cobre	35,7	197	mg/kg	27	17	63,0 %	0	0,0 %	23	1	4,3 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %	8	1	12,5 %	0	0,0 %
Montante	Cromo	37,3	90	mg/kg	27	25	92,6 %	1	3,7 %	23	17	73,9 %	3	13,0 %	16	15	93,8 %	0	0,0 %	8	6	75,0 %	0	0,0 %
Montante	Fósforo	2000	2000	mg/kg	27	0	0,0 %	0	0,0 %	23	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %	8	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	27	5	18,5 %	0	0,0 %	23	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %	8	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Níquel	18	35,9	mg/kg	27	21	77,8 %	0	0,0 %	23	8	34,8 %	1	4,3 %	16	8	50,0 %	0	0,0 %	8	2	25,0 %	0	0,0 %
Montante	Zinco	123	315	mg/kg	27	0	0,0 %	0	0,0 %	23	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %	8	0	0,0 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Arsênio	5,9	17	mg/kg	48	8	16,7 %	0	0,0 %	52	39	75,0 %	13	25,0 %	36	36	100,0 %	13	36,1 %	52	49	94,2 %	15	28,8 %
Ferro-Carvão	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	48	3	6,3 %	0	0,0 %	52	0	0,0 %	0	0,0 %	36	3	8,3 %	0	0,0 %	52	15	28,8 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Chumbo	35	91,3	mg/kg	48	3	6,3 %	0	0,0 %	52	19	36,5 %	0	0,0 %	36	13	36,1 %	0	0,0 %	52	17	32,7 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Cobre	35,7	197	mg/kg	48	23	47,9 %	0	0,0 %	52	31	59,6 %	0	0,0 %	36	36	100,0 %	0	0,0 %	52	48	92,3 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Cromo	37,3	90	mg/kg	48	1	2,1 %	0	0,0 %	52	19	36,5 %	0	0,0 %	36	0	0,0 %	0	0,0 %	52	3	5,8 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Fósforo	2000	2000	mg/kg	48	0	0,0 %	0	0,0 %	52	6	11,5 %	6	11,5 %	36	0	0,0 %	0	0,0 %	51	1	2,0 %	1	2,0 %
Ferro-Carvão	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	49	2	4,1 %	0	0,0 %	52	21	40,4 %	0	0,0 %	36	3	8,3 %	0	0,0 %	52	0	0,0 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Níquel	18	35,9	mg/kg	48	17	35,4 %	5	10,4 %	52	51	98,1 %	21	40,4 %	36	35	97,2 %	20	55,6 %	52	45	86,5 %	23	44,2 %
Ferro-Carvão	Zinco	123	315	mg/kg	48	1	2,1 %	0	0,0 %	52	0	0,0 %	0	0,0 %	36	0	0,0 %	0	0,0 %	52	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Arsênio	5,9	17	mg/kg	123	73	59,3 %	20	16,3 %	109	84	77,1 %	6	5,5 %	113	91	80,5 %	6	5,3 %	57	46	80,7 %	5	8,8 %
Região 1A	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	116	2	1,7 %	0	0,0 %	106	0	0,0 %	0	0,0 %	113	2	1,8 %	0	0,0 %	57	5	8,8 %	0	0,0 %
Região 1A	Chumbo	35	91,3	mg/kg	123	62	50,4 %	47	38,2 %	109	9	8,3 %	3	2,8 %	113	5	4,4 %	1	0,9 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Cobre	35,7	197	mg/kg	123	54	43,9 %	0	0,0 %	109	10	9,2 %	0	0,0 %	113	21	18,6 %	0	0,0 %	57	15	26,3 %	0	0,0 %
Região 1A	Cromo	37,3	90	mg/kg	123	28	22,8 %	6	4,9 %	109	19	17,4 %	2	1,8 %	113	24	21,2 %	0	0,0 %	56	13	23,2 %	0	0,0 %
Região 1A	Fósforo	2000	2000	mg/kg	123	0	0,0 %	0	0,0 %	109	0	0,0 %	0	0,0 %	113	0	0,0 %	0	0,0 %	56	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	110	1	0,9 %	0	0,0 %	109	1	0,9 %	0	0,0 %	113	6	5,3 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Níquel	18	35,9	mg/kg	123	86	69,9 %	25	20,3 %	109	46	42,2 %	6	5,5 %	113	28	24,8 %	7	6,2 %	57	18	31,6 %	7	12,3 %
Região 1A	Zinco	123	315	mg/kg	123	1	0,8 %	0	0,0 %	109	0	0,0 %	0	0,0 %	113	0	0,0 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1B	Arsênio	5,9	17	mg/kg	105	82	78,1 %	7	6,7 %	65	60	92,3 %	7	10,8 %	53	39	73,6 %	11	20,8 %	44	39	88,6 %	10	22,7 %
Região 1B	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	105	4	3,8 %	0	0,0 %	65	0	0,0 %	0	0,0 %	53	4	7,5 %	0	0,0 %	39	1	2,6 %	0	0,0 %
Região 1B	Chumbo	35	91,3	mg/kg	105	47	44,8 %	0	0,0 %	64	7	10,9 %	0	0,0 %	53	10	18,9 %	0	0,0 %	44	1	2,3 %	0	0,0 %
Região 1B	Cobre	35,7	197	mg/kg	105	76	72,4 %	0	0,0 %	65	32	49,2 %	0	0,0 %	53	18	34,0 %	0	0,0 %	43	14	32,6 %	0	0,0 %
Região 1B	Cromo	37,3	90	mg/kg	105	71	67,6 %	1	1,0 %	65	52	80,0 %	2	3,1 %	53	28	52,8 %	1	1,9 %	44	30	68,2 %	1	2,3 %
Região 1B	Fósforo	2000	2000	mg/kg	105	3	2,9 %	3	2,9 %	65	1	1,5 %	1	1,5 %	53	0	0,0 %	0	0,0 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1B	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	105	32	30,5 %	4	3,8 %	65	8	12,3 %	0	0,0 %	53	5	9,4 %	0	0,0 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1B	Níquel	18	35,9	mg/kg	105	79	75,2 %	54	51,4 %	65	53	81,5 %	10	15,4 %	53	24	45,3 %	13	24,5 %	43	19	44,2 %	3	7,0 %
Região 1B	Zinco	123	315	mg/kg	105	1	1,0 %	0	0,0 %	65	0	0,0 %	0	0,0 %	53	0	0,0 %	0	0,0 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Arsênio	5,9	17	mg/kg	243	103	42,4 %	4	1,6 %	197	72	36,5 %	1	0,5 %	156	55	35,3 %	0	0,0 %	57	18	31,6 %	1	1,8 %
Região 2A	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	243	0	0,0 %	0	0,0 %	196	0	0,0 %	0	0,0 %	156	0	0,0 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Chumbo	35	91,3	mg/kg	243	29	11,9 %	2	0,8 %	197	1	0,5 %	0	0,0 %	156	2	1,3 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Cobre	35,7	197	mg/kg	243	74	30,5 %	0	0,0 %	197	6	3,0 %	0	0,0 %	156	2	1,3 %	0	0,0 %	57	3	5,3 %	0	0,0 %
Região 2A	Cromo	37,3	90	mg/kg	243	216	88,9 %	46	18,9 %	197	96	48,7 %	24	12,2 %	156	42	26,9 %	0	0,0 %	57	16	28,1 %	0	0,0 %
Região 2A	Fósforo	2000	2000	mg/kg	243	0	0,0 %	0	0,0 %	197	0	0,0 %	0	0,0 %	156	0	0,0 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	240	15	6,3 %	1	0,4 %	200	0	0,0 %	0	0,0 %	156	0	0,0 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Níquel	18	35,9	mg/kg	243	130	53,5 %	26	10,7 %	197	56	28,4 %	7	3,6 %	156	24	15,4 %	0	0,0 %	57	9	15,8 %	0	0,0 %
Região 2A	Zinco	123	315	mg/kg	243	0	0,0 %	0	0,0 %	197	0	0,0 %	0	0,0 %	156	0	0,0 %	0	0,0 %	57	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Arsênio	5,9	17	mg/kg	78	71	91,0 %	10	12,8 %	77	76	98,7 %	14	18,2 %	72	72	100,0 %	4	5,6 %	49	49	100,0 %	4	8,2 %
Região 2B	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	78	0	0,0 %	0	0,0 %	77	0	0,0 %	0	0,0 %	72	0	0,0 %	0	0,0 %	47	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Chumbo	35	91,3	mg/kg	78	17	21,8 %	1	1,3 %	77	21	27,3 %	0	0,0 %	72	8	11,1 %	0	0,0 %	49	3	6,1 %	0	0,0 %
Região 2B	Cobre	35,7	197	mg/kg	78	60	76,9 %	0	0,0 %	77	63	81,8 %	0	0,0 %	72	54	75,0 %	0	0,0 %	49	38	77,6 %	0	0,0 %
Região 2B	Cromo	37,3	90	mg/kg	78	77	98,7 %	5	6,4 %	77	77	100,0 %	22	28,6 %	72	72	100,0 %	3	4,2 %	49	47	95,9 %	3	6,1 %
Região 2B	Fósforo	2000	2000	mg/kg	78	0	0,0 %	0	0,0 %	77	0	0,0 %	0	0,0 %	72	0	0,0 %	0	0,0 %	46	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	76	3	3,9 %	0	0,0 %	77	0	0,0 %	0	0,0 %	72	1	1,4 %	0	0,0 %	49	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Níquel	18	35,9	mg/kg	78	73	93,6 %	5	6,4 %	77	77	100,0 %	26	33,8 %	72	59	81,9 %	0	0,0 %	49	42	85,7 %	1	2,0 %
Região 2B	Zinco	123	315	mg/kg	78	0	0,0 %	0	0,0 %	77	0	0,0 %	0	0,0 %	72	0	0,0 %	0	0,0 %	49	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Arsênio	5,9	17	mg/kg	24	6	25,0 %	0	0,0 %	26	14	53,8 %	0	0,0 %	6	4	66,7 %	0	0,0 %	11	10	90,9 %	1	9,1 %
Região 2C	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	24	0	0,0 %	0	0,0 %	25	1	4,0 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	11	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Chumbo	35	91,3	mg/kg	24	5	20,8 %	0	0,0 %	26	0	0,0 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	11	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Cobre	35,7	197	mg/kg	24	4	16,7 %	0	0,0 %	26	0	0,0 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	11	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Cromo	37,3	90	mg/kg	24	7	29,2 %	0	0,0 %	26	10	38,5 %	0	0,0 %	6	4	66,7 %	0	0,0 %	11	9	81,8 %	0	0,0 %
Região 2C	Fósforo	2000	2000	mg/kg	24	0	0,0 %	0	0,0 %	26	0	0,0 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	10	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	21	0	0,0 %	0	0,0 %	26	0	0,0 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	11	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Níquel	18	35,9	mg/kg	24	6	25,0 %	0	0,0 %	26	0	0,0 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	11	3	27,3 %	0	0,0 %
Região 2C	Zinco	123	315	mg/kg	24	1	4,2 %	0	0,0 %	26	1	3,8 %	0	0,0 %	6	0	0,0 %	0	0,0 %	11	0	0,0 %	0	0,0 %

- **Região Montante**

Esta região está localizada a montante da Barragem B1, 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 do Grupo Nova Lima, Granito Nochese e Complexo Belo Horizonte presentes na região.

No período correspondente ao primeiro período de estiagem (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros que ultrapassaram o nível 1 do CONAMA 454/12 foram o As, Cu, Cr, Hg e Ni, sendo que o As e Ni ultrapassou o nível 2 do 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 de estiagem (abril/2020 a setembro/2020), constatou-se que o As, Cu, Cr e Ni ultrapassaram o nível 1, sendo que, houve redução no percentual ultrapassado em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 no período anterior, e ocorreu aumento em relação ao nível 2 para o Cr e Ni. Desta forma, além do intemperismo de solos e rochas que disponibilizam minerais para o rio Paraopeba, considerou-se também que as chuvas intensas de 2019/2020 podem ter mobilizado ainda mais sedimentos, seja em suspensão, por arraste ou até erosão de margens com minerais ou argilominerais contendo esses elementos e que puderam ser acumulados na calha do rio.

No período de estiagem 2021 (abril a setembro), tendo em vista os desvios, observou-se que na região montante, houve elevação no percentual de desvios da CONAMA 454/12 nível 1 para As, Cr e Ni, sendo que, para o nível 2, não houve percentual de desvios. Com o período de estiagem, houve redução dos percentuais de desvio, o que pode ser verificado para o nível 2 dos parâmetros Cr e Ni. Notou-se ainda, que uma menor quantidade de parâmetros ultrapassou os valores orientadores da CONAMA 454/12 nesse período de estiagem.

Para o período de estiagem 2022 (abril a setembro), tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, observa-se que na região montante houve aumento no percentual de desvios da CONAMA 454 nível 1 para As (8 desvios – 100%) e Cu (1 desvio – 12,5%), somente. Os parâmetros Cr (6 desvios – 75%) e Ni (2 desvios – 25%) apresentaram redução de desvios em relação ao período de estiagem anterior, enquanto os demais parâmetros não ultrapassaram os valores orientadores.

Considerando todos os períodos de estiagem, apesar da oscilação entre os períodos, os parâmetros As, Cu, Cr e Ni foram observados acima dos valores orientadores da CONAMA 454/12 em todos os períodos de estiagem abrangidos por esse relatório. O parâmetro Hg esteve acima do valor orientador somente na estiagem 2019. Ademais, as concentrações

desses metais (As, Cu, Cr e Ni) podem sugerir a possibilidade da característica da própria bacia, 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 lêntica de movimentação da água, e isso possibilita maior deposição de sedimentos de granulação fina que estavam transportados em suspensão e até os sedimentos mais grossos transportados por arraste, que se acumulam na área represada.

No primeiro período de estiagem (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn apresentaram desvio em relação ao nível 1 do CONAMA 454/12, e somente o Ni apresentou concentrações acima do nível 2.

No segundo período de estiagem (abril/2020 a outubro/2020), com a redução das vazões do ribeirão Ferro-Carvão, percebeu-se aumento gradativo das concentrações de metais nessa localidade em relação aos valores orientadores à medida que a estiagem avançou. Com exceção do Cd e Zn, que não ultrapassaram os valores orientadores do CONAMA 454/12 neste período, todos os outros elementos (As, Pb, Cu, Cr, P, Hg e Ni) ultrapassaram o nível 1 da CONAMA 454/12 e apresentaram elevação no percentual de desvios. Apenas As, P e Ni ultrapassaram o nível 2, e foram os elementos que apresentaram aumento em comparação com a estiagem de 2019.

No período de estiagem de 2021 (abril a setembro), os principais comportamentos dos percentuais de desvio da legislação na região Ferro-Carvão foram as elevações para o nível 1 da CONAMA 454/12 dos parâmetros As, Cd e Cu. Já os parâmetros Pb, Cr, P, Hg e Ni apresentaram redução em relação ao período de estiagem anterior. O metal Zn seguiu comportamento semelhante ao período de estiagem de 2020, não apresentando concentrações em desacordo com a legislação. Para o nível 2 da CONAMA 454/12 somente As e Ni apresentaram desvios, comportamento similar à estiagem de 2020.

Em relação ao período de estiagem de 2022 (abril a setembro) foi observado aumento dos desvios em relação ao período de estiagem anterior para Cd (15 desvios - 28,8%), Cr (3 desvios – 5,8%) e P (1 desvio – 2%). Já os parâmetros que apresentaram redução, foram: As (49 desvios – 94,2%), Pb (17 desvios – 32,7%), Cu (48 desvios – 92,3%), Hg (não houve desvio)

e Ni (45 desvios – 86,5%). Para o parâmetro Zn não houve desvios na estiagem 2022, assim como nas estiagens 2021 e 2020. Para o nível 2, houve desvios para As (15 desvios – 28,8%), P (1 desvio – 2%) e Ni (23 desvios – 44,2%). A persistência desses metais acima dos valores orientadores, pode ser justificada pelo represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão, que estabeleceu uma condição mais lêntica de movimentação da água.

Ao comparar os períodos de estiagem de todos os anos considerados, foi possível verificar menores percentuais de resultados acima dos valores orientadores na estiagem de 2019 (visto que a condição do ribeirão era livre, sem área represada). Nas estiagens seguintes, notou-se variação na percentagem de desvios dos valores orientadores da CONAMA 454/12, entretanto, os parâmetros As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni foram persistentes e ultrapassaram a Resolução em quase todos os períodos. Como observado nos mapas geoquímicos (Arcadis, 2020), o Arsênio, Cromo, Cobre, Niquel, Zinco são elementos presentes em rochas de composição máfica/ultramáfica presentes na bacia do Paraopeba, bem como do rejeito que se acumularam na bacia de decantação.

- **Região 1A**

A Região 1A foi a mais afetada pelo rompimento da barragem no rio Paraopeba e nela se depositaram sedimentos com característica química de rejeitos, conforme pode ser verificado no relatório de Fechamento de Ciclo de abril/2021, elaborado pela Arcadis, e os resultados analíticos estão associados com o rejeito e transportes de materiais 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 grupos 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 também pode 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 das barragens B1, B4, B4A.

No primeiro período de estiagem (abril/2019 a setembro/2019), os parâmetros As, Cd, Cr, Pb, Cu, Hg, Ni e Zn ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 da CONAMA 454/12. Destes, As, Pb, Cr e Ni ultrapassaram ainda o nível 2.

No segundo período de estiagem (abril/2020 a setembro/2020), foi possível observar que apenas os parâmetros As e Hg apresentaram elevação dos percentuais de desvios em relação ao nível 1. Dos parâmetros que apresentaram redução, Cd e Zn não apresentaram resultados em desacordo para a estiagem 2020, assim como o parâmetro P. Em relação ao nível 2 da legislação, As, Pb, Cr, Ni apresentaram redução do percentual de desvios em relação à estiagem de 2019.

No período de estiagem de 2021 (abril a setembro), foi observado aumento dos percentuais de resultados acima dos valores orientadores da CONAMA 454/12 para o nível 1 dos parâmetros: As, Cd, Cu, Cr e Hg. Para o nível 2, somente As e Ni apresentaram elevação dos percentuais em relação ao período de estiagem de 2020. Não foram observados desvios para os parâmetros P e Zn.

Para a região 1A, no período de estiagem de 2022 os parâmetros que apresentaram elevação do percentual de desvios para nível 1 da CONAMA 454/12 foram: As (46 desvios – 80,7%), Cd (5 desvios – 8,8%), Cu (15 desvios – 26,3%), Cr (13 desvios – 23,2%) e Ni (18 desvios – 31,6%). Destes, o As e Ni apresentaram elevação para o nível 2. Os parâmetros Pb e Hg apresentaram redução em relação ao período de estiagem 2021 e não apresentaram desvios na estiagem 2022, assim como P e Zn.

Ao realizar a comparação entre os períodos de estiagem de todos os anos considerados, nota-se, em geral, que os mesmos parâmetros apresentaram concentrações acima do nível 1 e com percentuais relativamente próximos, principalmente a partir de 2020.

- **Região 1B**

No período de estiagem de 2019 (abril a setembro), todos os parâmetros (As, Cd, Pb, Cu, Cr, P, Hg, Ni e Zn) apresentaram concentrações acima do nível 1 e os parâmetros As, Cr, P, Hg e Ni para o nível 2 da CONAMA 454/12.

Na estiagem de 2020 (abril a setembro), com a redução das vazões e intensidade das chuvas, houve maior deposição de sedimentos no rio Paraopeba. Em relação aos metais, houve aumento das percentagens de desvio para As, Cr e Ni considerando o nível 1 da CONAMA 454/12 e em relação ao período de estiagem de 2019, enquanto os demais apresentaram redução nos resultados que ultrapassaram os valores orientadores. Para o nível 2, apenas As e Cr apresentaram aumento na percentagem de desvios.

No período de estiagem 2021 (abril a setembro), foi observado elevação do percentual de desvios da CONAMA 454/12 em seu nível 1 para o Cd e Pb, em comparativo com o ciclo de estiagem de 2020. De modo geral, esses metais que apresentaram elevação na percentagem de desvios, não ultrapassaram 18,9% das amostras analisadas. Em contrapartida, a maioria dos parâmetros apresentaram redução na percentagem de desvios (As, Cu, Cr, P, Hg e Ni). Para o nível 2 da CONAMA 454/12, As, Cr e Ni apresentaram desvios. Já o parâmetro Zn, não apresentou desvios nos últimos dois períodos de estiagem (2020 e 2021).

Para o período de estiagem de 2022, os parâmetros que ultrapassaram os valores orientadores da CONAMA 454/12 nível 1 e apresentaram elevação de percentual foram: As (39 desvios – 88,6%) e Cr (30 desvios – 68,2%). Os parâmetros Cd (1 desvio – 2,6%), Pb (1 desvio - 2,3%), Cu (14 desvios – 32,6%), Hg (não houve desvio) e Ni (19 desvios – 44,2%) apresentaram redução da percentagem de desvios. Para o nível 2, somente As (10 desvios – 22,7%), Cr (1 desvio – 2,3%) e Ni apresentaram desvios (3 desvios – 7%).

Em comparação com os períodos de estiagem de 2019, 2020 e 2021, a maioria dos parâmetros apresentaram redução na percentagem de desvios da CONAMA 454/12 na estiagem de 2022.

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 da barragem B1.

- **Região 2A**

A região 2A está entre as regiões pouco afetadas pelo rompimento das barragens B1, 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.

No período de estiagem de 2019 (abril a setembro), os metais que ultrapassaram os valores orientadores nível 1 da CONAMA 454/12 foram As, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni, e destes, apenas o Cu não ultrapassou o valor orientador de nível 2. Os parâmetros Cd, P e Zn não apresentaram desvios em relação ao nível 1 e 2 da legislação para o período.

Na estiagem de 2020, apresentaram redução na percentagem de desvios, em relação à estiagem de 2019 os parâmetros As, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni, sendo que As, Cr e Ni ultrapassaram o nível 2, apesar de apresentarem redução no período. Os parâmetros Cd, P e Zn apresentaram comportamento similar nas duas estiagens (2019/2020) e não apresentaram desvio para a legislação.

Para o terceiro período de estiagem (abril/2021 a setembro/2021), ocorreu elevação do percentual de desvios da legislação CONAMA 454/12 em seu nível 1 somente para o Pb. Apresentaram redução de desvios, os metais As, Cu, Cr e Ni, sendo que nenhum metal apresentou desvio para o nível 2 da legislação. O parâmetro Hg não apresentou desvio para as duas últimas estiagens e os parâmetros Cd, P e Zn apresentaram comportamento similar em todos os períodos de estiagem analisados, e não ultrapassaram os valores da legislação. Em geral, foi possível observar atenuação das concentrações em relação aos períodos pretéritos.

No período de estiagem de 2022 (abril a setembro), na Região 2A foi verificado comportamento de elevação do percentual de desvios da legislação nível 1 para: Cu (3 desvios – 5,3%), Cr (16 desvios – 28,1%) e Ni (9 desvios – 5,8%), enquanto os parâmetros As (18 desvios – 31,6%) e Pb (nenhum desvio) apresentaram redução em relação ao período de estiagem anterior. Para o nível 2, somente o As apresentou uma amostra acima do valor orientador. Os parâmetros

Cd, P, Hg e Zn não apresentaram concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para o período.

Ao avaliar os períodos de estiagem de 2019 a 2022, foi possível verificar que os parâmetros Cd, P e Zn não apresentaram concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 em nenhum período de estiagem. Já o Hg apresentou concentração em desacordo somente na estiagem de 2019. Para os demais parâmetros, nota-se, em geral, uma redução dos percentuais de desvios para os níveis 1 e 2 em relação aos períodos anteriores.

- **Região 2B**

As concentrações dos elementos na Região 2B possuem relação com os sedimentos naturais da bacia provenientes de intemperismos de rochas da Formação Serra de Santa Helena, composta por minerais e argilominerais ricos em Alumínio. Ademais, os pontos da Região 2B estão inseridos no reservatório da UHE de Retiro Baixo, em ambiente intermediário e propício à dissipação e deposição de materiais carreados de montante, servindo como área de acúmulo de materiais sedimentáveis provenientes da bacia.

No período de estiagem de 2019 (abril a setembro), As, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni apresentaram desvios para o nível 1 da CONAMA 454/12. Destes, apenas As, Pb, Cr e Ni ultrapassaram o nível 2 da legislação.

Na estiagem de 2020 (abril a setembro), houve aumento de percentual de desvios para o nível 1, dos parâmetros As, Pb, Cu, Cr e Ni, sendo que os metais As, Cr e Ni também apresentaram desvios para o nível 2. Hg apresentou redução e não ultrapassou os valores orientadores no período, comportamento similar ao dos parâmetros Cd, P e Zn, que também não apresentaram desvio para a legislação.

Para o período de estiagem de 2021 (abril a setembro), foi possível observar que apenas os metais As e Hg apresentaram aumento nos percentuais de desvios da legislação em seu nível 1, em relação ao período de estiagem anterior. Os parâmetros Pb, Cu e Ni apresentaram redução na percentagem de desvios; Cr manteve o comportamento observado na estiagem de 2020, ultrapassando o nível 1 em 100% das amostras, enquanto Cd, P e Zn não apresentaram desvios. Para o nível 2, somente As e Cr apresentaram desvios em relação a legislação, porém, apresentaram redução na percentagem de desvios.

Na Região 2B, ao longo do período de estiagem 2022, foi verificado que para o nível 1 da CONAMA 454/12 apenas os metais Cu (38 desvios – 77,6%) e Ni (42 desvios – 85,7%) apresentaram incremento das percentagens de desvio em relação ao período de estiagem anterior. O parâmetro As, manteve o comportamento do período anterior, ultrapassando o nível 1 em 100% das amostras, enquanto Pb (3 desvios – 6,1%), Cr (47 desvios – 95,9%) e Hg (não houve desvio) apresentaram redução nas percentagens de desvio. Para o nível 2, As (4 desvios – 8,2%), Cr (3 desvios – 6,1%) e Ni (1 desvio – 2%) apresentaram elevação na percentagem de desvios. Os parâmetros Cd, P e Zn não apresentaram desvios em nenhum período de estiagem analisado nesta região.

O reservatório da UHE Retiro Baixo tem operado como um decantador e acumulador de sedimentos da bacia do rio Paraopeba e, na estiagem, com a redução da velocidade e vazão do rio, os metais presentes na bacia tendem a se dissiparem e depositarem no leito do reservatório. Ao se comparar os períodos de estiagem de todos os anos considerados (2019 a 2022), observa-se que ao longo do monitoramento os mesmos parâmetros permanecem ultrapassando os valores orientadores, e que estes parâmetros (As, Pb, Cu, Cr e Ni) apresentaram redução nas percentagens de desvio ou percentagens próximas.

- **Região 2C**

A Região 2C localizada a jusante da UHE Retiro Baixo, também, é envolvida por contribuições de rochas intemperizadas do Grupo Bambuí, além de sedimentos quaternários e terciários. No período de estiagem de 2019 (abril a setembro), os parâmetros em desacordo com o nível 1 da CONAMA 454/12 foram As, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn. Nenhum destes parâmetros ultrapassou o nível 2 da legislação.

No segundo período de estiagem (abril/2020 a setembro/2020), os metais As, Cd e Cr apresentaram aumento na percentagem de desvios em relação ao nível 1. Porém, em relação ao nível 2, nenhum parâmetro apresentou desvio para a legislação. Os parâmetros Pb, Cu, Ni e Zn apresentaram redução nas concentrações, e não ultrapassaram os valores orientadores em nenhum nível, assim como o ametal P.

Para a estiagem de 2021 (abril a setembro) em relação aos valores orientadores em seu nível 1, apenas os metais As e Cr apresentaram elevação nas percentagens de desvio e foram os únicos parâmetros que ultrapassaram a legislação nesta região, neste período. Os metais Cd e Zn apresentaram redução em relação ao período de estiagem anterior, e não apresentaram desvios. Os parâmetros Pb, Cu, P, Hg e Ni não ultrapassaram a legislação, assim como observado na estiagem de 2020.

No período de estiagem de 2022 (abril a setembro), foi possível observar que os parâmetros As (10 desvios – 90,9%), Cr (9 desvios – 81,8%) e Ni (3 desvios – 27,3%) apresentaram elevação nos percentuais de desvios em relação ao nível 1 da CONAMA 454/12. Destes, apenas o As (1 desvio – 9,1%) apresentou uma amostra em desacordo com o nível 2 da legislação. Os demais parâmetros não apresentaram desvio para a legislação.

Comparando-se os períodos de estiagem pretéritos (2019 a 2021) com o período de estiagem de 2022, foi possível observar que os parâmetros As e Cr permanecem acima dos valores orientadores de nível 1 em todos os períodos apresentados neste relatório e apresentaram aumento. O parâmetro Cd apresentou desvio pontualmente na estiagem de 2020, enquanto os demais, apresentaram redução ou não ficaram acima dos valores orientadores ao se comparar as estiagens de 2019 a 2021.

14.4. Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temático

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 setembro/2022, enquanto os mapas apresentados ao longo deste texto mostram o consolidado da evolução dos metais ao longo dos períodos de estiagem/2019, estiagem//2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. 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 no CONAMA 454/12.

Manganês

A **Figura 14.4-1** indica o consolidado dos períodos de estiagem/2019 até estiagem/2022. Verificou-se que, após o rompimento da Barragem B1, 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, 1B, mais próximas à fonte dos rejeitos e 2A mais afastada em relação à fonte foram as que acumularam as maiores concentrações no período de estiagem/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, 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. Nas regiões 2B e 2C não se perceberam aumento da concentração do Manganês nos sedimentos, sendo as concentrações identificadas como de sedimentos naturais. Enquanto na maioria dos tributários, as concentrações se mantiveram com característica de sedimentos naturais.

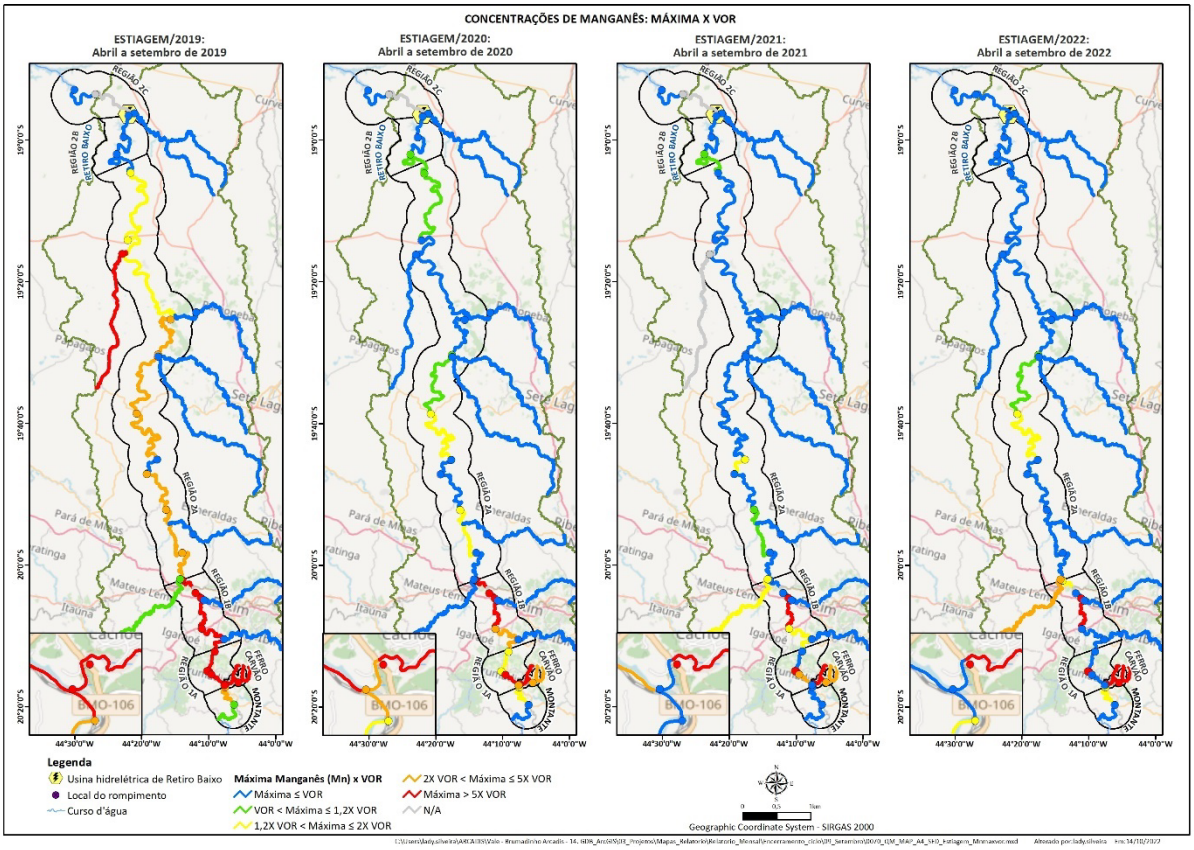
Na estiagem/2020, de forma geral, observou-se que as concentrações se atenuaram em relação à referência de Vicq (2015) nas regiões 1A até 2A, sendo que as maiores concentrações ficaram persistentes na região fonte, do ribeirão Ferro-Carvão, e em seguida a região 1B, com valores mais que 5 vezes acima da referência de Vicq (2015). Na região 2A, houve melhoria das condições em relação ao período de estiagem anterior, com concentrações elevadas de forma localizada nas proximidades do PT-53, PT-17 e PT-49, 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 17). Ainda sobre as elevações verificadas, observa-se uma grande transição da situação do tributário da região 2A, passando de concentrações 5 vezes acima da referência (estiagem/2019) para concentrações inferiores ao VOR (estiagem/2020), o que pode estar relacionado as atividades de uso e ocupação do solo ocorrentes no período supracitado.

No período de estiagem/2021, as concentrações de Manganês no rio Paraopeba permaneceram mais que 5 vezes acima do valor de Vicq (2015) na região fonte (ribeirão Ferro-Carvão) e, pontualmente, nas regiões 1A e 1B. Entretanto, nota-se comportamento próximo ou indicativo de menores concentrações no período de estiagem/2021 em relação ao período de estiagem/2020 em toda extensão do monitoramento

Para o último período, estiagem/2022, verifica-se persistência de concentrações 5 vezes maiores que a referência Vicq (2015) nas mesmas localidades do período anterior, Ferro Carvão e pontualmente nas regiões 1A e 1B. Para as regiões à jusante dessa, nota-se um comportamento predominante de redução das concentrações de Manganês, com exceção de alguns pontos da Região 2A, com concentrações elevadas de forma localizada nas proximidades do PT-53, PT-17 e PT-49, 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.

Ao se avaliar a distribuição do Manganês, compreendendo os períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022 (Figura 14.4-1), 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, com exceção de alguns pontos na região 2A, as demais localidades tiveram redução desse metal. Ademais, percebeu-se que dentre os tributários houve somente concentrações 1,2 vezes acima de Vicq (2015) no rio Manso (TT-03) na região 1B em 2019 e em 2021 e em 2022, além do rio Pardo (TT-08) em 2019 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 estiagem monitorados.

Figura 14.4-1: Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Ferro

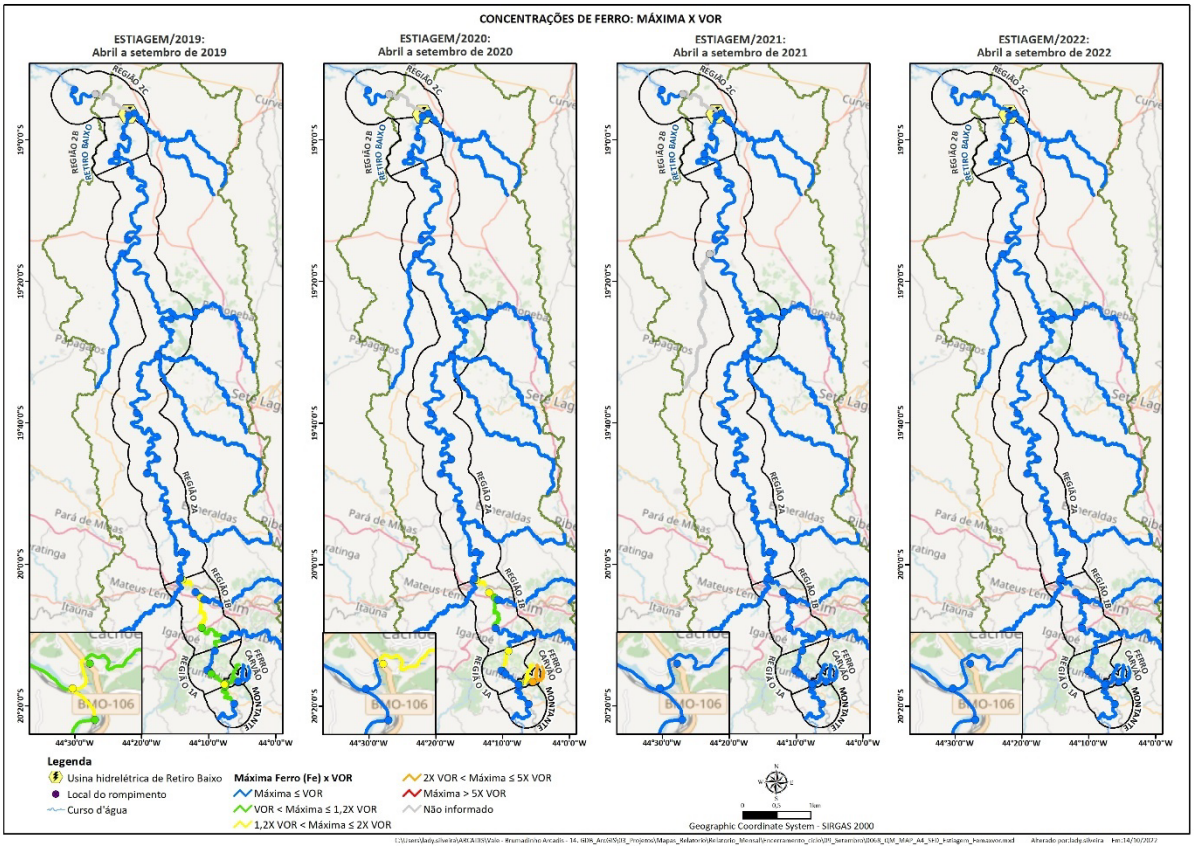
O Ferro**,** principal constituinte do rejeito, tem distribuição em concentrações elevadas em toda a bacia do rio Paraopeba. O Igam adota a referência orientadora para Ferro de 281.000 mg/kg proposta por Vicq (2015). No período de estiagem/2019, constatou-se que concentrações acima dessa referência foram registradas, predominantemente desde a região de Montante até a Região 1B e tais concentrações permaneceram entre 1,2 e 2 vezes maiores que o valor proposto por Vicq (2015), enquanto nas demais regiões, os valores das concentrações permaneceram abaixo da referência adotada.

No período de estiagem/2020, as elevadas concentrações ora identificadas no período anterior foram se atenuando até se estabelecerem com valores menores ou iguais à referência do Igam e Vicq (2015) em toda a extensão do rio Paraopeba. Contudo, a região Ferro–Carvão ainda apresentou concentrações de Ferro entre 2 a 5 vezes o valor de Vicq (2015). Nas demais regiões as concentrações se mantiveram abaixo da referência.

Nos períodos de estiagem/2021 e estiagem/2022 constatou-se redução das concentrações de Ferro em toda a extensão monitorada no rio Paraopeba, em todos os casos inferiores à referência de Vicq (2015).

De modo geral, ao se avaliar a distribuição do Ferro, compreendendo os períodos de estiagem de 2019, 2020 e 2021 (**Figura 14.4-2**), as concentrações demonstraram redução ao longo da do tempo e espaço. Observa-se ainda que em 2019 e 2020 havia disposição espacial localizada nas regiões Ferro-Carvão, região 1A e 1B, e, nas estiagens de 2021 e 2022 essa disposição espacial se reduziu, não havendo variações espaciais de Ferro ao longo de nenhuma região, incluindo os tributários.

Figura 14.4-2: Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Alumínio

O Alumínio, que é um elemento abundante na bacia do rio Paraopeba, não o é no rejeito da Barragem B1, B4, B4A conforme já identificado por Geoenviron (2019) e Arcadis (2020, 2021) na avaliação da qualidade dos sedimentos. Ao se avaliar a distribuição dessa substância ao longo do rio, constatou-se que, nas regiões do Ferro-Carvão, 1A, 1B e até aproximadamente o ponto PT-17, na Região 2A, as concentrações de alumínio foram menores ou iguais ao valor de referência de 45.300 mg/kg proposto por Vicq (2015) e adotado pelo Igam no primeiro período de estiagem de 2019, enquanto nas regiões montante, parte da região 2A (a partir de PT-18, principalmente) e 2B, as concentrações foram entre 1,2 (Montante) a 2 vezes o valor proposto por Vicq (2015) nas regiões 2A e 2B.

Na estiagem de 2020, as concentrações foram mais atenuadas nas regiões 1A e 2A, enquanto nas regiões Montante, Ferro-Carvão e 2B, os valores de concentração de Alumínio foram 1,2 (Montante), até 2 vezes (a partir do PT-18) e até 5 vezes na região 2B. A ocorrência de Alumínio nesta região 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 granitóides do Complexo Belo Horizonte e de metassedimentos do Grupo Bambuí nestas regiões do rio Paraopeba. Pontualmente, na Região 1B, as concentrações máximas de Alumínio foram mais que 5 vezes superiores a referência de Vicq (2015).

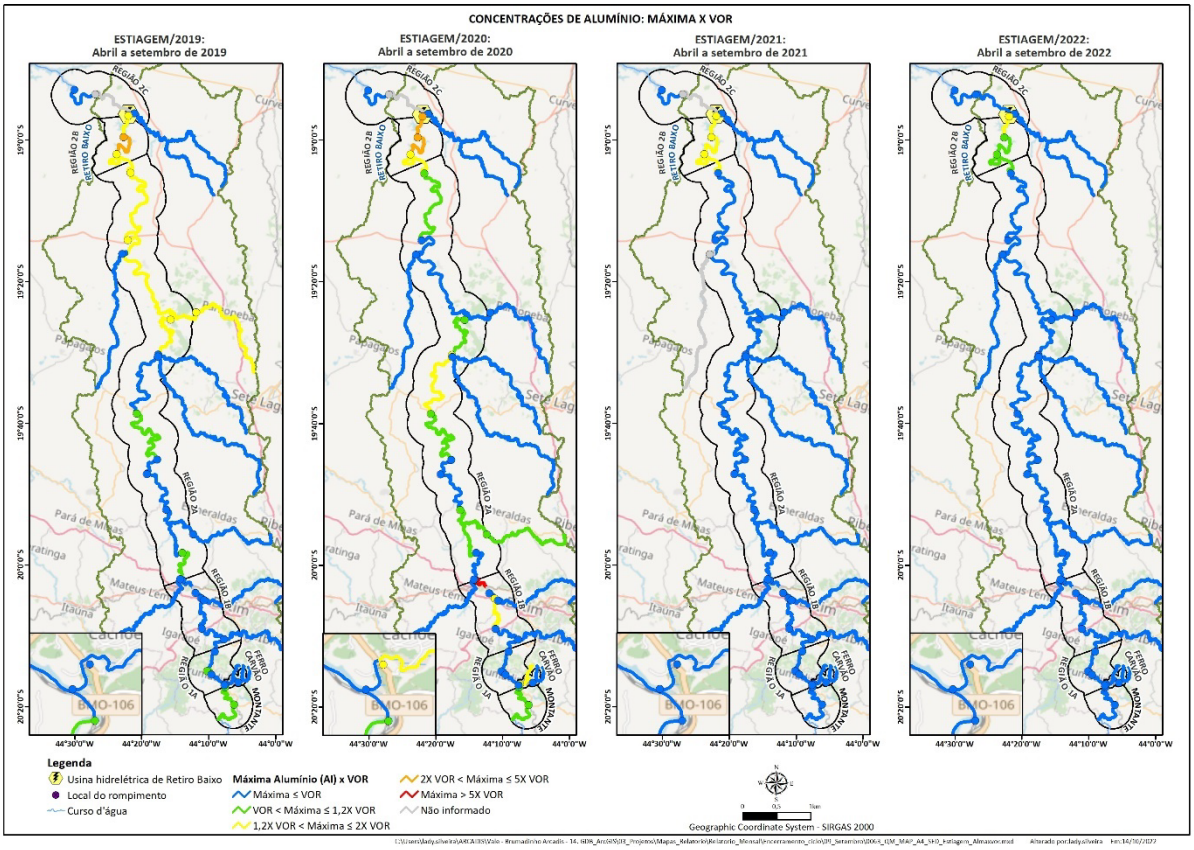
Comparando-se os resultados das concentrações máximas de Alumínio na estiagem/2020 com a estiagem/2019, percebeu-se relativa proximidade, exceto pelo ribeirão Ferro Carvão, que teve maior concentração na estiagem de 2020 em função do represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão, que reduziu a velocidade da água e possibilitou a deposição de sedimentos finos em suspenção no PT-12.

No período estiagem/2021, as concentrações de Alumínio ao longo da bacia do rio Paraopeba foram mais atenuadas e com exceção dos sedimentos depositados no reservatório da UHE Retiro Baixo que teve concentrações entre 1,2 e 2 vezes o valor proposto por Vicq (2015), as demais regiões ficaram com valores menores que esta referência, mostrando redução nas concentrações no tempo e no espaço.

No período de estiagem/2022 essa condição se manteve, com concentrações de Alumínio abaixo do valor proposto por Vicq (2015) ao longo das regiões, com exceção da Região 2B para a qual as concentrações máximas foram equivalentes a até 2 vezes o valor de referência.

Ao se avaliar o Alumínio nos mapas temáticos nas estiagens de 2019, 2020, 2021 e 22 (**Figura 14.4-3**) 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, que a interferência do rejeito da barragem B1 na bacia foi menor e 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 ricas em 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 nos dois períodos de estiagem anteriores a 2021, havia disposição espacial de Al acima do proposto por Vicq (2015) em todas as regiões, com exceção da região 2C, e, a partir da estiagem/2021 essa disposição espacial se reduziu, se concentrando na região 2B.

Figura 14.4-3: Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Níquel

Na **Figura 14.4-4**, as concentrações de Níquel estão apresentadas por períodos sazonais de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. Notadamente, com o rompimento da barragem, percebeu-se um incremento de níquel em termos de variação de concentração até o PT-17. Tanto primeiro período chuvoso de 2019 e como o da estiagem de 2019 foram o que mais tiveram aumento nas concentrações em relação a Resolução CONAMA 454/12 ao longo da bacia até a Região 2C, incluindo os tributários.

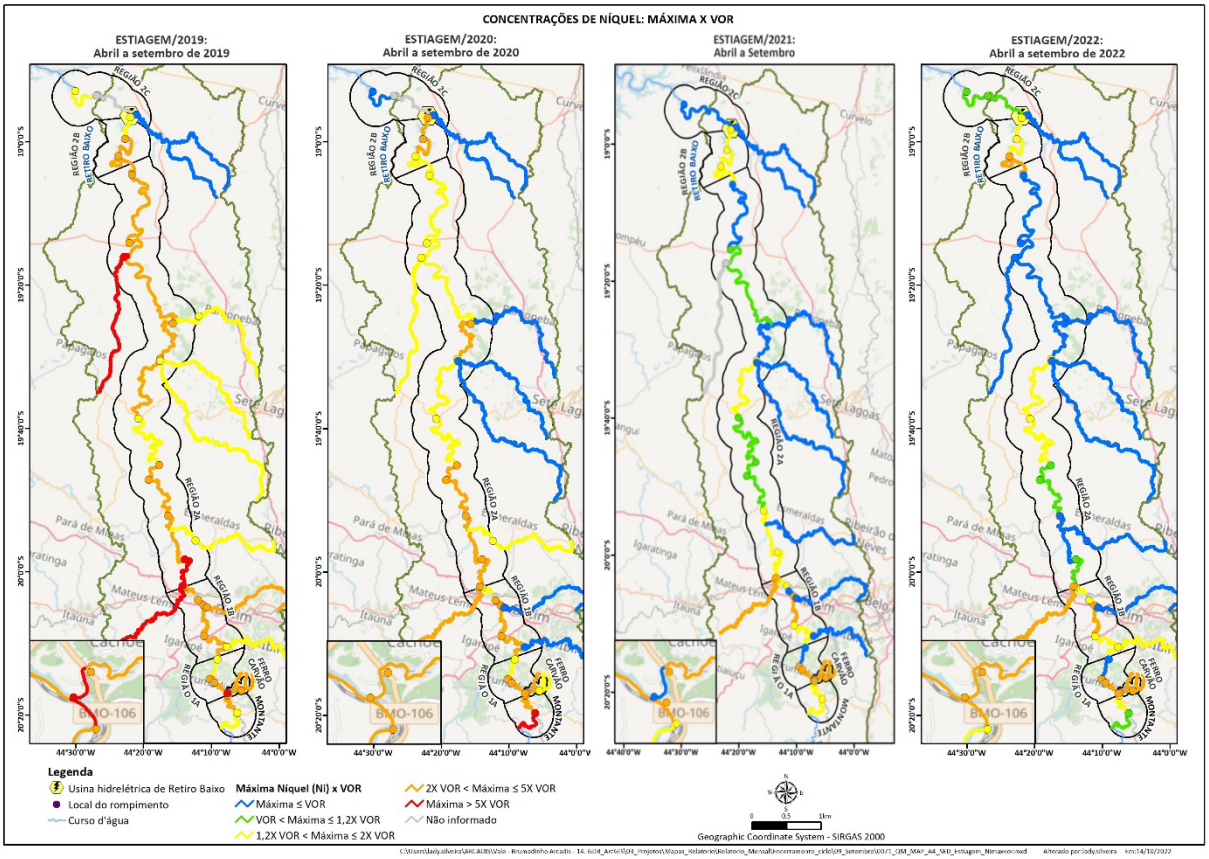
Na estiagem/2020 mesmo após as intensas chuvas de 2019/2020, as concentrações de Níquel ainda ficaram cerca de 5 vezes acima do valor de nível 1 da CONAMA 454/12 na região Montante, mantiveram-se entre 2 e 5 vezes maiores que o nível 1 da CONAMA 454/12 entre as regiões Ferro-Carvão, 1B e 2A (até PT-54) e se reduziram para 1,2 a até 5 vezes acima do VOR até a região 2B e na 2C, os valores de Níquel se mantiveram abaixo do nível 1.

Já na estiagem/2021, as concentrações de Níquel em comparação com as estiagens de 2019 e 2020 **(Figura 15.4-4)** foram reduzidas nas regiões Montante, 2A e 2B para 1,2 vezes a 2 vezes o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, enquanto na região Ferro-Carvão (PT-12, área com água estancada), região 1A e região 1B, mantiveram as concentrações entre 2 a 5 vezes

este nível, mostrando que apesar de um cenário de chuvas mais atenuado em 2020/2021 em comparação com 2019/2020, os sedimentos, apesar das reduções, continuaram a ter materiais com concentrações mais elevadas que a CONAMA 454/12, nível 1.

No último período de estiagem, estiagem/2022, o panorama geral é manutenção das concentrações máximas entre as regiões Ferro-Carvão até a 1B em relação a estiagem de 2021, redução na região Montante ou redução das concentrações de Níquel entre PT-17 e PT-49 na região 2A, e aumento na porção inicial da região 2B, possivelmente, reflexo do transporte e acúmulo de sedimentos provenientes do intemperismo de rochas máficas/ultramáficas do Grupo Nova Lima e solos de montante e da região 2C que voltaram a apresentar concentrações mais altas, entre 2 e 5 vezes o valor de referência e até 1,2 vezes o valor de referência, respectivamente.

Figura 14.4-4: Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Cobre

Na **Figura 14.4-4**, as concentrações de Cobre estão apresentadas por períodos sazonais de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. Com rompimento da barragem, percebeu-se um incremento de Cobre no rio Paraopeba na estiagem/2019, seja por causa das contribuições provenientes do rejeito da barragem B1, B4, B4A em que as concentrações no ribeirão Ferro-Carvão 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.

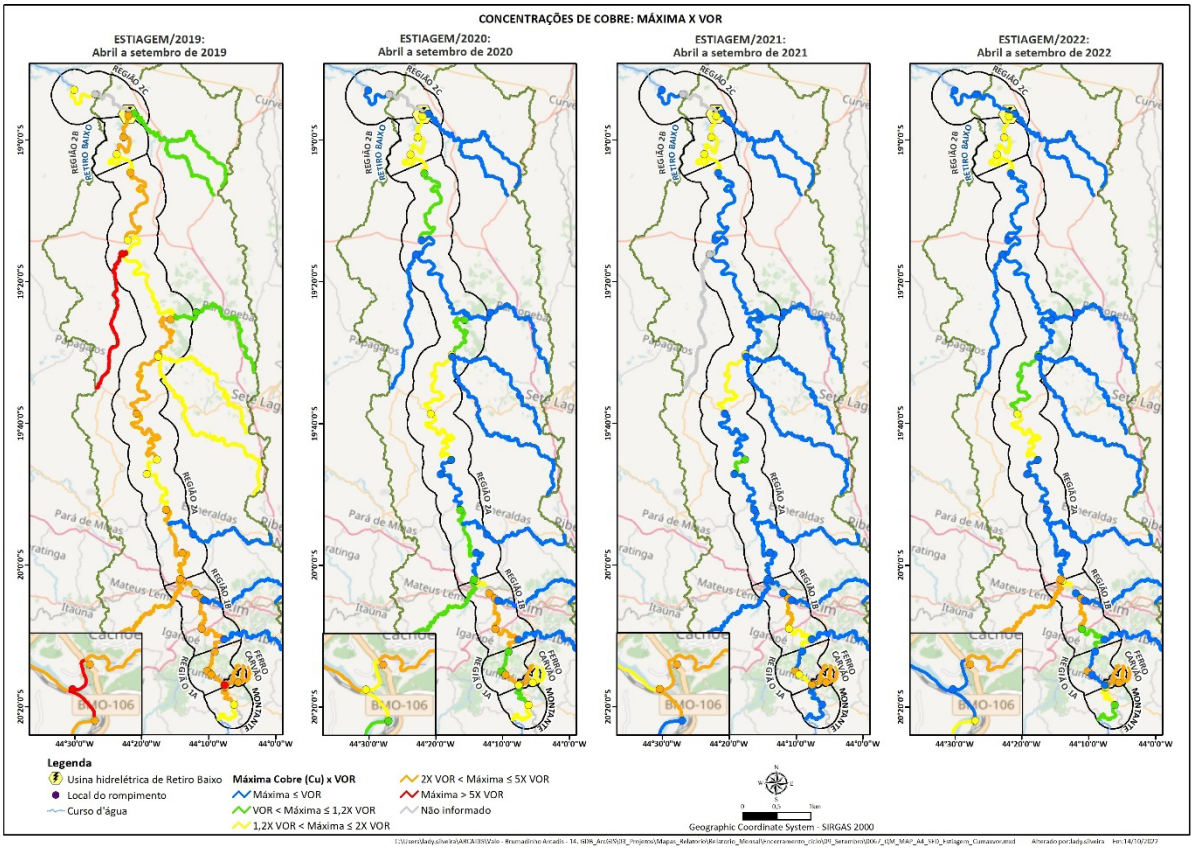
Na estiagem/2020, as concentrações continuaram entre 2 e 5 vezes maiores em relação ao valor orientador do Cobre nas regiões do Ferro-Carvão e 1B, enquanto nas demais regiões as concentrações foram reduzidas para 1,2 vezes a 2 vezes a Resolução CONAMA 454/12.

Na estiagem/2021 notou-se redução das concentrações deste metal ao longo de todas as regiões monitoradas. Em relação ao período de estiagem anterior, as concentrações de Cobre foram um pouco maiores apenas no Ferro-Carvão.

Por fim, na estiagem/2022 o comportamento se manteve próximo do período anterior, e, em geral, com maiores condições de afastamento do valor de referência da Resolução CONAMA 454/12 apenas na Região de Montante, com concentrações variando de 1,2 a 2 vezes o VOR 1.

Ao se avaliar a distribuição do Cobre, compreendendo os períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 (**Figura 14.4-5**), as concentrações demonstram redução ao longo da evolução temporal e da espacial. Nos dois anos anteriores, em especial na estiagem/2019, havia disposição espacial de Cu acima da Resolução CONAMA 454/12 em todas as regiões, ao passo que, em 2021, essa disposição se reduziu, ocupando as regiões do mapa com concentrações acima do VOR em até 2 vezes em alguns trechos da região 2A (PT-17 a PT-49) e 2B e em até 5 vezes na região do Ferro-Carvão, 1A e 1B. Na região a montante e na maior parte da região 2A, não foram observadas concentrações em desacordo com a legislação. Na estiagem/2022 essa condição se manteve, com exceção da região de Montante, conforme mencionado.

Figura 14.4-5: Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Chumbo

No período de estiagem/2019, as concentrações de Chumbo (**Figura 14.4-6**) ficaram maiores que o valor orientador da CONAMA 454/12 em vários trechos das regiões de montante até a Região 2C, sendo as maiores concentrações identificadas nas regiões 1A, mais que 5 vezes acima do VOR 1, e a jusante do PT-17, entre 2 e 5 vezes o VOR 1.

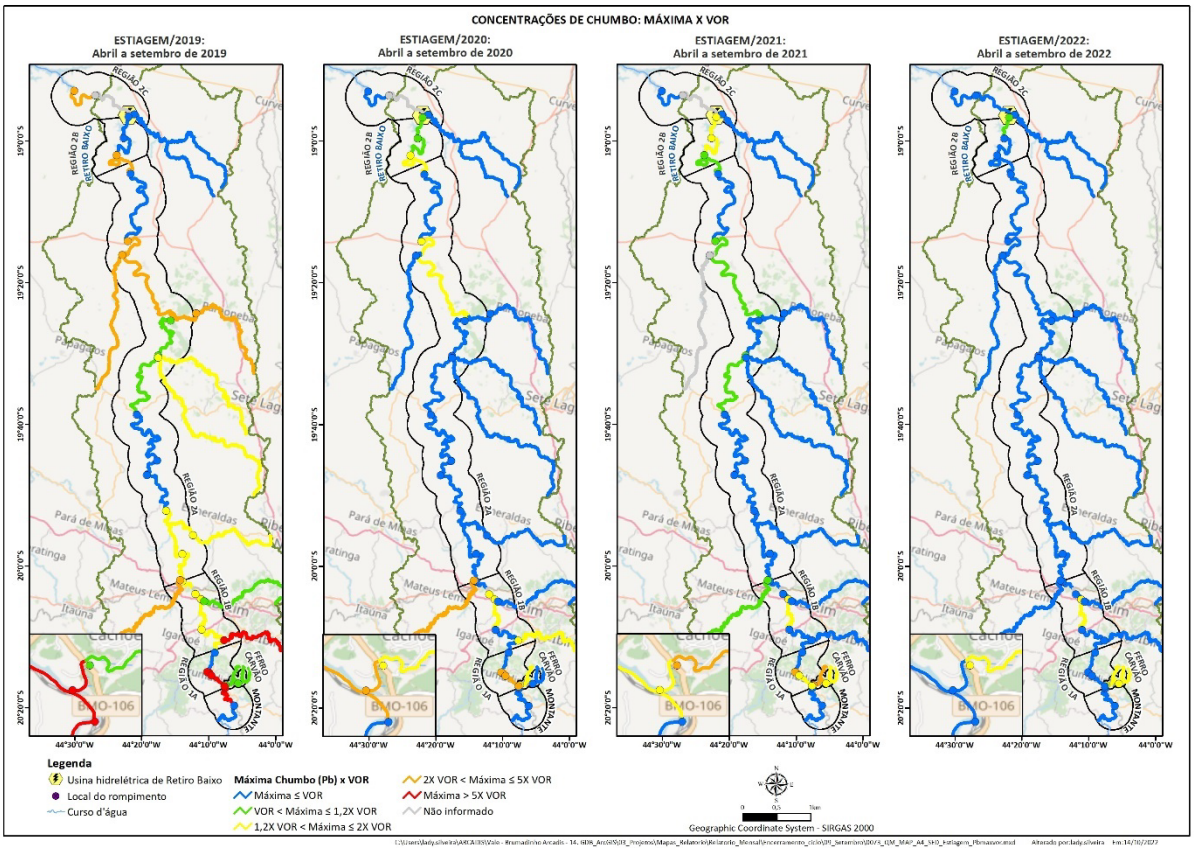
Na estiagem/2020, os aumentos em relação ao valor orientador do CONAMA 454/12 ficaram limitados predominantemente em trecho da região do Ferro-Carvão, no reservatório da UHE de Retiro Baixo (2B) e, ocasionalmente, na região 1B. Ao se comparar os dados da estiagem de 2020 com a de 2019, percebeu-se que o Chumbo ocorreu de forma mais segmentada ao longo de toda bacia em 2019, ao passo que em 2020, ele ficou mais atenuado e restrito às regiões do Ferro-Carvão e 2B.

A distribuição espacial do Chumbo na estiagem/2021 mostrou afastamentos em relação ao VOR 1 na região de Retiro Baixo e na porção central da Região 2 A, mas em proporções menores na região 2A se comparado aos períodos de estiagem anteriores. Situação semelhante ocorreu nas regiões 1A e 1B.

Na estiagem/2022, as concentrações de Chumbo apresentaram-se mais reduzidas ao longo de toda a extensão do monitoramento, com ocorrência de resultados máximo acima do VOR1 da CONAMA 454/12 apenas de forma pontual nas regiões do ribeirão Ferro-Carvão e 1B (até 2 vezes) e na porção final da região 2B (até 1,2 vezes), possivelmente por conta do acúmulo de sedimentos finos nessas localidades e que continham chumbo.

O Chumbo ocorreu em baixas concentrações no rejeito, porém está presente neste 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, principalmente, nas proximidades do PT-17, PT-19, reservatório da UHE Retiro Baixo e na Região 2C, que já apresentava Chumbo nos sedimentos mesmo antes do rompimento da barragem B1.

Figura 14.4-6: Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Arsênio

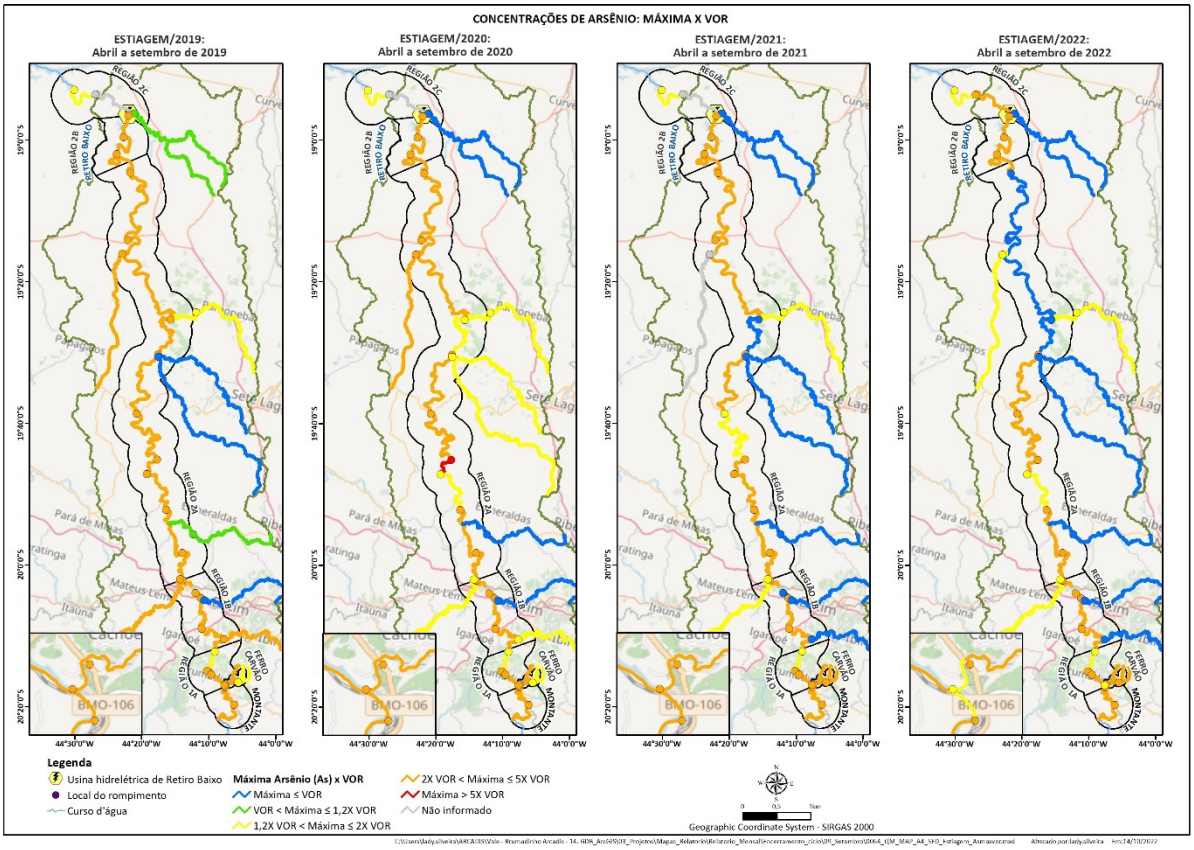
Na **Figura 14.4-7** são apresentadas as variações de Arsênio nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022. As concentrações de Arsênio na estiagem/2019 ficaram entre 2 a 5 vezes maiores que os valores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, com permanência desde a região Montante até a 2B, enquanto na 2C, as concentrações foram até 2 vezes maiores que a legislação neste período. Os tributários do rio Paraopeba também apresentaram concentrações entre 1,2 até 2 vezes o valor da legislação.

Na estiagem/2020, o Arsênio apresentou concentrações máximas com comportamento semelhante ao da estiagem/2019 nas regiões Montante, 1A, 1B, 2B, 2C e trechos da 2A, com exceção de ocorrência pontual mais que 5 vezes superiores ao VOR 1 nesta última região. No período de estiagem/2021, as concentrações máximas foram próximas as de 2020, à exceção dos tributários, que em sua maioria apresentaram concentrações menores que da legislação e menores que no período anterior.

Já no último período de estiagem, estiagem/2022, o padrão espacial das concentrações máximas de Arsênio se manteve, destacando-se, contudo, o final da região 2A para a qual houve melhoria com concentrações inferiores ao VOR 1 da Resolução CONAMA 454/12.

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. Na região do ribeirão Ferro-Carvão, o aumento do Arsênio 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.

Figura 14.4-7: Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



Cromo

Os mapas de distribuição espacial do Cromo por períodos de estiagem, 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, estão na **Figura 14.4-8**. As maiores concentrações de Cromo foram observadas entre janeiro/2019 e abril/2019 nas regiões 2A, 2B e 2C. Na estiagem/2019, a concentração de Cromo aumentou nessas regiões, com destaque para o início da região 2A com concentrações mais que cinco vezes acima o VOR, além de detecções nas regiões 1A e 1B até 5 vezes acima da referência da Resolução CONAMA 454/12.

Comparando-se a estiagem/2020 com a de 2019, percebeu-se que as concentrações se atenuaram entre as regiões 1A, e Ferro-Carvão; mantiveram-se semelhantes em Montante, 1B, 2B, 2C, enquanto na região 2A, o trecho entre o PT-53 e PT-54 teve aumento de mais de 5 vezes a legislação, 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. No restante da região 2A, as concentrações máximas oscilaram entre 2 vezes e de 2 a 5 vezes a legislação, ou seja, foram mais reduzidas que no período anterior.

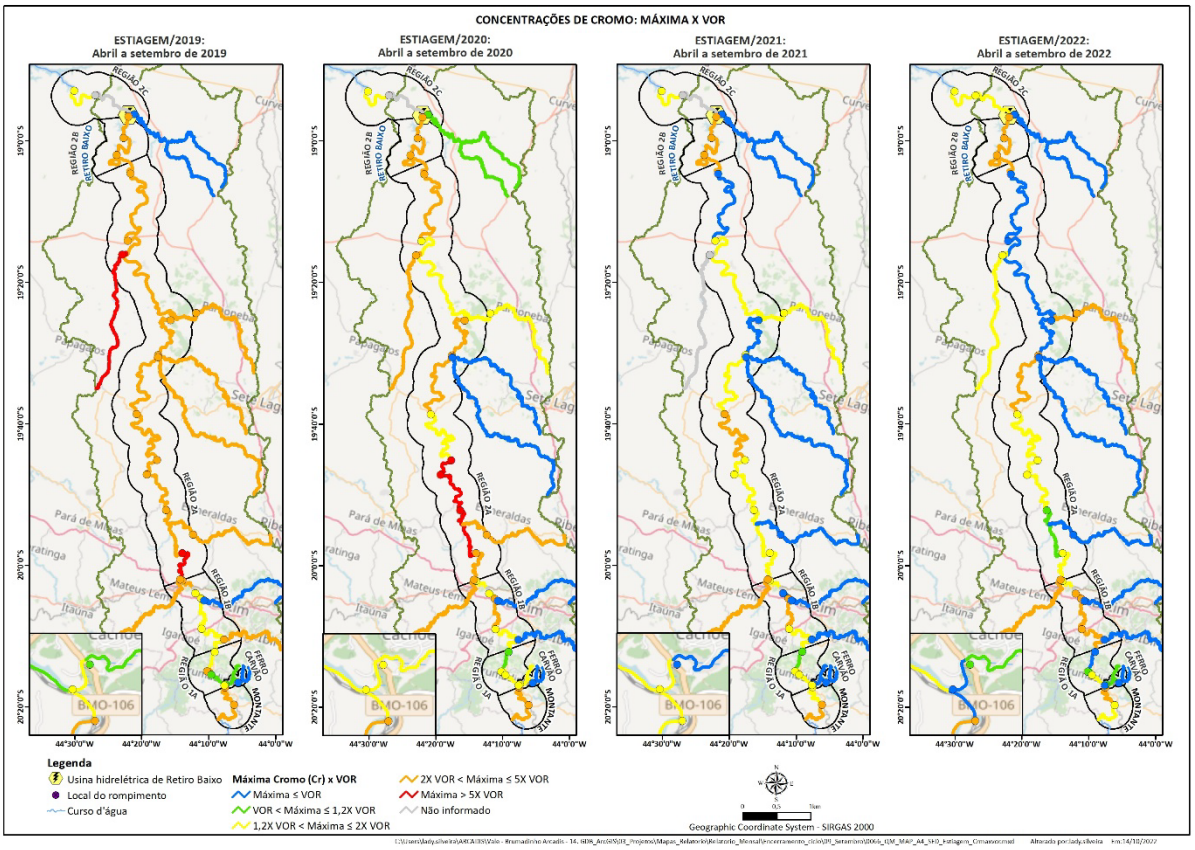
Na estiagem/2021 observou-se a distribuição espacial do Cromo na bacia acima do nível 1 em todas as regiões, sendo que nas regiões Montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2B e 2C as concentrações mantiveram comportamento similar a estiagem/2020. Já na região 2A, constataram-se redução das concentrações principalmente na porção mais distal com valores abaixo da legislação.

No período de estiagem/2022 o comportamento se manteve próximo do período de estiagem anterior, estiagem/2021, porém com indicativo de redução das concentrações máximas de Cromo principalmente ao longo da região 2A, com maior extensão de resultados abaixo do VOR da CONAMA 454/2012.

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, 2020). Ele não é constituinte do rejeito da barragem B1 como pode ser visto nas concentrações de rejeito observadas por Geoenviron (2019) e, a constar pelos resultados analíticos, os rejeitos da barragem B1, B4, B4A não corroboraram para intensificar as concentrações de Cromo que já existiam na bacia.

A distribuição espacial do Cromo nas estiagens de 2019, 2020, 2021 e 2022 (**Figura 14.4-8**), também corrobora com o comportamento observado e que demonstra características da própria bacia, uma vez que as concentrações, mesmo atenuadas, permanecem acima da legislação em toda bacia, principalmente nos tributários, com exceção da região Ferro-Carvão.

Figura 14.4-8: Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



1,1 % em outros pontos, mas sem persistência. Dessas amostras que apresentaram valores acima do 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).

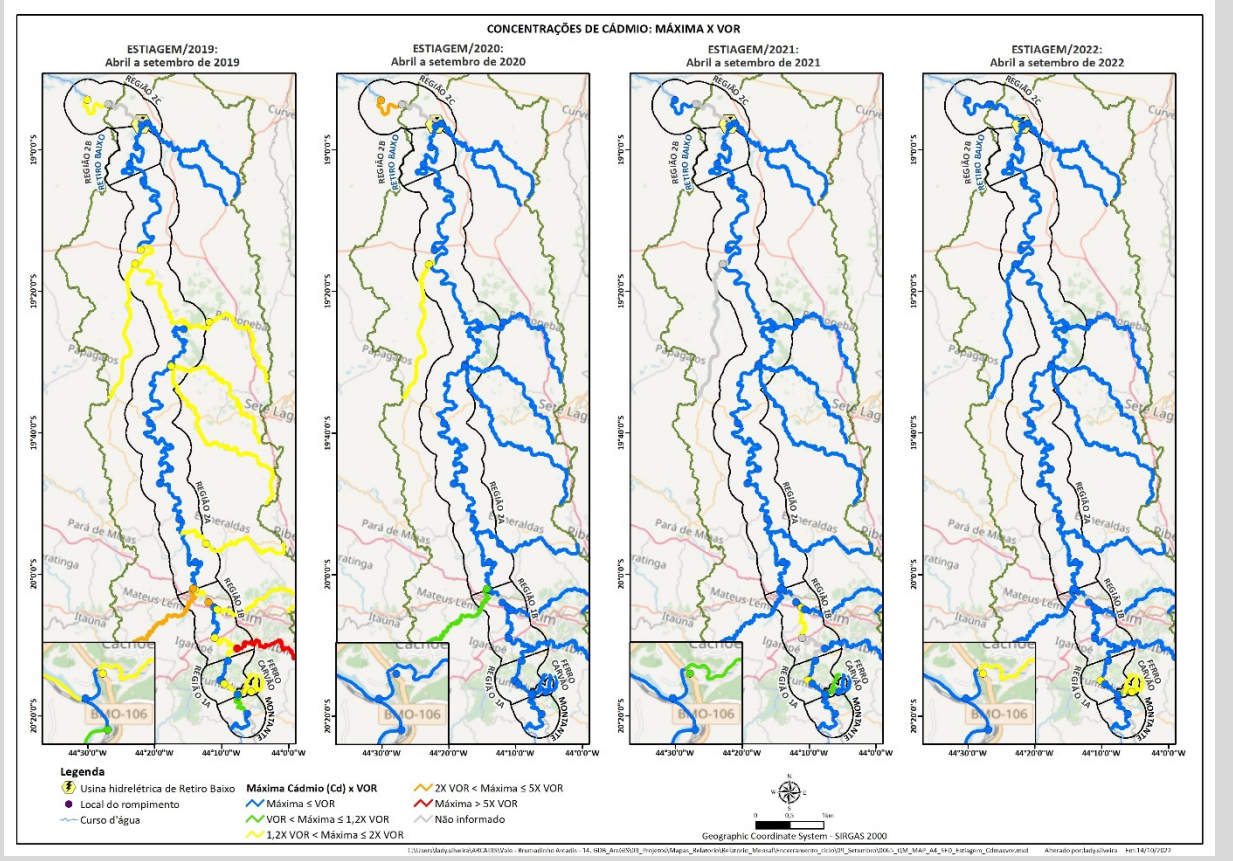
Em síntese, na avaliação dos resultados de cádmio para os períodos sazonais desde o início do monitoramento, constatou-se que sua ocorrência foi predominantemente abaixo do valor de referência de nível 1, do CONAMA 454 (0,6 mg/kg) em todas as regiões (Arcadis, 2022b). Isso posto constatou-se que os rejeitos da barragem B1 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 estiagem/2019 (**Figura 14.4-9**) foram constatados afastamentos em relação a legislação em todas as regiões, com exceção da região 2B, em geral, com concentrações até 2 vezes acima da legislação na bacia do rio Paraopeba, enquanto nos tributários as concentrações se mantiveram até 5 vezes o valor de referência.

Na estiagem/2020, observa-se redução de Cádmio ao longo de toda a extensão do monitoramento, com valores acima do VOR da CONAMA 454/2012 apenas nos tributários e pontualmente na Região 2C, onde a ocorrência de Cádmio está relacionada a alguma contribuição de uso e ocupação de solo locais.

Na estiagem/2021, as concentrações de Cádmio se mantêm mais homogêneas ao longo de toda bacia, incluindo os tributários, com desvio pontual apenas nas regiões Ferro-Carvão, 1A e 1B. Na estiagem/2022, do mesmo modo, as concentrações permanecem reduzidas e com distribuição homogênea, com desvio pontual apenas na região do ribeirão Ferro-Carvão e 1A.

Figura 14.4-9 Evolução do Cádmio no sedimento nos períodos de estiagem/2019, estiagem/2020, estiagem/2021 e estiagem/2022.



14.5. Considerações

Para a comparação dos percentuais de desvios em relação aos valores orientadores, no período de estiagem de 2022, 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. Na estiagem em análise, manganês e alumínio ultrapassaram os valores orientadores Vicq (2015) e arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, fósforo e níquel ultrapassaram os valores orientadores de nível 1 (VOR 1) da CONAMA 454/12. Em relação ao valor orientador do nível 2 do CONAMA 454/12, ocorreram desvios para arsênio nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2B e 2C; cromo nas regiões 1B e 2B; níquel nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B.

Os pontos localizados entre PT-11 (Ferro-Carvão) e Região 1B estão localizados nas regiões mais afetadas pelos rejeitos provenientes da barragem B1, sendo que é neste intervalo que ocorreram os maiores aumentos de manganês no período. 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. Ademais, esses pontos, no reservatório da UHE Retiro Baixo, estão em ambiente propício à deposição de materiais carreados 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.

No comparativo entre as estiagens de 2019, 2020, 2021 e 2022, foi observado que os parâmetros que apresentaram elevação nos percentuais em relação ao nível 1 para a estiagem 2022 foram: Arsênio (Região Montante, 1A, 1B e 2C), Cádmio (Região Ferro-Carvão, 1A e 1B), Cobre (Região Montante, 1A, 2A e 2B), Cromo (Região Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2C), Fósforo (Região Ferro-Carvão), Níquel (Região 1A, 2A, 2B e 2C). Para o nível 2, apresentaram elevação o Arsênio (Região 1A, 1B, 2A, 2B, 2C), Cromo (Região 1B e 2B), Fósforo (Região Ferro-Carvão), Níquel (Região 1A e 2B). Os demais parâmetros apresentaram redução na percentagem de desvios ou não ultrapassaram os valores orientadores, ao longo da escala temporal analisada.

Ao se avaliar a evolução dos sedimentos no tempo e no espaço constatou-se que as concentrações da maioria dos metais prioritários e traço vem, em geral, reduzindo na maior parte das regiões monitoradas, condição que se perpetuou na estiagem/2022. As concentrações mais elevadas dos metais principais (Fe, Al e Mn) e dos elementos traço, apresentam nas regiões comportamentos, que ao longo do monitoramento, tendem a serem característicos de cada uma das regiões, mas nas regiões afetadas pelo rejeito (Ferro-Carvão, 1A, 1B), ainda se observa a interferência deste, principalmente, para Manganês.

15. Qualidade dos sedimentos nas regiões do reservatório de Três Marias (região 2D) e no trecho a jusante (região 3)

15.1. Objetivo

Avaliar o comportamento granulométrico e de qualidade dos metais, em relação a Resolução CONAMA 454/12 para os níveis 1 e 2, nos sedimentos nas regiões do reservatório da UHE Três Marias e a jusante deste, até a confluência com rio Abaeté, ao longo dos ciclos sazonais correspondentes aos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022. A avaliação granulométrica serviu também como referência para verificação das variações das concentrações dos metais em razão do tamanho do grão. Cabe destacar que os parâmetros Manganês, Alumínio e Ferro não estão listados nesta resolução, mas foram comparados de acordo com Vicq (2015).

15.2. Metodologia

A fim de compreender a distribuição granulométrica e a qualidade nos sedimentos do reservatório da UHE Três Marias e na região a jusante, ao longo dos períodos estiagem (2019, 2020, 2021 e 2022)), foram realizadas as seguintes avaliações:

- Avaliação da Distribuição granulométrica, segundo orientação da Resolução CONAMA 454/2012 para material a ser dragado, que tem como referência de classificação granulométrica a escala Granulométrica de Wentworth, 1922
- Análise espacial e temporal dos parâmetros de qualidade de sedimentos por meio de gráficos *boxplot* da região 2D (PT-23 e PT-29) e região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32);
- Comparação estatística entre os períodos de estiagem;
- Avaliação do percentual de resultados acima dos valores orientadores definidos na Resolução.

Confere a esta análise um conjunto de parâmetros (metais) prioritários, fósforo e traço, que são representativos para cada uma das regiões existentes.

15.3. Resultados e discussão

O reservatório da UHE Três Marias após confluência entre o braço do rio Paraopeba com o braço do rio São Francisco é denominada região 2D, enquanto a região a jusante da UHE Três Marias denominam-se região 3, ambas são regiões que não sofreram o impacto e consequências do rompimento das barragens B1, B4 e B4A em janeiro de 2019. Os sedimentos com característica química de rejeitos em suspensão chegaram, em março/2019, ao

barramento da UHE Retiro Baixo (Região 2B) e lá permaneceu, onde as frações sólidas, que estavam em suspensão, foram depositadas no rio e se dissiparam. Nesse sentido, são regiões sob influência de condições locais.

Especificamente a região de reservatório da UHE Três Marias (região 2D), da mesma forma que o reservatório da UHE Retiro Baixo, representa um ambiente com mudança no regime hidráulico de escoamento (lótico para lêntico), favorecendo os efeitos de decantação/deposição de sedimentos finos e acúmulo de metais. Sabe-se que sedimentos de granulação mais fina (silte e argila), adsorvem mais metais, visto que quanto menor o tamanho do grão maior é a área superficial, onde as partículas são mais porosas e com maior capacidade de troca catiônica (USEPA Ohio, 2001 - *Sediments sampling guide e methodologies*). Enquanto o trecho a jusante do reservatório (região 3) envolve um trecho lótico, onde as características hidráulicas se assemelham aos demais trechos lóticos do rio Paraopeba, com variação na deposição de sedimentos finos e grossos conforme sinuosidade do trecho, além da influência da pluviosidade e contribuições locais. Trechos com maior energia de transporte, acumulam sedimentos mais grossos (areia), enquanto trechos com menos energia, favorecem a deposição de sedimentos mais finos (silte e argila). A qualidade de sedimento vem sendo rotineiramente avaliada pelos pontos em sequência PT-23 e PT-29 (região 2D) e PT-25, PT-27 e PT-32 (região 3), com amostragens de sedimentos de fundo.

15.3.1. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais

As condições hidrológicas descritas anteriormente (*i.e.* itens 4 e 14) compreendem importantes fatores de influência para o arraste/carreamento difuso de materiais da bacia pelo escoamento superficial, bem como seu transporte, ressuspensão e sedimentação ao longo do eixo longitudinal e transversal do rio Paraopeba em seus diferentes trechos.

Os resultados das análises granulométricas foram divididos por períodos sazonais de estiagem, incluindo os períodos de 01/04/2019 a 30/09/2019 (**Gráfico 15.3.1-1**); 01/04/2020 a 30/09/2020 (**Gráfico 15.3.1-2**); 01/04/2021 a 30/09/2021 (**Gráfico 15.3.1-3**) e 01/04/2022 a 30/09/2022 (**Gráfico 15.3.1-4**). A distribuição dos perfis granulométricos foi avaliada ao longo dos períodos sazonais, 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. Destaca-se que as informações referentes aos pontos não coletados estão destacadas abaixo em cada gráfico.

De modo geral, os sedimentos finos (argila e silte) predominaram nos trechos mais lênticos 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. Nesse sentido, a análise mostrou que para o período de estiagem nos diferentes anos (2019 a 2022) houve variação na deposição de sedimentos do reservatório da UHE Três Marias (2D). O período de 2019 mostrou a predominância de sedimentos finos (silte e argila), inclusive no trecho lótico a jusante. Para os anos subsequentes (2020 a 2022), foi observado comportamento de aumento na ocorrência de sedimentos finos, principalmente argila, no trecho de reservatório, e mais grossos (areia média, grossa e muito grossa) no trecho lótico a jusante.

No período de estiagem de 2019 (abril a setembro/2019) percebeu-se predomínio das frações granulométricas siltosas entre todos os pontos avaliados. Nos pontos PT-23 e PT-29, localizados no interior do reservatório de UHE Três Marias, em ambiente com característica lêntica, permitiu-se a dissipação e deposição de materiais em suspensão de natureza mais fina. Nesse trecho as frações silte predominaram, e o conteúdo de argila variou de 3,5% a 6,0%. Já nos pontos PT-25 a PT-32, trecho a jusante, o silte também foi a fração predominante, porém com menores volumes de argila e maiores conteúdos de areia. A variação dos conteúdos de areia e argila entre os pontos PT-25 e PT-32 pode estar relacionada principalmente a dinâmica natural do trecho, com deposição do rio sob condições lóticas e sinuosas, com porções com acúmulo maior de frações finas e outras mais grossas. Além disso, pode apresentar também influência 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. O PT-25 encontra-se na saída do reservatório UHE Três Marias, podendo apresentar características granulométricas semelhantes aos pontos do reservatório. Já o PT-32, por estar inserido na confluência com rio Abaeté, apresenta também o aporte de sedimentos deste tributário.

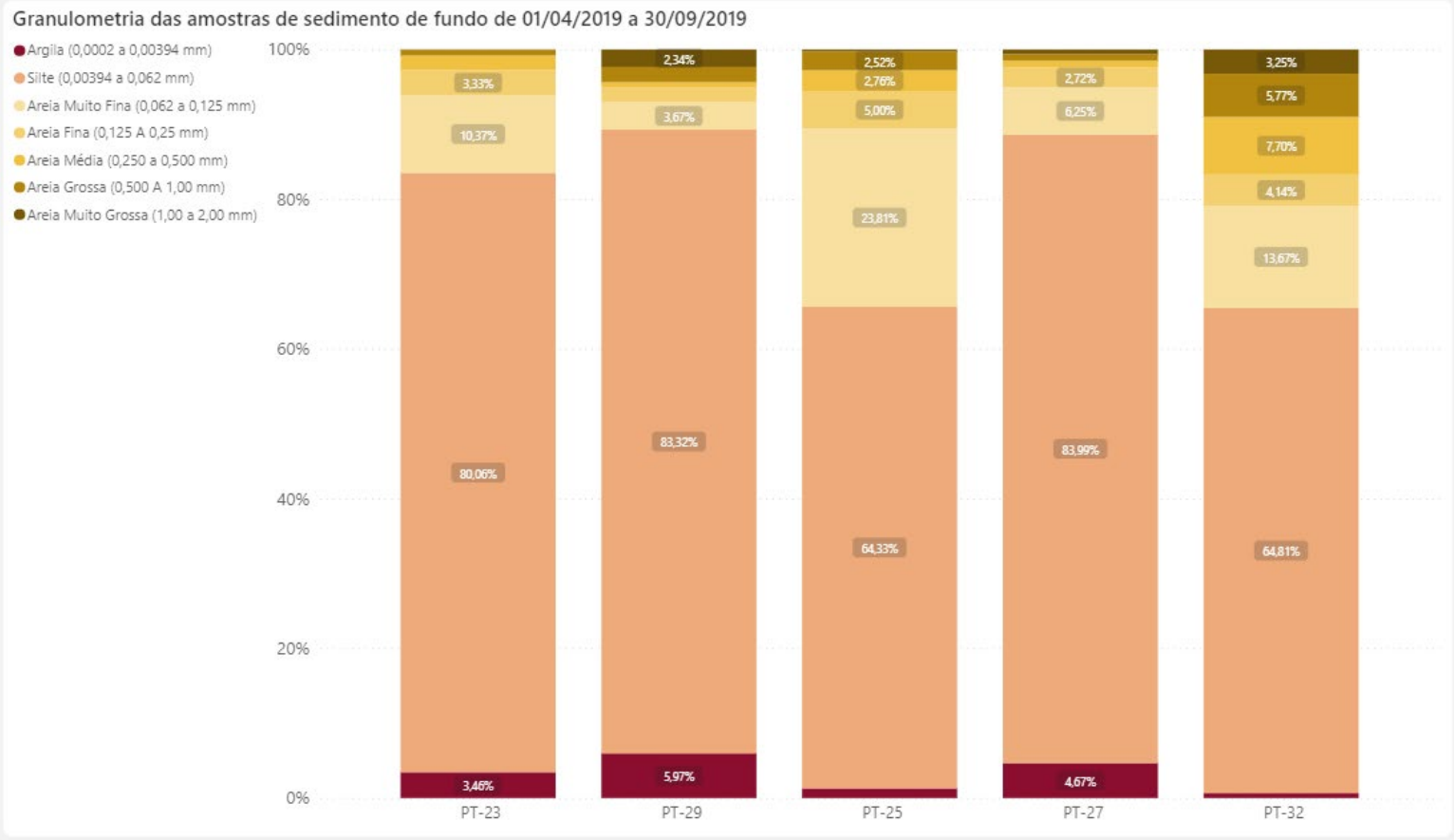
Na estiagem de 2020 (abril/2020 a setembro/2020), a granulometria dos pontos PT-23 e PT-29, que possui condição mais lêntica por conta do reservatório, se manteve predominante na fração silte e com argila subordinada (até 2,7%), semelhante a campanha anterior. Já o trecho entre os pontos PT-27 e PT-32 apresentaram essencialmente materiais mais grossos, principalmente o PT-32 (areia, *ca.* 42%), que podem relacionar-se à característica mais lótica do rio, aporte de sedimentos do tributário, às coletas ao longo da porção central do rio, ou mesmo, a uma mudança na dinâmica natural da bacia decorrente das chuvas 2019/2020 que antecederam o período. Neste contexto, as chuvas podem ter resultado no aumento da energia no rio (maior turbulência) associado a declividade do rio e, por consequência, em potenciais erosões marginais, transporte de materiais 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. Condições de solo desnudo e consequente facilidade para erosão e acúmulo de sedimentos podem contribuir para acúmulo de frações fino em algumas localidades, principalmente nas regiões de reservatório.

A estiagem/2021 (abril a setembro de 2021) sucedeu um cenário de chuvas menos intensas (2020/2021) quando comparadas as de 2019/2020, marcada pela redução da capacidade de transporte de materiais ao longo do rio devido a redução das vazões e do nível de água. Os pontos inseridos no trecho de reservatório (PT-23 e PT-29) mantiveram comportamento granulométrico similar ao período anterior, com a predominância de silte, porém com maiores conteúdos de argila (até *ca.* 45%). Os pontos a jusante do reservatório apresentaram variação no perfil granulométrico. Os pontos PT-25 e PT-27, inseridos no fim do reservatório e no início da porção lótica do rio, mostram transição das características sedimentológicas entre os trechos, com predominância de sedimentos finos, com silte (*ca.* 63-64%), certos conteúdos de argila (*ca.* 10-17%) e areia (até *ca.* 21%). Já o PT-32, que mostrou predominância de sedimentos arenosos (*ca.* 95%), resposta granulométrica associada principalmente a uma maior influência do rio Abaeté pelo aporte de material local, aos aspectos morfológicos da

drenagem, em trecho de caráter lótico, e ainda, por vezes, a amostragem na porção central do canal do rio.

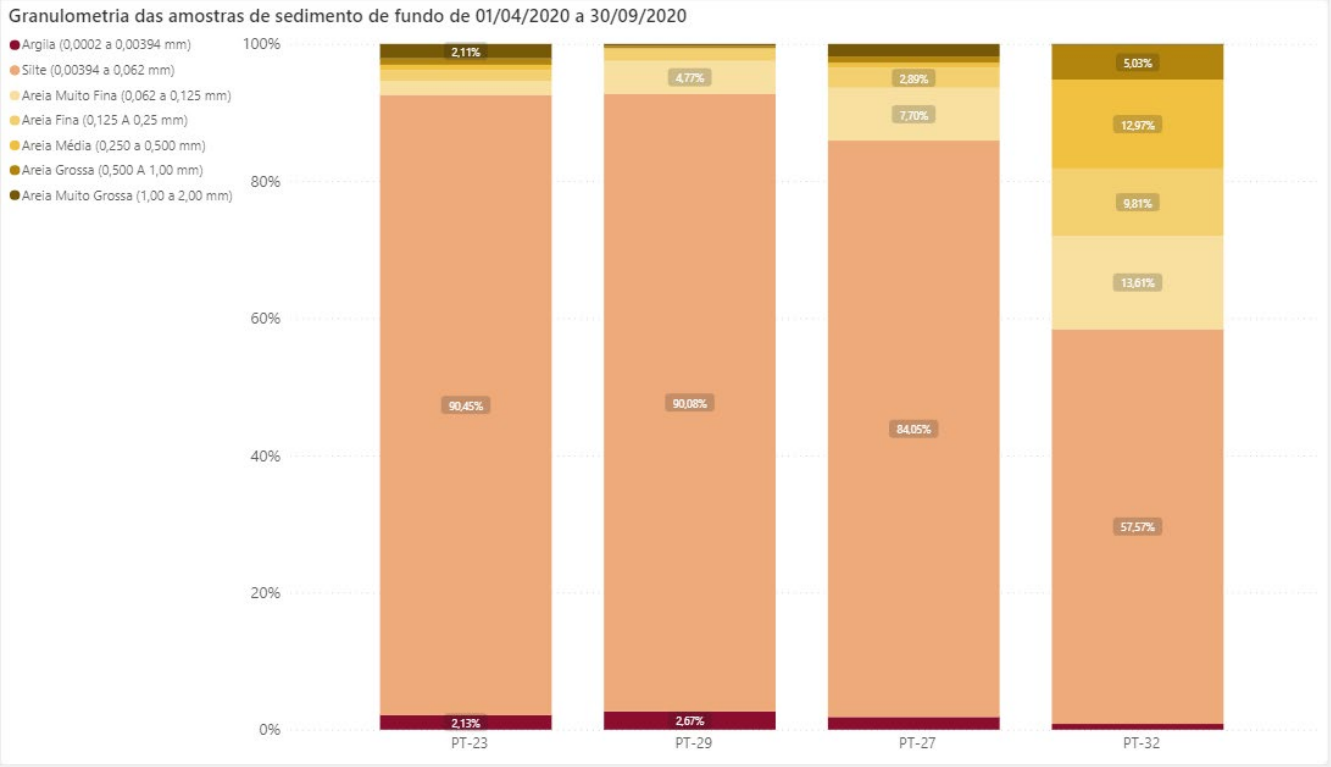
O período atual de estiagem/2022 (de abril a setembro/2022) sucedeu um período de chuvas intensas (2021/2022), conforme relatado no item 4 deste relatório e, de forma mais detalhada, no documento sobre o fechamento de ciclo anterior (Arcadis, 2022b). Neste cenário, os pontos avaliados apresentaram padrão de sedimentos semelhante ao observado na estiagem anterior (2021). Os pontos PT-23 e PT-29 mantiveram predominância frações finas, com menores conteúdos de argila (até *ca.* 36%) e ausência de areia em relação ao período anterior, relacionados possivelmente a maior aporte, transporte e deposição de sedimentos finos em suspensão nesta estiagem, decorrente das chuvas 2021/2022. Os pontos a jusante do reservatório, da mesma forma, mostraram transição entre as características sedimentológicas, com maior predomínio de sedimentos finos que o período anterior, com silte (*ca.* 74%) e argila (*ca.* 11-18%) e menor conteúdo de areia (até *ca.* 12%). Já o PT-32, novamente mostrou predominância de sedimentos arenosos (ca. 92%), porém com mais frações finas que o período anterior (silte e argila *ca.* 8%), o que sugere maior influência das precipitações no aporte e transporte de sedimentos finos, além da influência do rio Abaeté e dos aspectos morfológicos deste trecho lótico.

Gráfico 15.3.1-1 ação granulométrica no período de abril/2019 a setembro/2019.



Elaboração: Arcadis, 2022

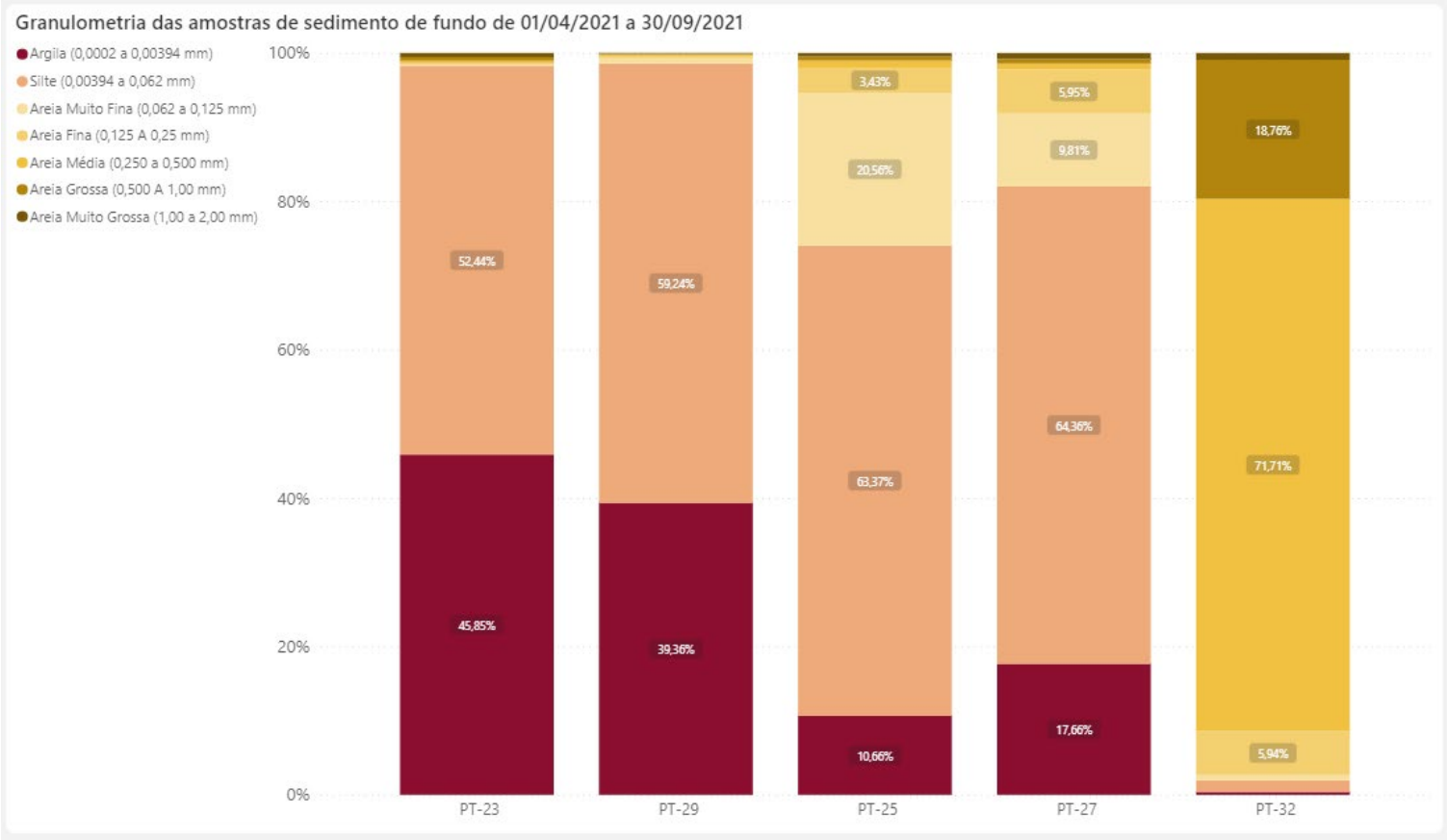
Gráfico 15.3.1-2 Variação granulométrica no período de abril/2020 a setembro/2020.



Elaboração: Arcadis, 2022.

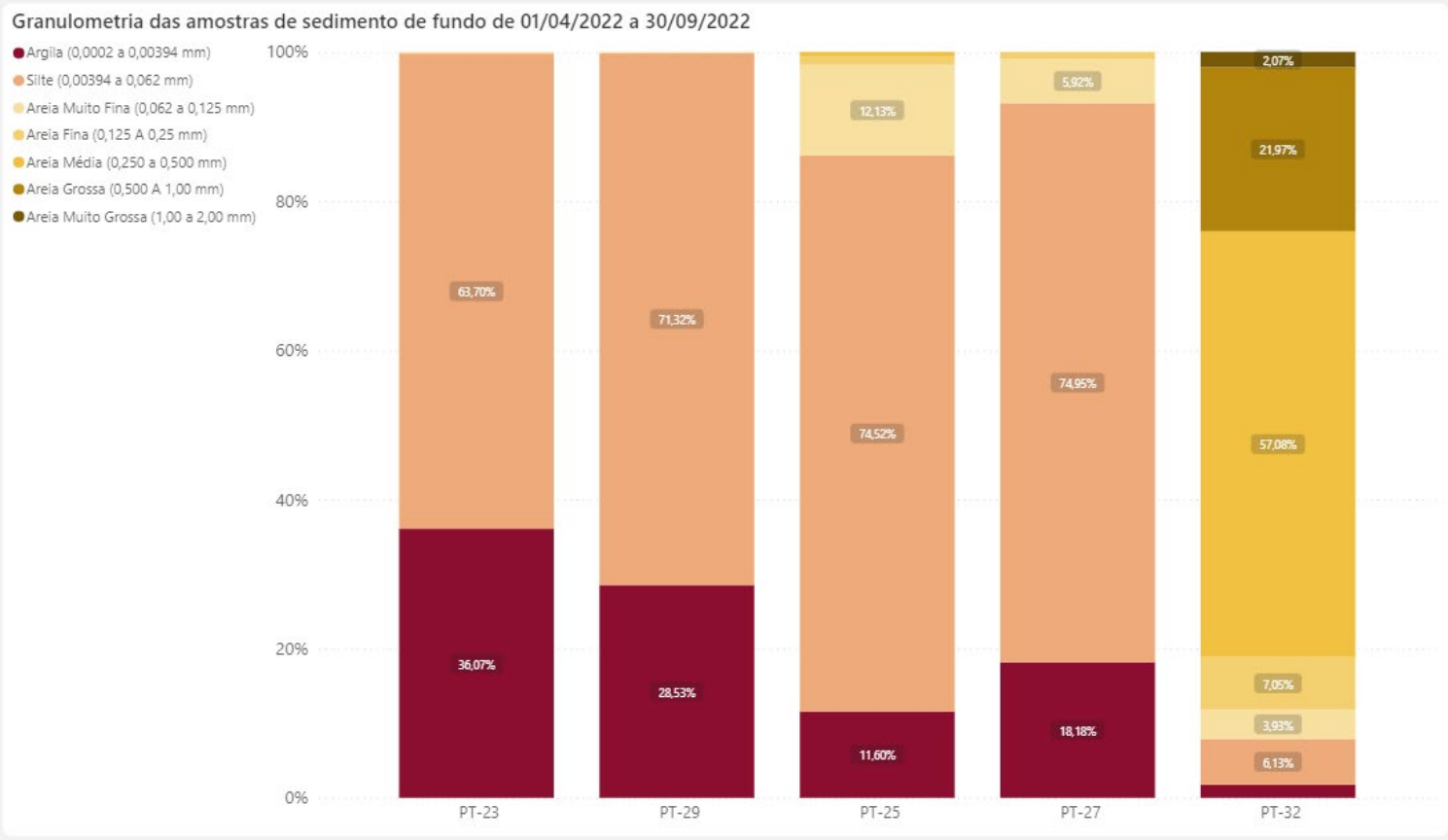
Nota: Os pontos localizados ao longo do rio Paraopeba não amostrados pelo menos uma vez durante o período analisado foram: PT-25. Os principais motivos para as não-coletas foram: ausência de material para coleta, inacessibilidade do ponto ou condição insegura para amostragem.

Gráfico 15.3.1-3 Variação granulométrica no período de abril/2021 a setembro/2021.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 15.3.1-4 Variação granulométrica no período de abril/2022 a setembro/2022



Elaboração: Arcadis, 2022.

15.3.2. Comportamento da qualidade de sedimentos nos diferentes períodos sazonais

A análise estatística descritiva dos resultados de sedimentos dos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022 foi feita por regiões (2D e 3) 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 454/12 de cada elemento, quando disponível. Os elementos avaliados foram os majoritários (Mn, Fe, Al), além do P, e os traço (Pb, Cu, Ni, As, Cr, Cd, Hg e Zn). Nestes gráficos é apresentado um recorte visual dos dados com o objetivo de melhorar a apresentação dos dados nas duas regiões. No **Anexo IVA** consta os gráficos *boxplot* por ponto e para os demais parâmetros, com todos os resultados, incluindo *outliers*, dos períodos avaliados.

Nos **Gráfico 15.3.2.1** até o **Gráfico 15.3.2.11,** estão apresentados os resultados dos parâmetros nas regiões 2D e 3, e nas tabelas a avaliação estatística da comparação entre os períodos de estiagem (**Tabela 15.3.2.1 a Tabela 15.3.2.11**).

- **Manganês**

Em uma análise espacial do parâmetro apresentado, observa-se proximidade das concentrações de Manganês entre as duas regiões. Em termos temporais, a região 2D mostrou proximidade entre os valores medianos nos períodos de estiagem, porém na estiagem/2022 os valores foram significativamente maiores em comparação com os demais (**Tabela 15.3.2.1)**. Além disso, no período de estiagem/2020 os resultados também foram significativamente mais elevados em relação ao período anterior, estiagem/2019. Tal acúmulo é favorecido pelas condições de menor energia propiciadas pelo reservatório e maior influência das chuvas 2019/2020 (item 4), com maior contribuições e aporte. Enquanto a região 3, mostrou oscilação com aumento significativo em 2020 em relação aos demais períodos (**Gráfico 15.3.2.1** e **Tabela 15.3.2.1**). Os gráficos mostram, de modo geral, concentrações medianas de Manganês próximo a 250 mg/kg, para a região 2D, em todos os períodos de estiagem. Enquanto a região 3 mostrou valores menores, próximos a 200 mg/kg, com oscilação em 2020 (*ca.* 400 mg/kg), relacionado as chuvas de 2019/2020, e em 2022 relacionado as chuvas 2020/2021 (*ca.* 180 mg/kg). As variações nessas concentrações podem estar associadas com as condições transicionais entre o trecho de reservatório e porção lótica do rio, com morfodinâmicas e granulométricas diferentes e aporte de sedimentos provenientes de contribuições locais e ou assoreamentos. Além disso, é possível que o intemperismo natural das rochas locais, juntamente com o antrópico, além da erosão do solo local favoreça a lixiviação e o escoamento de materiais, muitas vezes sem presença de ferro e manganês nesta região, porém com potencialidade de contribuição para a localidade.

Gráfico 15.3.2.1: *Boxplot* dos resultados de Manganês dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

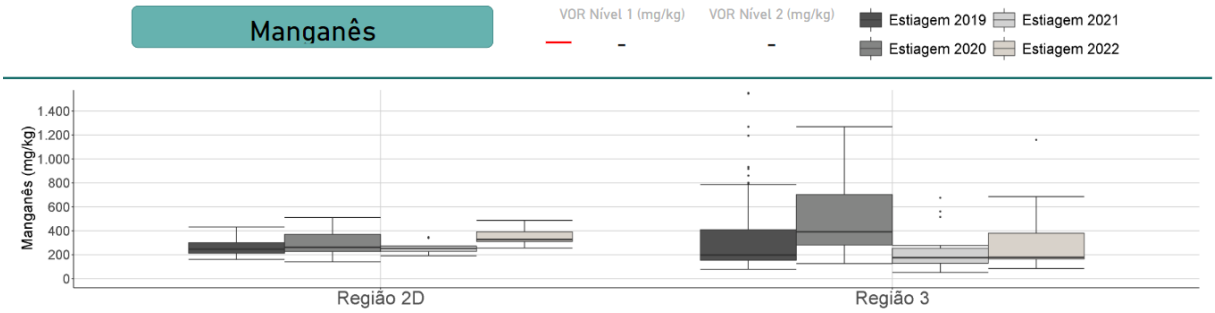


Tabela 15.3.2.1: Comparação temporal do parâmetro Manganês ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	>	~
Est-2022 X Est-2020	>	<
Est-2022 X Est-2019	>	~
Est-2021 X Est-2020	~	<
Est-2021 X Est-2019	~	~
Est-2020 X Est-2019	>	>

- **Ferro**

No recorte espacial, percebe-se que a região 2D apresentou valores medianos maiores que a região 3, o que pode estar relacionado às condições lênticas de reservatório (**Gráfico 15.3.2.2**). Em relação a comparação temporal, na região 2D não houve diferença significativa entre os períodos de estiagem (**Tabela 15.3.2.2**). Já a região 3, a jusante, mostrou redução significativa nos dois últimos períodos analisados. A região 3, por representar ambiente de transição entre um trecho lêntico e lótico, mostra oscilação entre o comportamento dos pontos. De modo geral, os gráficos mostram baixas concentrações de Ferro, abaixo de 60.000 mg/kg para ambas as regiões ao longo dos períodos de estiagem.

A estiagem/2022 apresenta maior oscilação das medianas e P75 entre a região 2D e 3. A região 2D mostrou valores maiores, enquanto a região 3 exibiu variação entre os pontos. Tal comportamento distinto entre as regiões, pode estar relacionado a influência das precipitações e contribuições difusas na região do reservatório da UHE Três Marias, com intemperismo e lixiviação de materiais locais.

Gráfico 15.3.2.2: *Boxplot* dos resultados de Ferro dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

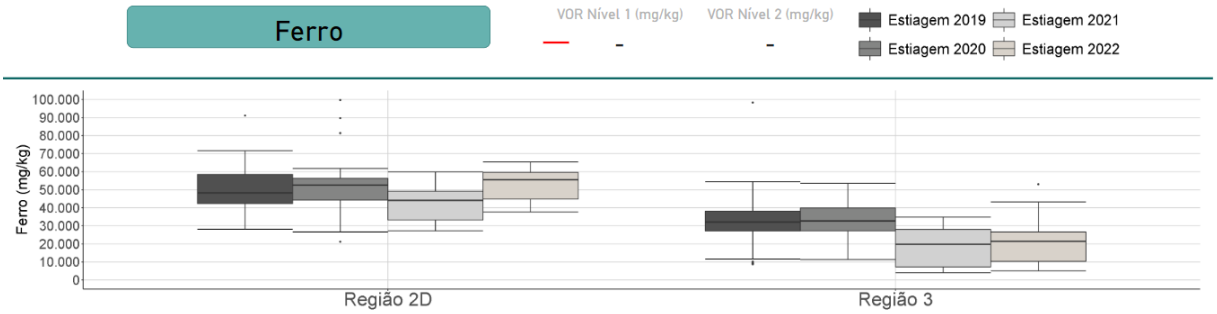


Tabela 15.3.2.2: Comparação temporal do parâmetro Ferro ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	~	<
Est-2022 X Est-2019	~	<
Est-2021 X Est-2020	~	<
Est-2021 X Est-2019	~	<
Est-2020 X Est-2019	~	~

- **Alumínio**

Em relação à evolução temporal do parâmetro Alumínio, no trecho analisado, observou-se que a região 2D apresentou valores medianos maiores que a região 3, dada as condições de reservatório e acúmulo de sedimentos finos (**Gráfico 15.3.2.3**). Ambas as regiões mostraram redução das concentrações ao longo do tempo, com aumento significativo na estiagem/2020, seguida de redução significativa na estiagem/2021 e manutenção dos valores na estiagem/2022 (**Tabela 15.3.2.3)**.

No período de estiagem/2022, a região 2D não mostrou variação dos valores quando comparados a 2019, enquanto a região 3 exibiu redução das medianas em relação a 2019. Os gráficos mostram, de modo geral, baixas concentrações medianas de Alumínio, abaixo de 50.000 mg/kg, para ambas as regiões ao longo dos períodos de estiagem.

Gráfico 15.3.2.3: *Boxplot* dos resultados de Alumínio dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

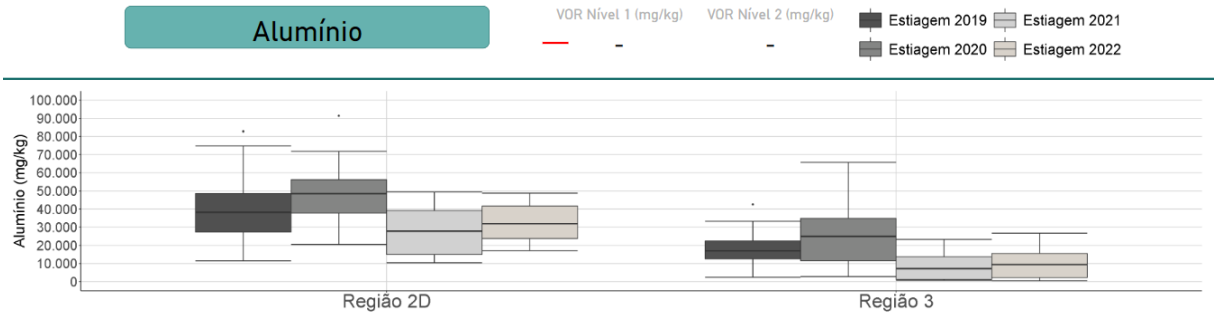


Tabela 15.3.2.3: Comparação temporal do parâmetro Alumínio ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	<	<
Est-2022 X Est-2019	~	<
Est-2021 X Est-2020	<	<
Est-2021 X Est-2019	<	<
Est-2020 X Est-2019	>	>

- **Fósforo**

Do ponto de vista da evolução temporal das concentrações de Fósforo, percebe-se que, a região 2D apresentou valores medianos e P75 maiores que a região 3, destacando-se o último período de estiagem (**Gráficos 15.3.2.4**), relacionado principalmente ao contexto do reservatório UHE Três Marias, com acúmulo de sedimentos finos e materiais da região, além de apresentar influência das precipitações 2021/2022.

Apesar da variação dessas métricas ao longo do tempo, a região 2D não apresentou variação estatisticamente significativa entre os períodos, ao passo que na região 3 os resultados de 2021 foram inferiores em relação a 2020 e em relação a 2019; e os resultados 2022 em relação a 2019 (**Tabela 15.3.2.4**). Nesse sentido, as precipitações, principalmente 2019/2020 e 2021/2022, repercutiram nos períodos de estiagem subsequentes com maior aporte de sedimentos finos, contribuições locais e antrópicas para as regiões em questão, em especial de reservatório que concentram os materiais. O tributário Abaeté, a jusante do reservatório, pode contribuir também seja com materiais mais ricos em P, seja com menos P, porém permitindo maior erosão e transporte de depósitos para trechos a jusante. Os gráficos mostram, de modo geral, baixas concentrações medianas de Fósforo, abaixo de 2.000 mg/kg (valor orientador), ao longo dos períodos de estiagem.

Gráfico 15.3.2.4: *Boxplot* dos resultados de Fósforo dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

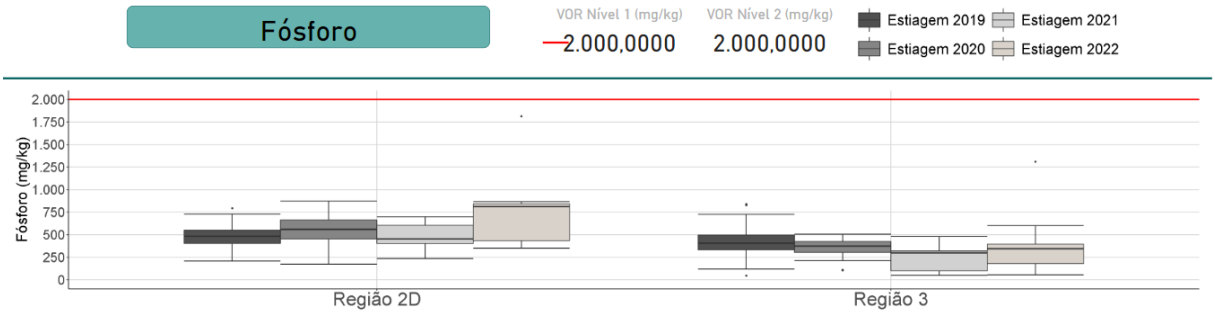


Tabela 15.3.2.4: Comparação temporal do parâmetro Fósforo ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	~	~
Est-2022 X Est-2019	~	<
Est-2021 X Est-2020	~	<
Est-2021 X Est-2019	~	<
Est-2020 X Est-2019	~	~

- **Arsênio**

Em uma análise temporal do parâmetro apresentado, observa-se concentrações medianas maiores entre os pontos da região 2D em relação aos pontos da região 3 (**Gráfico 15.3.2.5**). Em ambas as regiões notam-se concentrações de Arsênio significativamente mais elevadas no período de estiagem/2020 e ausência de diferenças significativas entre os demais períodos (**Tabela 15.3.2.5**). Tal acúmulo é favorecido pelas condições de reservatório e maior influência das chuvas 2019/2020.

Os gráficos mostraram concentrações de Arsênio próximo a 6 mg/kg, para a região 2D, em todos os períodos de estiagem, com oscilação em 2020 (*ca.* 9 mg/kg), relacionado as chuvas de 2019/2020, e em 2022 relacionado as chuvas 2020/2021 (*ca.* 8 mg/kg). Enquanto a região 3 mostrou valores menores, principalmente para o PT-25 e PT-32, próximos a 4 mg/kg, com oscilação em 2020 (*ca.* 6 mg/kg), relacionado as chuvas de 2019/2020. As variações nessas concentrações podem estar associadas com as condições transicionais entre o trecho de reservatório e porção lótica do rio, onde a maior proporção de sedimentos finos correlaciona-se a um acúmulo de metais. Além disso, é possível que o intemperismo natural das rochas locais de regiões a montante, como o Complexo Belo Horizonte e o Grupo Nova Lima, que podem conter minerais que possuem Arsênio em sua composição (*i.e.* arsenopirita), juntamente com o escoamento superficial, possam também contribuir para o sistema.

De modo geral, o Arsênio apresenta concentrações medianas e P75 elevadas, acima do 5,9 mg/kg (VOR nível 1) somente na região 2D, ao longo dos períodos de estiagem, somente a estiagem/2021 teve mediana inferior. Já para região 3, todos as medianas foram inferiores, onde apenas a estiagem/2020 exibiu P75 maior que o VOR1.

No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e P75 apresentaram concentrações aproximadas e maiores na região 2D (PT-23) que na região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32), somente o ponto PT-32 apresentou mediana bastante inferior as demais, relacionado a contribuições locais e influência do tributário Abaeté. Ou seja, as concentrações mais elevadas são observadas no reservatório da UHE Três Marias, região esta que apresenta maior influência dos materiais das regiões a montante e naturalmente um acúmulo de sedimentos finos, e por consequência, de metais.

Gráfico 15.3.2.5: Boxplot dos resultados de Arsênio dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

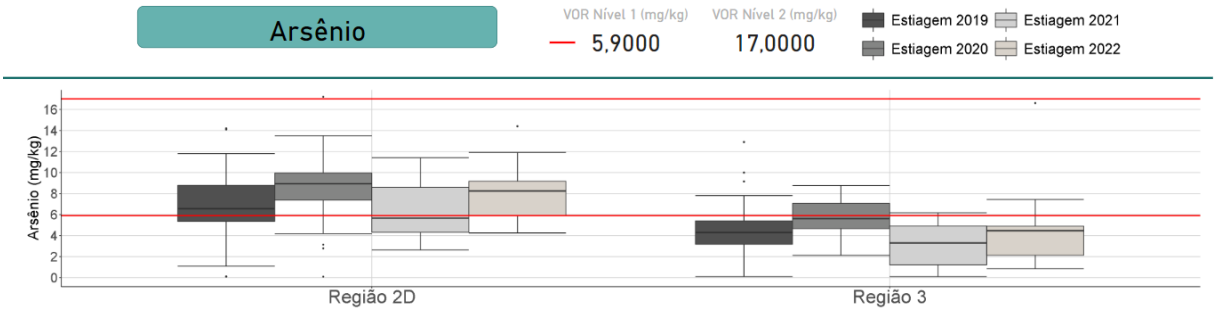


Tabela 15.3.2.5: Comparação temporal do parâmetro Arsênio ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	<	<
Est-2022 X Est-2019	~	~
Est-2021 X Est-2020	<	<
Est-2021 X Est-2019	~	~
Est-2020 X Est-2019	>	>

- **Cádmio**

Em uma análise temporal do parâmetro apresentado, observa-se concentrações medianas maiores entre os pontos da região 3 que nos pontos da região 2D. A região 3 oscilou os valores de mediana e P75, com concentrações significativamente mais reduzidas na estiagem/2020 em relação a estiagem/2019 e significativamente mais elevadas em 2021 em relação a 2020. Por outro lado, na região 2D as concentrações nas estiagens de 2021 e 2022 apresentaram aumento significativo em comparação com 2019 e 2020 (**Gráfico 15.3.2.6** e **Tabela 15.3.2.6**).

Os gráficos mostraram, para a região 2D, concentrações de Cádmio próximas ao valor do limite de quantificação (LQ<0,1 mg/kg) em todos os períodos de estiagem, onde somente o ponto PT-29 exibiu oscilação em 2021 (*ca.* 0,12 mg/kg) e em 2022 (*ca.* 0,17 mg/kg). Enquanto para a região 3, os valores foram maiores, principalmente para o PT-25 e PT-27, próximos a 1 mg/kg, com oscilação em 2019 (*ca.* 3,5 mg/kg) e 2021 (*ca.* 4 mg/kg). As variações nessas concentrações podem estar associadas com a contribuições locais e difusas da região, com influência do uso e ocupação do solo.

De modo geral, o Cádmio apresentou concentrações medianas e P75 elevadas, acima de 0,6 mg/kg (VOR nível 1) e de 3,5 mg/kg (VOR nível 2) somente na região 3, ao longo dos períodos de estiagem. As estiagens de 2019, 2020 e 2022 mostraram medianas acima apenas do VOR1, enquanto a estiagem/2021 atingiu valores acima do VOR2. Já na região 2D, todos as medianas foram inferiores ao VOR1.

No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e P75 apresentaram concentrações aproximadas e maiores na região 3 (PT-25 e PT-27) que na região 2D (PT-23 e PT-29), somente o ponto PT-32 apresentou mediana bastante inferior (próximo ao LQ). Ou seja, as concentrações mais elevadas são observadas no trecho a jusante do reservatório da UHE Três Marias, região esta que apresenta maior influência de contribuições locais, difusas e de drenagens tributárias, apesar de que o incremento das concentrações na região 2D é favorecido pelas condições de reservatório e maior influência das chuvas 2021/2022.

Gráfico 15.3.2.6: *Boxplot* dos resultados de Cádmio dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

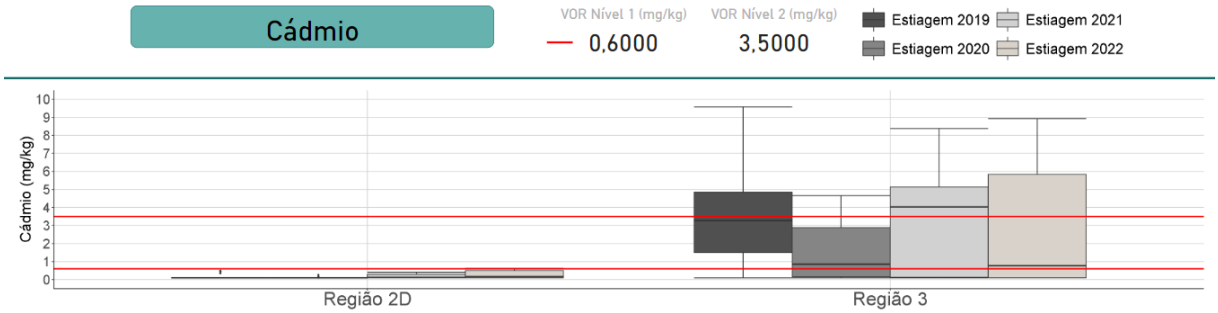


Tabela 15.3.2.6: Comparação temporal do parâmetro Cádmio ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	>	~
Est-2022 X Est-2019	>	~
Est-2021 X Est-2020	>	>

Est-2021 X Est-2019	>	~
Est-2020 X Est-2019	~	<

- **Chumbo**

Em uma análise temporal do Chumbo, observa-se concentrações medianas aproximadas entre as regiões 2D e 3 ao longo dos diferentes períodos de estiagem (**Gráfico 15.3.2.7**). Em termos temporais, apesar das oscilações, estatisticamente não houve indicativo de diferença significativa entre os períodos em ambas as regiões (**Tabela 15.3.2.7**).

Os gráficos mostraram concentrações de Chumbo próximos a 30 mg/kg para ambas as regiões, em todos os períodos de estiagem. No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e P75 apresentaram concentrações aproximadas entre as regiões e inferiores ao VOR 1.

As concentrações descritas podem estar associadas ao acúmulo de sedimentos, uma vez que os pontos com predominância de sedimentos finos mostraram manutenção dos valores ao longo do tempo, enquanto o PT-32 que apresenta importantes frações de areia mostrou diminuição das concentrações. Nesse sentido, condições de reservatório, assim como as precipitações (*i.e.* 2019/2020 e 2021/2022) podem ter favorecido o acúmulo de materiais nessas regiões. Contribuições locais, difusas e de drenagens tributárias também podem ter influenciado a região.

De modo geral, o Chumbo apresentou concentrações medianas inferiores, abaixo VOR1 ao longo dos períodos de estiagem. Apenas a estiagem/2022 (região 3) apresentou valores de P75 próximo ao limite de nível 1, enquanto a estiagem/2019 (2D) teve valores de P75 acima deste limite.

Gráfico 15.3.2.7: *Boxplot* dos resultados de Chumbo dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

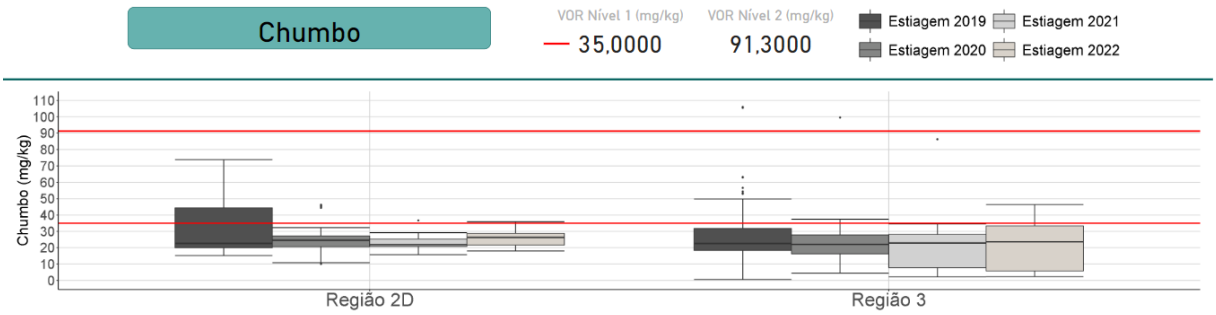


Tabela 15.3.2.7: Comparação temporal do parâmetro Chumbo ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	~	~
Est-2022 X Est-2019	~	~
Est-2021 X Est-2020	~	~
Est-2021 X Est-2019	~	~
Est-2020 X Est-2019	~	~

- **Cobre**

Em uma análise espacial do parâmetro avaliado, observa-se concentrações medianas maiores na região 2D que na região 3 (**Gráfico 15.3.2.8**). A região 2D mostrou redução significativa das medianas nas estiagens de 2020 e 2021 em relação a de 2019, e aumento significativo da estiagem de 2022 em relação a 2020 (**Tabela 15.3.2.8**). A região 3 mostrou diminuição significativa nas estiagens de 2020 e 2021 em comparação com 2019.

Os gráficos mostraram concentrações de Cobre próximos de 32 mg/kg para a região 2D, em todos os períodos de estiagem, enquanto a região 3 apresentou teores próximos de 25 mg/kg. Ao avaliar as concentrações por ponto, os PT-23 e PT-25 mostraram valores acima de 35,7 mg/kg (VOR nível 1) na estiagem/2022, enquanto o PT-29 e PT-27, na estiagem/2019. O PT-32 exibiu os menores valores, especialmente em 2021 e 2022. De modo geral, o Cobre apresentou concentrações medianas maiores na região 2D, tendo as estiagens de 2019 e 2022 valores acima do VOR1. A região 3 mostrou valores inferiores ao nível 1, apesar de mostrar na estiagem/2019 valores de P75 acima desse limite.

No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e P75 apresentaram concentrações aproximadas e maiores na região 2D (PT-23) que na região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32), somente o ponto PT-32 apresentou mediana bastante inferior as demais, relacionado a contribuições locais e influência do tributário Abaeté. Da mesma forma que o parâmetro Arsênio, as concentrações de Cobre descritas podem estar associadas ao acúmulo de sedimentos, e por consequência de metais, em ambiente de reservatório da UHE Três Marias.

Gráfico 15.3.2.8: *Boxplot* dos resultados de Cobre dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

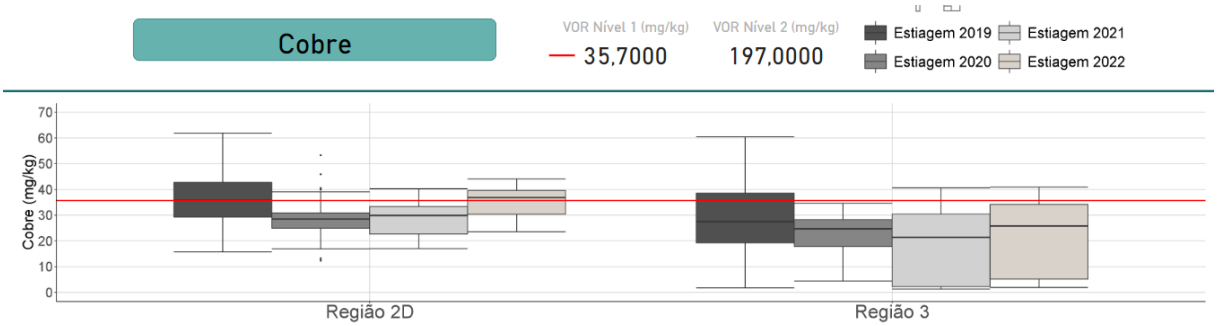


Tabela 15.3.2.8: Comparação temporal do parâmetro Cobre ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	>	~
Est-2022 X Est-2019	~	~
Est-2021 X Est-2020	~	~
Est-2021 X Est-2019	<	<
Est-2020 X Est-2019	<	<

- **Cromo**

Em uma análise temporal do Cromo, observa-se concentrações medianas levemente maiores na região 2D que na região 3, porém que mostram manutenção dos valores ao longo dos diferentes períodos de estiagem (**Gráfico 15.3.2.9**). A região 2D não mostrou diferença significativa dos valores entre os diferentes períodos de estiagem (**Tabela 15.3.2.9**). Já na região 3 a estiagem/2020 apresentou resultados significativamente mais elevados em comparação com os demais períodos de estiagem avaliados.

Os gráficos mostraram concentrações de Cromo próximos de 50 mg/kg para a região 2D, em todos os períodos de estiagem, enquanto a região 3 apresentou teores próximos de 35 mg/kg. Ao avaliar as concentrações por ponto, somente os pontos PT-25 e PT-32 mostraram valores abaixo de 37,3 mg/kg (VOR nível 1), principalmente nas estiagens de 2021 e 2022. O restante dos pontos mostrou valores acima do nível 1. De modo geral, o Cromo apresentou concentrações medianas acima do VOR1 em todas as estiagens na região 2D. A região 3 mostrou valores inferiores ao nível 1, apesar de mostrar na estiagem/2020 medianas acima.

No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e P75 apresentaram concentrações maiores na região 2D (PT-23) que na região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32), somente o ponto PT-32 apresentou mediana bastante inferior as demais. Da mesma forma que os parâmetros Arsênio e Cobre, as concentrações de Cromo descritas podem estar

associadas ambiente de reservatório da UHE Três Marias, onde há acúmulo de sedimentos e metais. Além disso, é possível que o intemperismo natural das rochas de regiões a montante, como as rochas máficas-ultramáficas do Grupo Nova Lima, juntamente com a influência de precipitações (*i.e.* 2019/2020 e 2021/2022) e o escoamento superficial, possam também contribuir para o sistema.

Gráfico 15.3.2.9: *Boxplot* dos resultados de Cromo dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

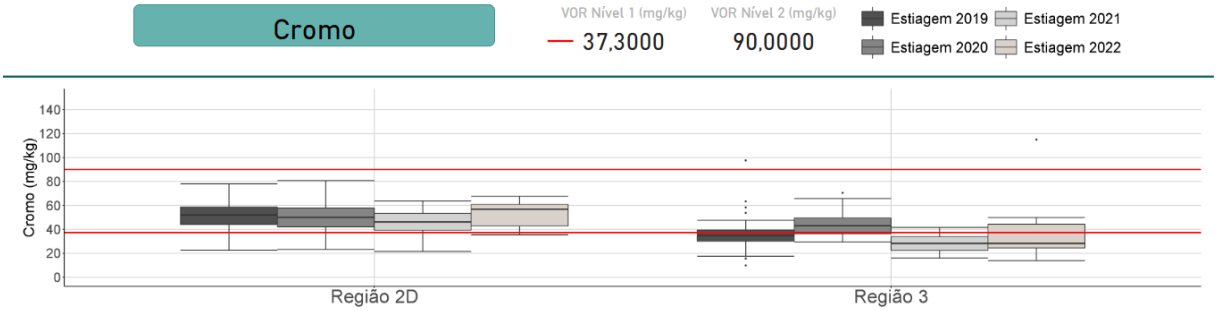


Tabela 15.3.2.9: Comparação temporal do parâmetro Cromo ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	~	<
Est-2022 X Est-2019	~	~
Est-2021 X Est-2020	~	<
Est-2021 X Est-2019	~	<
Est-2020 X Est-2019	~	>

- **Níquel**

Em uma análise temporal do Níquel, observa-se concentrações medianas maiores na região 2D que na região 3 (**Gráfico 15.3.2.10**). Na região 2D não houve diferença significativa entre os diferentes períodos de estiagem (**Tabela 15.3.2.10**). A região 3 mostrou oscilação dos valores medianos entre os diferentes períodos de estiagem, tendo nas estiagens de 2020 concentrações significativamente superior em relação aos demais períodos analisados.

Os gráficos mostraram concentrações de Níquel próximos de 18 mg/kg para a região 2D, em todos os períodos de estiagem, enquanto a região 3 apresentou teores próximos de 15 mg/kg até 2020, e de 2 mg/kg a partir de 2021. Ao avaliar as concentrações por ponto, somente os pontos PT-29 e PT-32 mostraram valores acima de 18 mg/kg (VOR nível 1), principalmente nas estiagens de 2019 e 2020. O PT-23 mostrou valores acima do nível 1 para todos o período avaliado. De modo geral, o Níquel apresentou concentrações medianas acima do VOR1 em quase todas as estiagens da região 2D, com exceção da estiagem/2021. A região 3 mostrou, em geral, valores inferiores ao nível 1.

No atual período de estiagem/2022, é possível verificar que os resultados de medianas e P75 apresentaram concentrações maiores na região 2D (PT-23) que na região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32), somente os pontos PT-25 e PT-32 apresentaram medianas bastante inferiores as demais. Da mesma forma que o parâmetro Cromo, as concentrações de Níquel descritas podem estar relacionadas ao contexto do reservatório da UHE Três Marias, onde há acúmulo de sedimentos finos e metais principalmente. Além disso, a influência de grandes precipitações (*i.e.* 2019/2020 e 2021/2022) e contribuições de regiões a montante, como intemperismo de rochas máficas-ultramáficas do Grupo Nova Lima, podem também contribuir para o sistema.

Gráfico 15.3.2.10: *Boxplot* dos resultados de Níquel dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

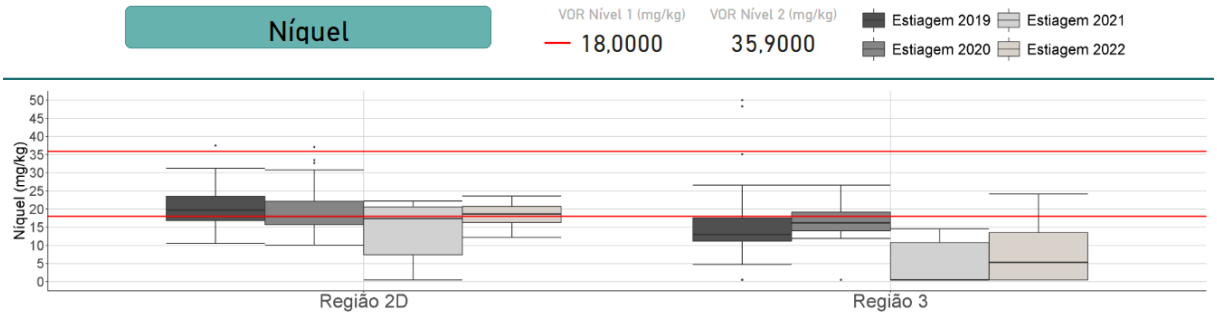


Tabela 15.3.2.10: Comparação temporal do parâmetro Níquel ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	~	<
Est-2022 X Est-2019	~	<
Est-2021 X Est-2020	~	<
Est-2021 X Est-2019	~	<
Est-2020 X Est-2019	~	>

- **Zinco**

Em uma análise temporal do parâmetro apresentado, observa-se concentrações medianas maiores entre os pontos da região 3 que nos pontos da região 2D. Ambas as regiões não mostraram diferença significativa entre os diferentes períodos (**Tabela 15.3.2.11**). Apesar disso, os *boxplots* (**Gráfico 15.3.2.11**) mostraram, para a região 3, maior oscilação dos valores de mediana e P75, com redução nas estiagens de 2020 e 2022, e aumento na de 2021. Os gráficos mostraram, para a região 2D, concentrações de Zinco de 75 mg/kg em todos os períodos de estiagem. Enquanto para a região 3, os valores foram maiores, principalmente para o PT-25 e PT-27, com oscilação em 2019 e 2021 (*ca.* 800 mg/kg) e em 2020 e 2022 (*ca.* 300 mg/kg). As variações nessas concentrações podem estar associadas com a contribuições

locais e difusas da região, com influência antrópica e de uso e ocupação do solo, e de escoamento superficial.

Gráfico 15.3.2.11: *Boxplot* dos resultados de Zinco dos períodos de estiagem 2019, 2020, 2021 e 2022, nas regiões dos reservatórios de Três Marias (2D) e a jusante (3).

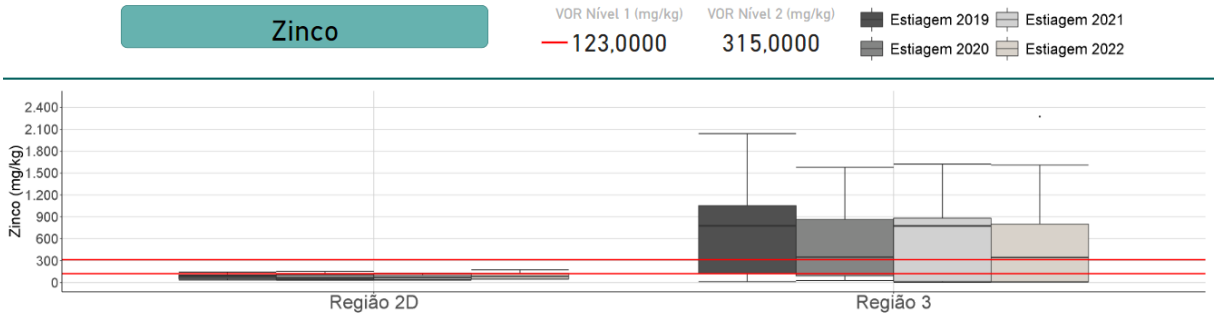


Tabela 15.3.2.11: Comparar temporal do Zinco ao longo dos períodos de estiagem de 2019 até 2022

Períodos comparados	Região 2D	Região 3
Est-2022 X Est-2021	~	~
Est-2022 X Est-2020	~	~
Est-2022 X Est-2019	~	~
Est-2021 X Est-2020	~	~
Est-2021 X Est-2019	~	~
Est-2020 X Est-2019	~	~

15.3.3. Evolução das concentrações em relação aos valores orientadores da CONAMA 454/2012 e Vicq (2015) ao longo do tempo

Nas **Tabelas 15.3.3.1** e **15.3.3.2**, estão apresentados os percentuais de resultados acima dos valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, para os níveis 1 e 2, nas regiões 2D e 3 no período de estiagem/2022, por ponto e parâmetro. Cabe destacar que os parâmetros Manganês, Alumínio e Ferro não estão listados nesta resolução, mas foram comparados de acordo com Vicq (2015). As discussões são apresentadas por regiões.

De acordo com a **Tabela 15.3.3.1**, constatou-se que, para a estiagem/2022, os metais majoritários com concentrações acima dos valores propostos por Vicq (2015) foram Alumínio (PT-23) identificados na região 2D e Manganês (PT-27) na região 3, em uma amostra cada. Essas regiões, apresentaram ainda resultados em desacordo com a legislação CONAMA 454/12 de nível 1 para os metais As (PT-23, PT-29, PT-25 e PT-27), Cd (PT-29, PT-25 e PT-27), Pb (PT-23 e PT-27), Cu (PT-23, PT-29 e PT-25), Cr (PT-23, PT-29, PT-27 e PT-32), Ni

(PT-23, PT-29 e PT-27) e Zn (PT-29, PT-25, PT-27). Com relação ao Fósforo, não houve desvios nos pontos monitorados. Para o nível 2, os metais Cd (PT-25 e PT-27), Cr (PT-27) e Zn (PT-25 e PT-27) ultrapassaram os valores orientadores nível 2 na região 3.

Em relação à região 2D (PT-23 e PT-29), a localização destes pontos no reservatório da UHE Três Marias, em zona de mistura e remanso, além da predominância de sedimentos nas frações finas (silte e argila) provenientes de contribuições do rio São Francisco, pode favorecer a maior adsorção de metais. Para a região 3 (PT-25, PT-27 e PT-32), que está localizada a jusante do reservatório da UHE Três Marias, as variações nas concentrações de metais podem ser associadas a contribuições provenientes de fontes locais e que não estão associadas ao rejeito das barragens B1, B4 e B4A. Além disso, o Fósforo, de maneira geral, apresenta também associação a contribuições de origem sanitária ao longo da bacia.

Tabela 15.3.3.1: Percentual de parâmetros que ultrapassaram o VOR1 da Resolução CONAMA 454/12 nos pontos de monitoramento com foco na estiagem de 2022.

Parâmetro	CONAMA 454/12	Reservatório Três Marias		Rio São Francisco		
		Reg.2D		Região 3		
	VOR 1 (mg/kg)	PT-23	PT-29	PT-25	PT-27	PT-32
MAJORITÁRIOS						
Manganês*	3.300	-	-	-	17	-
Ferro*	281.000	-	-	-	-	-
Alumínio*	45.200	17	-	-	-	-
TRAÇOS						
Arsênio	5,9	100	50	17	33	-
Cádmio	0,6	-	17	100	50	-
Chumbo	35	17	-	-	33	-
Cobre	35,7	83	17	50	-	-
Cromo	37,3	100	67	-	83	17
Níquel	18	83	17	-	17	-
Zinco	123	-	67	100	50	-
OUTROS						
Fósforo	2.000	-	-	-	-	-
N coletas realizadas		6	6	6	6	6

*Vicq, 2015

Tabela 15.3.3.2: Percentual de parâmetros que ultrapassaram o VOR2 da Resolução CONAMA 454/12 nos pontos de monitoramento com foco na estiagem de 2022.

Parâmetro	CONAMA 454/12	Reservatório Três Marias		Rio São Francisco		
		Reg.2D		Região 3		
	VOR 2 (mg/kg)	PT-23	PT-29	PT-25	PT-27	PT-32
TRAÇO						
Arsênio	17	-	-	-	-	-
Cádmio	3,5	-	-	100	17	-
Cromo	90	-	-	-	17	-
Níquel	35,9	-	-	-	-	-
Zinco	315	-	-	100	50	-
N coletas realizadas		6	6	6	6	6

15.4. Considerações

As alterações observadas para a região do reservatório da UHE Três Marias e o trecho a jusante, apesar de estarem incluídas no escopo de análise e avaliação do Plano de Monitoramento Emergencial (PME), são regiões distantes e não afetadas pelo rompimento das barragens B1, B4 e B4A. Neste sentido, essas regiões podem apresentar influência de outros fatores locais, isolados e ou combinados, que podem abranger as alterações sazonais da bacia do rio Paraopeba. Tais fatores podem envolver a influência de precipitações e o aumento do escoamento superficial das áreas de drenagem da bacia e das vazões fluviais nos períodos de chuva, bem como nos períodos de estiagem subsequentes, com aporte e carreamento de material. Além disso, as regiões avaliadas apresentam porções com elevado grau de exposição do solo, o que pode contribuir para o aumento de contribuições difusas para o sistema. A confluência de tributário, principalmente o rio Abaeté na localidade, também pode influenciar a dinâmica sedimentar da região.

Condições específicas e locais de regiões lênticas, incluindo o comportamento do reservatório da UHE Três Marias podem, eventualmente, influenciar na deposição de sedimentos, favorecer a disponibilização de parâmetros e o aumento de seus teores. Condições essas relacionadas à capacidade de retenção de material, diminuição da energia de transporte, movimentações eventuais da massa d'água e regra de operação hidráulica da qual derivam o turbinamento e vertimento da estrutura.

Especificamente sobre o período de estiagem de 2022, a granulometria e os parâmetros analisados para sedimento de fundo no presente item variaram conforme as regiões avaliadas. A região 2D mostrou predominância de sedimentos finos depositados e, de modo geral, a região 2D apresentou concentrações mais elevadas e constantes dos analitos ao longo do tempo, com variações naturais relacionadas possivelmente às características intricas de cada período de estiagem.

Já a região 3 mostrou, por envolver a região jusante do reservatório, apresentar características sedimentológicas transicionais, com predominância de granulometria fina nos pontos mais próximos ao reservatório e dominância de frações mais grossas nas porções mais distante, próximos a confluência com o rio Abaeté. Destaca-se a influência de fatores locais (precipitações, dinâmica fluvial, contribuições locais) e os metais Zinco e Cádmio que

apresentaram concentrações mais elevadas nestas regiões que nas demais avaliadas do rio Paraopeba (Montante até 2C), o que mostra ser uma assinatura mais característica deste trecho do rio.

16. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Aplicação dos índices químicos composicionais

16.1. Objetivo

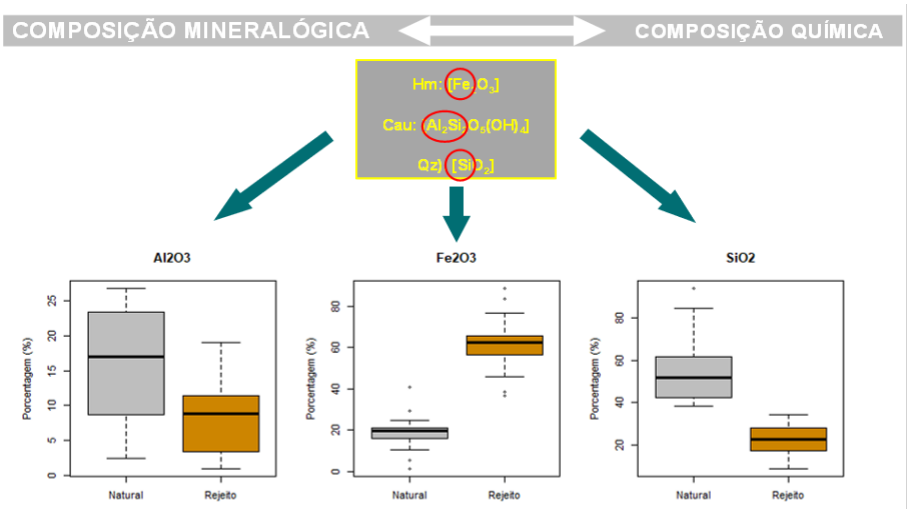
O objetivo da avaliação da evolução da composição químicas dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais foi verificar se houve redução na extensão dos sedimentos com características químicas de rejeitos ao longo do rio Paraopeba ao se comparar com os períodos anteriores.

16.2. Metodologia

Com base na análise dos testemunhos de sondagens dos sedimentos do rio Paraopeba realizados por Arcadis e Vale (2020) 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 16.2.1**)

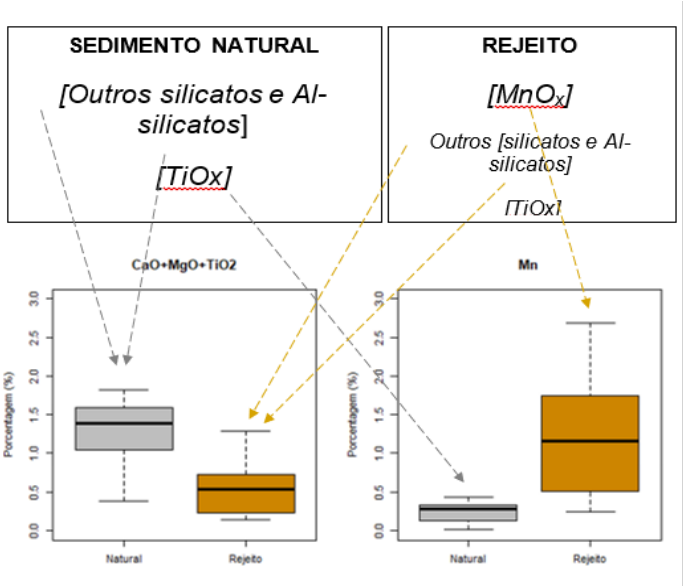
Figura 16.2-1: Identificação da composição mineralógica e química predominante do rejeito da barragem B1, porcentagem de ocorrência de Al_2O_3, Fe_2O_3 e SiO_2 nos rejeitos e sedimentos naturais.



Fonte: Relatório de Fechamento de Ciclo, outubro/2020.

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 16.2.2**).

Figura 16.2-2: Boxplot de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis e Vale (2020).



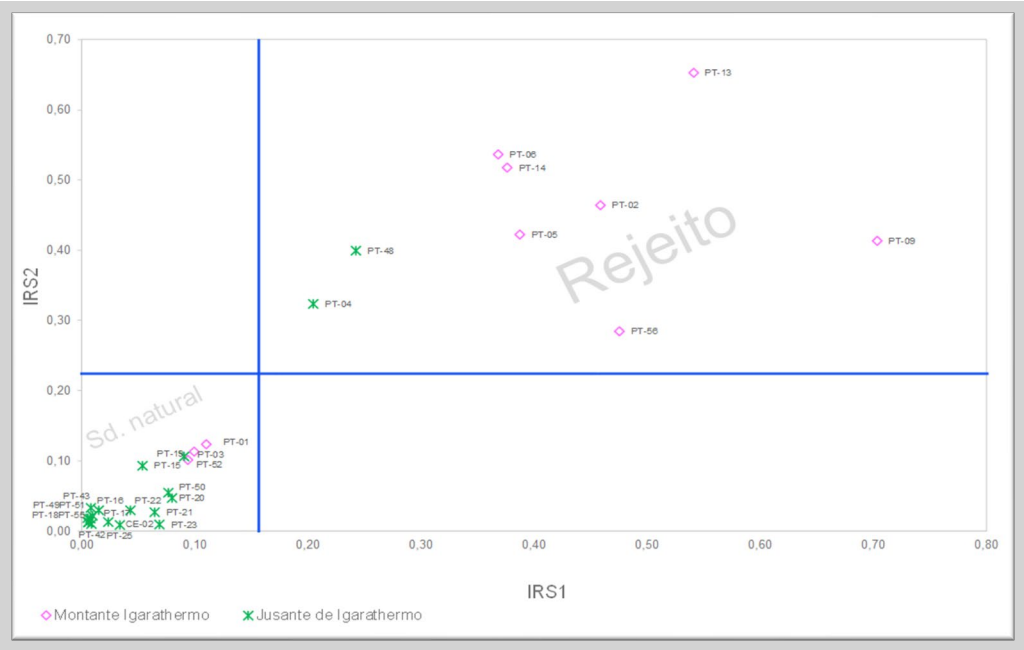
Fonte: Relatório de Fechamento de Ciclo, outubro/2020.

A análise com os testemunhos de sondagem (Arcadis e Vale, 2020) 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 (Relatório de Fechamento de Ciclo, outubro/2020), a saber:

- $IRS1 = [Fe]/\{[Fe] + [Al] + [Si]\}$
- $IRS2 = [Mn]/\{[Mn] + [Ti] + [Ca] + [Mg] + [Na] + [K]\}$

A aplicação foi realizada com dados do período de estiagem de 2019 e se separou os locais com predominância de rejeitos dos materiais com predominância de sedimentos naturais (**Figura 16.2.3**) ao longo da bacia do Paraopeba, ou seja, desde a região montante, avançou na região 2C até o PT-23 na entrada do reservatório de Três Marias.

Figura 16.2.3: 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: Relatório de Fechamento de ciclo, outubro/2020.



Elaboração: Arcadis (2020)

Com base no diagrama da **Figura 16.2.3** procurou-se evidenciar os locais que não foram afetados pelos rejeitos da barragens B1, B4 e B4A e com isso estabelecer os balizadores que mostrariam os valores de índices composicionais com base em dados brutos do período de 2019 até 2020. Para fins de acompanhamento da variação da composição química dos sedimentos ao longo do tempo, os índices químicos foram avaliados 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 estiagem de 2022.

Com base no diagrama da **Figura 16.2.3** procurou-se evidenciar os locais que não foram afetados pelo rejeito da barragem B1, B4 e B4A e com isso estabelecer os balizadores que mostrariam os valores de índices composicionais com base em dados brutos do período de 2019 até 2020.

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 estiagem de 2022. 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 muito baixos e foram interpretados com características de sedimentos naturais, não afetados por rejeito. Os balizadores identificados na avaliação dos dados brutos foram calculados novamente considerando o percentil 95 (P95) dos dados analíticos brutos, de cada região para evitar *outliers* considerando o período completo até a estiagem de 2022. Com isso,

os resultados corresponderam 0,10 e 0,14, respectivamente, para IRS1 e IRS2, limitando a característica composicional de sedimento natural, valores estes que corroboram com as avaliações anteriores. Detalhes de análise acham-se no relatório de Fechamento de Ciclo do período de janeiro/2019 a março/2021 elaborado por Arcadis (2021).

16.3. Análise dos resultados

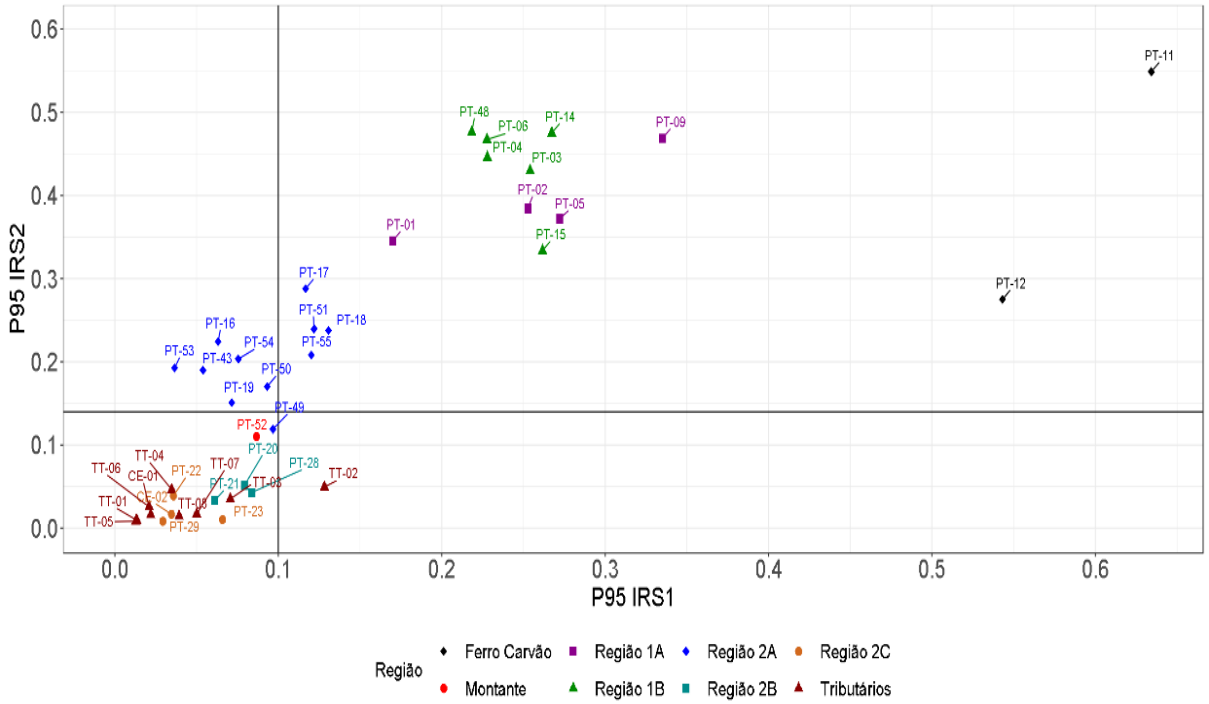
Avaliação por período sazonal

A avaliação desse item contempla todo o período sazonal de chuvas e de estiagem até 2022 para facilitar a identificação da evolução dos resultados de IRS1 e IRS2 ao longo do tempo. Em relação ao período de chuva de 2019, constatou-se que 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. O 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 e os mantiveram como 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 16.3.1**, que os maiores índices da relação de Mn e Fe ocorreram nas regiões mais afetadas pelo rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, regiões estas que evidenciaram a presença de rejeitos densos (densidade maior que 3,05 g/cm^3, 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, 2020 e 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.

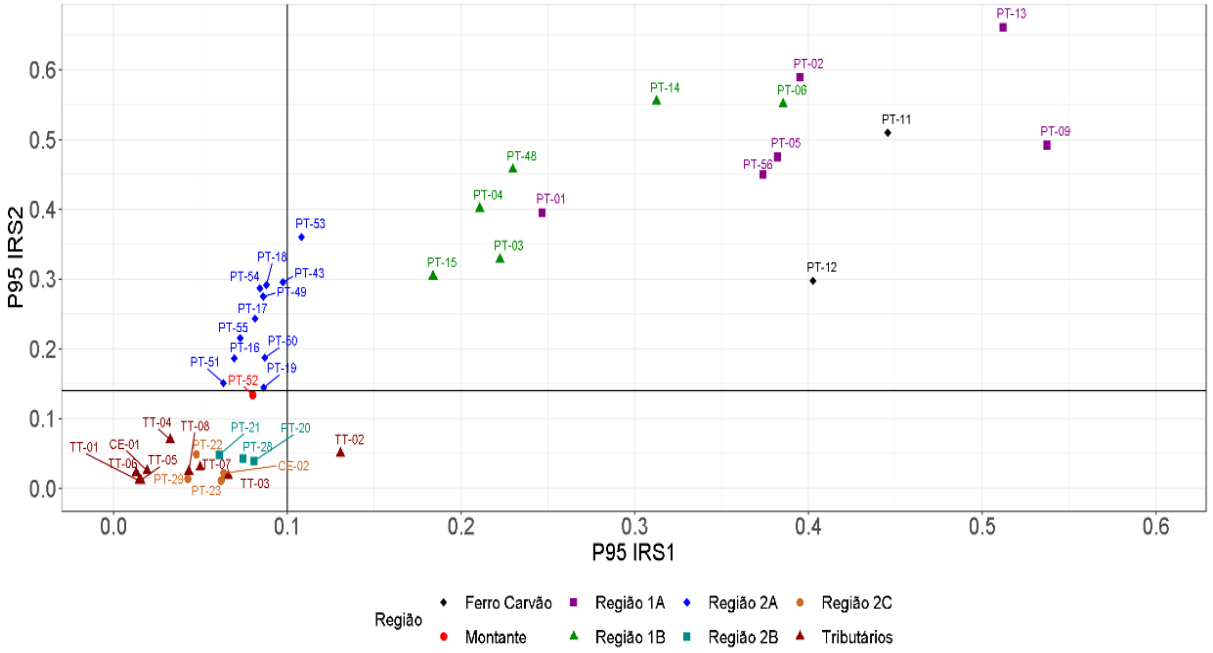
Figura 16.3-1: Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019.



Elaboração: Arcadis (2022)

Em relação ao período de estiagem de 2019 (**Figura 16.3.2**) constatou-se que somente dados das amostras de sedimentos dos pontos das regiões 1A e 1B foram aqueles que mantiveram a característica química composicional de rejeitos, sendo que 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. Ponto este que pode apresentar aporte de sedimentos de áreas mais escarpadas, através do transporte e arraste de materiais erodidos/intemperizados, de minério exposto no terminal de carregamento localizado a montante deste ponto, ou de eventuais contribuições de transbordos na planície de inundação do rio. Já no ribeirão Ferro-Carvão, a característica predominou como sedimentos com característica química de rejeitos.

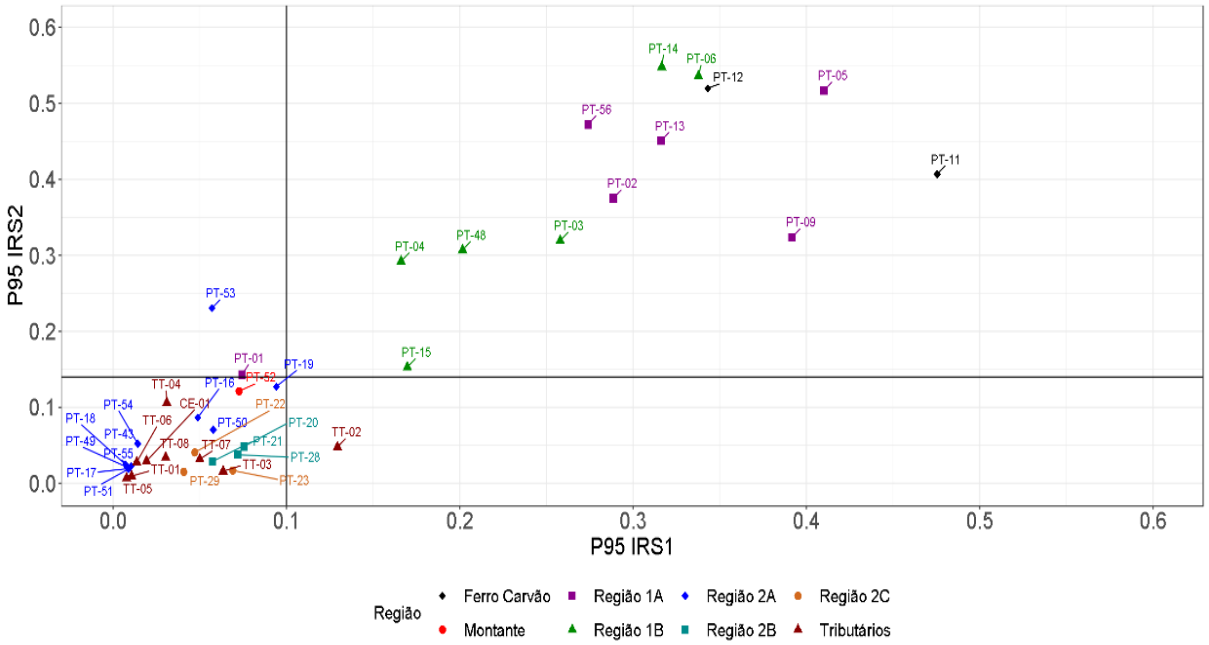
Figura 16.3-2 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2019



Elaboração: Arcadis (2022)

No novo ciclo de chuvas que se iniciou em 2019/2020 **(Figura 16.3.3)** constatou-se a 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. Os resultados são coerentes com aqueles apontados por Arcadis e Vale (2020). 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.

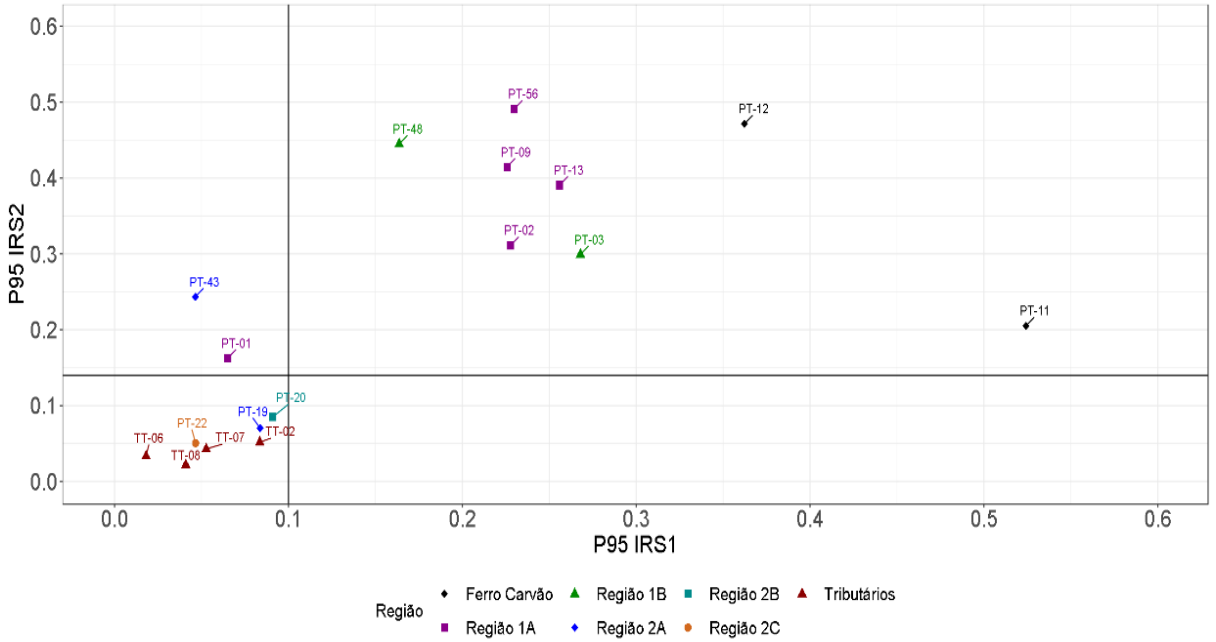
Figura 16.3-3 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020



Elaboração: Arcadis (2022)

O período de estiagem de 2020 **(Figura 16.3.4)** mostrou que 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. Os pontos PT-19 e o PT-43 foram amostrados na estiagem de 2020 para região 2A. Os resultados dos índices indicaram que o primeiro ponto manteve a característica de sedimento natural, enquanto elas apresentaram valores IRS1 coerentes com aqueles de sedimentos naturais, mas valores IRS2 apontando para rejeitos. Neste sentindo, o PT-43 apresenta uma assinatura de transição possivelmente relacionado a mistura entre sedimentos oriundos dos rejeitos e sedimentos naturais. Isto faz sentido com a dinâmica fluvial sobre o transporte preferencial de finos em suspensão. Além disto, o estudo anterior da *Geoenviron* (2019) apontou a elevada presença de Mn nos materiais finos. 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. Já 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.

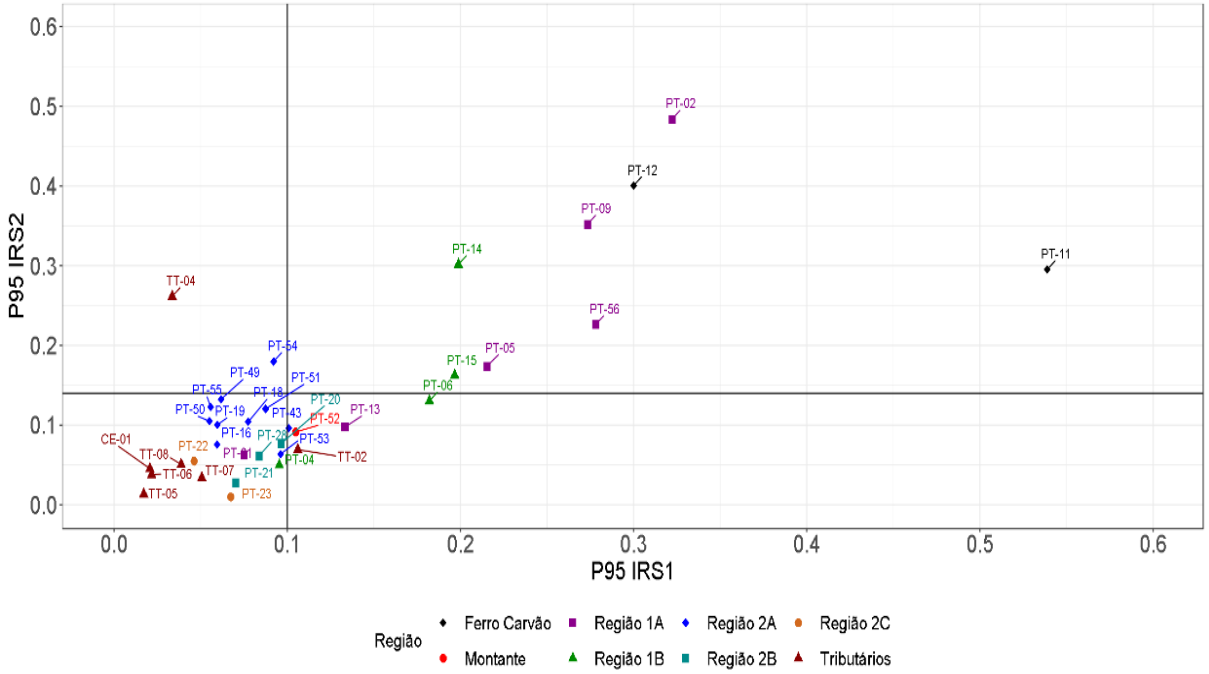
Figura 16.3-4 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem de 2020



Elaboração: Arcadis (2022)

No período de chuva de 2020/2021, constatou-se 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 16.3.5**). Os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão destacam-se por apresentarem maiores valores de IRS1, ficando em um agrupamento que o diferenciou das regiões mais afetadas. Já os sedimentos amostrados na região 2A apresentaram característica de sedimento natural, muito embora o PT-54, que não apresentou característica composicional definida, exibiu 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 neste ponto. Semelhante ao período anterior, isto faz sentido com a 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.

Figura 16.3-5 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021

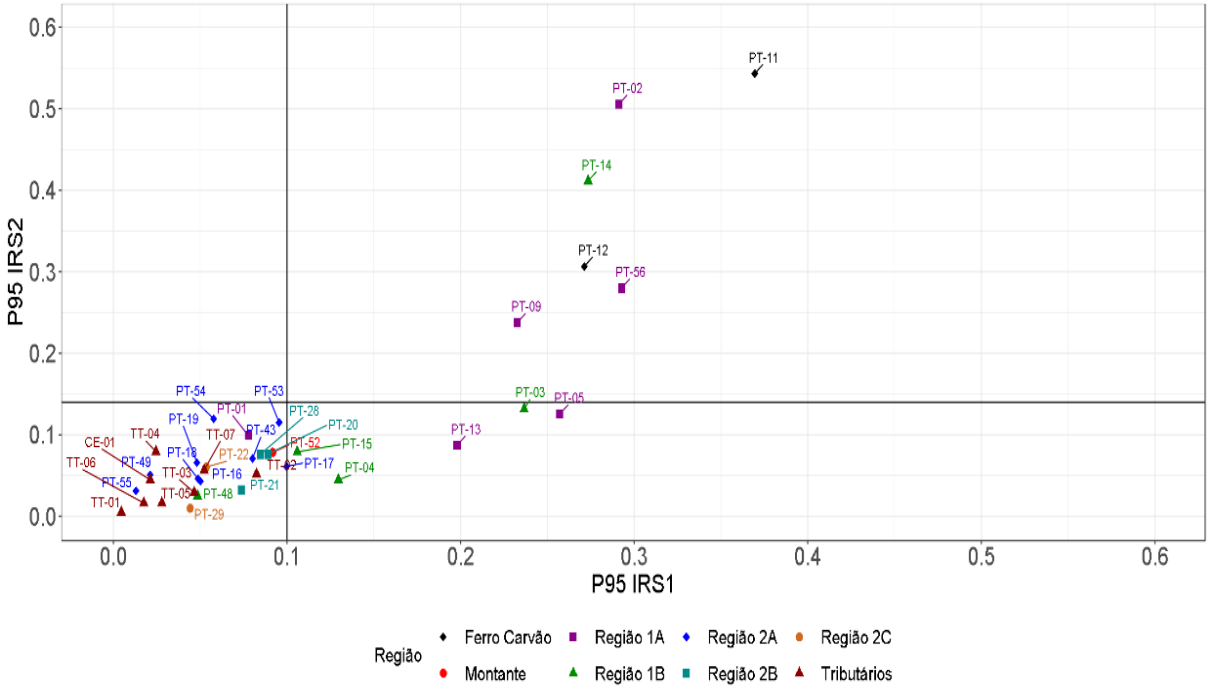


Elaboração: Arcadis (2022)

No período de estiagem de 2021 (**Figura 16.3.6**) percebeu-se 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.

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. Os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão já não se comportaram como um grupo isolado e seus valores de IRS1 e IRS2 se assemelharam com os de amostras coletadas na região 1A. Isto poderia apontar uma pequena parcela de presença de finos oriundos dos rejeitos, misturados com a maioria de sedimentos naturais nestes pontos como foi confirmado 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.

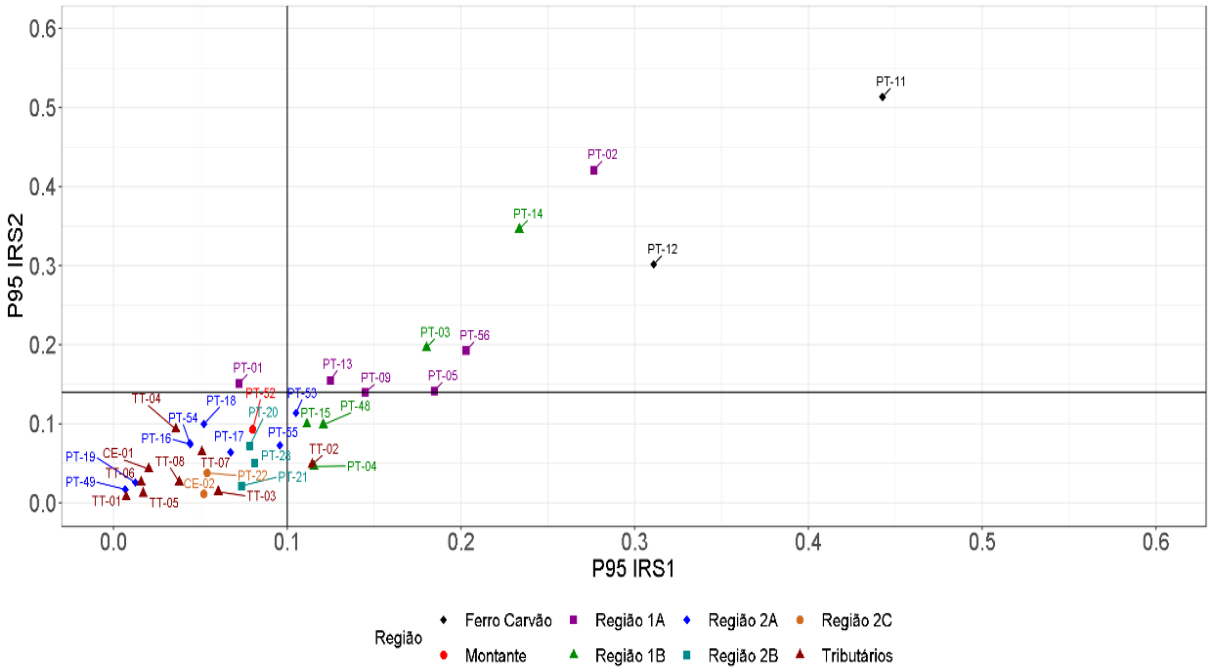
Figura 16.3-6 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2021



Elaboração: Arcadis, 2022

No período de chuvas de 2021/2022, constatou-se 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 na região 1B indicou o limite da posição do sedimento com característica química de rejeitos (**Figura 16.3.7**). 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 no ribeirão Ferro-Carvão novamente se destacaram por apresentarem os maiores valores de IRS1 e IRS2. Os sedimentos amostrados na região 2A apresentaram característica de sedimento natural, porém alguns deles como PT-50, não apresentou característica composicional definida, mas apresentou 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.

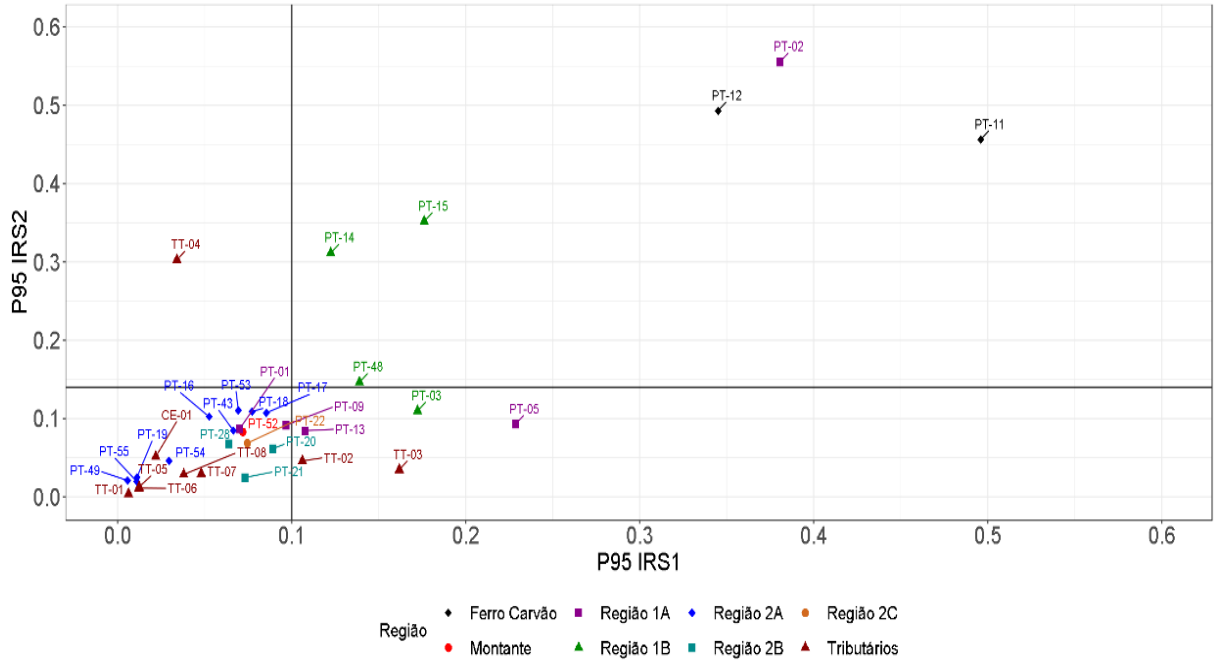
Figura 16.3-7 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022

No período de estiagem de 2022 (**Figura 16.3.8**) 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. A região Ferro-Carvão, da mesma forma, 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*). 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, apresentaram manutenção das assinaturas de sedimentos com característica química natural.

Figura 16.3-8 Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de estiagem 2022



Elaboração: Arcadis, 2022

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 brutos e avaliaram-se as características dos sedimentos em determinados pontos da bacia. O critério de seleção dos pontos foi:

- Um número 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 de 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

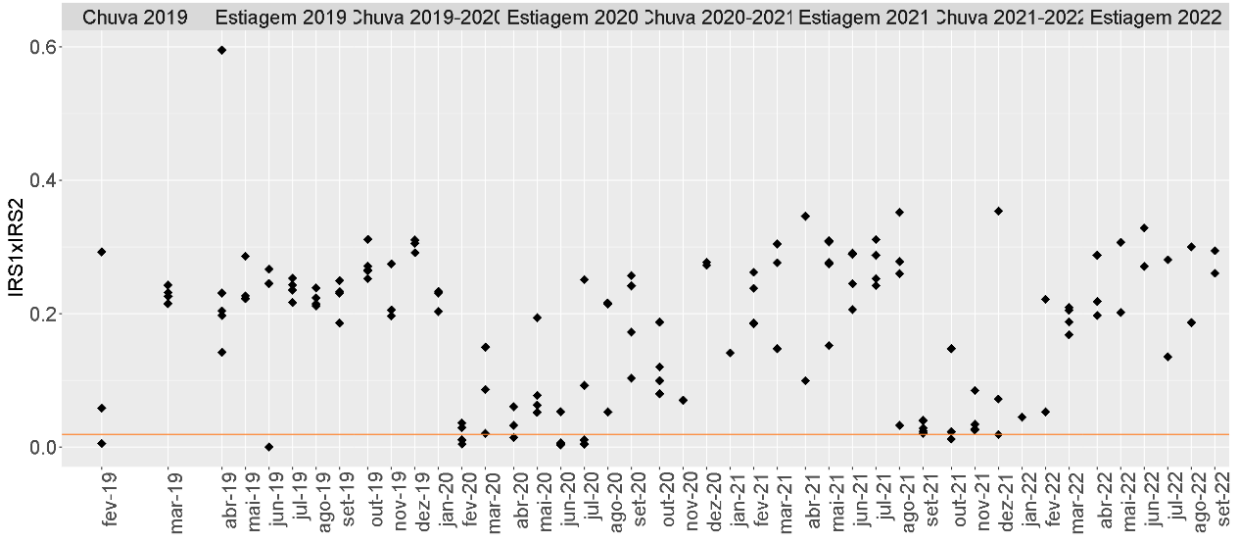
Nesta avaliação, o produto dos índices (*i.e.*, IRS1xIRS2) foi introduzido como parâmetro adicional de análise, a fim de avaliar seus efeitos conjuntos, ao longo do tempo. O produto entre as 2 variáveis foi utilizado como artifício, uma vez que, conceitualmente, são sinérgicos os efeitos dos índices para a diferenciação entre sedimentos naturais e rejeitos.

Neste caso, por analogia, os balizadores (P95) determinados anteriormente foram multiplicados entre si, obtendo-se o valor de 0,0192. 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 16.3-9**), constatou-se, claramente, dois campos composicionais principais, a partir da dispersão dos dados analíticos, no diagrama. O primeiro deles correspondeu justamente ao ano hidrológico 2019 (até Jan/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 setembro/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. 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. A estiagem de 2022 voltou a apresentar elevação dos valores de IRS1xIRS2, ao mesmo patamar de valores que o do primeiro período avaliado (2019), com características químicas de rejeitos.

Figura 116.3-9 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-02



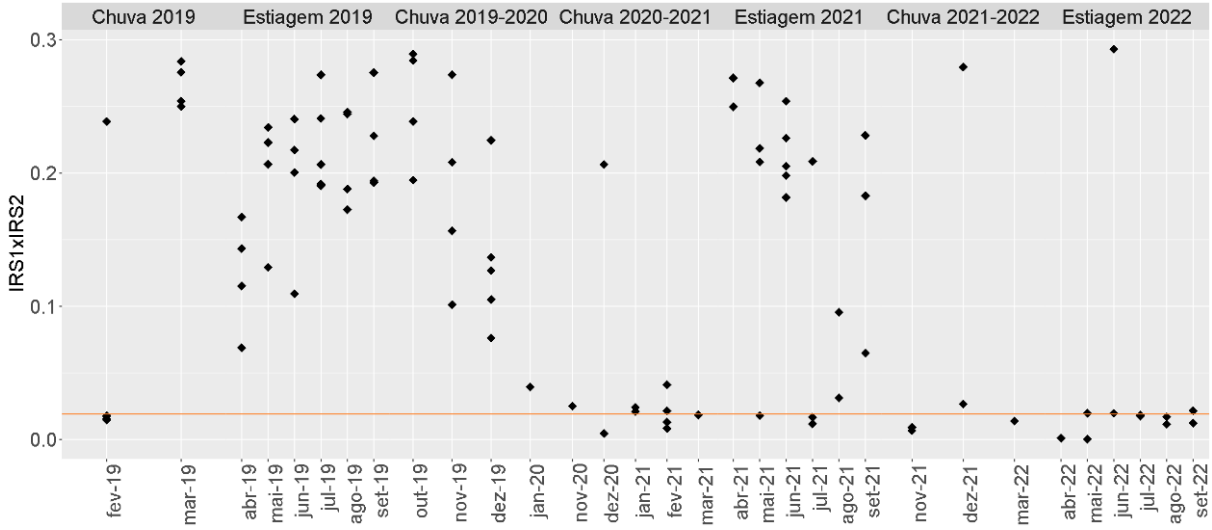
Elaboração: Arcadis (2022)

PT-14

Na região 1B, as amostras coletadas no PT-14 mostraram predominância de característica química composicional de rejeitos essencialmente ao longo de todos os períodos sazonais.

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 (**Figura 16.3-10**). A partir daí, houve uma tendência de decréscimo dos índices químicos, atingindo o limite rejeitos/sedimentos naturais em novembro de 2020, e permaneceu 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.

Figura 16.3-10 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-14



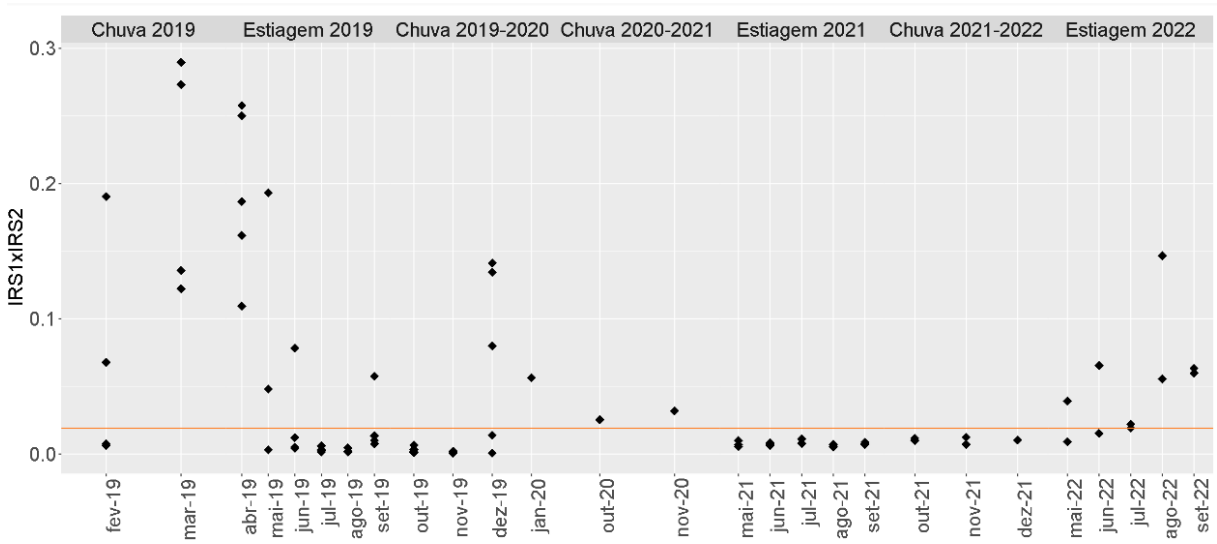
Elaboração: Arcadis (2022)

PT-15

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 amostragem normal, com dados a partir de maio até setembro de 2022.

Os resultados do produto IRS1xIRS2 são apresentados na **Figura 16.3.11**. 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. 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 dez/2019, que apresentou incremento de valores para o campo de rejeitos, seguido de nova tendência de queda em janeiro/2020. Entre fevereiro e setembro deste mesmo ano não houve resultados disponíveis, porém em outubro/2020 percebeu-se que o produto IRS1xIRS2 mantinha a característica química de rejeito para os sedimentos locais. Ele já tangenciava o limite da transição para os sedimentos naturais, o que ocorreu desde novembro/2020 e se manteve até dezembro/2021, com esta mesma característica e mostrando regressão dos materiais com característica química de rejeito na localidade. A partir de maio/2022, no período de estiagem, o produto IRS1xIRS2 voltou a evidenciar assinatura de rejeito, com progressão de valores do limite entre a transição entre sedimento natural e rejeito, para rejeito em setembro.

Figura 16.3-11 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-15.

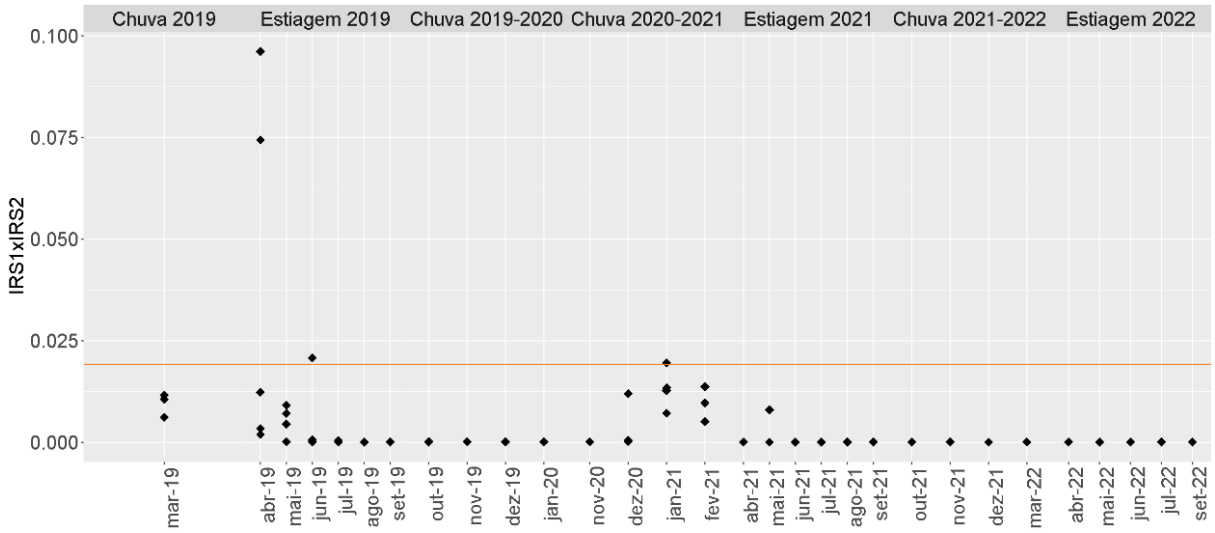


Elaboração: Arcadis (2022)

PT-49

Na região 2A, os dados IRS1xIRS2 das amostras do ponto PT-49 indicaram característica química composicional predominantemente de sedimentos naturais, ao longo do período avaliado. Na avaliação do parâmetro IRS1xIRS2 (**Figura 16.3-12**) 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. 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, e 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 16.3-12 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-49



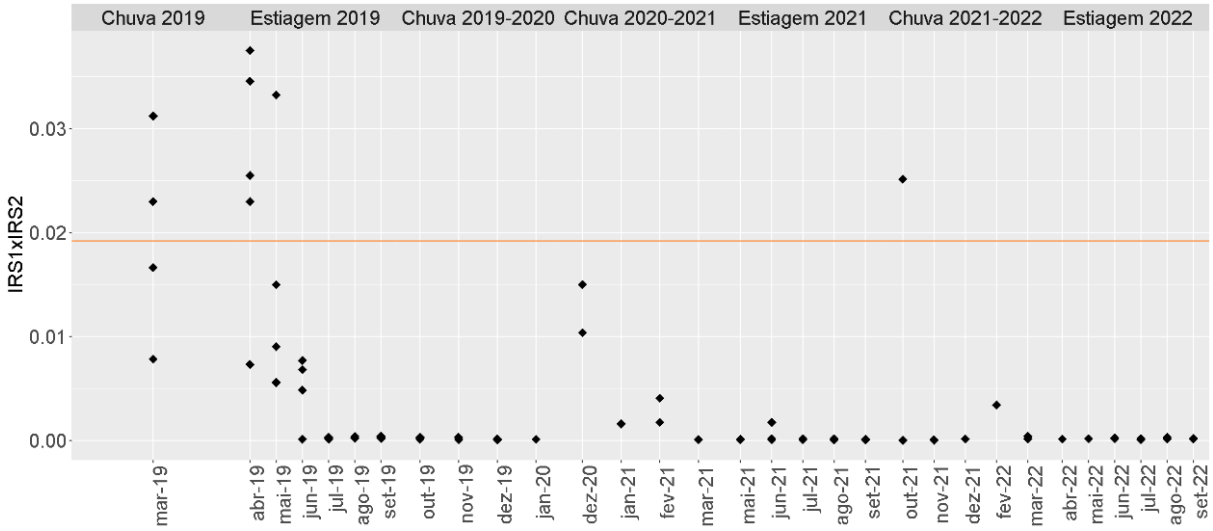
Elaboração: Arcadis (2022)

PT-55

A dispersão dos resultados no PT-55 no diagrama (IRS1xIRS2), verificou-se que nas chuvas de 2019, estiagem de 2019 (maio), se enquadraram no campo de materiais com características de rejeitos e já em junho/2019 tangencia os sedimentos com característica natural e evolui para tal composição até setembro/2022. 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. Os resultados são representados no diagrama da **Figura 16.3-13**.

Importante relembrar 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.

Figura 16.3-13 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-55

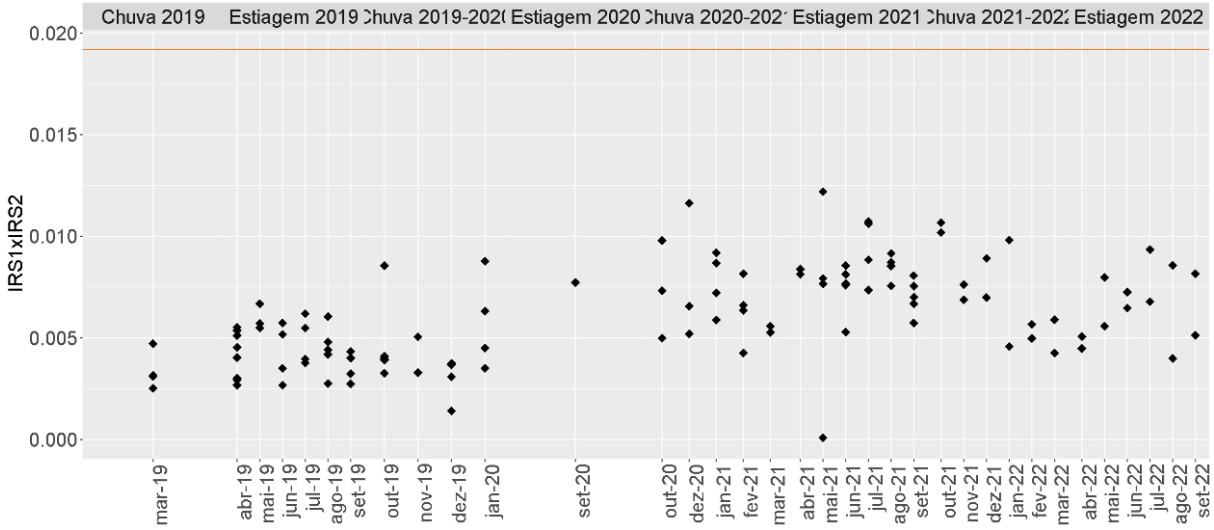


Elaboração: Arcadis (2022)

PT-20 e PT-21

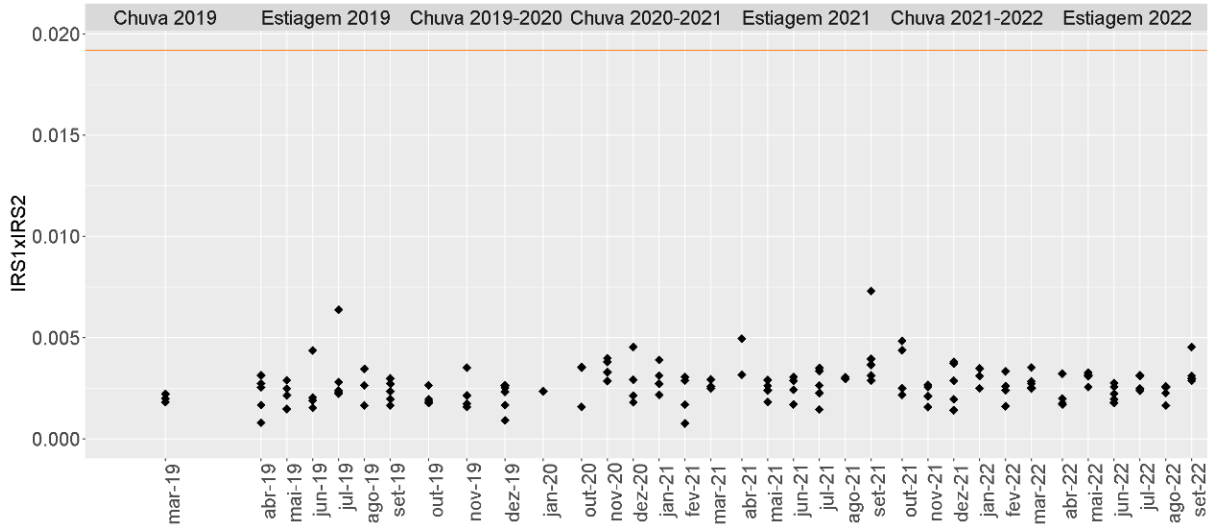
Os pontos PT-20 e PT 21 estão localizados, respectivamente na entrada do reservatório da UHE Retiro Baixo e no próprio reservatório. O diagrama dos produtos IRS1*IRS2 (**Figura 16.3-14** e **Figura 16.3-15**) indicaram materiais com característica química de sedimentos naturais durante todo o período monitorado até setembro/2022.

Figura 16.3-14 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-20



Elaboração: Arcadis (2022)

Figura 16.3-15 Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a setembro/2022 em relação ao fator multiplicador IRS1 e IRS2 no PT-21



Elaboração: Arcadis (2022)

16.4. Considerações

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 estiagem de 2022 e, espacialmente até o ponto de monitoramento PT-15, localizado no fim da região 1B.

- 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 nas chuvas de 2019. Entre as chuvas de 2019/2020 e a estiagem de 2022, a característica química do rejeito foi evidenciada até o PT-15 (final região 1B), enquanto 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 estiagem de 2022.

- 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 repontuar que, ao contrário do que foi verificado nas regiões 1A e 1B, as características químicas de rejeitos indicadas disseram 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 (*Geoenviron*, 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.

Esta condição também foi sustentada quando se verifica que 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 manganês e ferro, indicando que eles não contribuíram para variação dos índices no rio Paraopeba. Houve uma exceção identificada no TT-02 como fase indeterminada, mas 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.

17. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais

17.1. 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 estiagens de 2019, 2020, 2021 e 2022, e avaliar se tais variações identificadas no período recente encontram-se nos mesmos trechos e/ou se estes trechos continuam afetados pelo rejeito das barragens B1, B4, B4A.

17.2. Metodologia

O método aplicado foi a elaboração de gráficos com as concentrações máximas de cada ponto por período sazonal na matriz água e na matriz sedimentos, diferenciando-as em colunas para sedimentos e linhas para a água superficial. Os pontos de monitoramento foram dispostos em ordem unifilar de modo a se verificar as variações nas concentrações no espaço e no tempo.

A análise da qualidade da água e dos sedimentos foi realizada levando-se em consideração os resultados analíticos de Manganês, Ferro, Alumínio, Fósforo, Chumbo, Cobre, Níquel e Arsênio para os períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2022 e estão apresentados nos **Gráficos 17.3-1** a **17.3-7**.

Estes gráficos são avaliados da seguinte forma: as colunas representam as concentrações dos sedimentos e as linhas representam a água superficial, para cada período sazonal. As cores de cada período acompanham tanto as colunas quanto as linhas, se diferenciado em quatro períodos. Esta exposição é para avaliar o comportamento de metais prioritários (Mn, Fe, Al) e traço (Pb, Cu, Ni, As) e P 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 apresentada no **ANEXO II.**

Os parâmetros foram selecionados para avaliação das possíveis alterações dos sedimentos e sua integração com a água. As variáveis apresentadas levaram em consideração as características do rejeito e a avaliação dos tipos de transporte sob baixa energia de fluxo que poderiam ter capacidade de transporte de materiais em suspensão e deposição dos sedimentos de fundo. Essa avaliação é realizada desde a região Montante, confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão segue para a UHE Retiro Baixo e avança até o PT-22 na entrada do reservatório da UHE Três Marias.

17.3. Resultados e discussão

A avaliação integrada entre as matrizes água e sedimentos foi importante para se evidenciar maior disponibilidade de metais prioritários Manganês e Ferro nos sedimentos e na água superficial (frações totais) nas regiões 1A e 1B, que foram as mais afetadas pelo avanço do rejeito das barragens B1, B4 e B4A. À medida que se afastaram dessas regiões, e da fonte, as concentrações desses metais, de forma geral, foram se atenuando nas duas matrizes. Tal processo pode ser explicado seja pela redução da contribuição dos rejeitos das barragens, que foi interrompida com a implantação da cortina metálica no ribeirão Ferro-Carvão, seja pela mistura ou sobreposição de sedimentos oriundos da bacia sobre os rejeitos ou, ainda, pelo intemperismo de rochas, erosão marginal do solo, lixiviação e solubilização de materiais que podem contribuir para a disponibilização de elementos na água superficial e nos sedimentos. A análise integrada também considerou a avaliação de elementos secundários como Alumínio, Fósforo e dos traços Chumbo, Cobre, Níquel, Arsênio e Cromo.

Outro aspecto relevante nesta análise, refere-se à sazonalidade. 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.

Adicionalmente, percebe-se que os monitoramentos ao longo do tempo, tanto para a matriz água, quanto para a matriz sedimentos, têm apresentado redução nas concentrações quando comparados com o início do monitoramento em 2019. Constatou-se, ao longo dos períodos sazonais, que nas regiões 1A e 1B, as concentrações dos metais nos sedimentos continuaram mais elevadas, haja vista que a maior quantidade de rejeitos acumulados e ainda evidenciados entre as regiões 1A até o PT-15, na região 1B. Ademais, aspectos como a morfologia do corpo hídrico (declividade do rio, baixa sinuosidade na maioria das seções amostradas), as estruturas de contenção (barramento próximo ao PT-14, 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 um potencial acúmulo sucessivo de sedimentos ao longo do curso de água entre os períodos sazonais. Assim, os efeitos entre um período e outro não podem ser interpretados como um comportamento isolado, mas possivelmente, uma somatória de causas acumuladas ao longo do tempo em função das contribuições da bacia e da dinâmica do rio. Os **Gráficos 17.3-1 a 17.3-8** mostram a avaliação qualitativa integrada entre essas duas matrizes nos períodos de estiagem.

Manganês

As concentrações de Mn avaliadas na bacia do rio Paraopeba em relação aos dados de 2008 e 2009 coletados em sedimentos de corrente pela CPRM (2018) estão representadas no mapa geoquímico elaborado pela Arcadis (2020). Verificando-se o mapa geoquímico das concentrações de manganês produzido a partir desses dados, identificando-se os pontos de monitoramento da Vale sobre este mapa e os utilizando como referência prévia ao rompimento da barragem B1, tem-se que as variações de Mn estavam, predominantemente, entre 100

mg/kg e 500 mg/kg, onde se situam as regiões Montante, 1A, 2A, 2B e 2C. Os valores mais elevados, ou seja, acima de 1000 mg/kg, foram identificados na Região 1B, entre PT-03 e PT-15 e na Região 2A nos arredores do PT-49.

Comparando-se qualitativamente os resultados deste mapa geoquímico com resultados dos diferentes períodos sazonais, percebeu-se que na Região 1A, após o rompimento da barragem B1, o aporte de sedimentos contendo manganês aumentou. De modo geral, os pontos inseridos na região Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12) apresentaram aumentos nas concentrações medianas do período de estiagem/2019 a estiagem/2021, com redução dos valores observados no PT-11 e aumento no PT-12 para o período de estiagem/2022. As demais regiões apresentaram, no geral, comportamentos de manutenção ou redução das concentrações medianas de 2019 em diante.

A **Gráfico 17.3-1a** mostra as variações ao longo dos períodos de estiagem para o manganês. Há de se perceber que, entre as regiões classificadas como mais afetadas pelo rejeito denso das barragens B1, B4, B4A, ou seja, entre as regiões 1A e 1B (PT-01 ao PT-15), estão predominantemente as maiores concentrações do Manganês nos sedimentos, juntamente com a região do Ferro-Carvão. À medida que se desloca para regiões mais distantes, o rejeito foi sendo transportado em suspensão juntamente com os sedimentos que eram descarregados para o rio Paraopeba, provenientes de outros tributários da própria bacia.

Nos períodos de estiagem constataram-se que na região montante (PT-52), as concentrações máximas variaram pouco de 2019 a 2022, sendo de 3.410 mg/kg em 2019, 2.130 mg/kg em 2020, 1.977 mg/kg em 2021 e 2.012 mg/kg em 2022. Na região Ferro-Carvão é possível observar aumentos das concentrações máximas de 2021 para 2022, ainda abaixo das concentrações identificadas em 2019.

Na região 1A, em geral, as concentrações máximas diminuíram no tempo, tendo variação de 14.151 mg/kg a 51.764 mg/kg (estiagem 2019); 4.170 mg/kg a 16.605 mg/kg (estiagem 2020), 1.847 mg/kg a 24.004 mg/kg (estiagem 2021) e 1.557 mg/kg a 20.666 mg/kg (estiagem 2022). Na região 1B, as concentrações máximas também se reduziram ao longo do tempo, sendo que variaram de 21.100 mg/kg a 37.169 mg/kg (estiagem 2019); 13.400 mg/kg a 26.300 mg/kg (estiagem 2020); 634 mg/kg a 20.950 mg/kg (estiagem 2021) e 2.473 mg/kg a 19.063 mg/kg (estiagem 2022), entretanto os pontos PT-48 e PT-15 apresentaram aumento das concentrações em relação ao período anterior. Para as regiões menos afetadas pelo rompimento da barragem, a partir da Região 2A, as concentrações também reduziram nesse trecho, tendo variado de 3.160 mg/kg a 13.000 mg/kg (estiagem 2019); 337 mg/kg a 4.950 mg/kg (estiagem 2020); 337 mg/kg a 5.943 mg/kg (estiagem 2021) e 203 mg/kg a 6.127 mg/kg (estiagem/2022), entretanto os pontos PT-17 e PT-18 apresentaram aumento das concentrações em relação ao período de estiagem/2021. Na região 2B, as variações foram menores no aspecto espaço-temporal, indo de 1.130 mg/kg a 2.018 mg/kg (estiagem 2019) e 1.397 mg/kg a 3886 mg/kg (estiagens de 2020 a 2022). Na região 2C as variações também foram pequenas, indo de 1.331 mg/kg (estiagem 2019) a 2.291 mg/kg (estiagem 2022), indicando pequeno aumento para 2022 em relação a 2021.

De forma geral, para as concentrações medianas, **Gráfico 17.3-1B**, nota-se que as diferenças mais proeminentes para esta variável estatística, em relação aos resultados máximos, ocorreram para os pontos localizados entre a região de Ferro-Carvão e final da 1B.

Comparando os resultados com os dados da CPRM (2018), de forma qualitativa, percebeu-se que as concentrações do manganês aumentaram em toda a bacia, inclusive a montante do rompimento da barragem onde antes as concentrações eram de até 500 mg/kg e em 2022 percebeu-se concentrações até 12 vezes maiores. De qualquer maneira, as concentrações de Manganês permaneceram maiores nos trechos entre os PT-01 e PT-15 (regiões 1A a 1B) com resultados até 29 vezes maiores que os constatados pela CPRM (2018) nos tributários dessa bacia. Ademais, ao se aplicar os índices IRS1 e IRS 2 percebeu-se que há predominância dos sedimentos com característica química de rejeitos até a região 1B (PT-14) no período de chuvas 2021/2022. Para este último período, de estiagem de 2022, a região 1B (PT-15) mostrou sedimentos com características químicas de rejeito, enquanto na região 2A, verificou-se que desde as chuvas 2019/2020, os sedimentos possuem característica natural, haja vista a redução do Manganês nesta localidade, indicado como marcador do avanço dos rejeitos da barragem ao longo do rio Paraopeba. Tal característica de marcador está relacionada ao fato desse elemento estar presente nas várias frações granulométricas, incluindo as mais finas como identificado nos estudos de granuloquímica de Geoenviron (2019).

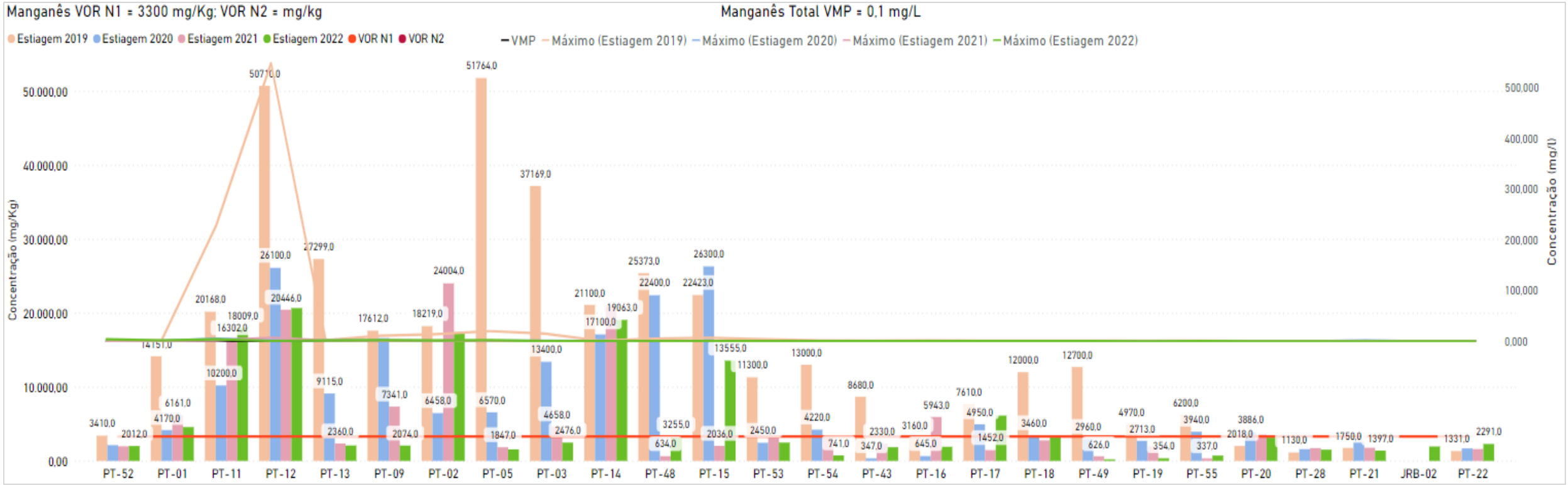
Da mesma forma, ao se integrar essa avaliação ao comportamento das águas, as concentrações máximas de Manganês total na água superficial tiveram redução nas concentrações ao longo dos quatro períodos de estiagem, quando se avalia as concentrações máximas.

Nestas duas matrizes, percebeu-se que, ao longo do tempo, houve contribuições provenientes de transportes de materiais oriundos de sub bacias a montante do rompimento da barragem que contribuíram para o transporte de materiais em suspensão contendo o Mn até chegar na região do rompimento, sendo que as concentrações máximas já superavam os valores da Resolução COPAM CERH 08/2022 nos quatro períodos, sendo estes provenientes de contribuições da própria bacia (atividades antrópicas como mineração; desmatamentos, intemperismos de rochas e ou erosões do solo). Entre as regiões 1A e 1B permaneceram as maiores concentrações de Manganês total, à semelhança do evidenciado para os sedimentos e foram se reduzindo à medida que se afastava da área fonte, porém, nesta estiagem ainda se observou alguns pontos em que a concentração máxima superou a máxima de 2021, como no PT-12 (Ferro Carvão) e PT-14 e PT-15 (região 1B), provavelmente por serem regiões de retenção hidráulica que acabaram acumulando materiais transportados das chuvas de 2021/2022. No caso da água superficial, as concentrações se atenuaram no tempo e espaço, uma vez que, na estiagem, ocorre redução dos materiais em suspensão transportados sob regime de menor fluxo, ainda que se perceba que nas regiões Montante e 1A sejam observados pontos com tendência de aumento. Essa condição pode ser resultante dos efeitos das últimas chuvas, visto que o período chuvoso de 2021/2022 apresentou volumes pluviométricos notadamente elevados (Arcadis, 2022b), o que pode ter reverberado para o período de estiagem de 2022 com a bacia ainda em condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal fluvial.

Em caráter mais específico, os totais precipitados acumulados mensais (mm) desde 2019 das estações pluviométricas utilizadas ao longo do rio Paraopeba (Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, Retiro Baixo Montante e Retiro baixo Jusante) foram comparados às médias mensais históricas (1941 a 2019) de medições convencionais de precipitações (mm) reportadas pelas estações Melo Franco e Ponte Nova do Paraopeba de acordo com a localização mais próximas das estações de análise (Gráfico 4.2-8).

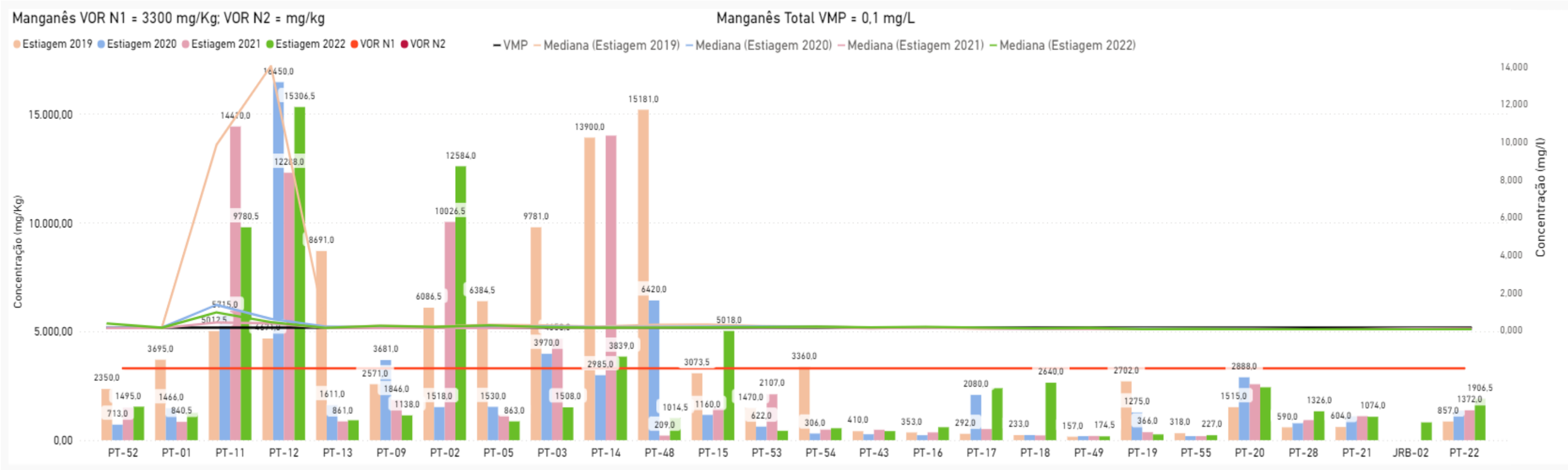
A comparação dos valores IRS entre as campanhas de amostragem permitiram confirmar a queda relativamente significativa de Mn (ou seja, dos valores IRS2) nos rejeitos, ao longo do tempo. Esta queda ocorreu predominantemente em função do decréscimo de Mn. Isso foi observado no detalhe e em diferentes profundidades na avaliação da carga de fundo dos sedimentos realizados por Arcadis (2021b). A comparação se deu entre as campanhas de 2019 e 2020, mas verificou-se redução na composição modal dos rejeitos, em detrimento às outras fases mineralógicas ali presentes. Ainda, verificou-se que o decréscimo dos teores relativos de Mn ocorreu nas porções mais rasas dos pontos e intervalos de amostragem em comum nas 2 campanhas de amostragem (2019 e 2020). Os resultados levantados indicaram que a presença de camadas ferruginosas em níveis profundos foi interpretada como materiais não relacionados com os rejeitos oriundos da Barragem B1 e que podem ter origem de atividades pretéritas da mineração de ferro da região.

Gráfico 17.3-1a: Evolução das concentrações máximas de manganês em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do manganês, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022. A linha sólida preta representa o valor de referência para Manganês obtido de Vicq (2015).

Gráfico 17.3-1b: Evolução das concentrações medianas de manganês em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do manganês, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022. A linha sólida preta representa o valor de referência para Manganês obtido de Vicq (2015).

Ferro

As concentrações de Fe avaliadas na bacia do rio Paraopeba, em relação aos dados de 2008 e 2009 coletados em sedimentos de corrente pela CPRM (2018), está representada no mapa geoquímico elaborado pela Arcadis (2020). Verificando-se o mapa geoquímico das concentrações de Fe produzido a partir desses dados, utilizando-os como referência prévia ao rompimento da barragem B1, B4, B4A e identificando os pontos de monitoramento da Vale sobre este mapa, os dados mostram variações na Região Montante (entre 10.000 mg/kg e 35.000 mg/kg); Ferro-Carvão a 1B (maior que 70.000 mg/kg); Região 2A (entre 11.000 e 35.000 mg/kg e entre 35.000 e 70.000 (PT-49 a PT-19)); Região 2B e Região 2C (entre 20.000 mg/kg e 35.000 mg/kg).

Em relação ao Ferro nos sedimentos, constatou-se pelo **Gráfico 17.3-2a**, que na região Montante, as concentrações máximas estiveram na faixa de 148.000 a 158.000 mg/kg ao longo dos períodos de estiagem de 2019 e 2020, com reduções nos períodos seguintes, de 71.779 mg/kg (2021) a 67.405 mg/kg (2022). A região Ferro-Carvão apresentou padrão de aumento das concentrações de 2019 a 2020, seguida de redução para 2021 e pequeno aumento em 2022 em concentrações que variaram de 223.316 mg/kg a 676.000 mg/kg no PT-11 e de 233.303 a 396.000 mg/kg no PT-12. As regiões 1A e 1B acumularam as maiores concentrações, junto com a região Ferro-Carvão, tanto na estiagem de 2019 (244.775 a 416.000 mg/kg) quanto na estiagem de 2020 (85.690 mg/kg a 547.000 mg/kg). Nas estiagens de 2021 (42.285 mg/kg a 276.401 mg/kg, agrupando os dois trechos até PT-15, ou entre 113.484 e 276.401 mg/kg até o PT-14) e 2022 (63.645 mg/kg a 251.791 mg/kg) percebeu-se redução nas concentrações máximas em relação aos períodos anteriores. Entretanto, elas ainda permaneceram maiores quando comparadas, qualitativamente, aos resultados obtidos pela CPRM em 2008 e 2009 em tributários desta região. As concentrações máximas para o período de estiagem recente indicam, de modo geral manutenção no padrão de distribuição das concentrações do ferro quando comparadas ao período de estiagem/2021. Dessa forma, o período de 2020 permanece sendo período que apresenta as maiores concentrações de Ferro ao longo das regiões Ferro-Carvão a 1B.

Na região 2A (PT-53 ao PT-55), as concentrações máximas foram menores em relação a 1A e 1B, mas tiveram aumento na região, variando na estiagem de 2019 de 108.000 mg/kg a 274.000 mg/kg; na estiagem/2020 de 14.500 mg/kg a 170.000 mg/kg), na estiagem de 2021 (6.833 mg/kg a 90.497 mg/kg) e na estiagem/2022 de 5.192 mg/kg a 112.463 mg/kg), evidenciando assim uma pequena oscilação das concentrações máximas de Ferro no sedimento ao longo dos períodos monitorados. Na região 2B (PT-20 ao PT-21), as concentrações nas estiagens de 2019 a 2022 ocorreram entre 74.000 e 107.000 mg/kg, com pouca variação temporal e espacial. Nas duas regiões, as variações foram maiores que a referência da CPRM de 2008 a 2009 (maiores que 70.000 mg/kg) quando comparados de forma qualitativa, sugerindo alteração na concentração de Fe nos sedimentos e que estes tiveram contribuição do rejeito e dos materiais da bacia transportados e depositados ao longo do rio Paraopeba. Na região 2C, as concentrações máximas de ferro ocorreram na faixa de 45.576 mg/kg a 62.910 mg/kg ao longo das estiagens, e são maiores, qualitativamente, que as

concentrações identificadas pela CPRM (20.000 mg/kg e 35.000 mg/kg) nos tributários próximos da região.

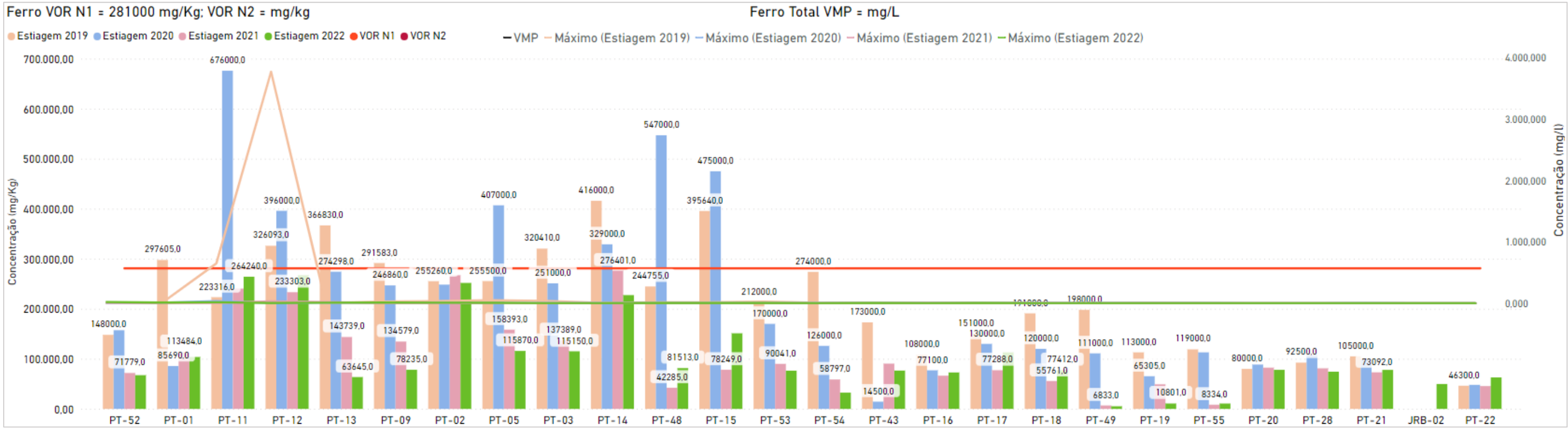
Avaliando-se os resultados ao longo do tempo, percebeu-se, de forma geral, redução nas concentrações de Ferro ao longo dos períodos sazonais. Para os resultados das medianas (**Gráfico 17.3-2b**), são verificadas concentrações mais reduzidas quando comparadas aos resultados máximos para os pontos ao longo de toda a bacia, mas com um padrão de distribuição similar. Verificando-se a distribuição desses elementos com o comportamento dos índices químicos composicionais, evidencia-se predominância das maiores concentrações de Ferro até o PT-15, indicando predomínio de sedimentos com composição química de rejeitos a jusante da UTE Igarapé, fato que no ciclo anterior se limitava ao PT-14. Análises mineralógicas evidenciaram que a densidade dos sedimentos (acima de 3,1g/cm^3) e mineralogia composta por mais de 50% de hematita, indicaram que o rejeito da barragem B1 alcançou o PT-14 (P-22 do estudo) e o P-24, próximo ao PT-15 deste monitoramento, sendo que neste último, as evidências foram limitadas à avaliação da densidade maior que 3,2 g/cm^3 (Arcadis 2021b). A jusante dessa área, a densidade foi menor que 3,2 g/cm^3 e a presença de hematita também se reduziu gradativamente, corroborando com o observado na avaliação qualitativa e índices químicos composicionais apresentados no relatório de fechamento de ciclo de abril/2021. Adicionalmente, neste mesmo estudo confirmou-se através de análise modal e mineralógica, o aumento da ocorrência de quartzo e caulinita na campanha de 2020 em relação a 2019 e na redução na densidade dos sedimentos. A esta variação atribuiu-se a transporte de materiais mais recentes, pós rompimento das barragens B1, B4, B4A e com característica de sedimento natural, a considerar a densidade, mineralogia (quartzo e caulinita) também verificados em localidades à montante da influência do rompimento da barragem e pela composição química dos materiais que apresentaram menor presença de hematita.

Além disso, as variações nas concentrações têm a ver com mudanças dos transportes de materiais provenientes de erosões do solo, contribuições antrópicas (atividades minerais de extração de areia, atividades agropastoris e mineração), intemperismo de rochas das unidades litológicas mais enriquecidas por este elemento (Supergrupo Minas e Grupo Nova Lima) para as menos enriquecidas, como os granitoides e gnaisses do Complexo Bonfim e metassedimentos do Grupo Bambuí.

Avaliando-se o comportamento da água, percebe-se, no **Gráfico 17.3-2a**, que as concentrações do Ferro total foram as mais elevadas na Região 1A e 1B no ano de 2019 e até mais elevadas do que a contribuição monitorada no ponto de montante (PT-52). À medida de se deslocou da fonte (barragens B1, B4, B4A), as concentrações de Ferro total, foram se atenuando em direção ao reservatório da UHE Retiro Baixo, ainda em 2019 onde se dispersou. De forma geral, as concentrações de Ferro total foram mais tênues nos períodos de estiagem de 2020 e continuaram a se reduzir em 2021 e 2022, ficando os resultados deste período predominantemente mais baixos que todos os períodos anteriores e em toda a extensão do rio Paraopeba. Isso indica que apesar da presença do rejeito da barragem B1 nos trechos das regiões 1A e 1B, as concentrações desse metal na água mostraram redução geral, haja vista a redução dos materiais em suspensão transportados sob regime de menor fluxo. Há de se

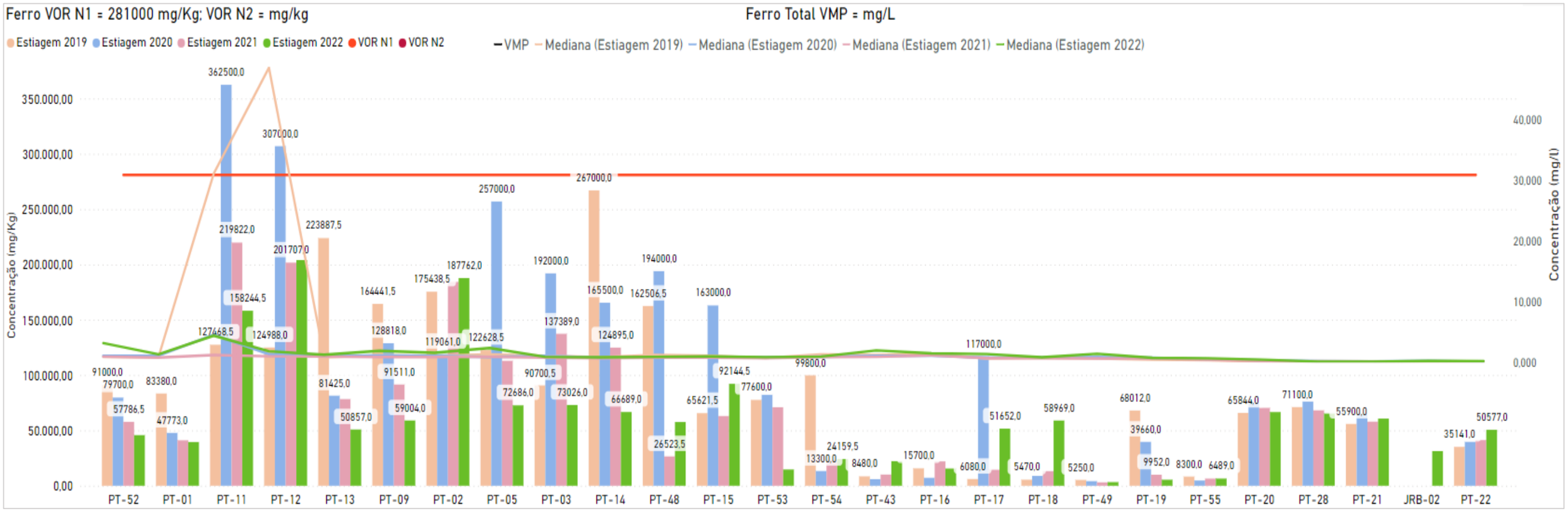
pontuar que nas regiões Montante e Ferro-Carvão houve aumento e este é reflexo do período de chuvas anterior, que ainda mostra condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal do rio, como já discutido nos capítulos 4 e 5.

Gráfico 17.3-2a: Evolução das concentrações máximas de ferro em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do ferro, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022

Gráfico 17.3-2b: Evolução das concentrações medianas de ferro em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do ferro, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Alumínio

O mapa geoquímico de distribuição do Alumínio (Al) em sedimentos de fundo elaborados pela Arcadis (2020), com base nos dados de 2008 e 2009 da CPRM (2018), mostra que as concentrações de Al na bacia do rio Paraopeba na Região Montante (PT-52) alcançavam 12.600 mg/kg; na Região Ferro-Carvão, se encontravam as menores concentrações de Al, na ordem de 8.000 mg/kg; na Região 1A, chegava a 12.600mg/kg; entre as regiões 1B e 2A, oscilavam entre 12.600 e 24.800 mg/kg; e nas regiões 2B e 2C, apresentavam trechos que ultrapassava os 24.600 mg/kg.

Avaliando-se os resultados ao longo dos períodos sazonais de estiagem, percebeu-se que, na Região Montante do rompimento da barragem (PT-52), já eram apontadas concentrações na ordem de 46.000 mg/kg em 2019 e 2020, seguida de redução para 24.779 mg/kg na estiagem 2021 e 19.946 mg/kg (2022), até 2 vezes maior que os dados da CPRM (2018) (**Gráfico 17.3-3a**). Quando comparados, qualitativamente, observa-se um indicativo de aumento e redução na concentração de alumínio no sedimento como condição de disponibilidade química na própria bacia.

A região 1A, apresentou redução nas concentrações máximas de alumínio, que variaram entre 15.991 mg/kg e 48.340 mg/kg (estiagem/2019); 17.299 mg/kg a 47.004 mg/kg (estiagem/2020), de 10.251 mg/kg a 20.943 mg/kg (estiagem/2021) e leve aumento em relação a 2022 de 7.707 mg/kg a 25.325 mg/kg (estiagem/2022). Na região 1B, as variações foram maiores que em 1A, ficando entre 23.749 mg/kg e 45.100 mg/kg (estiagem 2019); 17.200 mg/kg e 318.000 mg/kg (estiagem/2020), entre 8.440 mg/kg e 40.509 mg/kg (estiagem/2021) e entre 17.934 mg/kg e 30.943 mg/kg (estiagem/2022). Desta forma, evidencia-se que o rompimento da barragem levou a contribuição de alumínio em 2019, porém em concentrações menores que na região Montante, e maiores quando comparados qualitativamente com os resultados da CPRM (2018), além da influência de contribuições naturais da bacia provenientes de atividades de intemperismo de rochas ácidas (Complexo Belo Horizonte) na localidade.

Percebe-se que as concentrações de Al nas regiões mais afetadas (1A e 1B) pelo rompimento da barragem B1 são as que apresentam as menores concentrações e, as mais afastadas (regiões 2A, 2B e 2C), as maiores, principalmente a partir do PT-18 até reservatório de Retiro Baixo, onde verificou-se, acúmulo de concentrações de Al entre 76.000 mg/kg e 106.000 mg/kg (estiagem de 2019) e entre 45.000 mg/kg a 145.000 mg/kg (estiagens 2020 a 2022).

Quanto aos resultados medianos (**Gráfico 17.3-3b**), são verificadas concentrações mais reduzidas quando comparadas aos resultados máximos para os pontos ao longo de toda a bacia, e isto, para ambas as matrizes, água superficial e sedimento.

A ocorrência do Al é menor em rochas metavulcânicas como as associadas aos Grupos Itabira e Nova Lima (como na região 1A), enquanto granitóides e, principalmente, os metassedimentos do Grupo Bambuí já apresentam rochas mais enriquecidas em alumínio e, portanto, a presença deste elemento é mais destacada na rocha e nos produtos de intemperismo desta e solos. No reservatório de Retiro Baixo, apesar de sua condição mais lêntica permitir a deposição de

materiais transportados, ele também acumula materiais provenientes da localidade que contém rochas da Formação Serra de Santa Helena (Grupo Bambuí) e de intemperismos de granitóides. A Região 2C (JRB-02 e PT-22), a jusante da UHE Retiro Baixo, também, é envolvida por contribuições de rochas intemperizadas do Grupo Bambuí, aluviões e solos. Avaliações realizadas no rejeito por Gomes (2009) antes do rompimento da barragem e por Geoenviron (2019), após o rompimento, mostraram que o rejeito contém alumínio, sendo na ordem de 3% para Al_2O_3 no primeiro caso, e com medianas na mesma ordem no segundo caso, o que sugere que houve contribuição de Al para a bacia do rio Paraopeba, porém, esta já vinha apresentando concentrações mais elevadas desde a Região de Montante do rompimento. Nas comparações realizadas nos sedimentos e rejeito apresentados no capítulo 14 percebeu-se que a presença do Al na bacia é característica de sedimento natural e que o aporte, mesmo no momento do rompimento e que atingiu principalmente a Região 1A, não transgrediu a característica do Al na bacia do rio Paraopeba, visto que foram as menores contribuições em todos os períodos avaliados.

Avaliando a evolução da água, percebe-se no **Gráfico 17.3-3a** que, à semelhança dos períodos chuvosos, as concentrações do Alumínio total foram as mais elevadas na região 1A no ano de 2019 e até mais elevadas do que a contribuição monitorada no ponto de montante, o PT-52. A estiagem de 2019/2020 ocorre logo após as chuvas de 2019/2020, as concentrações de Alumínio total foram ainda maiores em toda a bacia, desde a região de Montante até a regiões 2B e 2C, mostrando que as chuvas atípicas de 2019/2020 transportaram materiais mais enriquecidos em alumínio e provenientes de diferentes locais que escoaram para a bacia do rio Paraopeba, porém a estiagem demonstrou quedas nas concentrações de Al em comparação aos dois períodos anteriores. Já na estiagem de 2021 percebeu-se que as concentrações máximas também se reduziram na bacia do rio Paraopeba, sendo desta vez, com máximas semelhantes ao longo de todo a extensão monitorada, mostrando, mais uma vez, a contribuição de aportes locais e da presença de alumínio provenientes de solos e rochas da bacia e de formações constituídas por minerais e argilominerais ricos em Al. Os gráficos mostram claramente que o alumínio, ao contrário dos metais prioritários ferro e do manganês teve e tem ocorrência mais distal da fonte (barragem B1). Sobre os aumentos das concentrações de Al e Fe ao longo do rio Paraopeba, pode-se perceber também que o pH da água ficou mais ácido ao longo dos períodos sazonais (**Anexo IV**).

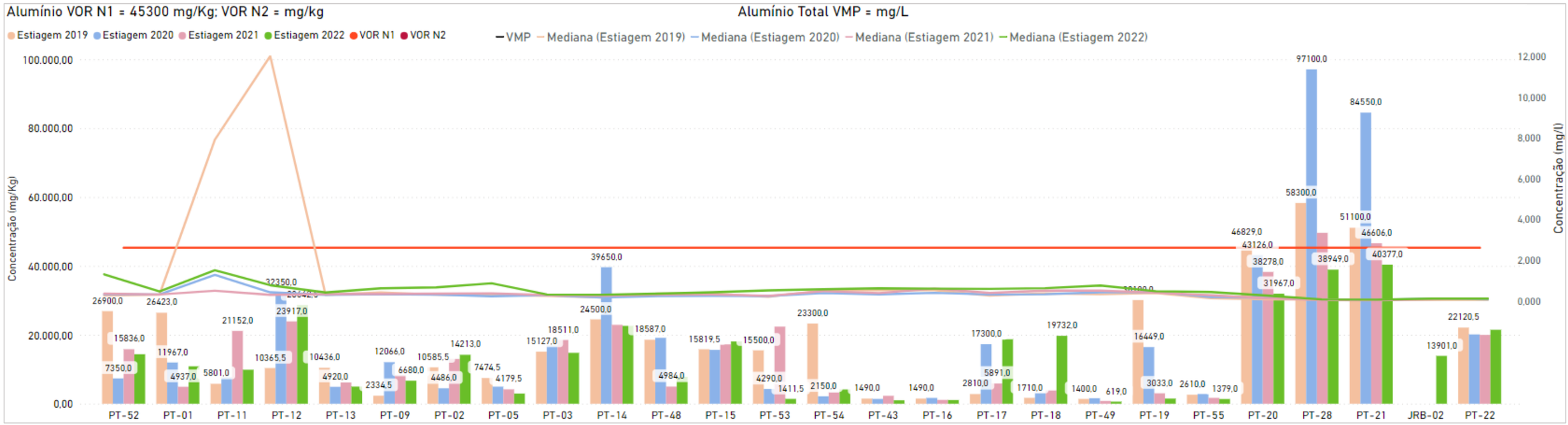
Percebe-se que as concentrações medianas de alumínio na água superficial tiveram um aumento na região Montante até 2B no período de estiagem de 2022. Tal condição pode ser resultante do período chuvoso de 2021/2022, onde foram registrados elevados volumes de precipitação superiores à média histórica (vide capítulo 4), corroborando com os aumentos de nível e vazão do rio Paraopeba no período, e reverberando no período de estiagem atual. De maneira geral, em caráter de exemplo, as precipitações de janeiro de 2022, além de terem sido intensas, aparentemente foram mais duradouras quando comparadas com o evento chuvoso de 2020 e isso deslocou e transportou materiais em suspensão, aumentando a concentração na água superficial.

Já o Alumínio dissolvido, no meio aquoso natural, é, em princípio, controlado principalmente por Al-óxi-hidróxidos como a gibbsita (α-Al_2O_3), um óxido de Al cristalino muito comum em solos

e sedimentos naturais (vide referencial teórico, Relatório de Fechamento de ciclo de abril/2021 e outubro/2021). De forma análoga ao ferro dissolvido, as maiores solubilidades ocorrem em pH mais ácido, ou mais alcalino. Adicionalmente, a fase amorfa contendo alumínio (assim como para o ferro dissolvido) se apresenta menos estável que a fase cristalina de Al-oxi-hidróxidos, podendo resultar em teores de Al dissolvido mais elevados.

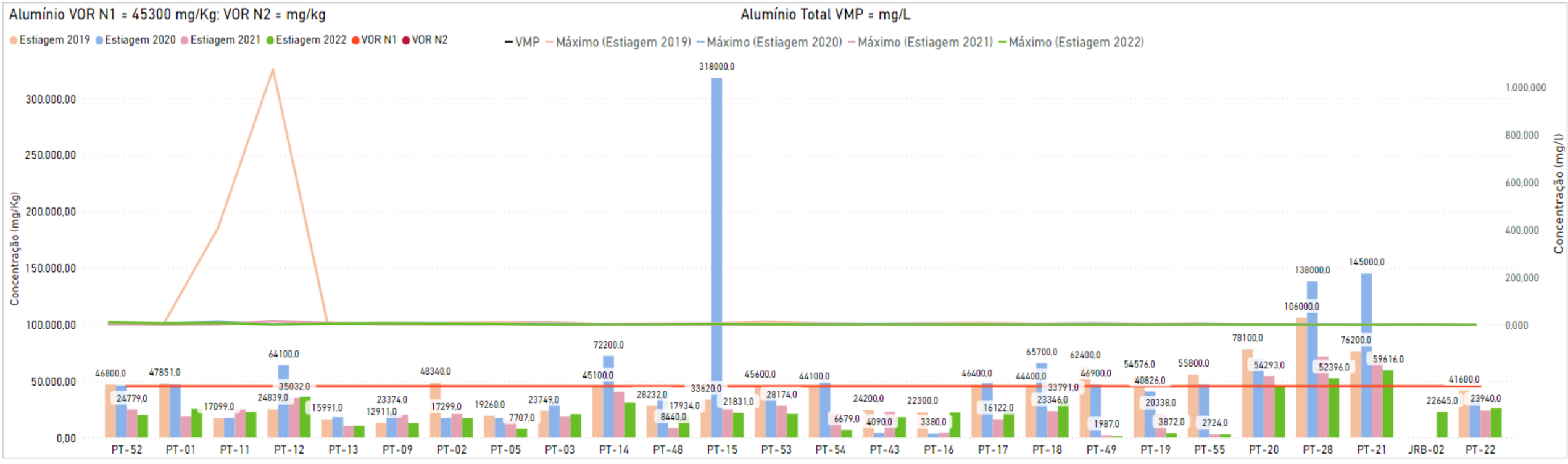
A solubilidade das fases minerais (óxi-hidróxidos como para Fe, Al e Mn) relaciona-se com as condições geoquímicas do meio aquoso como pH e potencial redox (Arcadis, Relatório Fechamento de ciclo, abril/2021). Há de se pontuar que a fase amorfa (como por exemplo óxi-hidróxidos) de um metal possui uma área superficial relativamente mais elevada que os óxidos cristalinos de um mesmo metal e, portanto, apresenta maior solubilidade relativa. Caulinita e gibbsita são comuns como produto do intemperismo e de solo e possuem Al em sua constituição. Caulinita foi identificada como um mineral comum na composição de sedimentos naturais do rio Paraopeba, ocorrendo em menores quantidades nos rejeitos, oriundos da Barragem B1. Em termos de gênese, caulinita e gibbsita relacionam entre si de forma tal que, em função das condições dos processos do intemperismo, a segunda fase constitui o produto (sólido) de dissolução da primeira, sob uma reação quimicamente reversível.

Gráfico 17.317.3-3a: Evolução das concentrações máximas de alumínio em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do alumínio, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 17.3-3b: Evolução das concentrações medianas de alumínio em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do alumínio, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Fósforo

Após Pauta extra da sessão técnica de outubro/2022, por solicitação da equipe da Aecom, representante do Ministério Público Estadual, 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. O projeto *Entire* (2022), através de modelagem de Fósforo em água superficial, indicou relação das concentrações com o rejeito. Entretanto, o estudo *Geoenviron* (2019) apontou a presença de baixos conteúdos de Fósforo no rejeito, assim como o estudo de Arcadis (2020c) sobre a caracterização geológica dos testemunhos coletados no rio Paraopeba. Nesse sentido, a seguir, estão apresentadas as avaliações de Fósforo para água superficial e sedimentos, suas concentrações e possíveis fontes.

A dinâmica do P na bacia do rio Paraopeba associa-se, principalmente: (i) a ocorrência natural deste elemento na bacia, relacionado aos minerais presentes nas rochas paraderivadas, como do grupo Nova Lima e Itabira; (ii) a contribuição antrópica desse elemento, relacionado a efluente domésticos e contribuições difusas; (iii) ao rejeito. Inicialmente, em cenário de pré-rompimento das barragens, a bacia do rio Paraopeba já apresentava concentrações quantificáveis, relacionada a fontes geogênicas/naturais e antrópicas (efluentes domésticos/contribuições difusas).

O mapa de distribuição do P em sedimentos de corrente, elaborados pela CRPM (2018), mostrou valores de concentração próximos de 640 mg/kg para maioria dos trechos da bacia do rio Paraopeba, incluindo as regiões Montante, Ferro-Carvão e mais a jusante, até a região 1B. Regiões estas que também apresentam teores naturais mais elevados de Fe e Mn (Arcadis, 2020), o que pode sugerir uma associação entre as concentrações de P, Fe e Mn como algo natural e característico desta bacia.

Do ponto de vista geológico, as regiões com teores maiores de P (Fe e Mn) estão relacionadas a ocorrências de rochas sedimentares e metavulcanossedimentares dos Grupos Nova Lima, Itabira, Sabará (Ferro-Carvão a Região 1B) e Formação Serra de Santa Helena (parte de 2A, além das regiões 2B e 2C), enquanto as regiões com valores menores associam-se a ocorrência de granitoides e gnaisses do Complexo Bonfim, Belo Horizonte, Alto Maranhão.

Além disso, o estudo de Arcadis (2020c) sobre a caracterização geológica dos testemunhos de sedimentos coletados no rio Paraopeba, também mostrou concentrações predominantes na faixa de 700 mg/kg, próximos do indicado por CRPM (2018), considerando amostras de profundidades de até 1m. Apresentou ainda valores maiores, de até 2426 mg/kg em um único local, porém relacionado a presença de níveis de rejeitos das barragens. Nesse sentido, o Fósforo representa um elemento típico e com ocorrência frequente nesta bacia, com valores que podem apresentar oscilações conforme período sazonal e aporte.

Considerando o rompimento da barragem B1 e a possível influência dos rejeitos na bacia, a Geoenviron (2019) conduziu um estudo que avaliou as concentrações químicas dos elementos presentes nos rejeitos da VALE S.A. As análises foram feitas em rejeitos com características

originais (CO) e rejeitos potencialmente misturados (RM - rejeito + solo). Com relação ao Fósforo, foram identificados valores baixos, entre 552 mg/kg e 586 mg/kg, com concentrações similares às do relatório consolidativo Vale (2019) e próximas dos valores indicados pela CPRM (2018). Além disso, o estudo apontou que o Fósforo, Manganês e demais metais-traço ocorrem associados principalmente a sedimentos finos (≤0,02 mm), dado que o rejeito apresentou granulometria de dimensões silte a areia muito fina. Comparando-se com os períodos sazonais monitorados após o rompimento da barragem (**Gráfico 17.3-4a,b**), percebeu-se que as concentrações de fósforo na Região Montante (PT-52) apresentavam valores na ordem de 980 mg/kg, maiores em 1,5 vezes aos valores da CPRM (2018), quando comparados qualitativamente.

Os trechos referentes as regiões Montante, 1A e 1B já apresentavam concentrações maiores que as demais, dadas as condições geológicas (*ca.* 500 mg/kg; CPRM, 2018) e antrópicas. Contudo, após o rompimento da barragem, houve a inserção de rejeitos à bacia que contribuíram com mais P para o sistema, o que resultou em um aumento intermitente identificado entre a chuva e estiagem/2019, para água (fração total) nas regiões impactadas (Ferro-Carvão, 1A e 1B principalmente) (**Gráfico 17-3.4a,b)**. A região Ferro-Carvão exibiu um desacoplamento entre as concentrações dissolvida e total, com aumento da fração total neste período, enquanto a fração dissolvida, em geral, não mostrou valores quantificáveis (LQ). Após a estiagem/2019, as concentrações de P total reduziram se aproximando mais das condições pré-rompimento, com regiões impactadas mostrando valores mais próximos aos trechos não-impactados.

Assim, os valores maiores de P total e baixos para P dissolvido no Ferro-Carvão após o rompimento foram condicionados possivelmente por fatores físico-químicos, que interferem na precipitação (imobilização) dos íons fosfato no ambiente aquático, destacando-se a concentração dos íons de Ferro. Além disso, a maior solubilidade de fases minerais amorfas de Fe que fases minerais cristalinas, podem influenciar na disponibilização de frações dissolvidas de Fe e de P no rio Paraopeba. Destaca-se também as características oxidantes da bacia, variando de básica a levemente ácidas, o que contribui para a mobilização de alguns elementos no ambiente.

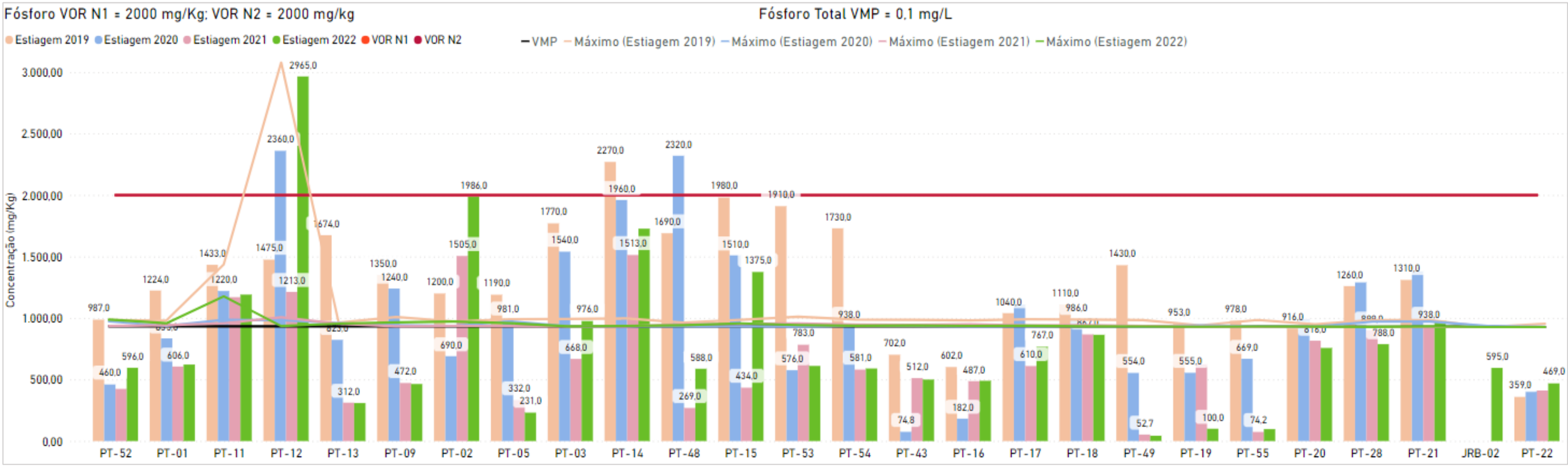
Os valores mais elevados de Fósforo total principalmente em 2019, sugerem maior presença da fração inorgânica partícula (não biodisponível) com um menor tempo de interação com o meio e transformação para fração dissolvida. Após o rompimento, a pluma de analitos e Turbidez apresentou um rápido deslocamento e um grande transporte de materiais, inclusive com carreamento, arraste e erosão de materiais superficiais (*i.e.* solos, vegetação, animais, entre outros) que contribuíram com P para o sistema, em particular na fração inorgânica, sem tempo suficiente de transformação para a fração biodisponível.

O P em sedimentos também registrou o incremento nas concentrações após o rompimento, corroborando para a ideia de que os rejeitos foram mais uma contribuição para o teor global de P da bacia do rio Paraopeba. Esse aumento (**Gráfico 17-3.4a,b)** ocorreu até o período de estiagem/2019 nas regiões 1A e 1B no rio Paraopeba, com diminuição desde então, incluindo na região Montante. Enquanto para a região Ferro-Carvão, o incremento ocorreu a partir da

chuva 2019/2020, após o represamento do ribeirão e construção da Estaca-Prancha (em setembro/2019), com manutenção dos teores até estiagem/2022. A Região 2B também mostrou concentrações similares entre os períodos e com valores maiores que das demais regiões, possivelmente relacionado ao contexto do reservatório de Retiro Baixo. Importante destacar que o estudo de testemunhos (Arcadis, 2020c) mostrou que os rejeitos têm diminuído sua ocorrência, com mistura e sobreposição por sedimentos naturais mais novos, inclusive com empobrecimento de metais no rejeito ao longo do tempo.

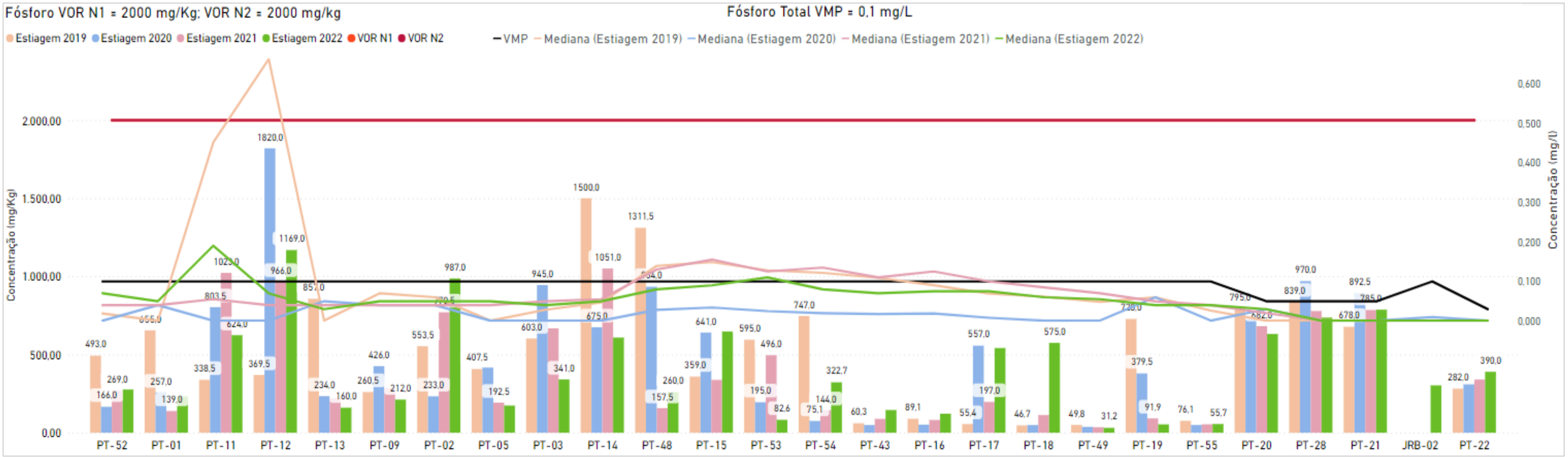
Na estiagem/2022 houve mudanças do padrão de concentração de Fósforo, principalmente para água superficial, ao longo da bacia. A região de Montante não-impactada mostrou aumento das concentrações de Fósforo total e dissolvido em água superficial, muitas vezes com os maiores valores dentre os períodos sazonais avaliados. Na mesma linha, os trechos impactados (Ferro-Carvão, 1A e 1B) também mostraram o incremento nas concentrações deste analito. Apesar desse aumento, os valores medianos de P dissolvido foram próximos aos períodos anteriores (inferior ao LQ). Nesse sentido, o desacoplamento entre a fração total e dissolvida pode estar mais relacionado a processos físico-químicos e condições do ambiente do que a fonte do analito em si. Além disso, destaca-se a influência das condições sazonais no incremento deste analito, dada a maior contribuição difusa quando da ocorrência de maiores precipitações. Em sedimentos, as concentrações de fósforo aumentaram nas regiões Montante (PT-52), 1A e 1B (até o PT-15), em comportamento similar ao observado nos parâmetros manganês e ferro. No contexto da Região 2A (PT-53 ao PT-49) foi possível notar que as concentrações de P se mantém muito próximas do ciclo de estiagem anterior (2021). Do PT-55 em diante (Região 2B e 2C) observou-se manutenção dos valores observados em 2021, onde houve maiores concentrações de fósforo nos pontos localizados no contexto da UHE Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21).

Gráfico 17.3-4a: Evolução das concentrações máximas de fósforo em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do fósforo, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 17.3-4b: Evolução das concentrações medianas de fósforo em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do fósforo, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022

Chumbo

O mapa de distribuição do Pb em sedimentos de corrente elaborados pela Arcadis (2020), com base nos dados de 2008 e 2009 da CPRM (2018), mostrou que os valores de concentração de chumbo da bacia do rio Paraopeba variaram entre 13 e 18 mg/kg na maior parte da bacia, porém próximos aos pontos PT-06 e PT-48; PT-19, PT-50 e PT-51 e PT-20 e PT-21, os valores de chumbo apresentavam-se entre 18 mg/kg e 32,8 mg/kg. Comparando-se com os períodos sazonais monitorados após o rompimento da barragem B1 (**Gráfico 17.3-5a**), percebeu-se que as concentrações de chumbo na Região Montante (PT-52) apresentavam valores na ordem de 23 a 29 mg/kg, estando pouco maior, quando comparados qualitativamente, aos valores da CPRM (2018).

A Região 1A, entre os pontos PT-01 e PT-02, apresentaram concentrações na ordem de 100 a 250 mg/kg nos períodos de estiagem de 2019 a 2021 e se reduziram bruscamente para a faixa predominante de 35 mg/kg no último período de estiagem, qualitativamente, 2 vezes maior que os valores de concentração levantados nos dados da CPRM (2018). Os valores anômalos de chumbo não se dispersaram para outras regiões, ainda que tenham sido detectadas concentrações na faixa de 30 a 70 mg/kg nas estiagens de 2019 e 2020 na região 1B e posteriormente na estiagem de 2021 se reduziu para faixa de 14 mg/kg a 30 mg/kg nesta mesma região 1B, exceto na região da UTE Igarapé, que as concentrações acumuladas ficaram em 40 mg/kg. No período de estiagem de 2022 é possível identificar que a partir do PT-14 não há pontos com concentrações acima de 35 mg/kg (VOR N1), com a única exceção sendo o PT-21 (35,6 mg/kg), inserido no contexto da UHE Retiro Baixo. O rejeito da barragem B1 apresentou concentração mediana de aproximadamente 20 mg/kg e máxima de 45 mg/kg para o Pb (Geoenviron, 2019), sugerindo contribuição de chumbo do rejeito nas regiões do Ferro-Carvão, 1A e 1B, porém, ao longo dos períodos de estiagem, a concentração de chumbo no rejeito diminuiu.

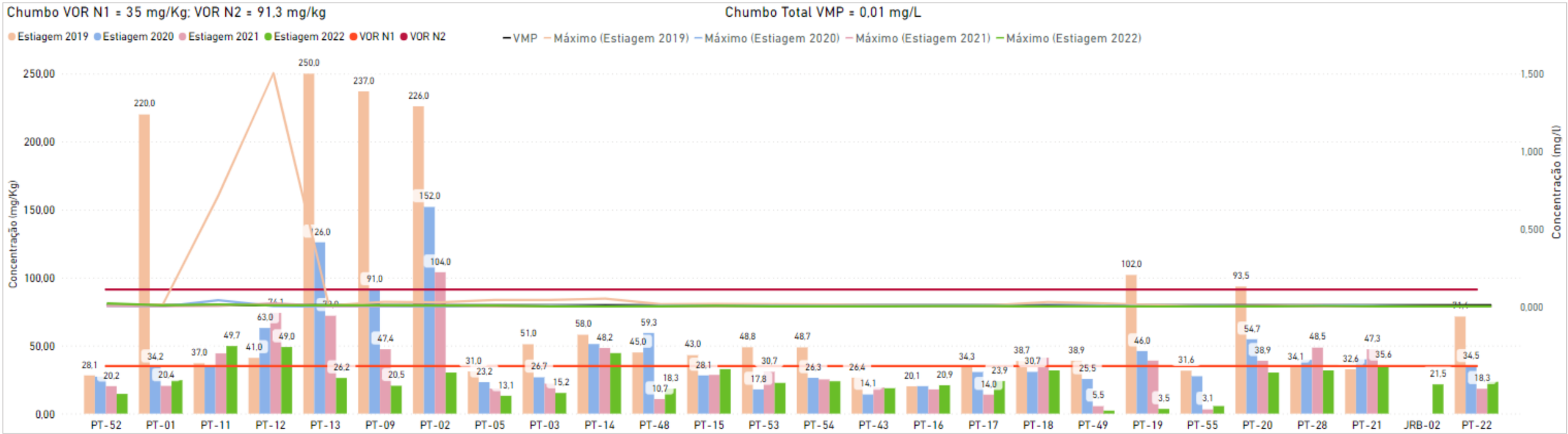
As concentrações na estiagem de 2019 e na estiagem de 2020, variaram majoritariamente na faixa de 20 a 40 mg/kg, nas regiões 2A e entre 30 e 50 mg/kg na região 2B, mantendo-se mais elevado que os dados da CPRM (2018). Já na estiagem de 2021, as concentrações na região 2A ficaram mais próximas (3 a 25 mg/kg, na maioria) aos valores obtidos pela CPRM, enquanto na região 2B continuaram mais elevados e na faixa de 38 a 47 mg/kg. Na Região 2C, perceberam-se reduções de 70 mg/kg (2019) para até 16 mg/kg (2021). No período de estiagem/2022 as concentrações foram na ordem de 20 a 30 mg/kg nas regiões 2A e 2B. Na Região 2C (JRB-01 e PT-22) as concentrações foram de 18,3 a 21,5 mg/kg em 2022.

Desta forma, o que se percebeu foi uma tendência de redução nas concentrações de chumbo na bacia tanto nos sedimentos com característica química de rejeitos (regiões 1A e 1B, até PT-14) como pontualmente nas regiões 2A e 2C. Na região 2B percebeu-se pequena variação, porém os resultados ficaram mais equilibrados entre 2020 e 2021, padrão que se mantêm em 2022.

Avaliando-se os resultados da água ao longo dos períodos sazonais de estiagem (**Gráfico 17.3-5b**), analogamente, ao que ocorreu com o sedimento, percebeu-se que o período mais intenso da presença do Chumbo total foi no primeiro período de estiagem de 2019 e na região mais afetada, principalmente. Nos períodos seguintes, sua ocorrência foi se reduzindo a ocorrências pontuais e, possivelmente, relacionadas a aportes locais. Entretanto, semelhante ao que se observou em outros elementos, a chuva intensa e contínua de 2022, transportou materiais em suspensão e o desaguamento do rio ainda reverbera na estiagem de 2022, o que indicou aumentos nas concentrações de chumbo, principalmente na região montante, Fe-Carvão e, pontualmente, nas regiões 1A e 2A. No sedimento, as concentrações tenderam a se manter mais baixas ou semelhantes ao período anterior, exceto em regiões de maior retenção hidráulica como no PT-11, PT-17 (destroços de ponte próximos) ou ainda reflexos de transbordos pós barramento da UTE Igarapé como no PT-48 e PT-15, todos potencialmente, reflexos das chuvas de 2021/2022.

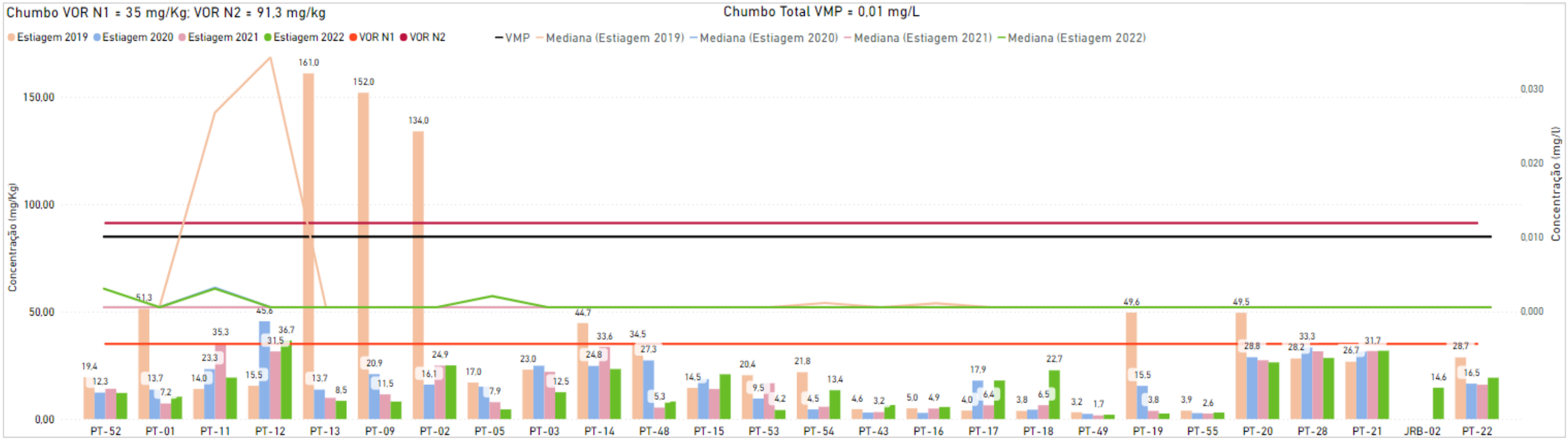
Sabe-se que o rejeito da barragem B1 apresentou concentração mediana de aproximadamente 20 mg/kg e máxima de 45 mg/kg para o Pb (Geoenviron, 2019), sugerindo contribuição de chumbo do rejeito nas regiões do Ferro-Carvão, 1A e 1B. Ao considerar os períodos de chuva, percebe-se que a concentração de chumbo no rejeito diminuiu, comportamento este verificado também para o período de estiagem.

Gráfico 17.3-5a: Evolução das concentrações máximas de chumbo em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do chumbo, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 17.3-5b: Evolução das concentrações medianas de chumbo em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do chumbo, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Níquel

Níquel tem ocorrência na bacia do rio Paraopeba como um todo (CPRM, 2018). No caso do níquel, as concentrações avaliadas no mapa geoquímico elaborado pela Arcadis (2020) com os dados de 2008 a 2009 da CPRM (2018) variaram de menor que 18 mg/kg na região do PT-52; entre 18 e 38 mg/kg na região do médio Paraopeba (até PT-17) e se reduziram para valores menores que 18 mg/kg nos metassedimentos do Grupo Bambuí. As concentrações máximas de Ni identificadas no rejeito da barragem B1 pela Geoenviron (2019) foi de 50 mg/kg.

Ao verificar os resultados dos períodos sazonais de estiagem no **Gráfico 17.3-6a,** tem-se que do ano de 2019 para 2020 e deste para 2021, as concentrações de níquel nos sedimentos se reduziram no espaço e tempo ao longo do rio do Paraopeba, sugerindo que as condições dinâmicas do rio em seus ciclos de transporte e deposição de sedimentos foram mais atenuadas e com menor aporte de Ni. No período de estiagem de 2022 é possível ver estabilização nas concentrações deste metal, com poucas oscilações pontuais.

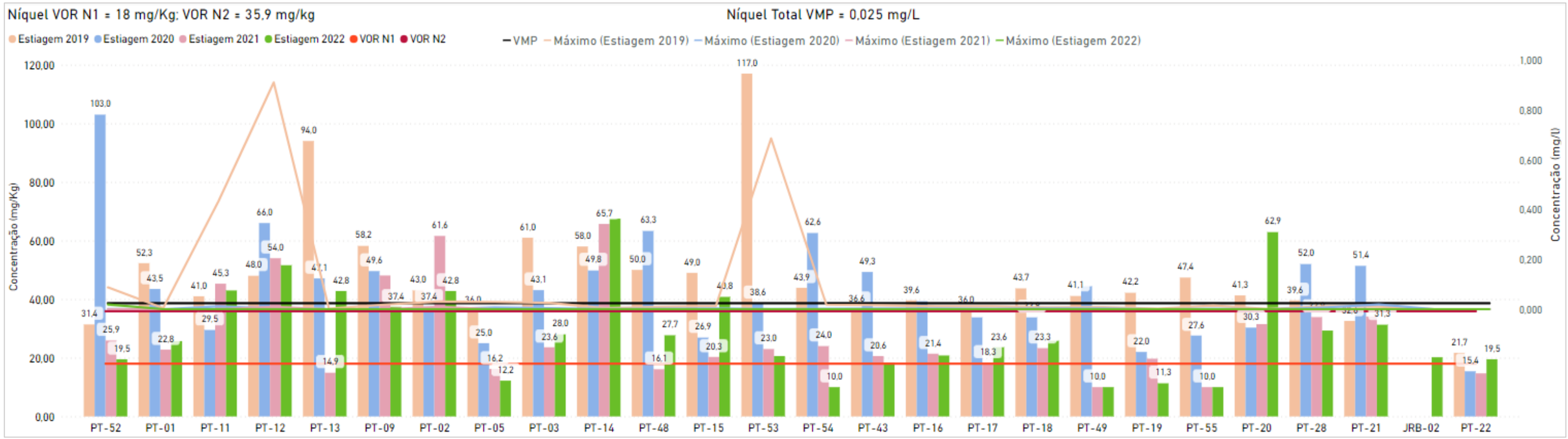
O período de estiagem de 2019 foi o que apresentou os maiores aumentos nas concentrações de Níquel ao longo de todo rio Paraopeba. Elas variaram de 25 mg/kg no PT-52, para concentrações entre 30 e 58 mg/kg na região 1A e entre 48 mg/kg e 60 mg/kg na região 1B. Enquanto, nas regiões 2A e 2B, as concentrações ficaram entre 35 e 42 mg/kg, predominantemente e na região 2C, as concentrações foram menores entre 12 mg/kg e 32 mg/kg. Destas regiões, os valores das concentrações foram de 0,5 a 1,5 vezes maiores quando comparados com os dados da CPRM (2018). Após as chuvas de 2019/2020, o período de estiagem de 2020 mostrou uma queda nas concentrações ao longo do rio Paraopeba e na estiagem de 2021 ficaram na faixa de 25 mg/kg no PT-52; 11mg/kg a 60 mg/kg entre regiões 1A e 1B; entre 10 e 24 mg/kg na região 2A, sendo que na 2B, as concentrações se mantiveram na ordem de 37 mg/kg e na 2C na faixa de 15 a 20 mg/kg. No período de estiagem/2022 as concentrações foram na faixa de 20 mg/kg no PT-52; 12 mg/kg a 68 mg/kg entre regiões 1A e 1B; entre 10 mg/kg e 24 mg/kg na região 2A, sendo que na 2B, as concentrações se mantiveram na ordem de 29 mg/kg a 63 mg/kg e na 2C na 20 mg/kg. Ao se comparar estes valores, de forma qualitativa, com os dados da CPRM (2018), os dados coletados ainda permaneceram pelo menos 0,5 vezes mais elevados.

Na análise desses dados, percebeu-se que a bacia recebeu contribuições de níquel ao longo do tempo e que com o rompimento da barragem B1, notou-se que ficaram mais elevadas entre regiões 1A e 1B. Na estiagem de 2022, ocorreu uma redução do Níquel a partir da Região 2A, com manutenção ou pequenos aumentos nas regiões a montante. Em alguns locais como nos pontos de monitoramento PT-13, PT-48, PT-15 e PT-14, bem como os pontos inseridos no contexto da região do Ferro-Carvão (PT-11), ainda se nota alguns acúmulos de Níquel, sendo reflexo da condição morfodinâmica local, em que favorece a retenção de sedimentos finos e materiais com característica química de rejeitos.

Na água superficial, à semelhança dos sedimentos, as concentrações ficaram próximas ao longo dos períodos sazonais, na maioria das vezes inferiores ao VMP, quando se trata de valores medianos (**Gráfico 17.3-6b).** No final da Região 1A, verifica-se aumento das

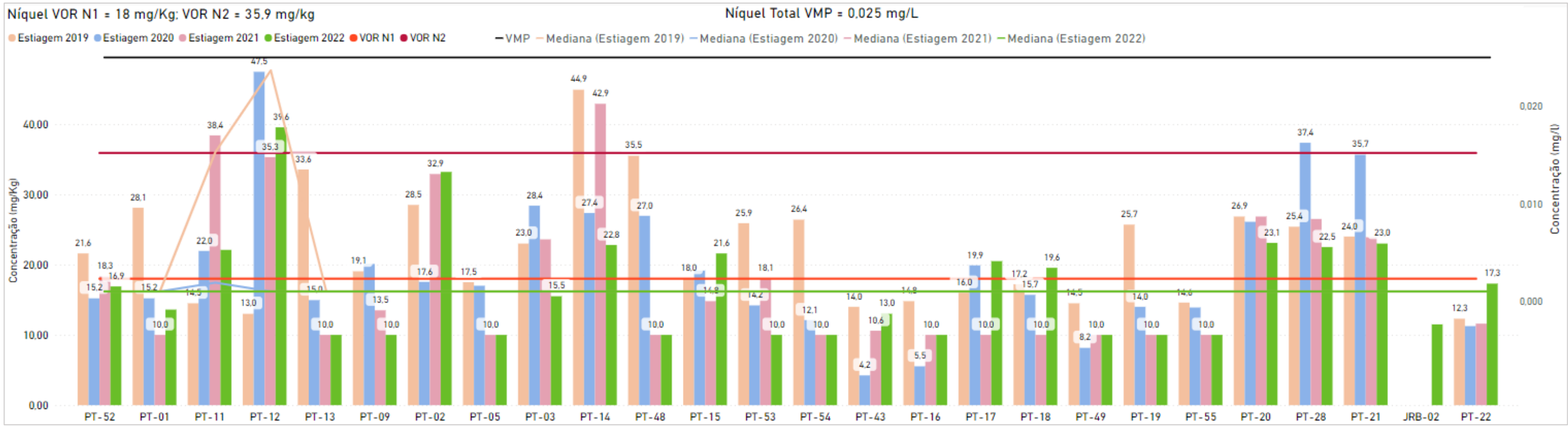
concentrações em 2019, e nos demais anos, as concentrações permaneceram abaixo dos valores de referência, o que indica a não contribuição do rejeito da barragem B1, B4, B4A para o aumento da concentração de Níquel na água superficial.

Gráfico 17.3-6a: Evolução das concentrações máximas de níquel em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do níquel, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 17.3-6b: Evolução das concentrações medianas de níquel em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do níquel, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022

Cobre

Considerando os sedimentos de corrente coletados entre 2008 e 2009 pela CPRM (2018) e o mapa geoquímico do cobre elaborado pela Arcadis (2020), teve-se que as concentrações de cobre variaram de menos de 6 mg/kg nas regiões Montante, Ferro-Carvão e 1A; entre 20 mg/kg e 42 mg/kg na 1B; entre 6 e 20 mg/kg na Região 2 e, em alguns pontos, como no reservatório da UHE Retiro Baixo e região 2C, houve variações maiores que 20 mg/kg.

Em relação aos sedimentos, ao se compararem os períodos sazonais de estiagem, notou-se uma nítida redução dos valores máximos de cobre no tempo e no espaço (**Gráfico 17.3-7a**) no rio Paraopeba. De 2019 para 2020, as concentrações máximas se reduziram em 0,5 a 3 vezes nas regiões 1A, 1B, 2A, 2B e 2C. Em algumas localidades como nos PT-02 na região 1A; nos PT-14, PT-48 na Região 1B e entre PT-20 e PT-21 na região 2B houve manutenção das concentrações de Cobre. No primeiro caso o acúmulo foi provavelmente por causa da condição morfodinâmica, haja vista proximidades com ponte que reduz a energia da água do rio. Há de se notar que o avanço dessa concentração de cobre se deu até o PT-55 em 2019 indicando também que materiais contendo cobre podem ter adentrado à bacia seja por causa da presença do rejeito, seja por contribuições difusas (intemperismos de rochas, efluentes, dragagens de areia, erosões do solo). Já na estiagem de 2020, percebeu-se a redução do cobre nos sedimentos novamente, sendo as maiores concentrações variando entre 69 e 170 mg/kg nas regiões 1A e 1B, enquanto nas regiões 2A e 2C, as concentrações foram menores, entre 25 mg/kg e 39 mg/kg e no reservatório da UHE Retiro Baixo, as concentrações máximas também diminuíram e ficaram em 60 mg/kg. Ainda assim, para o PT-14, a concentração mediana neste período, não ultrapassou 32 mg/kg (**Gráfico 17.3-7b)**. Vale reforçar que nas proximidades dos PT-14 e PT-48 tem-se uma área com sinuosidade transicional, porém o barramento no rio Paraopeba, localizado na altura da UTE Igarapé, pode reduzir a energia de transporte, causando remanso e potencializando deposição de materiais nesta localidade.

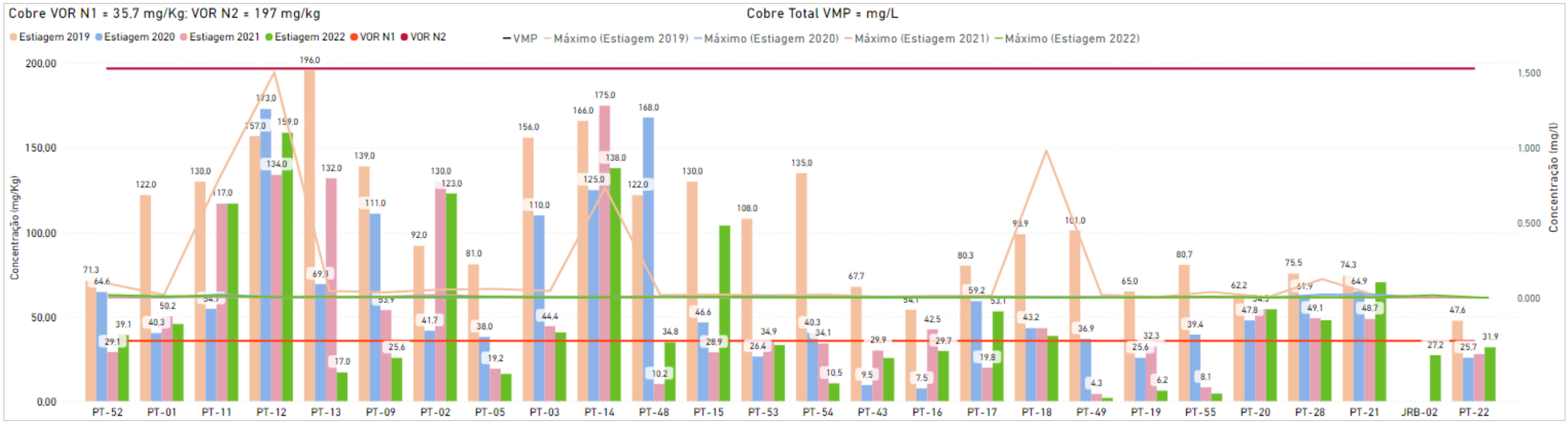
Entre a estiagem de 2020 e a de 2021 também foram constatadas reduções nas concentrações do Cobre, sendo que as maiores delas se mantiveram nas regiões 1A e 1B, entre os PT-02, PT-14 e PT-48 e com concentrações que chegaram a 130 mg/kg na região 1A e 175 mg/kg na região 1B. Na região 2A as concentrações máximas foram de 4 a 25 mg/kg; na 2B reduziu para 48 mg/kg e na 2C se manteve reduzida em 25 mg/kg. Estas concentrações são maiores quando comparadas qualitativamente com os resultados da CPRM (2018), principalmente nas regiões 1A e 1B. É possível observar que a partir do PT-20 os sedimentos apresentam marcadores típicos de composição química natural e se percebeu diminuição nas concentrações na estiagem de 2021. No período de estiagem/2022 é possível constatar manutenção do comportamento espaço temporal do níquel ao longo do rio Paraopeba, com algumas oscilações positivas e negativas em alguns pontos, como no PT-15 e PT-20, que passaram de 20,3 mg/kg e 30,3 mg/kg para 40,8 mg/kg e 62,9 mg/kg, respectivamente. Houve também aumentos no Fe-Carvão (PT-11 e PT-12) e região 2B (PT-21) resultantes de retenção hidráulica; além do PT-15 e PT-48 na região 1B, aumentado provavelmente em função de transbordos no vertedouro da UTE Igarapé e no PT-17 provavelmente acumulado nos destroços da ponte que está no leito do rio.

Há de se notar que materiais contendo cobre podem ter adentrado à bacia seja por causa da presença do rejeito, seja por contribuições difusas (intemperismos de rochas, efluentes, dragagens de areia, erosões do solo). Estas concentrações são maiores quando comparadas qualitativamente com os resultados da CPRM (2018), principalmente nas regiões 1A e 1B. Considerando que a Geoenviron (2019) constatou cobre nos rejeitos originais com concentrações máximas de 150 mg/kg, as ocorrências dessa ordem de grandeza identificadas nas regiões mais afetadas receberam contribuição do rejeito da barragem B1 e com o tempo não se percebeu deslocamento em massa para outras localidades, mas sim, redução nas concentrações dos sedimentos amostrados nos locais com sedimentos com característica química de rejeitos.

Avaliando a água superficial, percebe-se no **Gráfico 17.3-7a** que as concentrações do Cobre total foram as mais elevadas nas regiões 1A e 1B no ano de 2019 e até mais elevadas do que a contribuição monitorada no ponto de montante, o PT-52. Entretanto, na estiagem de 2020, as concentrações de Cobre total reduziram em toda a bacia, desde a região de montante até as regiões 2B e 2C. O mesmo comportamento é observado nos períodos de estiagem de 2021, 2022. Ainda que o Cobre na água apresente redução ao longo dos pontos, e que este comportamento seja evidenciado também para a matriz de sedimento, não existe um padrão definido para aumento e redução concomitante entre as matrizes.

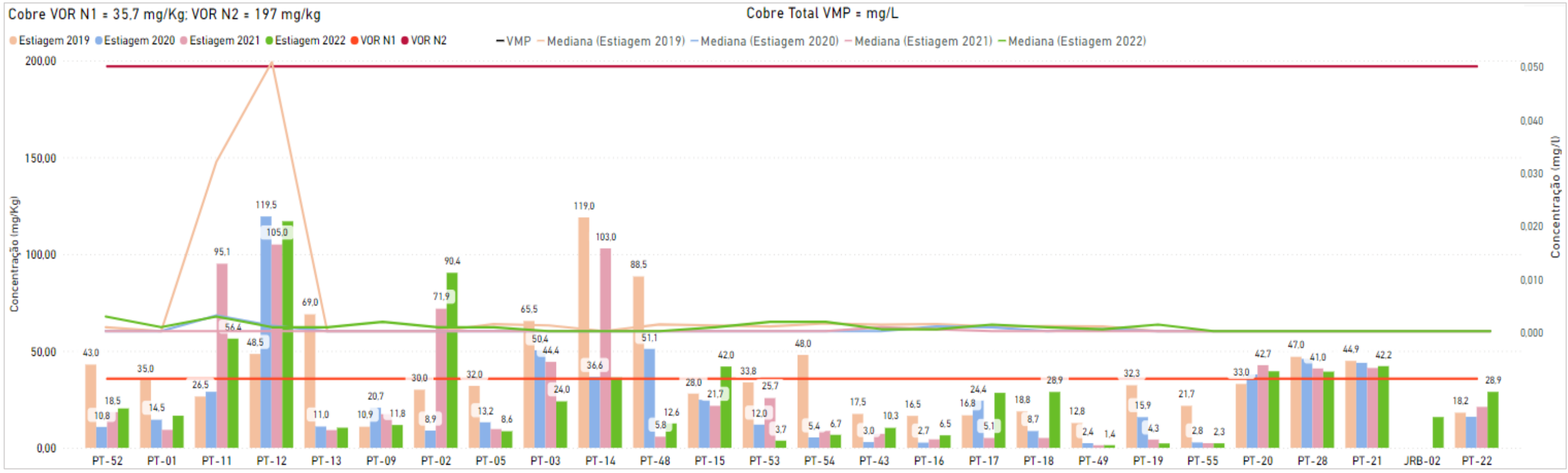
Quanto as concentrações medianas **(Gráfico 17.3-7b)**, de maneira geral, nota-se um distanciamento das mesmas em relação aos valores máximos, principalmente da Região de Ferro-Carvão até o final da Região 1B, e na 2A com foco para o período de chuva de 2019. Entretanto, à semelhança do que ocorreu com outros elementos, percebeu-se concentração mediana aumentada na região Montante, Fe-Carvão e 1A, sendo consequência das chuvas intensas e contínuas que ocorreram no início de 2022, corroborando com os aumentos de nível e vazão do rio Paraopeba no período e reverberando no período de estiagem atual com a bacia ainda em condição de desaguamento mais pronunciado do fluxo de base para o canal fluvial.

Gráfico 17.3 -7a: Evolução das concentrações máximas de cobre em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do cobre, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis (2022).

Gráfico 17.3-7b: Evolução das concentrações medianas de cobre em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do cobre, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022

Arsênio

Arsênio tem recorrência na bacia do Paraopeba como um todo (CPRM, 2018). O mapa de resultados geoquímicos elaborado pela Arcadis (2020) com base nos dados de sedimentos de corrente de 2008 e 2009 coletados pela CPRM (2018) mostrou que as concentrações de arsênio nos sedimentos de corrente variam, aproximadamente, entre 5 e 12 mg/kg nas regiões montante e regiões 1A e 1B; ultrapassa os 12 mg/kg na região do Ferro-Carvão e se reduz à medida que se chega nos metassedimentos do Grupo Bambuí para 1 a 5 mg/kg.

Avaliando-se o comportamento do Arsênio nos períodos sazonais estiagem (**Gráfico 17.3-8a**), tem-se que apresentam tendência de concentrações de forma semelhante com as estações chuvosas (Arcadis, 2021 e Arcadis, 2022). As variações entre os períodos sazonais são próximas, apresentando um pequeno aumento nos períodos de estiagem em relação ao de chuvas. Os valores dos períodos sazonais de estiagem de 2019 a 2021 variaram entre 13 e 17 mg/kg na região montante; 10 a 30 mg/kg na região 1A; 13 a 26 mg/kg na região 1B; 7 a 16 mg/kg na região 2A; 15 a 19 mg/kg na região 2B e de 7 a 16 mg/kg na região 2C.

As maiores concentrações que ocorreram nas regiões 1A (próximo a confluência com o Ferro-Carvão e no PT-02) e na 1B (entre o PT-03 e o PT-14, próximos ao barramento da usina termoelétrica de Igarapé) que podem ter além da contribuição natural da bacia, alguma contribuição do rejeito, haja vista que as concentrações medianas do rejeito chegaram a 10 mg/kg e a máximas a 30 mg/kg conforme dados Geoenviron (2019). Em 2022 foi possível perceber alguns aumentos nas regiões Ferro-Carvão (PT-11 e PT-12), 1B (PT-03, PT-48 e PT-15), 2B (PT-20 e PT-21) e 2C (PT-22) e, pontualmente, na Região 2A (PT-54, PT-17 e PT-18), indicando possíveis contribuições da própria bacia, sendo reflexo do transporte de materiais ocorridos durante as chuvas de 2021/2022 e que ficaram retidos por algum obstáculo, sejam as retenções hidráulicas no Fe-Carvão e reservatórios, ou áreas de remanso como no PT-20 e PT-22, PT-17, ou ainda reflexos de potenciais vertimentos de sedimentos provenientes da UTE Igarapé como no PT-48 e PT-15.

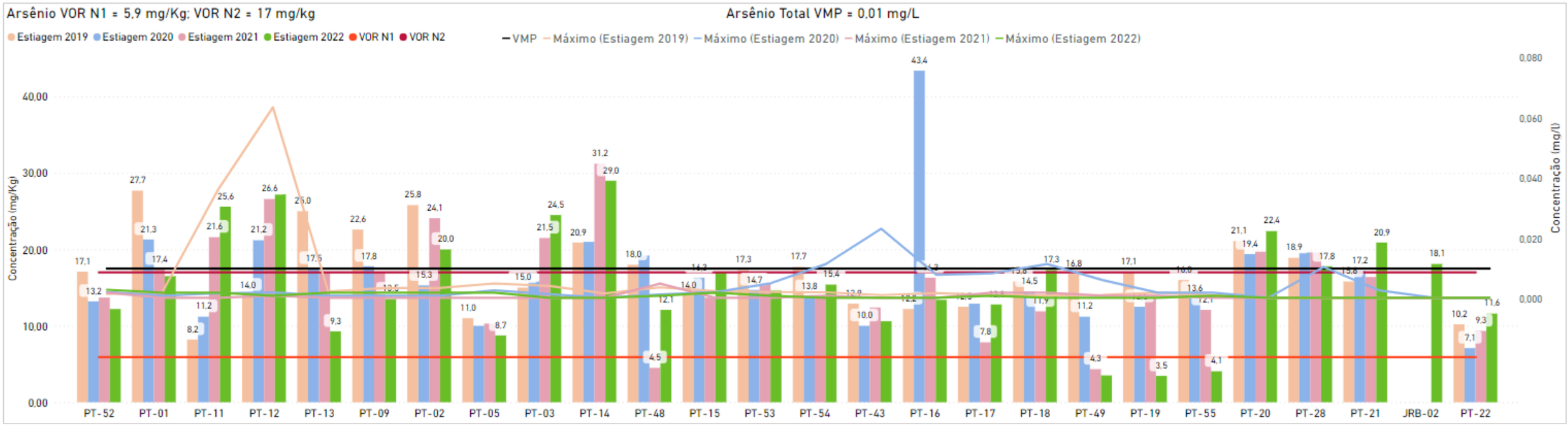
Quanto as concentrações medianas, **Gráfico 17.3-8b**, nas regiões imediatamente após o Ferro Carvão, 1A e 1B, nota-se, em geral, poucas variações entre os períodos de estiagem considerados. Na região 2A (PT-53 a PT-55), observa-se uma discrepância entre os períodos de estiagem 2021 e 2022 no PT-03, com redução das concentrações medianas de 21,5 para 15,3 mg/kg. A partir dos dados de medianas é possível observar que as maiores concentrações de arsênio permanecem nas regiões a jusante do PT-14, mas estendendo-se até o PT-15 para o período de estiagem de 2022, além dos pontos inseridos no contexto da UHE Retiro Baixo na região 2B (PT-20, PT-28 e PT-21).

Com relação à água superficial, constata-se que em 2022 as concentrações de Arsênio acompanharam a mesma distribuição e padrões observados na estiagem de 2021. Aumentos pontuais podem ser reflexo de atividades locais como extração de areia do rio. O Arsênio depositado no leito do rio ao ser exposto a um ambiente aeróbio por causa das ações de remoção de sedimentos, pode se oxidar e com isso indicar aumento na concentração. O

arsênio não teve associação com o rejeito haja vista sua baixa concentração no mesmo e também ao fato das concentrações identificadas à montante do PT-54 serem todas menores que no trecho entre PT-54 e PT-49. No período de estiagem de 2022, de modo geral, as concentrações de As total foram as menores ou similares aos períodos anteriores, indicando estabilização do parâmetro ao longo do monitoramento.

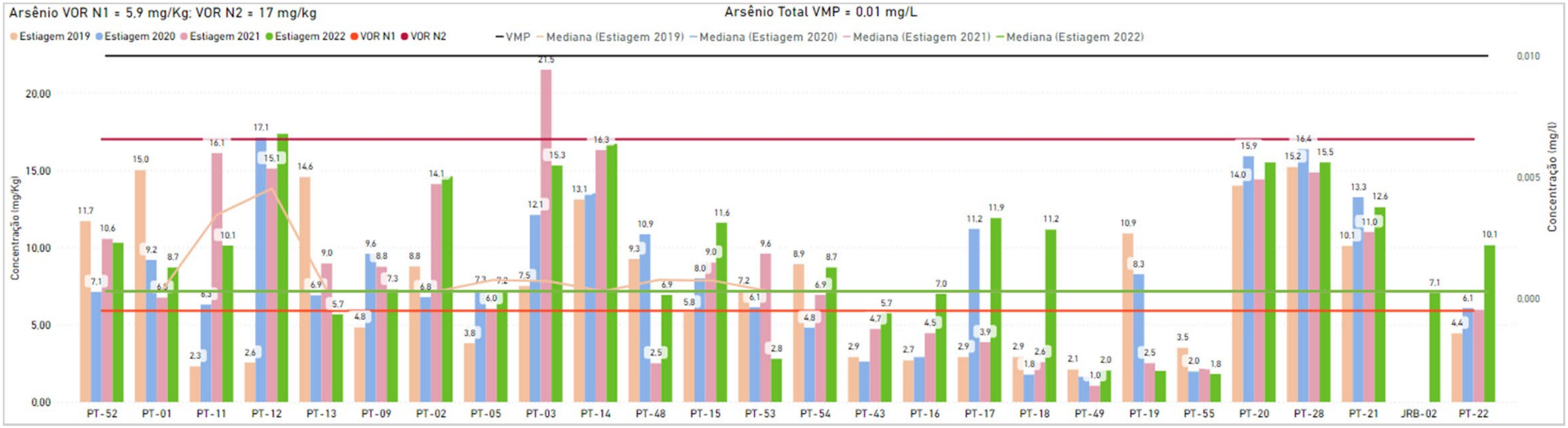
Avaliando-se os resultados sazonais do pH, percebeu-se que estes diminuíram ao longo do tempo e na bacia do rio Paraopeba. Esta variação do pH mais ácido e potencial redox oxidante (vide sessão de águas) não alterou a disponibilidade do As na bacia, podendo este ter sido mais elevado na estiagem de 2020, devido à vazão maior do rio e transporte de materiais em suspensão, fato que não se observou na estiagem de 2021 que ocorreu posteriormente a um cenário de menor incidência de chuvas, e o período de estiagem de 2022, posterior a uma maior incidência de chuvas (**Anexo IV**).

Gráfico 17.3-8a: Evolução das concentrações máximas de arsênio em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração máxima do arsênio, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis (2022).

Gráfico 17.3-8b: Evolução das concentrações medianas de arsênio em relação aos períodos de estiagem de 2019, 2020, 2021 e 2022. As linhas e colunas representam a concentração mediana do arsênio, sendo apresentadas em cores distintas para cada período de estiagem: laranja para 2019; azul para 2020; rosa para 2021 e verde para 2022.



Elaboração: Arcadis, 2022

17.4. Considerações

A análise integrada de água superficial e sedimento permitiu verificar as associações em termos de concentração entre as duas matrizes na bacia do rio Paraopeba ao longo dos períodos sazonais. Percebeu-se que as concentrações, para as matrizes água superficial e sedimento, quando comparados com o início do monitoramento em 2019, têm apresentado redução dos principais metais associados à assinatura química do rejeito, ao longo do tempo e do espaço, e a dissipação da turbidez, causada com o rompimento da barragem. Na estiagem de 2022, 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 chuvoso de 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). Em 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 estiagem/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 estiagem/2019, 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 estiagem/2019, até a estiagem/2022, 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 (Sumps, Chincanas, Estaca-Prancha), 1B (UTE Igarapé) e 2B (UHE Retiro Baixo), mostraram incremento ou manutenção das concentrações de metais e P em decorrência do acúmulo de sedimentos finos. Oscilações pontuais, com valores maiores em alguns pontos ao longo do tempo foram identificadas relacionadas principalmente a processos locais, à hidrodinâmica do rio, aporte de materiais e influência das precipitações. Além disso, é importante considerar que desde agosto/2020, os sedimentos passaram a ser coletados em margem de rio, onde há predomínio de sedimentos finos (silte e argila), enquanto em 2019, eram amostrados majoritariamente em centro de rio, onde predominam os sedimentos mais arenosos, o que pode influenciar nos resultados.

É importante ressaltar ainda que na estiagem/2022, 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 (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 16 do presente relatório de fechamento de ciclo de estiagem.

18. Referencial Bibliográfico

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS - ANA. *Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.* http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico. Acesso em 09/01/2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA E COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, (2011). *Guia Nacional De Coleta e Preservação De Amostras Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos*. Brasília-DF.

AKOGLU, H. (2018). User's guide to correlation coefficients. Turkish journal of emergency medicine, v. 18, n. 3, p. 91–93.

ARCADIS. 2019. *Relatório mensal da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba*. Fechamento de Ciclo (janeiro/19 a setembro/2019). Setembro/2019.

ARCADIS. 2020a. *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*.

ARCADIS. 2020b. *Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba*. Fechamento de ciclo (janeiro/2019 a setembro/2020).

ARCADIS. 2020c. *Caracterização geológica dos testemunhos coletados no rio Paraopeba – MG*. Relatório Técnico interno elaborado para Vale S.A. Belo Horizonte/MG.

ARCADIS & VALE S.A. 2020. *Caracterização geológica dos testemunhos de sondagem no rio Paraopeba – MG.* Relatório Técnico interno elaborado para Vale S.A. Belo Horizonte/MG. 50p.

ARCADIS. 2021a. *Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba*. Fechamento de ciclo (janeiro/2019 a março/2021).

ARCADIS. 2021b. *Dispersão de Rejeitos na Carga de Fundo do Rio Paraopeba Após o Rompimento da Barragem B1, 2ª Campanha (2020)*. Agosto/2021.

ARCADIS. 2021c. *Relatório Executivo Consolidado Transporte e Deposição de Sedimentos e Rejeitos ao Longo do Rio Paraopeba e Reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias*. Dezembro/2021

ARCADIS. 2021d. *Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba*. Fechamento de ciclo (janeiro/2019 a setembro/2021).

ARCADIS. 2022a. *Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno.* Outubro/2022

ARCADIS. 2022b. *Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba*. Fechamento de ciclo (janeiro/2019 a março/2022).

ARCADIS. 2022c. 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.

CALLEGARI-JACQUES, SÍDIA M. (2003). Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artmed.

CAMPOS, L. F.B. (2017). DA SEDIMENTAÇÃO À ANQUIZONA: EVOLUÇÃO DOS PELITOS NEOPROTEROZOICOS 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.

CAMPOS, L. F.B.; GUIMARÃES, E. M. (2017) 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. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil E-ISSN 1807-9806

CARVALHO, M.A. G. (2003). *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.

CHRISTOFARO, C.& LEÃO, M. M. D. (2014). Tratamento de dados censurados em estudos ambientais. *Química Nova*, vol. 37, n. 1, p.104-110.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. 2019. – Superintendência Regional de Belo Horizonte. *Monitoramento especial da Bacia do rio Paraopeba-Monitoramento Geoquímico: Relatório III* – Belo Horizonte, abril de 2019.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. 2020. – Superintendência Regional de Belo Horizonte. *Monitoramento especial da Bacia do rio Paraopeba-Monitoramento Geoquímico: Relatório V*– Belo Horizonte, novembro/2020.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- CPRM. 2018. *Atlas geoquímico da Bacia do Rio São Francisco*.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 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.

DUNN, O. J. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, 1964, p. 241-252.

GEOENVIRON, 2019. *Caracterização geoquímica de rejeitos-composição química global, análise granulométrica e classificação segundo a norma NBR ABNT 10.004/2004***.** Nota Técnica - Dezembro/2019.

GOMES, M.A. 2009. *Caracterização tecnológica para aproveitamento de rejeito minério de ferro.* Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia de Minas. UFOP. Ouro Preto, Minas Gerais.

GOMES, F. B. R., DE SOUZA FAGUNDES, P. B. S., CASTRO, S. R., & DE MELO RIBEIRO, C. B. (2020). Avaliação de impactos ambientais do desastre de Brumadinho-MG pela proposição de valores de referência. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, 1(1).

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. (2005) *Análise Multivariada de Dados***.** 5.ed. Porto Alegre: Bookman. 593 p.

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.

KALFF, J. Limnology: Inland Water Ecosystems. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2.

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.

MINAS GERAIS. 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. Belo Horizonte, 2022.

MINAS GERAIS. Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte- Prefeitura Municipal de Sarzedo- MG. Plano Diretor- Assessoramento aos municípios/PDDI-RMBH. http://www.rmbh.org.br/arquivos_biblioteca/PDRMBH_PRD04_SARZEDO_PM.pdf. Acesso em 09/01/2020.

MONTGOMERY D. G. *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th edn, Wiley, New York, 2009. 734 p.

NETO, J. V., DOS SANTOS, C. B., TORRES, É. M., & ESTRELA, C. (2017). *Boxplot:* um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. *Revista Odontológica do Brasil Central*, 26(76).

PLANO DE REPARAÇÃO SOCIOAMBIENTAL DA BACIA DO RIO PARAOPEBA. CAPÍTULO 2 - VOLUME 2, MARÇO/2022.

PROJETO ENTIRE. 2022. *Análise dos impactos de rejeitos em rompimentos de barragens para um ambiente aquático restaurado*. Relatório Semestral, Janeiro de 2022 (Refª: RT-1A2S/2021-Rev8F).

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.

SGS Geosol. *Laudos NBR 10.004 amostras AM1, AM2, AM3 e AM4*. 2019.

SILVA, L. P. 2016. A influência das condições de estabilidade da coluna d´água na estrutura das comunidades planctônicas (fito e zooplâncton) do reservatório de Ribeirão das Lajes, RJ. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

TEC3- Geotecnia e Recursos Hídricos .2019. *Estudo conceitual mina córrego do Feijão* – Caracterização hidrológica da bacia do rio Paraopeba – Relatório Técnico, 2019.

TEC3 – Geotecnia e Recursos Hídricos.2020. Estudo conceitual- Mina Córrego do Feijão. Prognóstico do Volume de rejeitos depositado em trechos do rio Paraopeba em decorrência do rompimento da Barragem B-I. *Relatório Técnico interno elaborado para Vale S.A. Belo Horizonte/MG. 40p.*

TRIOLA, M.F. (1999). Introdução à Estatística. 7. ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. Limnologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2008

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, R.F. da C. 2015. *Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (Background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero.* 2015. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Escola de Minas. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Outro Preto, Ouro Preto, 201.

VICQ, R.; MATSCHULLAT, J., LEITE, M.G.P., NALINI JR, H.A. & LEÃO, L.P. 2018. Geochemical mapping of potentially hazardous elements in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Geochimica Brasiliensis*, 32: 243 - 267.