RELATÓRIO MENSAL DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

FECHAMENTO DE CICLO
(25/01/2019 a 31/03/2022)

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

CODIFICAÇÃO ARCADIS (1.03.03.50435-QM-RT-0016-Rev.2)

VALE S.A.

DEZEMBRO DE 2022

Isenção de Responsabilidade

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

ARCADIS	**Áreas**	
Elaborador Filipe Lima Dornelas Kátia Maria Mellito Fernanda Rivelli de Paiva Leonardo Silva Ludmila Lage Milena Almeida Gabriela Rodrigues Barroso João Pedro Marques Ribeiro Aline Amaral Priscilla Santana Conegundes Viviane Ramos de Carvalho Caique Cabral Pollyane Santos Gabriel Ferreira	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc Geóloga, MSc Engenheira Ambiental, MSc Engenheiro Ambiental MSc Engenheiro Ambiental Estatística Engenheira Ambiental Engenheira Ambiental e Sanitarista, MSc Geógrafo, MSc Geologia Geóloga Engenheiro Ambiental Engenheira Ambiental, MSc Geológo, MSc Engenheiro Ambiental Engenheiro Ambiental e Sanitarista	**Data da Elaboração** 29/06/2022
Verificador Filipe Lima Dornelas	**Área** Coordenação técnica	**Data da Revisão** 05/12/2022
Aprovador Diego Marcondes		

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

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 Engenheiro Ambiental	Diego.marcondes@arcadis.com
Nayana Ortmann	Responsável Técnico	CREA/ MG: 188818/D
	Líder do Projeto	nayana.ortmann@arcadis.com
Kátia M. Mellito	Coordenação técnica geral	CREA/SP: 5060090181/D
	Geóloga, MSc	katia.mellito@arcadis.com
Filipe Lima Dornelas	Eng. Ambiental e Biólogo, MSc.	filipe.dornelas@arcadis.com
	Coordenação técnica geral	
Ludmila Lage	Estatística	ludmila.lage@arcadis.com
	Coordenação analítica	
Fernanda Rivelli de Paiva	Engenheira Ambiental, MSc.	fernanda.paiva@arcadis.com
Gabriela Rodrigues Barroso	Engenheira Ambiental e Sanitarista, MSc.	gabriela.barroso@arcadis.com
Marcel Mizukami	Engenheiro Civil	marcel.mizukami@arcadis.com
Nikolas Minaré	Engenheiro Ambiental	nikolas.ferreira@arcadis.com
João Ribeiro	Geógrafo, MsC. Geologia	joao.ribeiro@arcadis.com
Leonardo Silva	Engenheiro Ambiental	leonardo.silva@arcadis.com
Aline Amaral	Geóloga	aline.amaral@arcadis.com

Equipe Técnica		
Viviane Ramos de Carvalho	Engenheira Ambiental, MSc.	viviane.carvalho@arcadis.com
Milena Almeida	Engenheira Ambiental	milena.almeida@arcadis.com
Matheus Armond	Geógrafo	matheus.armond@arcadis.com
Priscilla Conegundes	Engenheira Ambiental	priscilla.conegundes@arcadis.com
Pollyane Santos	Engenheira Ambiental	pollyanne.santos@arcadis.com
Caique Cabral	Geológo, MSc	caique.cabral@arcadis.com
Gabriel Ferreira	Engenheiro Ambiental	gabriel.ferreira@arcadis.com

Índice

1. Introdução 22
2. Contextualização geral 24
3. Premissas gerais 31
3.1. Recorte dos Dados 31
3.2. Caracterização da Área de Estudo 32
3.3. Caracterização do Rejeito 32
3.4. Campanhas de Monitoramento 33
3.5. Baselines 33
3.6. Limites de Quantificação (LQ) 34
3.7. Níveis de consistência dos dados reportados 35
3.8. Situação da pluma original 35
3.9. Enquadramento dos corpos de água 36
3.10. Valores orientadores dos sedimentos 37
4. Caracterização hidrológica 39
4.1. Rio Paraopeba 41
4.2. Ribeirão Ferro-Carvão 55
5. Alterações da qualidade da água do rio Paraopeba ao longo do tempo e do espaço nos períodos sazonais de chuva tendo em vista o *baseline* (sazonal) do corpo hídrico 59
5.1. Objetivo 59
5.2. Metodologia 59
5.2.1. Estatística descritiva e inferencial 59
5.2.2. Análise de tendência temporal 61
5.2.3. Mapas temáticos - *baseline* 64
5.3. Resultados e discussão 65
5.3.1. Estatística descritiva e inferencial 66
5.3.1.1. Manganês total e dissolvido 67
5.3.1.2. Ferro total e dissolvido 75
5.3.1.3. Alumínio total e dissolvido 82
5.3.1.4. Turbidez 89
5.3.1.5. Chumbo total 93
5.3.2. Análise de tendência temporal 96
5.3.2.1. Manganês total e dissolvido 99
5.3.2.2. Ferro total e dissolvido 99
5.3.2.3. Alumínio total e dissolvido 100

5.3.2.4. Turbidez 101

5.3.2.5. Chumbo total 101

5.3.3. Mapas temáticos - *baseline* 102

5.4. Considerações 107

6. Evolução das violações aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba 109

6.1. Objetivo 109

6.2. Metodologia 109

6.3. Resultados e discussão 109

6.3.1. Mapas temáticos - VMP 116

6.4. Considerações 121

7. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba nas imediações das captações de água para consumo humano de acordo com as alterações sazonais 123

7.1. Objetivo 123

7.2. Metodologia 123

7.3. Resultados e discussão 125

7.3.1. Município de Brumadinho - Captação COPASA 125

7.3.2. Município de Pará de Minas - Captação Concessionária Águas de Pará de Minas 131

7.3.3. Município de Paraopeba – Captação COPASA 136

7.4. Considerações 141

8. Comportamento dos rios tributários ao longo dos diferentes períodos sazonais 142

8.1. Objetivo 142

8.2. Metodologia 142

8.3. Resultados e discussão 144

8.3.1. Ribeirão Sarzedo (TT-02) 144

8.3.2. Rio Betim (TT-01) 154

8.3.3. Ribeirão das Abóboras (TT-05) 163

8.3.4. Ribeirão dos Gomes (CE-01) 171

8.4. Considerações 180

9. Qualidade da água no reservatório de Retiro Baixo e no trecho de jusante na bacia do rio Paraopeba 182

9.1. Objetivo 182

9.2. Metodologia 182

9.3. Resultados e discussão 183

9.3.1. Acompanhamento da hidrodinâmica vertical do reservatório de Retiro Baixo 184

9.3.2. Comportamento da qualidade da água a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo nos diferentes períodos sazonais 189
9.4. Considerações 195
10. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba de acordo com os dados telemétricos 197
10.1. Objetivo 197
10.2. Metodologia 197
10.3. Resultados e discussão 201
10.4. Considerações 214
11. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos chuvosos até 2022 215
11.1. Objetivo 215
11.2. Metodologia 215
11.2.1. Método da Estatística descritiva e inferencial 216
11.2.3. Análise de tendência temporal 217
11.3. Resultados e discussão 218
11.3.1. Análise de cluster 218
11.3.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial 220
11.3.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann Kendall 265
11.4. Considerações 274
12. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba 276
12.1. Objetivo 276
12.2. Metodologia 276
12.3. Resultados 276
12.4. Considerações 283
13. Evolução das concentrações dos metais em relação aos valores orientadores do CONAMA 454/12 e Vicq (2015) nos sedimentos nos períodos sazonais de chuva de 2019 a 2022 ao longo do rio Paraopeba 284
13.1 Objetivo 284
13.2 Metodologia 284
13.3 Resultados e discussão 284
13.4 Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temáticos 296
13.5 Considerações 314
14. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Aplicação dos índices químicos composicionais 316

14.3 Objetivo 316
14.4 Metodologia 316
14.5 Análise dos resultados 318
14.6 Considerações 331
15. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais 332
15.3 Objetivo 332
15.4 Metodologia 332
15.5 Resultados e discussão 333
15.6 Considerações 354
16. Referencial Bibliográfico 356

Lista de Figuras

Figura 3.10.1 Estações fluviométricas utilizadas para caracterização das vazões. 39

Figura 3.10.2 Isoietas médias totais anuais para a bacia do rio Paraopeba - período 1942 – 2018. 41

Figura 4.1.1 Estações fluviométricas. 49

Figura 4.2.1 Localização das estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI, Tejuco e Alberto Flores. 55

Figura 5.2.2.1 Série temporal de Manganês total (avaliação cronológica dos dados brutos). ... 62

Figura 5.2.2.2: Série temporal de manganês total (avaliação por ordem de coleta dos dados brutos) 63

Figura 5.2.2.3: Série temporal de manganês total (avaliação cronológica e por ordem de coleta dos dados medianos mensais) 63

Figura 5.3.1:Dendograma da análise de Cluster para a matriz água superficial. 66

Figura 5.3.3.1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com os máximos do *baseline*. 103

Figura 5.3.3.2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com os máximos do *baseline*. 104

Figura 5.3.3.3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com os máximos do *baseline*. 105

Figura 5.3.3.4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com os máximos do *baseline*. 106

Figura 6.3.1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com o VMP. 118

Figura 6.3.2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP. 119

Figura 6.3.3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP.120

Figura 6.3.4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP. 121

Figura 7.2.1: Localização dos pontos de Captação no Diagrama Unifilar. 124

Figura 10.2.1: Diagrama unifilar das estações telemétricas juntamente com os pontos de monitoramento de qualidade de água. 200

Figura 11.3.1.1: 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. 220

Figura 12.4.1: Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. 298

Figura 12.4.2: Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 299

Figura 12.4.3: Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 301

Figura 12.4.4: Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 302

Figura 12.4.5: Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 304

Figura 12.4.6: Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 305

Figura 12.4.7: Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 307

Figura 12.4.8: Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022..... 308

Figura 14.2.1: 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.. 316

***Figura 14.2.2: Boxplot de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis e Vale (2020).* 317**

Figura 14.2.3: 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. .. 318

Figura 14.3.1: Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019..... 320

Figura 14.3.8: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-49..... 328

Figura 14.3.9: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-55..... 329

Figura 14.3.10: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-20..... 330

Figura 15.3.1a: Evolução das concentrações máximas de manganês em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022..... 336

Figura 15.3.1b: Evolução das concentrações medianas de manganês em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores

laranja representam a concentração mediana do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 336

Avaliando-se os resultados ao longo do tempo, percebeu-se redução nas concentrações de Ferro ao longo dos períodos sazonais. Para os resultados medianos (Figura 15.3.2b), são verificadas concentrações mais reduzidas quando comparadas aos resultados máximos para os pontos ao longo de toda a bacia. Verificando-se a distribuição desses elementos com o comportamento dos índices químicos composicionais evidencia-se predominância das maiores concentrações de Ferro até o PT-14 em 2021 e 2022 (em 2019 e 2020 avançavam até o PT-54 e PT-15, respectivamente), indicando predomínio de sedimentos com composição química de rejeitos UTE Igarapé, ... 338

Figura 15.3.2a: Evolução das concentrações máximas de ferro em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 339

Figura 15.3.2b: Evolução das concentrações medianas de ferro em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração mediana do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 339

Figura 15.3.3a: Evolução das concentrações máximas de alumínio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 343

Figura 15.3.3b: Evolução das concentrações medianas de alumínio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração mediana do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 343

Figura 15.3.4a: Evolução das concentrações máximas de chumbo em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 345

Figura 15.3.4b: Evolução das concentrações medianas de chumbo em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 345

Figura 15.3.5a: Evolução das concentrações máximas de níquel em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período

de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 347

Figura 15.3.5b: Evolução das concentrações medianas de níquel em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 347

Figura 15.3.6a: Evolução das concentrações máximas de cobre em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 350

Figura 15.3.6b: Evolução das concentrações medianas de cobre em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022. 350

Figura 15.3.7a: Evolução das concentrações máximas de arsênio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022 353

Figura 15.3.7b: Evolução das concentrações medianas de arsênio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022 353

Lista de Gráficos

Gráfico 4.1-1 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação Belo Vale. 43

Gráfico 4.1-2 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação Alberto Flores. 44

Gráfico 4.1-3 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba. 45

Gráfico 4.1-4 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação UHE Retiro Baixo Montante. 46

Gráfico 4.1-5 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação UHE Retiro Baixo Jusante. 47

Gráfico 4.1-6 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. 50

Gráfico 4.1-7 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva (outubro/2019 a março/2020), chuva (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/2022). 54

Gráfico 4.2-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva (outubro/2019 a março/2020), chuva (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/2022). 56

Gráfico 4.2-2 Total precipitado mensal (mm) para as estações B-VI, Córrego Feijão, Tejuco e AUT-MD e médias mensais históricas de precipitações. 57

Gráfico 5.3.1.1-1: *Boxplot* Manganês total para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, com escala fixa. 68

Gráfico 5.3.1.2-1: *Boxplot* Ferro total para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, com escala fixa. 76

Gráfico 5.3.1.3-1: *Boxplot* Alumínio total para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, escala fixa. 83

Gráfico 5.3.1.4-1: *Boxplot* Turbidez para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, escala fixa. 90

Gráfico 5.3.1.4-1: *Boxplot* Chumbo total para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, escala fixa. 94

Gráfico 5.3.1.4-: *Boxplot* Chumbo total para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, escala variável. 94

Gráfico 7.3.1-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados no ponto do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 128

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 133

Gráfico 7.3.3-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 138

Gráfico 8.3.1-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no TT02 (ribeirão Sarzedo) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba. 145

Gráfico 8.3.1-2: *Boxplots* - TT02. 151

Gráfico 8.3.2-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no TT01 (rio Betim) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba. 155

Gráfico 8.3.2-2: *Boxplots*- TT01. 160

Gráfico 8.3.3-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no TT05 (ribeirão Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba 164

Gráfico 8.3.3-2: *Boxplots* - TT05. 169

Gráfico 8.3.4-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no CE01 (ribeirão do Gomes) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba. 173

Gráfico 8.3.4-2: *Boxplots*- CE-01. 178

Gráfico 9.3.1-1: Diagrama da variação da Temperatura (°C) em profundidade e ao longo do tempo para o ponto RB-02. 185

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. 185

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. 186

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. 186

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. 187

Gráfico 9.3.1-6: Variação da resistência térmica relativa no ponto RB-02, na UHE Retiro Baixo, no período de chuva/2021-2022. 188

Gráfico 9.3.1-7: Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período de chuva/2021-2022. 189

Gráfico 9.3.2-1: Boxplot dos resultados de Al dissolvido dos períodos chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, dos pontos da região dos reservatórios de retiro baixo e três marias, em unifilar. 191

Gráfico 9.3.2-2: *Boxplot* dos resultados de Fe dissolvido dos períodos chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, dos pontos da região dos reservatórios de retiro baixo e três marias, em unifilar. 192

Gráfico 9.3.2-3: *Boxplot* dos resultados de Mn total dos períodos de chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, dos pontos da região dos reservatórios de retiro baixo e três marias, em unifilar. 193

Gráfico 9.3.2-4: *Boxplot* dos resultados de Turbidez dos períodos de chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, dos pontos da região dos reservatórios de retiro baixo e três marias, em unifilar. 194

Gráfico 9.3.2-5: *Boxplot* dos resultados de Pb total dos períodos de chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, dos pontos da região dos reservatórios de retiro baixo e três marias, em unifilar. 195

Gráfico 10.3-1: 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..... 203

Gráfico 10.3-2: 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. 204

Gráfico 10.3-3: Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CPM_Ativa, AUT-CP e AUT-MRB) 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. 205

Gráfico 10.3-4: Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MRB, AUT-JRB 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. 206

Gráfico 10.3-5: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 209

Gráfico 10.3-6: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 210

Gráfico 10.3-7: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 211

Gráfico 10.3-8: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear. 212

Gráfico 11.3.2-1: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 224

Gráfico 11.3.2-2: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 224

Gráfico 11.3.2-3: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período. 228

Gráfico 11.3.2-4: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 228

Gráfico 11.3.2-5: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período. 233

Gráfico 11.3.2-6: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021 com escala variável. 233

Gráfico 11.3.2-7: Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 238

Gráfico 11.3.2-8: Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 238

Gráfico 11.3.2-9: Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 243

Gráfico 11.3.2-10: Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 243

Gráfico 11.3.2-11: Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 247

Gráfico 11.3.2-12: Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 247

Gráfico 11.3.2-13: Variação do Mercúrio ao longo dos períodos sazonais de chuvade 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 250

Gráfico 11.3.2-14: Variação do Mercúrio ao longo dos períodos sazonais de estiagem de 2019 até 2021 com escala variável e sem outliers. 250

Gráfico 11.3.2-15: Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 253

Gráfico 11.3.2-16: Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 253

Gráfico 11.3.2-17: Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 257

Gráfico 11.3.2-18: Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 257

Gráfico 11.3.2-19: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 260

Gráfico 11.3.2-20: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável. 260

Gráfico 11.3.2-21: Variação do Zinco ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período. 263

Gráfico 11.3.2-22: Variação do Zinco ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável e sem *outliers*. 263

Gráfico 3-1: Variação granulométrica no período de janeiro/2019 a março/2019. 279

Gráfico 3-2: Variação granulométrica no período de outubro/2019 a março/2020. 280

Gráfico 3-3: Variação granulométrica no período de outubro/2020 a março/2021. 281

Lista de Tabelas

Tabela 3.5-1 Regiões e pontos analisados frente às violações aos limites legais..... 33

Tabela 3.8-1 Datas da passagem da Pluma de turbidez. 36

Tabela 3.10-1 Vazões médias mensais, Q7,10, Q95 e Qmlt (m^3/s) na calha principal do rio Paraopeba, referentes ao período 1938 a 2018. 40

Tabela 5.3.1.1-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Manganês total. 69

Tabela 5.3.1.1-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês total em cada região. 69

Tabela 5.3.1.1-3: Comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Manganês dissolvido. 71

Tabela 5.3.1.1-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Manganês dissolvido em cada região..... 71

Tabela 5.3.1.2-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Ferro total. 77

Tabela 5.3.1.2-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro total em cada região..... 77

Tabela 5.3.1.2-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Ferro dissolvido. 79

Tabela 5.3.1.2-4: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Ferro dissolvido em cada região. 79

Tabela 5.3.1.3-1:Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Alumínio total. 84

Tabela 5.3.1.3-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio total em cada região. 84

Tabela 5.3.1.3-3: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Alumínio dissolvido. 86

Tabela 5.3.1.3-4:Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Alumínio dissolvido em cada região..... 86

Tabela 5.3.1.4-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro turbidez.... 91

Tabela 5.3.1.4-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro turbidez em cada região. 91

Tabela 5.3.1.5-1: Resultados do teste de comparação espacial considerando a série completa dos períodos de chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Chumbo total. 95

Tabela 5.3.1.5-2: Resultados do teste de comparação temporal para o parâmetro Chumbo total em cada região. 95

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 – medianas mensais. 98

Tabela 5.3.2-2: Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de chuva – medianas mensais. 98

Tabela 6.3-1: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Ferro Carvão. 110

Tabela 6.3-2: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Montante..... 110

Tabela 6.3-3: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Região 1A. 110

Tabela 6.3-4: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Região 1B. 110

Tabela 6.3-5: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Região 2A. 110

Tabela 6.3-6: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Região 2B. 110

Tabela 6.3-7: Parâmetros violados *baseline* Igam X pontos Vale período de chuva/2019, chuva/2020 e chuva 2021/2022– Região 2C. 110

Tabela 6.3-8:Percentual de violações aos padrões legais nos pontos de monitoramento com foco na chuva 2021/2022. 112

Tabela 7.3.1-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 128

Tabela 7.3.2-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 133

Tabela 7.3.3-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 138

Tabela 8.2-1: Tributários e pontos de monitoramento de montante e jusante da confluência como o rio Paraopeba. 143

Tabela 8.3.1-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-05/PT-03) - Ribeirão Sarzedo. 153

Tabela 8.3.2-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-14/PT-48) - Rio Betim. 162

Tabela 8.3.3-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-53/PT-54) - Ribeirão das Abóboras.... 171

Tabela 8.3.4-1: Resultados do teste Mann-Whitney (PT-57/CE-02) - Ribeirão dos Gomes..... 180

Tabela 10.2-1: Faixas mínima e máxima dos parâmetros para classificação dos dados inconsistentes como inválidos. 198

Tabela 10.2-2: Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão. 199

Tabela 10.3-1: Resultados de R^2 para as relações de turbidez com a fração dissolvida dos metais 201

Tabela 10.3-2: Resultados de R^2 das relações de turbidez com as frações totais dos metais traçadores. 202

Tabela 11.2-1 Quantitativo do N Amostral de sedimentos nos diferentes períodos de chuva. 215

Tabela 11.3.2-1: Avaliação inferencial espacial do Manganês. 225

Tabela 11.3.2-2: Avaliação inferencial temporal do Manganês ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 225

Tabela 11.3.2-3: Avaliação inferencial espacial do Ferro. 229

Tabela 11.3.2-4: Avaliação inferencial temporal do Ferro ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 229

Tabela 11.3.2-5: Avaliação inferencial espacial do Alumínio. 234

Tabela 11.3.2-6: Avaliação inferencial temporal do Alumínio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 234

Tabela 11.3.2-7: Avaliação inferencial espacial do Chumbo. 239

Tabela 11.3.2-8: Avaliação inferencial temporal do Chumbo ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 239

Tabela 11.3.2-9: Avaliação inferencial espacial do Cobre. 244

Tabela 11.3.2-10: Avaliação inferencial temporal do Cobre ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 244

Tabela 11.3.2-11: Avaliação inferencial espacial do Níquel. 248

Tabela 11.3.2-12: Avaliação inferencial temporal do Níquel ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 248

Tabela 11.3.2-13: Avaliação inferencial espacial do Mercúrio. 251

Tabela 11.3.2-14: Avaliação inferencial temporal do Mercúrio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 251

Tabela 11.3.2-15: Avaliação inferencial espacial do Cádmio. 254

Tabela 11.3.2-16: Avaliação inferencial temporal do Cádmio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 254

Tabela 11.3.2-17: Avaliação inferencial espacial do Arsênio. 258

Tabela 11.3.2-18: Avaliação inferencial temporal do Arsênio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 258

Tabela 11.3.2-19: Avaliação inferencial espacial do Cromo. 261

Tabela 11.3.2-20: Avaliação inferencial temporal do Cromo ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 261

Tabela 11.3.2-21: Avaliação inferencial espacial do Zinco. 264

Tabela 11.3.2-22: Avaliação inferencial temporal do Zinco ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022. 264

Tabela 11.3.3-1: Resultados da análise temporal para a série completa considerando as medianas mensais de cada ponto. 267

Tabela 11.3.3-2: Resultados da análise temporal para os períodos de chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 considerando as medianas mensais de cada ponto. 267

Tabela 1313.3-1: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 1 da CONAMA 454/12, ou dos valores propostos por Vicq (2015), para a Chuva 2021/ 2022..... 285

Tabela 1313.3-2: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da CONAMA 454/12 para a chuva 2021/2022. 286

Tabela 13-13.313.3-3: Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. 290

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 16, 17, 18, 19 e 20 (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 versão 16 do PME, protocolado em 08/10/2021, é contemplada alteração na frequência atual do monitoramento da água superficial e sedimentos com exclusão dos pontos de monitoramento PT-04 e PT-56 da malha amostral e exclusão de parâmetros analíticos da água superficial da malha amostral, exceto Acrilamida, Alcalinidade total, Antimônio total, Cloreto, Cloro residual total, Coliformes totais, Fitoplâncton, Fósforo dissolvido, Potássio dissolvido, Magnésio total, Nitrogênio orgânico, Substâncias tensoativas, Sulfato total, Sulfeto (H_2S não dissociado), Vanádio total, Hidrocarbonetos poliaromáticos de petróleo, Benzeno, na água superficial e que já faziam parte do programa PME 15A, sendo alguns parâmetros para pontos específicos da malha amostral. Para a matriz sedimentos, houve a manutenção de todos os parâmetros analíticos, conforme já identificado no PME 15A.

Na versão 17 do PME, protocolado em 22/10/2021, mantém os objetivos do plano anterior. Considera as orientações sobre a manutenção dos pontos de monitoramento na malha amostral, frequência e escopo analítico e que estão documentados na Nota Técnica nº 24/IGAM/GEMOQ/2021(35575790), com as considerações da Gerência de Monitoramento da Qualidade da Água – GEMOQ/IGAM, em atenção a Carta Gerência Executiva de Reparação nº C.EXT. 1118/2021 (33774875). Considera as orientações sobre a manutenção dos pontos de monitoramento na malha amostral e escopo analítico que estão documentados na Nota Técnica Nº 60622935-ACM-DM-ZZ-TN-PM-0004-2021. Como a frequência da nota técnica do Gemoq/Igam foi mais conservadora, esta foi priorizada nesta revisão do plano de monitoramento. A partir da data de 20/10/2021 foi considerada a possibilidade de coleta em coordenada alternativa para sedimento, localizada em margem esquerda para o ponto CE-02.

A versão 18, protocolado na data de 26/11/2021, considera as orientações sobre a manutenção dos pontos de monitoramento na malha amostral, frequência e escopo analítico e que estão documentados na Nota Técnica nº 24/IGAM/GEMOQ/2021(35575790 e Nota Técnica nº 30/IGAM/GEMOQ/2021, contemplando atualizações da frequência. Contempla a atualização da frequência do TT-01 para mensal nos sedimentos, bem como a exclusão dos parâmetros acrilamida, antimônio total e dissolvido na água superficial e nitrogênio kjeldhal da matriz sedimentos, conforme explicitado na Nota Técnica nº 30/IGAM/GEMOQ/2021.

A versão 19, protocolada em 17/12/2021, apresenta a coordenada oficial de coleta do PT-47E a qual foi alterada para aproximadamente 70m a montante da coordenada anterior, devido às

obras de adequação da barragem B6. Por fim a versão 20, protocolada na data de 18/03/2022, considera a 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. Contempla a atualização da coordenada de amostragem de água superficial e sedimento no ponto PT-47-E e a atualização das coordenadas alternativas de amostragem de água superficial e de sedimento.

O presente documento, denominado Relatório de Fechamento de Ciclo de Qualidade da Água Superficial e Sedimentos (RT-0035), apresenta uma análise sistêmica da evolução dos resultados analíticos da qualidade da água e de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Paraopeba até o reservatório de Três Marias.

Objetiva-se a análise das alterações nos resultados analíticos em comparação ao *baseline* de dados históricos da região ao longo do período compreendido entre janeiro/2019 e março/2022, com foco no período de chuvas. 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.

2. Contextualização geral

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 como 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, inserido 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, assim, como um indicador secundário.

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, 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, promoveu atenuação dessas concentrações, sem a observância de alterações claras nos valores desses parâmetros para além do ponto de monitoramento PT-21 até a terceira semana de maio/2019, apontando alcançar as condições de *baseline* na água e, assim, indicando o limite efetivo da 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 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 analíticos, indicando retorno 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 das potenciais ressuspensões das deposições de rejeito ao longo do rio Paraopeba. Cabe ressaltar, ademais, que as chuvas se intensificaram significativamente para os meses de janeiro e fevereiro/2020, resultando em aumentos ainda mais pronunciados 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 significativamente 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 oficial, 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, forte e esperada 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 último 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 a 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, há nova fase de dissipação de materiais em suspensão e consequente redução nas concentrações de manganês total, ferro total e alumínio total 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 alcançam a bacia do Paraopeba e promovem solubilização de fases minerais. Os teores de turbidez e dos elementos traços foram predominantemente reduzidos e dissipados neste período.

O período de chuvas 2021/2022, objeto principal do presente documento, foi marcado por chuvas 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 por ser dado para as chuvas que ocorreram principalmente no mês de janeiro/2022 que atingiram um patamar ainda mais elevado que nos períodos chuvosos anteriores.

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 o mesmo 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.

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 + 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.

Dessa maneira, os possíveis efeitos entre um período e outro chuvoso 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 corroborando com os resultados 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 suas características litológicas regionais contendo metassedimentos do Grupo Bambui e granitóides *sin a tardi* tectônicos, bem como rochas granitóides do Complexo Belo Horizonte.

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 traços 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 também mostraram redução nos índices IRS 1 e IRS 2 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 na região do Quadrilátero Ferrífero até o PT-15 e os demais trechos se mantiveram com concentrações próximas. Já o ferro e alumínio, aumentaram em toda a bacia nesta comparação, assim como 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 textura dos sedimentos é mais fina e a adsorção de metais é maior. Nas regiões 1A e 1B, a mudança na posição de amostragem teve um reflexo menor, potencialmente 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 o manganês foi o principal traçador para avanço dos rejeitos ao longo do rio Paraopeba e ainda que, as maiores concentrações de metais provenientes do rejeito da barragem B1 ocorreu no primeiro período chuvoso entre fevereiro e abril de 2019 e início da estiagem de 2019. A análise dos dados também 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). Entretanto, as partículas que estavam em suspensão foram transportadas até PT-55 neste período chuvoso de 2019. À medida que o tempo passou, constatou-se redução espacial de materiais com característica química de rejeito depositados 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 traços, a predominância foi de manutenção ou redução das concentrações.

O ciclo de chuvas de 2021/2022 foi marcado pela ocorrência de volumes pluviométricos elevados, quando comparado aos anteriores, principalmente o no mês de janeiro/2022, apesar dessa ocorrência no que diz respeito a qualidade de água e dos sedimentos, não foram observados comportamentos muito distintos dos já observados nos períodos de chuvas pretéritos (2019,2020,2021 e 2022). Especificamente para os parâmetros traços, no período 2021/2022, em água superficial o comportamento observado, de maneira geral, foi de manutenção e aumento pouco expressivo nas concentrações para algumas regiões quando compara-se com osperíodos chuvosos entre os anos de 2019 e 2021.

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 março/2021). 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.

3. Premissas gerais

As premissas gerais adotadas ao longo das análises para elaboração do Relatório de Fechamento de Ciclo de Qualidade da Água Superficial e Sedimentos (25/01/2019 a 31/03/2022) 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 31/03/2022 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 31/03/2022.

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 chuvoso de 2019: entre os meses de janeiro a março de 2019;
- Período chuvoso de 2019-2020: entre os meses de outubro/2019 e março de 2020;
- Período chuvoso de 2020-2021: entre os meses de outubro/2020 e março de 2021;
- Período chuvoso de 2021-2022: entre os meses de outubro/2021 e março de 2022.

Cabe destacar, no entanto, que o mês de abril/2019 reportou chuvas acima das médias históricas no trecho do rio Paraopeba, compreendido entre as estações de Belo Vale e UHE Retiro Baixo Jusante no mês em questão. Em função dessa condição peculiar e dos potenciais efeitos de arraste, ressuspensão no leito do rio e carreamento difuso da bacia, juntamente com a recente ocorrência do rompimento à época, optou-se por considerar, nos relatórios e informes anteriores, o mês de abril/2019 como extraordinariamente pertencente ao período chuvoso.

Para o presente documento, vale reforçar, tendo em vista o amplo espectro de dados obtidos ao longo do período de monitoramento e, assim, uma condição mais abrangente para a interpretação mais representativa dos resultados, foi definida a retomada para os recortes sazonais habituais da região de estudo, ou seja, o mês de abril/2019 foi mantido como um mês de estiagem.

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

A localização dos pontos de monitoramento e a coleta foram realizadas, até o fim de março de 2022, de acordo com o especificado no Plano de Monitoramento Emergencial versão 20. Durante o período de 01/10/2021 a 31/03/2022, as campanhas de monitoramento utilizaram como referência os Plano de Monitoramento Emergencial nas versões 16, 17, 18, 19 e 20.

A versão PME 20, foi protocolada em 18/03/2022, considera a 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. Contempla a atualização da coordenada de amostragem de água superficial e sedimento no ponto PT-47-E e a atualização das coordenadas alternativas de amostragem de água superficial e de sedimento.

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.

Na **Tabela 3.5-1** é apresentada a relação dos pontos de monitoramento da VALE com os respectivos pontos do Igam (*baseline*) pertencentes a cada uma das regiões do rio Paraopeba e do ribeirão Ferro-Carvão. É importante destacar que alguns pontos da VALE estão mais próximos aos pontos do Igam: BP036 e PT-52; BP068 e PT-05; BP072 e PT-04; BP082 e PT-16; BP083 e PT-49; BP078 e PT-19; BP099 e CE02.

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

Região	*Baseline*	Pontos VALE
Montante	BP036	PT052
Ferro-Carvão	FEI-01; FEI-03; FEI-07	PT11, PT12
1A	BP068	PT-01; PT56; PT13*; PT09; PT02; PT05
1B	BP070, BP072	PT03; PT06; PT14; PT48; PT04; PT15

Região	*Baseline*	Pontos VALE
2A	BP082, BP083, BP078	PT53; PT54; PT43; PT16; PT17; PT18; PT49; PT50; PT19; PT51; PT55
2B	BP099	PT20; PT28; PT21
2C	BP099	PT-57; CE-02; JRB-01; JRB-02; PT-22

*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 em muitos analitos os resultados são inferiores ao LQ, adotou-se como premissa utilizar à padronização do menor valor de LQ. Essa padronização somente não foi adotada para os casos em que os dados brutos foram apresentados.

Para a avaliação dos percentuais de violação aos limites legais de classe de enquadramento no caso da água superficial ou valores orientadores no caso dos sedimentos, optou-se por excluir, desse modo, os analitos que apresentaram todos os resultados inferiores ao LQ.

As verificações do QA/QC em água superficial e sedimentos estão associadas a Branco Temperatura, *surrogates*, limites de quantificação do método, *holding time*, branco do laboratório, consonância das amostragens com as orientações do Guia ANA/Cetesb (2011), compatibilidade entre as fichas de amostragem e as definições do plano de amostragem.

Para a análise exploratória dos dados, o método de substituição simples pelo próprio valor do LQ foi adotado. Esta forma de trabalhar é também utilizada pelo órgão ambiental Igam e é 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-detectado, 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-detectados e detectados.

Destaca-se que em dezembro de 2020, para alguns pontos de monitoramento, houve a mudança de laboratório para a análise de metais (Bioagri para a SGS) e, consequentemente, houve um aumento de 10x no limite de quantificação (LQ) para o Chumbo total, que passou de 0,001 mg/L para 0,01 mg/L. Com esse aumento de LQ houve uma perda de sensibilidade na detecção desse parâmetro nos níveis de concentração abaixo de 0,01 mg/L. Considerando que o limite de quantificação é a concentração mais baixa de um analito que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis, nas condições utilizadas durante a análise, não foi possível determinar se houve concentrações de Chumbo total abaixo do LQ certificado pela SGS para o ensaio em ICP-OES. A partir de março de 2021, a análise para o Chumbo total começou a ser realizada pelo método ICP-MS, cujo LQ certificado do laboratório SGS é de 0,002 mg/L (5x menor que para o ICP-OES). Dessa forma, foi possível a determinação novamente de concentrações abaixo de 0,01 mg/L.

3.7. Níveis de consistência dos dados reportados

Todos os dados analíticos enviados pelos laboratórios são submetidos a 3 etapas de *Quality Assurance e Quality Control* (QA/QC): (i) Validação; (ii) Qualificação e (iii) Confirmação, para garantia da confiabilidade destes. Eventualmente, devido à solicitação de reanálise de alguma amostra, alguns dados podem ser corrigidos e reincorporados, *a posteriori*, ao conjunto de resultados já reportados. Os dados recebidos até o dia 31/03/2022, e utilizados para a elaboração desse relatório, passaram por duas das três etapas de avaliação de QA/QC (validação e qualificação). A terceira e última etapa de confirmação dos resultados ainda está em andamento, pois depende, especificamente, do retorno dos laboratórios sobre as análises inconformes e dispende um maior tempo para ser finalizada. No ANEXO III, podem ser consultadas as análises de QA/QC realizadas.

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. Enquadramento dos corpos de água

Para fins de enquadramento dos corpos de água, conforme instituído pela Política Nacional de Recursos Hídrico, 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 01, de 05 de maio de 2008- Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes;
- 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.

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, conforme DN COPAM-CERH nº 01/2008:

- Classe 1 - Ribeirão dos Gomes, monitorado pelo ponto CE-01;
- Classe 2 - Ribeirão Sarzedo e ribeirão das Abóboras, monitorados pelos pontos TT-02 e TT-05, respectivamente;
- Classe 3 - Rio Betim, monitorado pelo ponto TT-01.

3.10. Valores orientadores dos sedimentos

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 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.

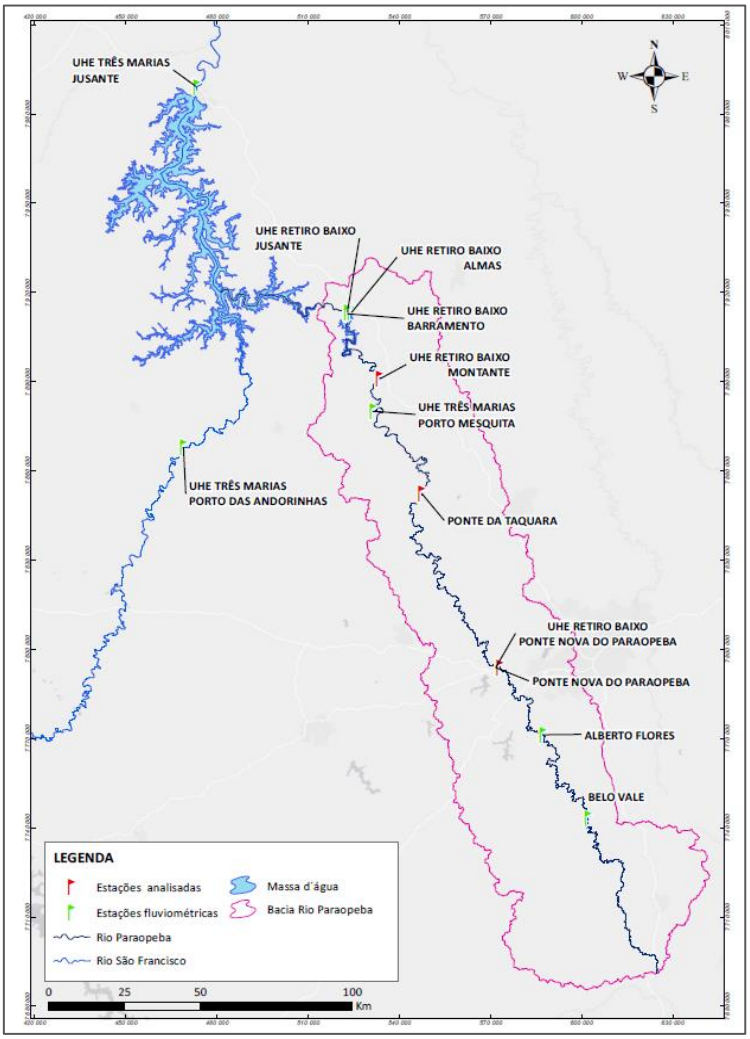
Os elementos manganês, ferro e alumínio não estão contemplados na CONAMA 454/12 e neste caso, foi utilizada a referência de Vicq (2015). Esta referência é utilizada pelo Igam nos relatórios técnicos informativos sobre a qualidade dos sedimentos no rio Paraopeba.

4. Caracterização hidrológica

Para a caracterização fluviométrica do rio Paraopeba ao longo do período global de análise, foram utilizados como referência os dados de vazões de estações hidrométricas oficiais de referência. É importante destacar, 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 3.10.1 é apresentada a localização das estações utilizadas na bacia do rio Paraopeba.

Figura 3.10.1 Estações fluviométricas utilizadas para caracterização das vazões.



Elaboração: Arcadis, 2019.

Na Tabela 3.10-1, 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.

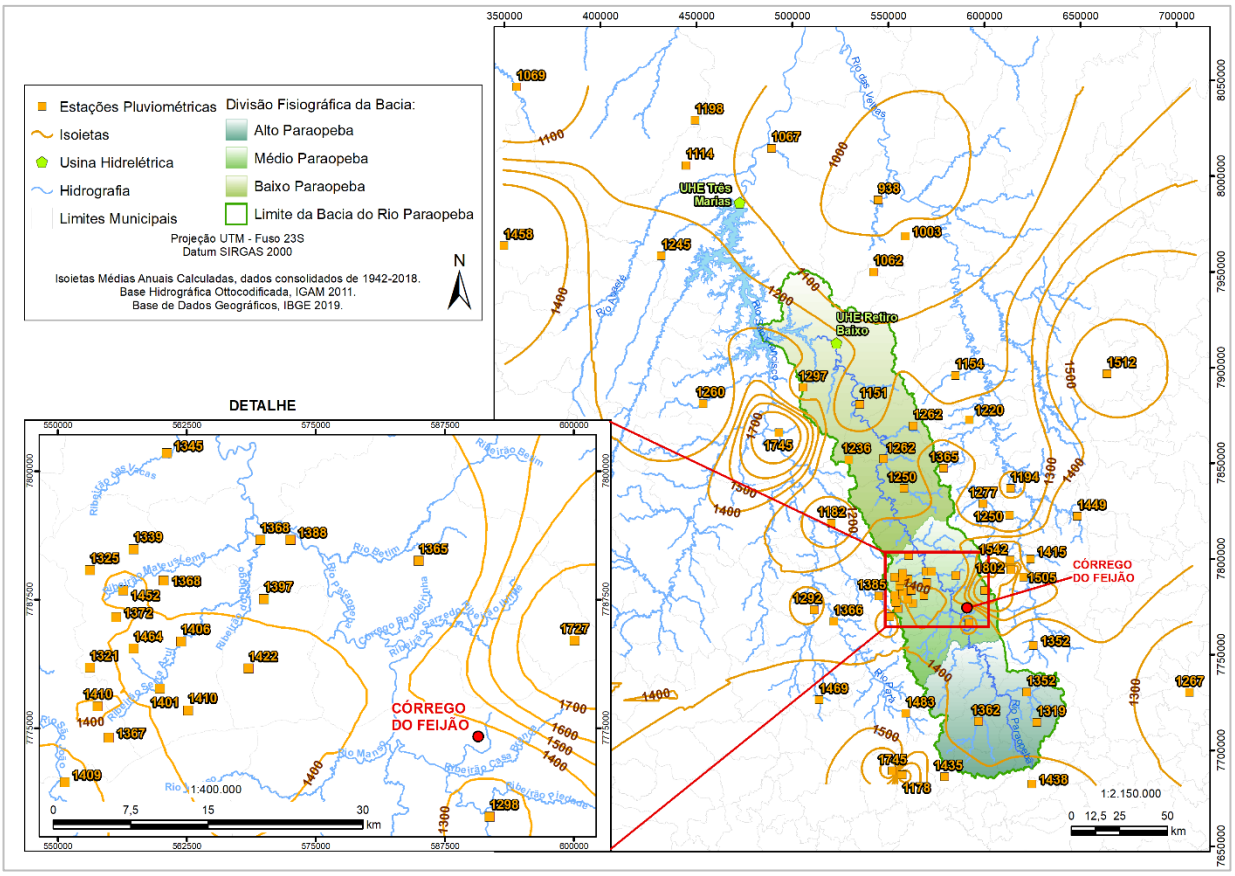
Tabela 3.10-1 Vazões médias mensais, Q7,10, Q95 e Qmlt (m³/s) na calha principal do rio Paraopeba, referentes ao período 1938 a 2018.

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 3.10.2 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 3.10.2 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 chuvas de 2019: entre os janeiro e março de 2019;
- Período de chuvas de 2019/2020: entre os meses de outubro/2019 a março/2020;
- Período de chuvas de 2020/2021: entre os meses de outubro/2020 a março/2021;
- Período de chuvas de 2021/2022: entre os meses de outubro/2021 a março/2022.

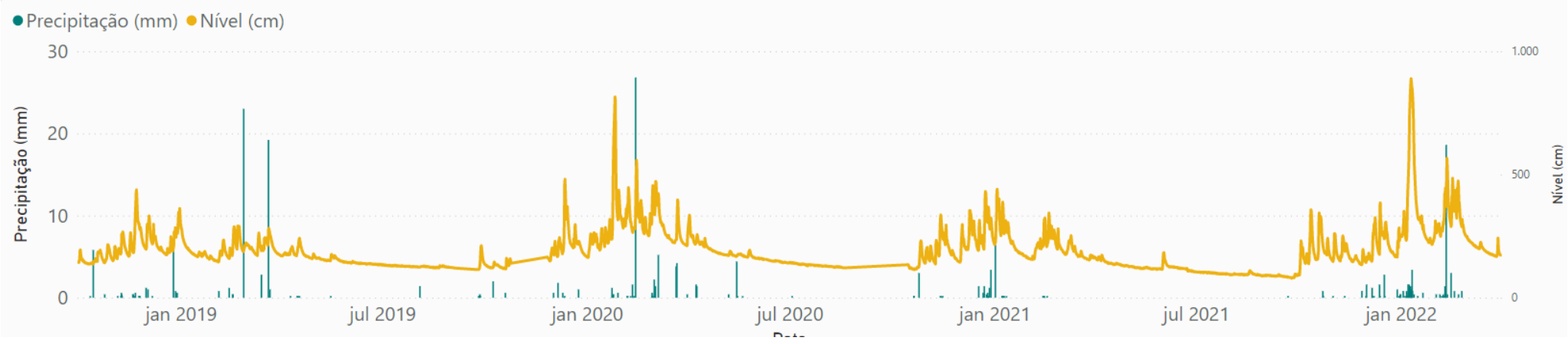
4.1. Rio Paraopeba

Os dados de pluviometria (hietogramas) e nível (cotagramas) das estações fluviométricas localizadas no rio Paraopeba Belo Vale, Alberto Flores, UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba, UHE Retiro Baixo Montante e UHE Retiro Baixo Jusante, todas com dados telemétricos e representativas espacialmente da bacia do rio Paraopeba, desde os trechos

mais proximais ao rompimento até trecho a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo podem ser visualizados no Gráfico 4.1-1 a Gráfico 4.1-5.

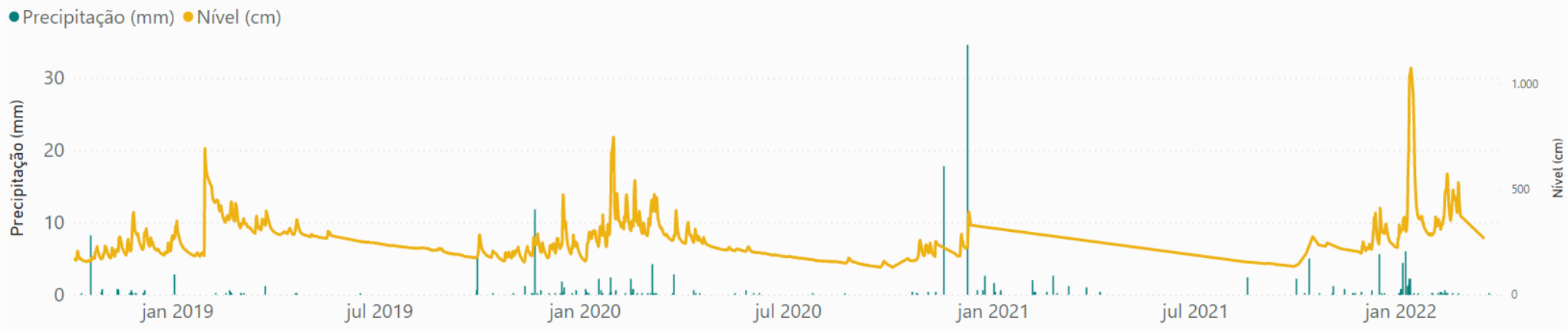
Os cotagramas a seguir apresentados têm a função específica de evidenciar a notada variação das condições hidrológicas do rio Paraopeba ao longo dos períodos sazonais em análise. Cabe ressaltar que os resultados das vazões monitoradas não foram incluídos nos gráficos, dadas as inconsistências e falhas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

Gráfico 4.1-1 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação Belo Vale.



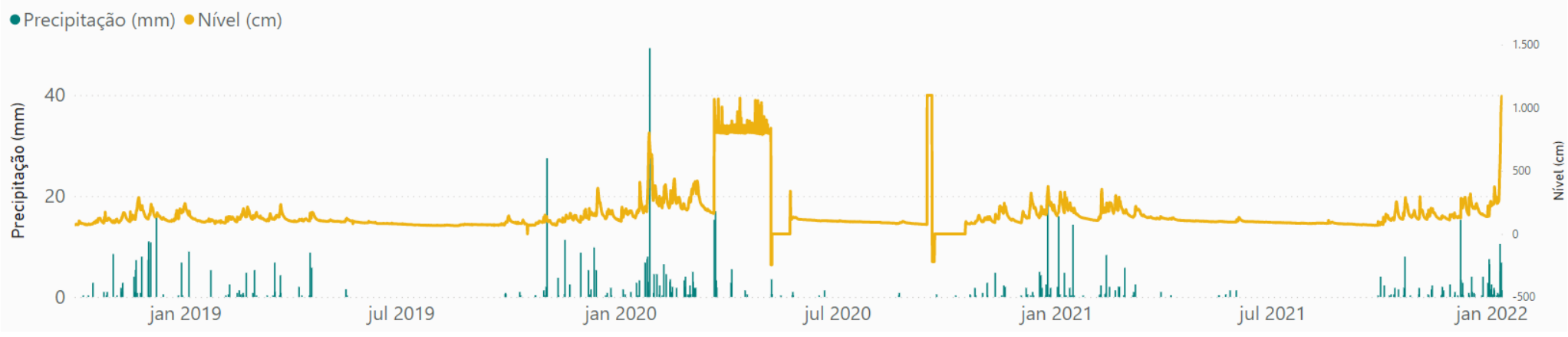
Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2020 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.1-2 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação Alberto Flores.



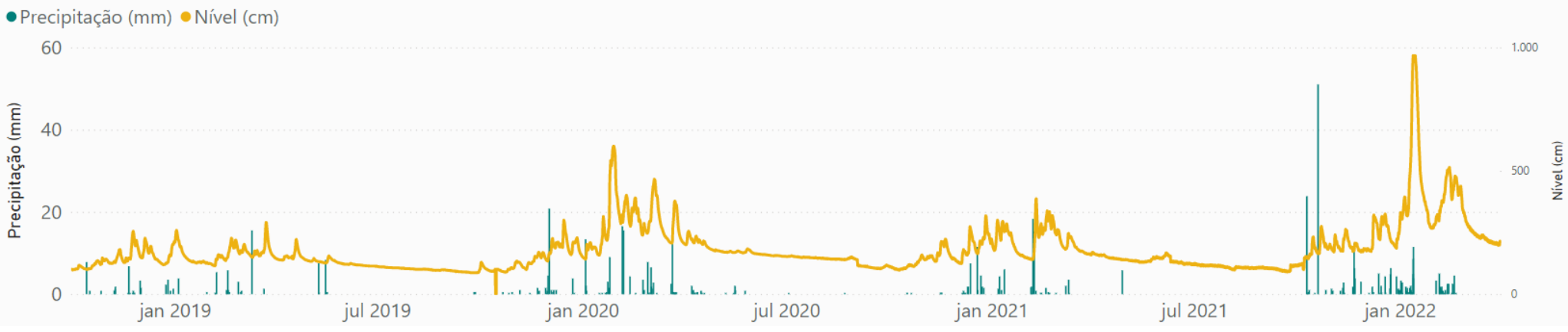
Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2020 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.1-3 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba.



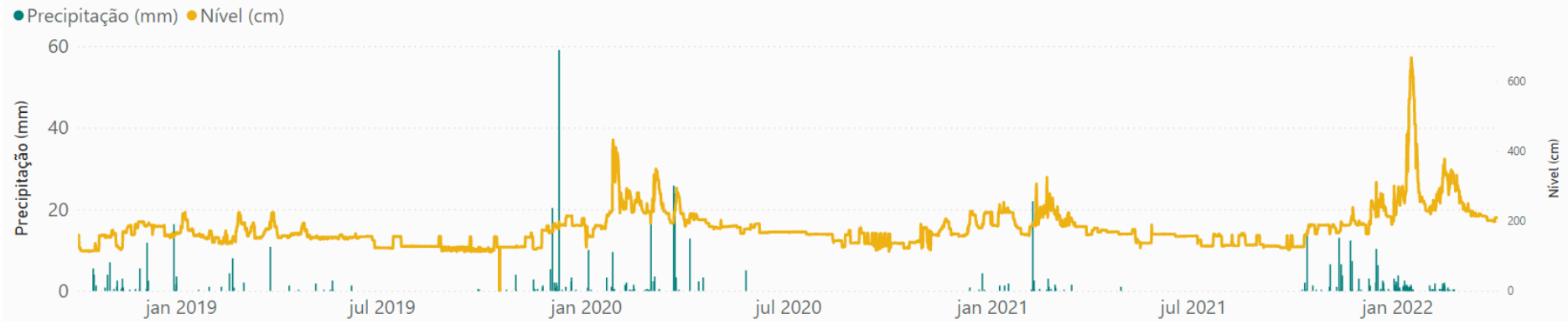
Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2020 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.1-4 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação UHE Retiro Baixo Montante.



Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2020 (www.snirh.gov.br).

Gráfico 4.1-5 Chuvas e nível do período de 01/janeiro (2019) a 31/março (2022) na estação UHE Retiro Baixo Jusante.



Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2020 (www.snirh.gov.br).

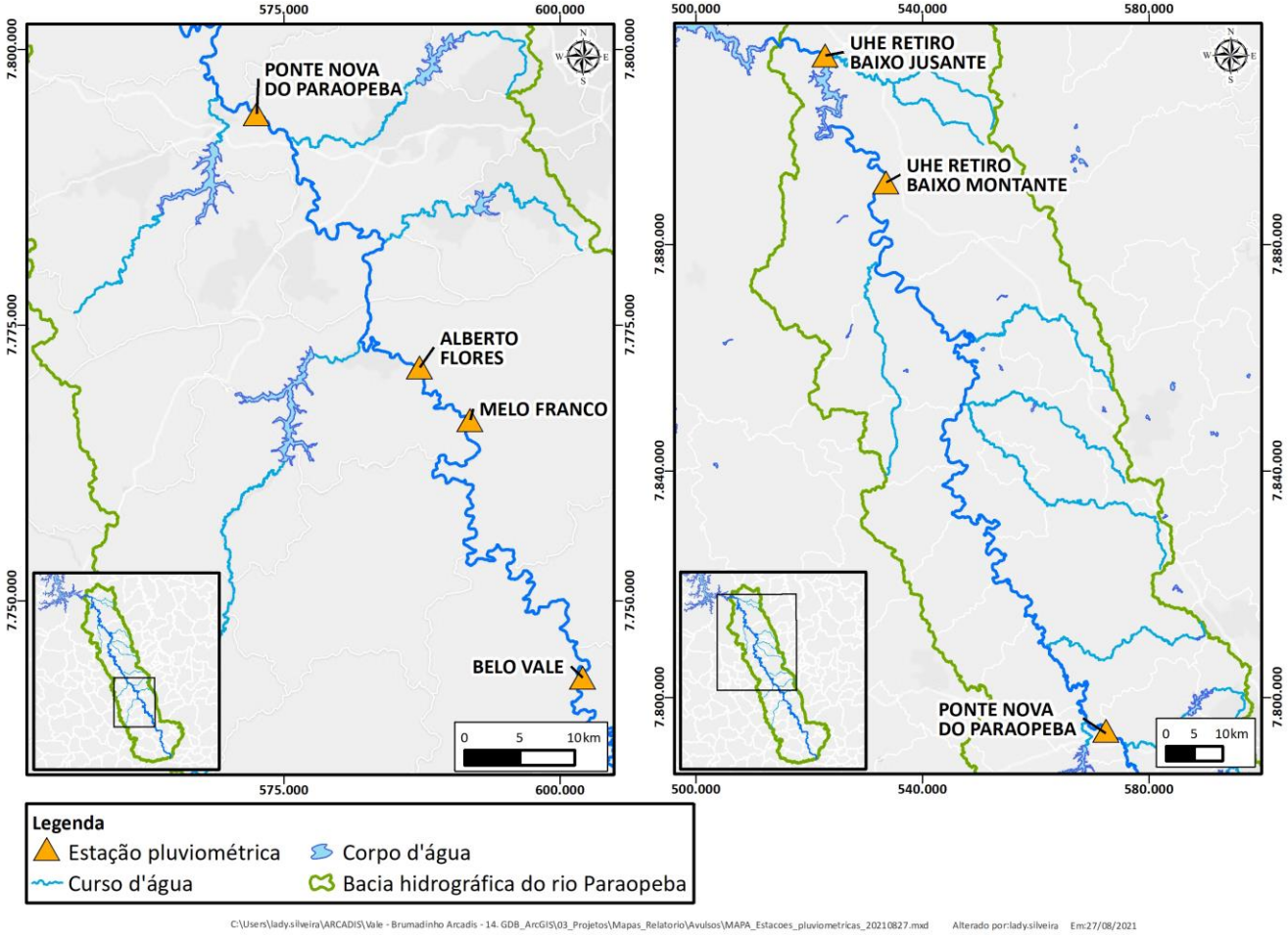
Embora seja evidente que os níveis/vazões compreendam respostas às precipitações ocorridas na bacia e nas regiões de influência das estações de monitoramento, é perceptível que, nos períodos chuvosos de 2019/2020 e 2021/2022, os valores apresentados nos cotagramas foram mais elevados. Destaque pode ser dado ao ápice de vazão ocorrido no mês de janeiro/2022, especialmente entre as datas de 07 e 13/01/2022, em que ocorreram chuvas intensas na bacia do rio Paraopeba e, em maior monta, nas regiões que cobrem do médio ao alto curso de água.

Assim sendo, notou-se, através dos resultados obtidos por meio das estações fluviométricas com telemetria disponíveis, ter havido um expressivo incremento de nível e vazão que transladou progressivamente a partir dos trechos fluviais de montante e seguiu no sentido do reservatório de Retiro Baixo. É possível notar, inclusive, que a estação UHE Retiro Baixo Ponte Nova do Paraopeba apresentou registros paralisados a partir da data de 09/01/2022.

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 da água.

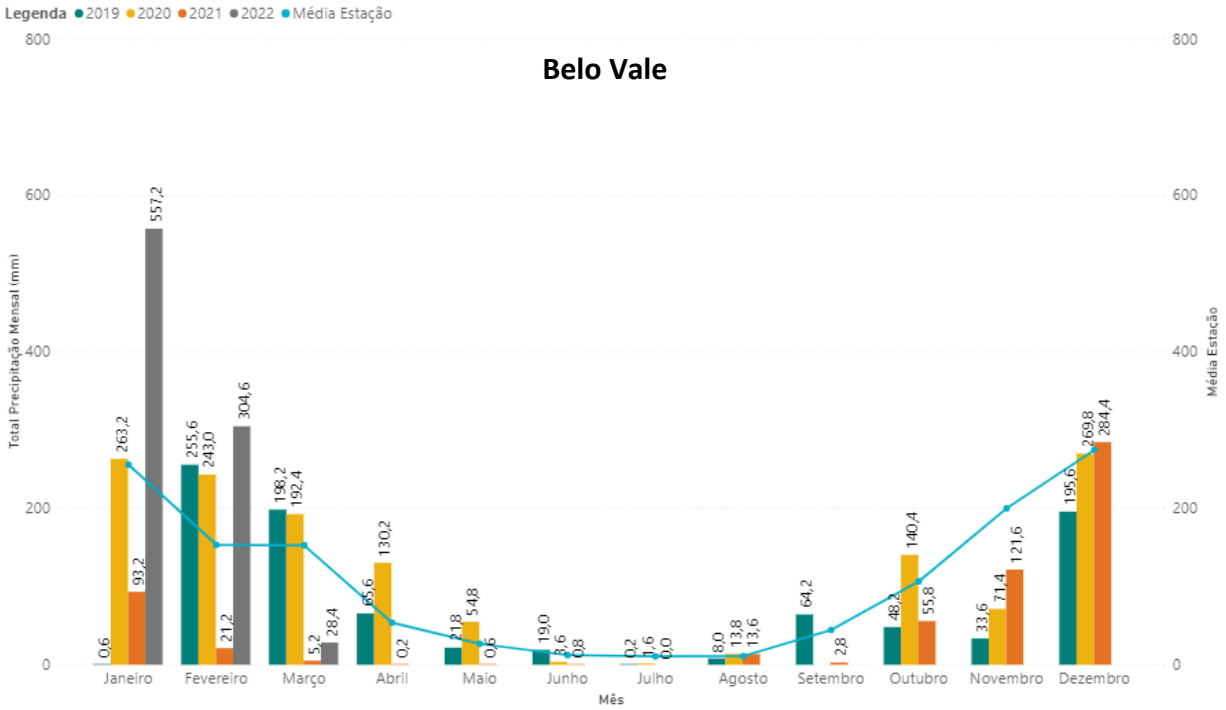
Em caráter mais específico, os totais precipitados acumulados mensais (mm) desde 2019 das estações pluviométricas utilizadas ao longo do rio Paraopeba (Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, Retiro Baixo Montante e Retiro baixo Jusante) foram comparados às médias mensais históricas (1941 a 2019) de precipitações (mm) reportadas pelas estações Melo Franco e Ponte Nova do Paraopeba de acordo com a localização mais próximas das estações de análise (Gráfico 4.1-6). Na Figura 4.1.1, podem ser visualizadas as localizações das estações utilizadas ao longo do rio Paraopeba.

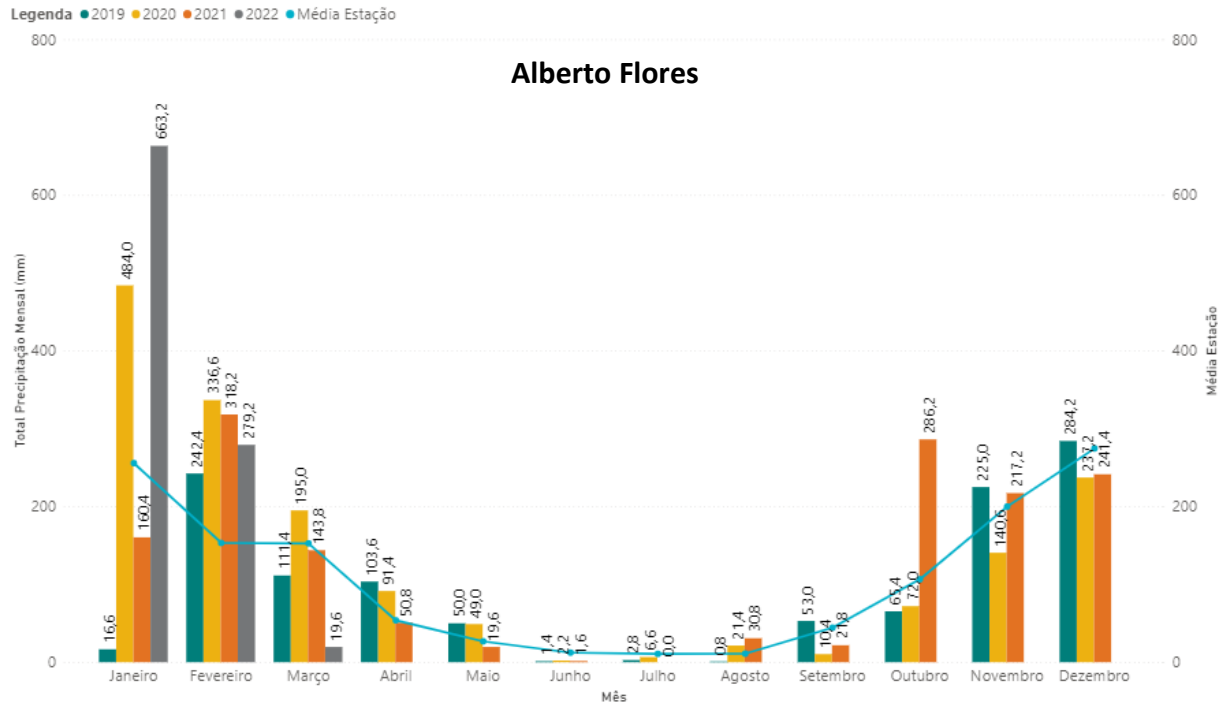
Figura 4.1.1 Estações fluviométricas.

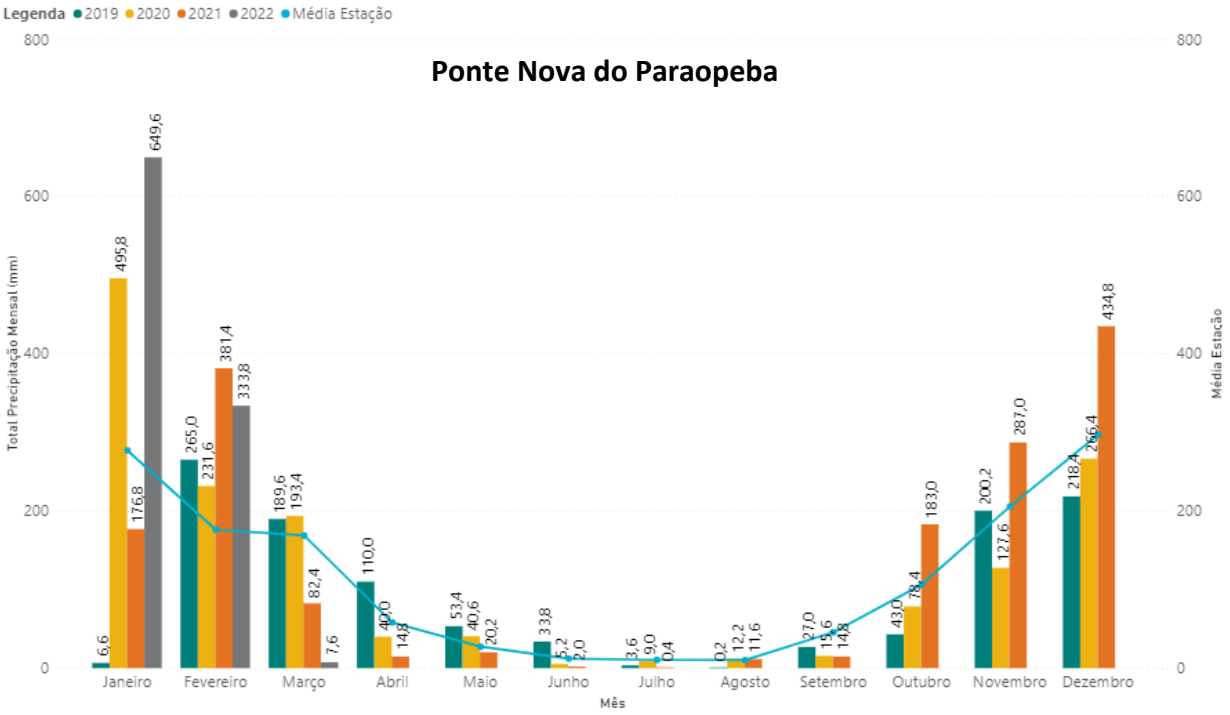


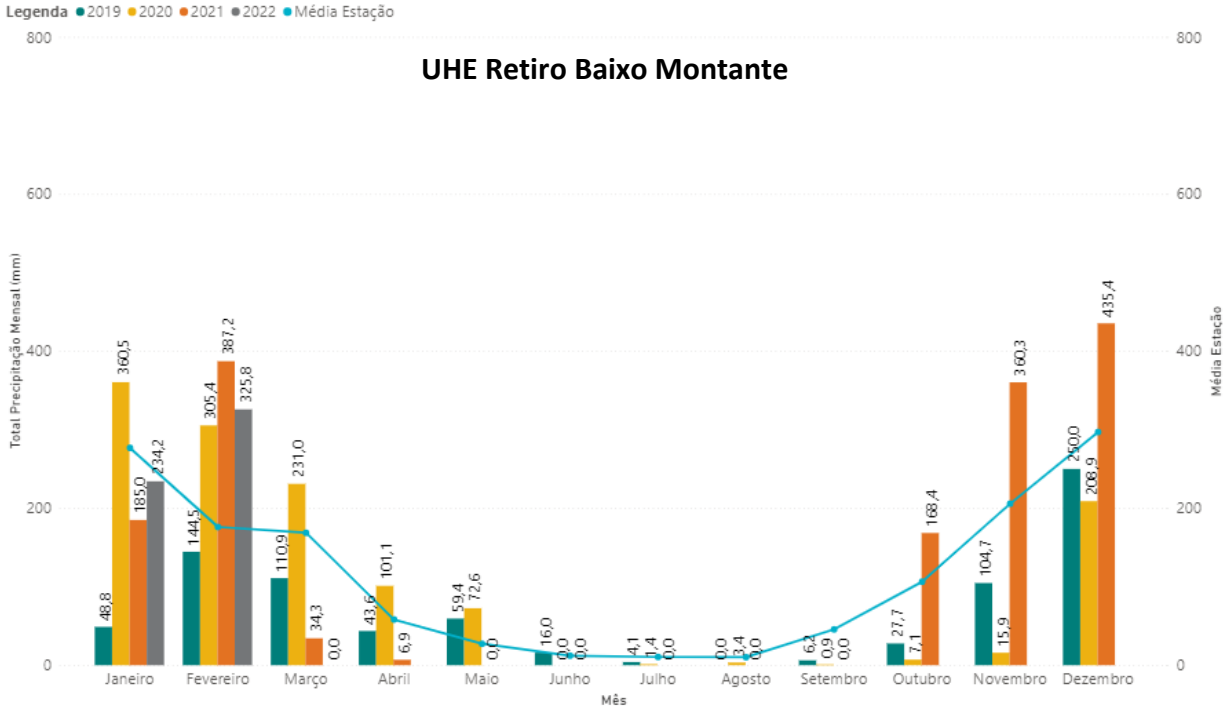
Elaboração: Arcadis, 2021.

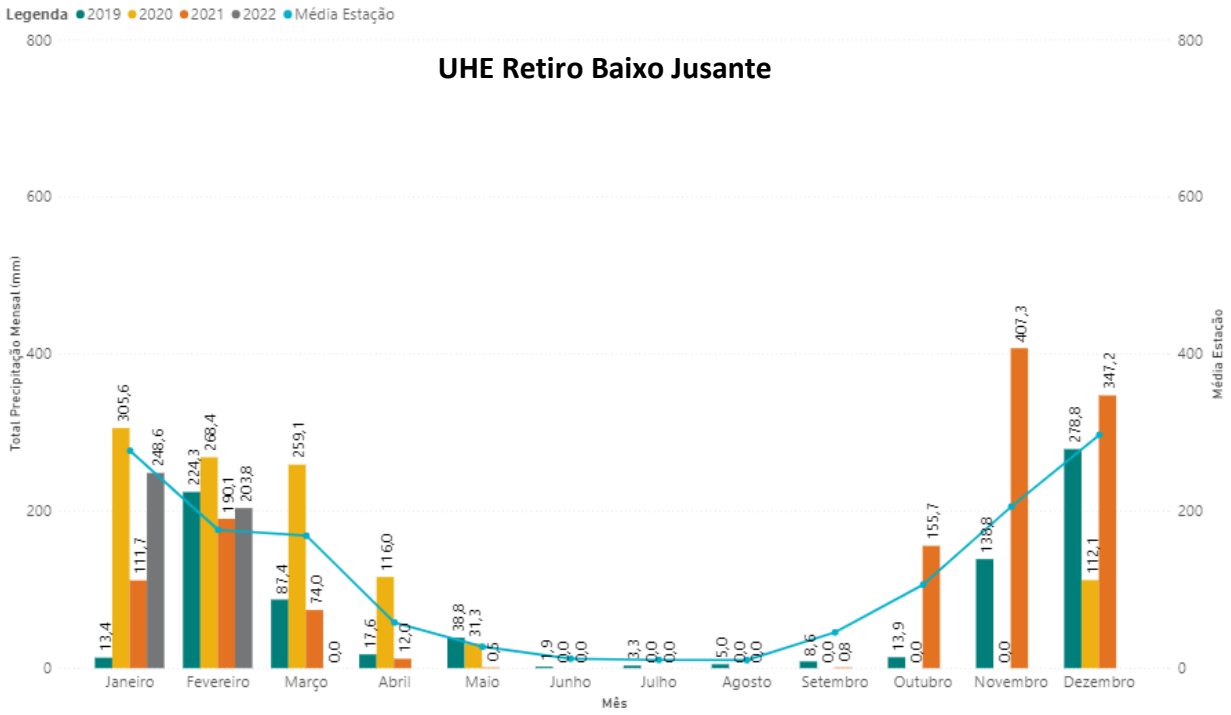
Gráfico 4.1-6 Total precipitado mensal (mm) para as estações Belo Vale, Alberto Flores, Ponte Nova Paraopeba, Retiro Baixo Montante e Retiro baixo Jusante e médias mensais históricas de precipitações.






Legenda 2019 2020 2021 2022 Média Estação
Ponte Nova do Paraopeba
Total Precipitação Mensal (mm)
Média Estação
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
53,4
40,6
20,2
3,8
5,2
2,0
3,6
9,0
0,4
0,2
12,2
11,6
27,0
15,6
14,8
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
UHE Retiro Baixo Montante
Total Precipitação Mensal (mm)
Média Estação
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
59,4
72,6
0,0
16,0
0,0
0,0
4,1
1,4
0,0
0,0
3,4
0,0
6,2
0,9
0,0
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.

Destaque pode ser atribuído ao mês de janeiro/2022 nos trechos da bacia do rio Paraopeba nas regiões média e alta da bacia, com elevados volumes pluviométricos registrados nas respectivas estações e bem superiores à média histórica, corroborando com os aumentos de nível e vazão do rio Paraopeba no período. 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).

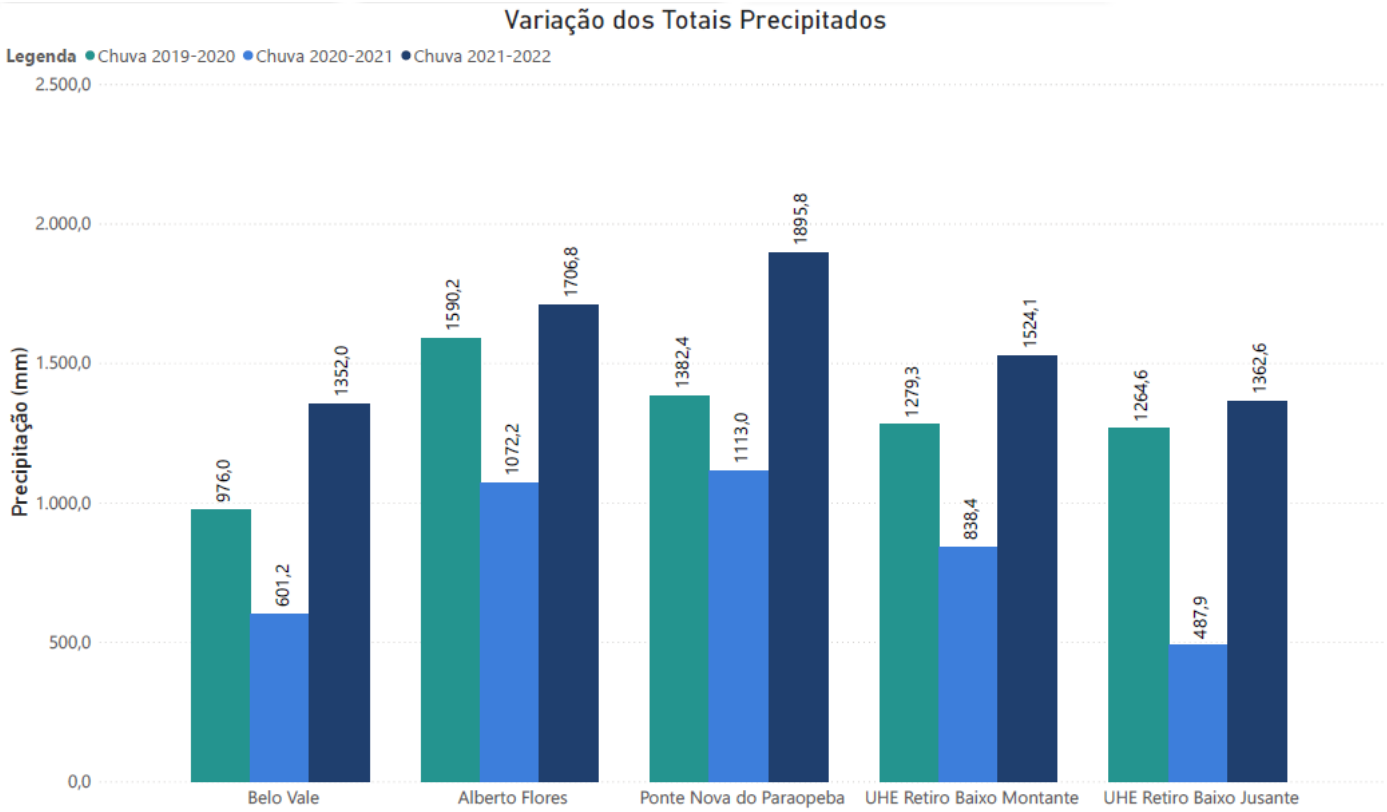
Complementarmente, no Gráfico 4.1-7, é apresentado o histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva (outubro/2019 a março/2020), chuva (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/2022). Confirma-se, assim, o aumento expressivo dos totais precipitados no período de chuva 2021/2022 em todas as estações de monitoramento. A variação mais acentuada (cerca de 280%) foi observada na estação UHE Retiro Baixo Jusante, alterando de 487,9 mm no período de 2020/2021 para 1.362,6 no período de 2021/2022, destaca-se que essa estação apresentou falha entre os

meses de outubro e novembro/2021, o que pode sugerir a variação mais acentuada entre os períodos nessa estação.

Essa descrita condição, aliada às precipitações que ocorreram acima da média, especialmente nas regiões média e alta da bacia, desde o mês de outubro/2021, favoreceram um aumento significativo dos níveis e vazões do rio Paraopeba. Considerando a bacia como um todo, os resultados obtidos por meio das estações fluviométricas com telemetria disponíveis, evidencia ter havido, de fato, um grande incremento de nível e vazão que transladou progressivamente a partir dos trechos fluviais de montante e seguiu no sentido do reservatório de Retiro Baixo.

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 4.1-7 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva (outubro/2019 a março/2020), chuva (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/2022).

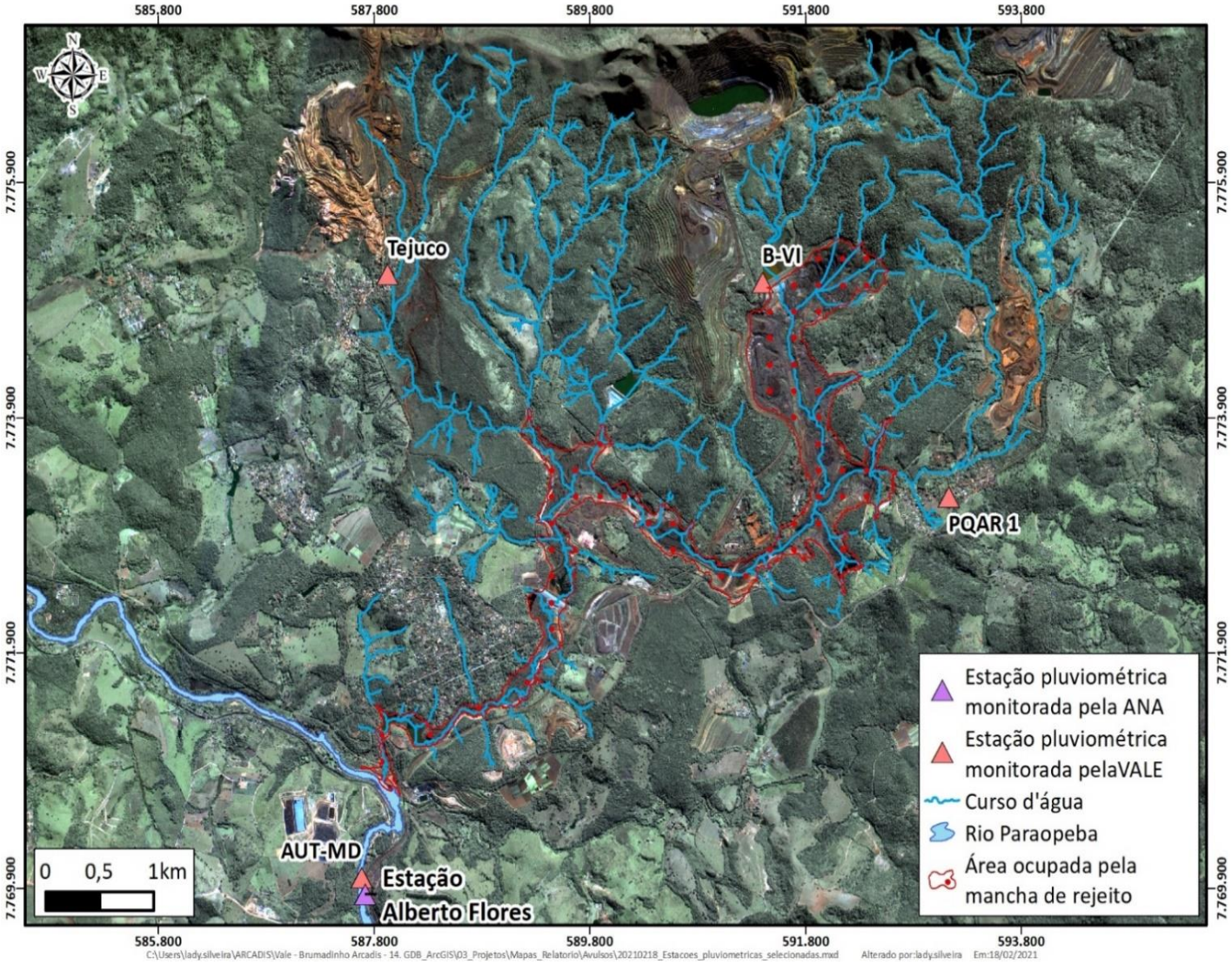


Elaboração: Arcadis, 2022. Fonte: ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

4.2. 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 4.2.1, podem ser visualizadas as localizações das referidas estações de monitoramento além da localização da estação Alberto Flores gerida pela ANA.

Figura 4.2.1 Localização das estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI, Tejuco e Alberto Flores.

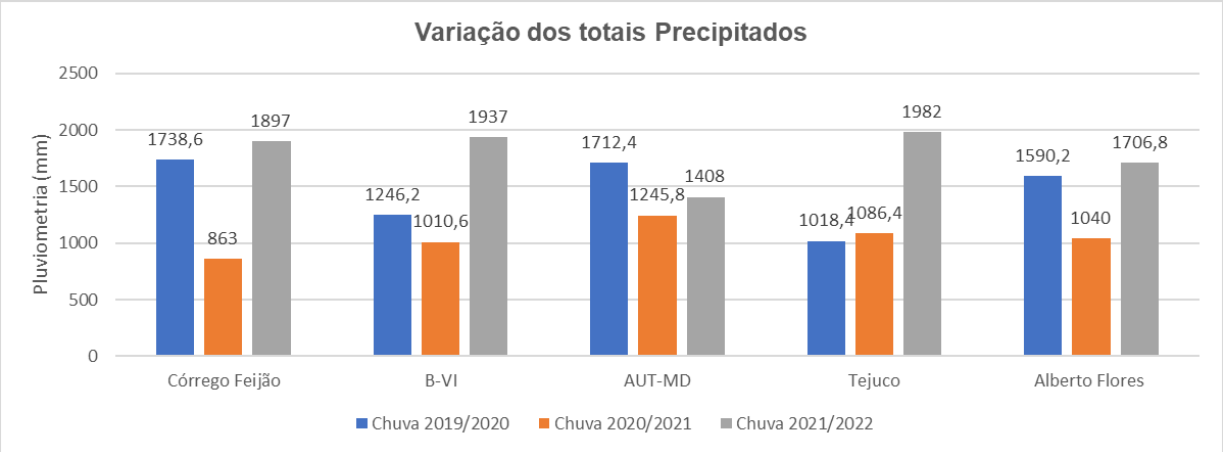


Elaboração: Arcadis, 2021.

O Gráfico 4.2-1 apresenta o histograma de variação dos totais precipitados registrados pelas estações pluviométricas AUT-MD, Córrego Feijão, Barragem VI e Tejuco nos períodos sazonais de chuva (outubro/2019 a março/2020), chuva (outubro/2020 a março/2021) e chuva

(outubro/2021 a março/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, o aumento da pluviosidade no período de 2021/2022 em comparação ao total precipitado no período de chuva de 2020/2021 para todas as estações de monitoramento.

Gráfico 4.2-1 Histograma de variação dos totais precipitados nos períodos sazonais de chuva (outubro/2019 a março/2020), chuva (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/2022).

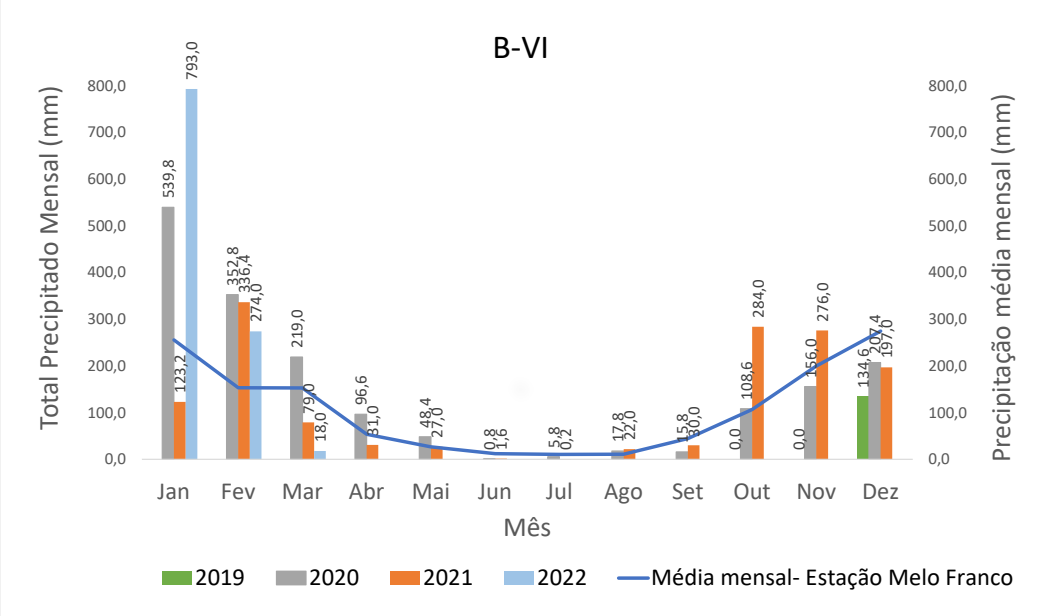


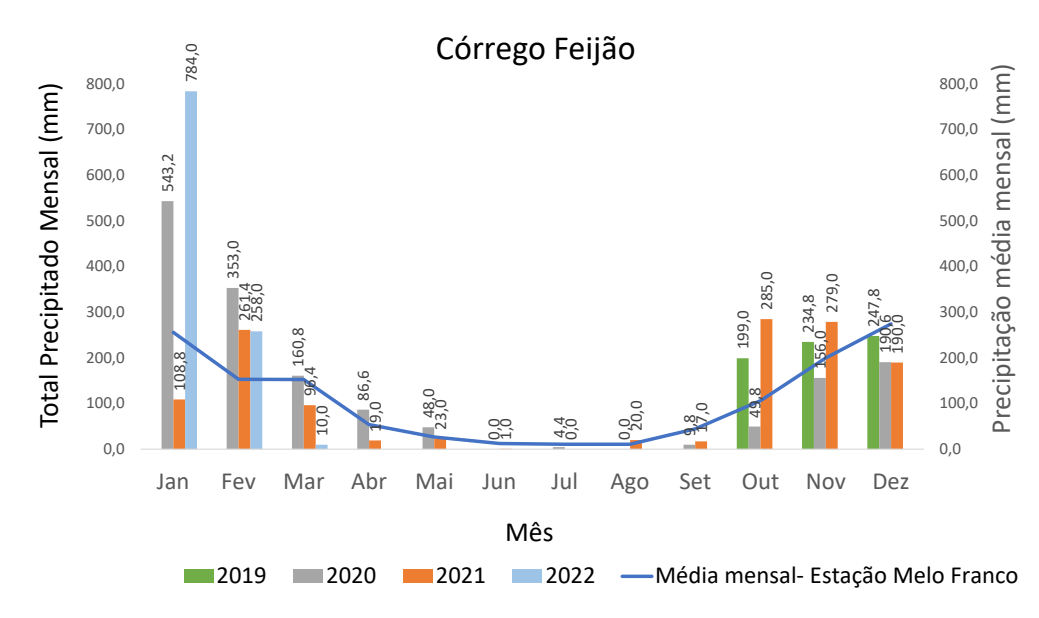
Elaboração: Arcadis, 2022. Fontes: VALE, 2022 (http://www.vale.com/brasil/PT/Paginas/plano-de-monitoramento-das-obras-emergenciais.aspx) e ANA, 2022 (www.snirh.gov.br).

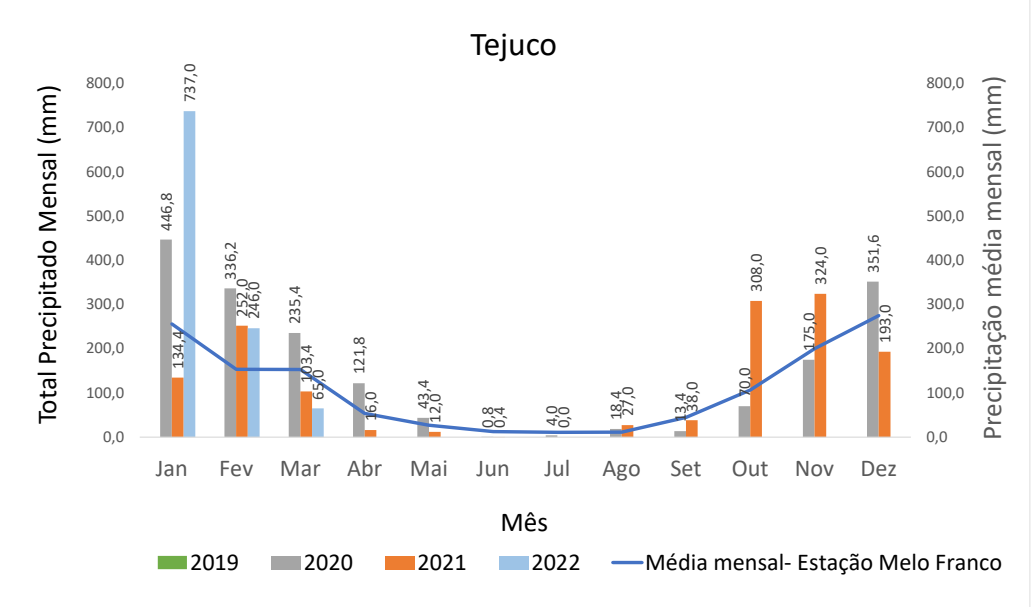
Os totais precipitados acumulados mensais (mm) nas estações pluviométricas localizadas no ribeirão Ferro-Carvão foram comparados às médias mensais históricas de precipitações reportadas pela estação Melo Franco (Gráfico 4.2-2). Notou-se que as precipitações totais mensais no período de chuva/2022 foram superiores às médias mensais históricas observadas na Estação Melo Franco para os meses de janeiro e fevereiro, exceto na estação AUT-MD, na qual, no mês de fevereiro, foi observada precipitação inferior à média mensal. Destaca-se que para esta estação os dados não foram reportados entre os dias 08/01 e 14/02/2022, em virtude da danificação da sonda após as fortes chuvas que ocorreram no início de janeiro/2022. Em todas as estações, as chuvas de outubro e novembro/2021 foram superiores às médias dos respectivos meses, em contrapartida para o mês de dezembro/2021 as precipitações foram inferiores à média.

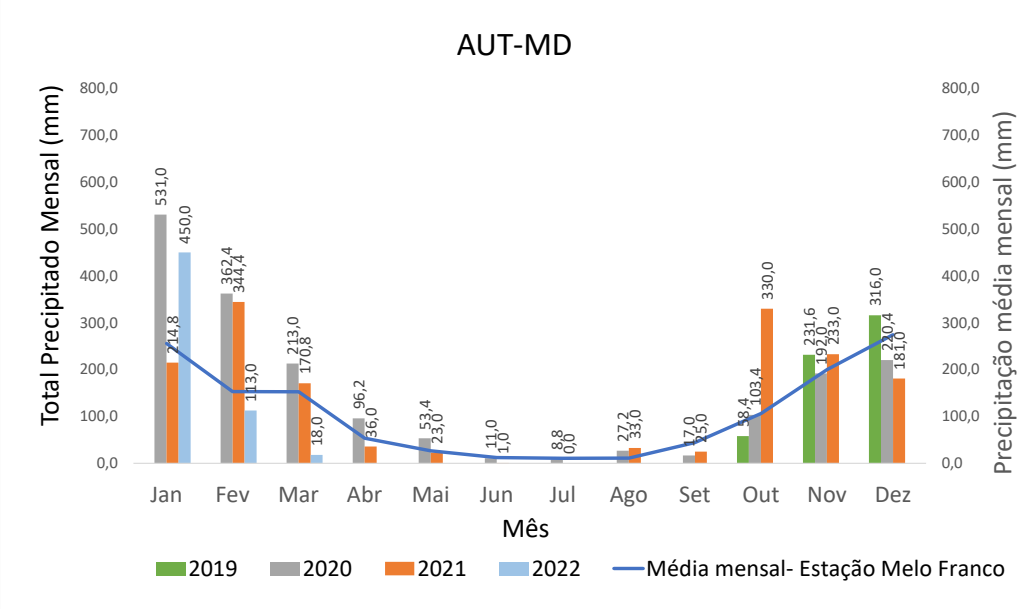
A análise dos dados permite observar comportamento similar entre as estações no período de chuva 2021/2022 e chuva 2020/2021, principalmente nos meses de novembro e dezembro. Especificamente para outubro/2021, as precipitações foram relativamente superiores ao mesmo período para o ano de 2020. Observou-se que, em janeiro/2022, tal qual já apontado anteriormente e para outras estações na bacia do rio Paraopeba, ocorreram precipitações majoritariamente superiores ao observado nos anos anteriores, exceto para a AUT-MD, a qual reportou 450 mm em 2022 e 531 mm em 2020. Em março/2022, por outro lado, notou-se redução expressiva nos índices pluviométricos em todas as estações.

Gráfico 4.2-2 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 chuva 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 chuva/2019, chuva/2020, chuva 2019/2020 e chuva 2021/2022 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) e Chumbo total ao longo do tempo e do espaço nos períodos de chuva. Os demais elementos traços apresentaram concentrações majoritariamente baixas e pouco variáveis ao longo dos períodos monitorados, sendo que na chuva 2021/2022, ocorreram violações pontuais apenas para Cromo total, Níquel total e Zinco total. Esses parâmetros apresentaram MAD (desvio mediano absoluto) igual a zero e 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). A avaliação mais detalhada desses parâmetros em comparação com os limites definidos na legislação será apresentada no item 6 deste relatório (evolução das violações aos limites legais ao longo do tempo e do espaço no rio Paraopeba).

Previamente à análise descritiva e inferencial dos resultados do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água nos períodos de chuva, visando identificar a similaridade entre os pontos de monitoramento contidos nas diferentes regiões monitoradas, foi empregada a Análise de Agrupamentos (AA), em específico a Análise de Cluster (AC) (HAIR et al., 2005). Essa análise agrupa objetos (casos) em classes (clusters) com base nas similaridades dentro da classe e dissimilaridades entre as diferentes classes. Para efetuar esta análise, foram consideradas as medianas mensais dos resultados dos parâmetros majoritários mencionados, desde o início do monitoramento até o final do período de chuva 2021/2022. 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 chuva entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de chuva (chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022) 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 chuva separadamente (comparação espacial chuva/2019, comparação espacial chuva 2019/2020, comparação espacial chuva 2020/2021 e comparação espacial chuva 2021/2022).

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.

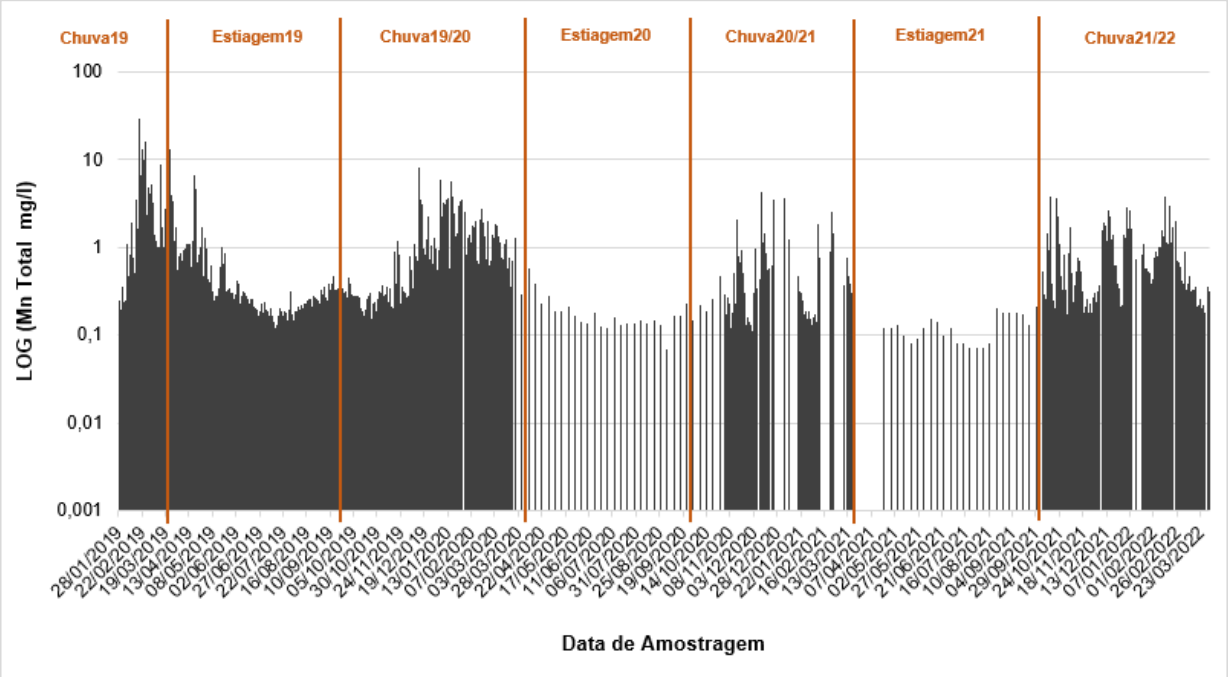
Nesse contexto, para o presente estudo, optou-se por aplicar o teste de tendência temporal em dados medianos mensais de cada ponto de amostragem no caso da água superficial, de forma

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;

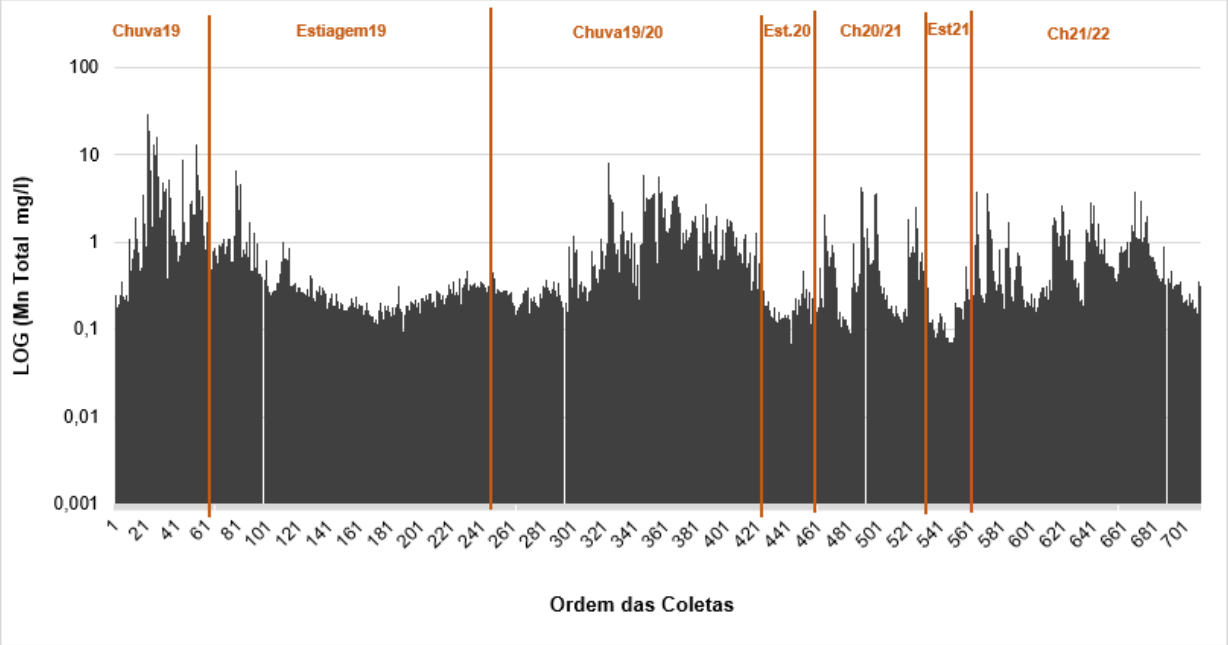
De forma ilustrativa, a Figura 5.2.2.1 mostra, do ponto de vista exploratório, como fica a avaliação temporal dos dados brutos (sem a compilação em uma métrica estatística). É possível identificar o comportamento das concentrações de Manganês total ao longo dos anos em termos de variabilidade, tendência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



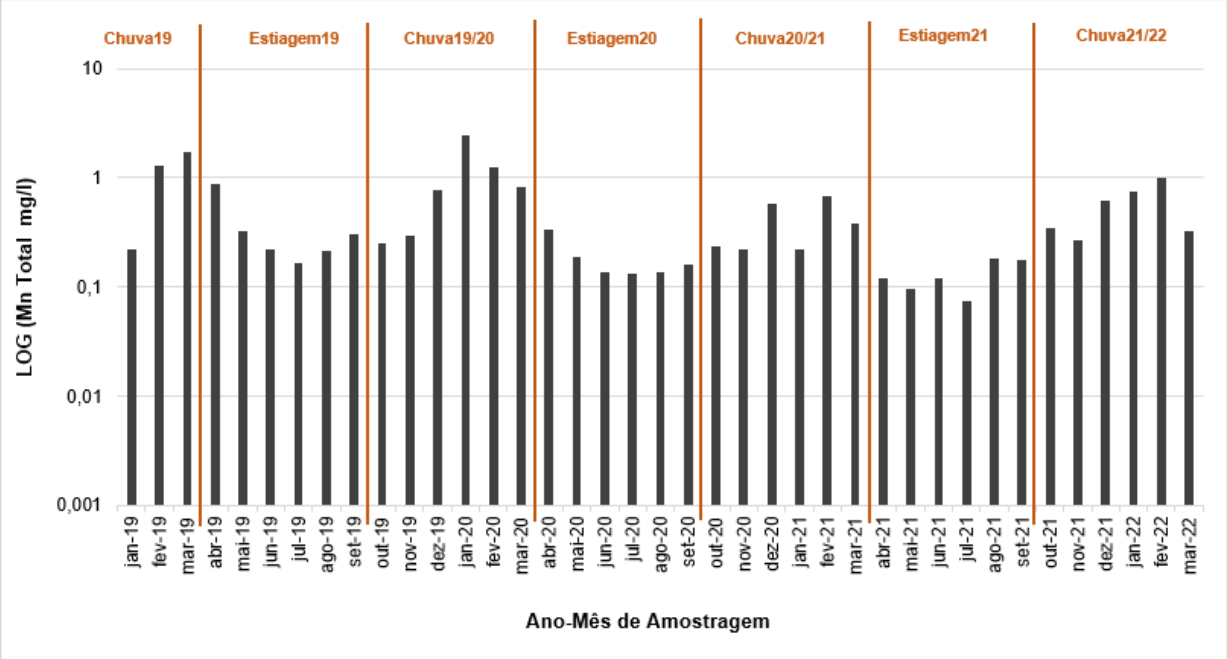
Elaboração: Arcadis, 2022.

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 Chumbo total) considerando a métrica mediana mensal.

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

Primeiramente, a tendência temporal da série de dados completa foi avaliada, desde o início do monitoramento até o final do período de chuva 2021/2022, 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 chuva separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de chuva. Neste caso, o teste de Mann-Kendall foi empregado sem necessidade de avaliação prévia da influência da sazonalidade nos dados. Os resultados do teste de tendência temporal para os períodos de estiagem monitorados, podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2021 (ARCADIS, 2021d).

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

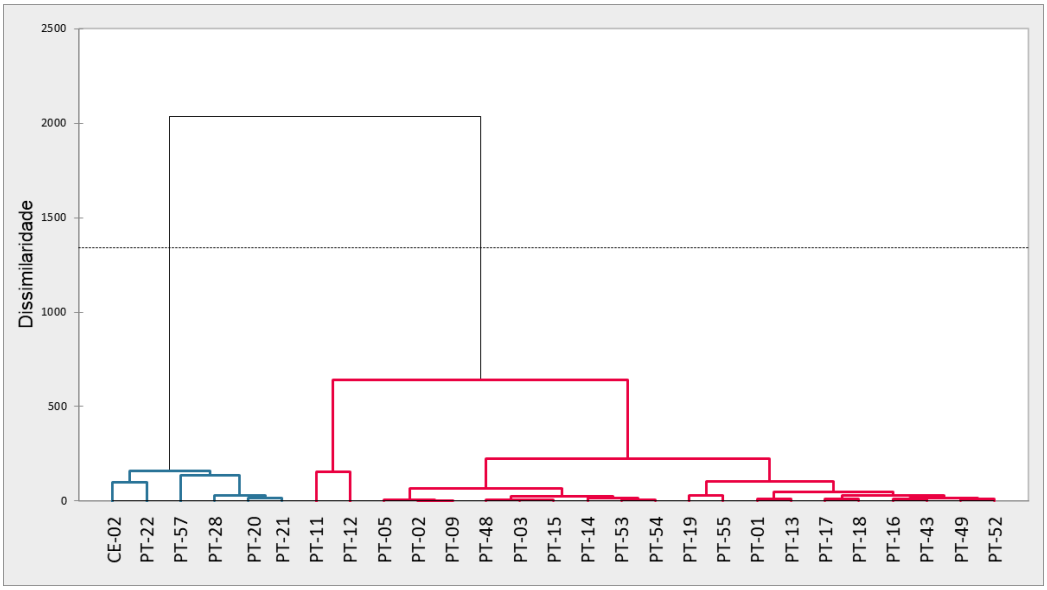
Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido e Turbidez ao longo da bacia do rio Paraopeba durante os períodos de chuva/2019, chuva/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, em termos de concentrações máximas. A avaliação proposta é baseada na comparação de afastamento ou aproximação da qualidade 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 março/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

A semelhança dos resultados obtidos no último Fechamento de ciclo, com dados até a estiagem/2021, a análise de agrupamento (*cluster*) para água superficial (Figura 5.3.1) com a inclusão dos dados do período de chuva 2021/2022 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 nas regiões 1A, 1B e pontos iniciais da 2A (PT-05, PT-02, PT-09; PT-48, PT-03, PT-15, PT-14; PT-53 e PT-54) e por fim, entre pontos localizados nas regiões 2A, 1A e Montante (PT-19, PT-55, PT-01, PT-13, PT-17, PT-18, PT-16, PT-43, PT-49 e 52). 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 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 e Chumbo total) agregados para cada período sazonal de chuva e para cada uma das regiões. Os resultados dos testes estatísticos da comparação espacial e temporal, também são apresentados e discutidos para cada um dos parâmetros mencionados. Os gráficos *boxplots* desses e dos demais parâmetros por ponto de monitoramento podem ser consultados no ANEXO IV-A. No ANEXO IV-C, estão apresentadas as tabelas com as métricas estatísticas utilizadas, especificamente, para a geração dos gráficos *boxplots* por região para

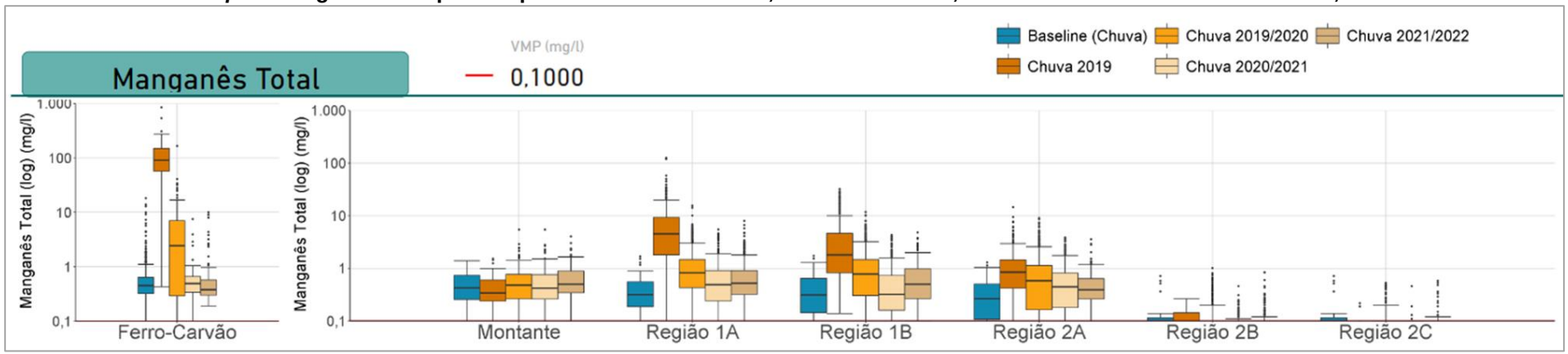
os parâmetros majoritários e Chumbo total discutidos neste presente item. No ANEXO IV-D, constam os resultados detalhados dos testes estatísticos temporais, sazonais e de tendência.

Ressalta-se que os resultados dos períodos de estiagem constam no último relatório de fechamento de ciclo protocolado, referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2021 (ARCADIS 2021d).

5.3.1.1. Manganês total e dissolvido

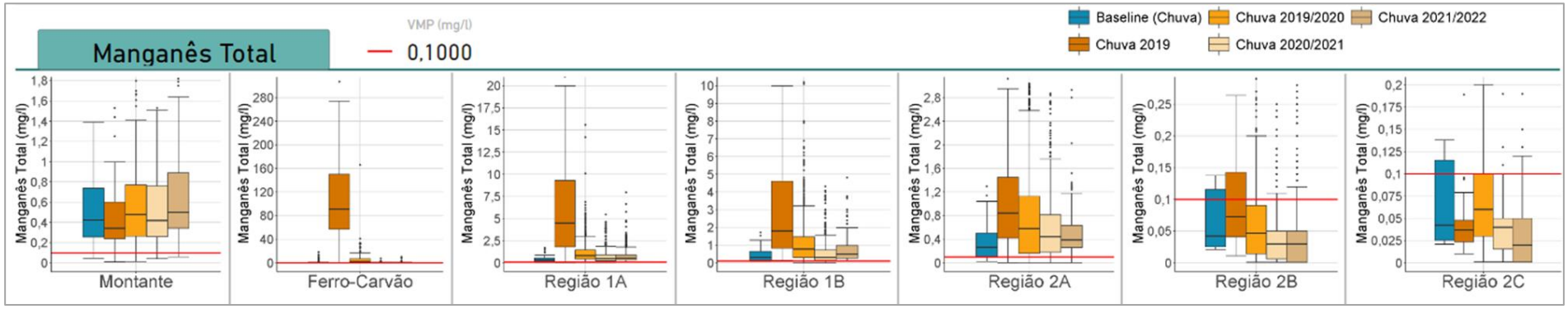
Nos Gráficos (5.3.1.1-1 e 2) e (5.3.1.1-3 e 4) são apresentados os *boxplot* dos parâmetros Manganês total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.1-1 a 5.3.1.1-4 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log, devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

Gráfico 5.3.1.1-2: *Boxplot* Manganês total para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Manganês total.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			>	>	~	<	<
Reg1A				~	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							~
Reg2C							

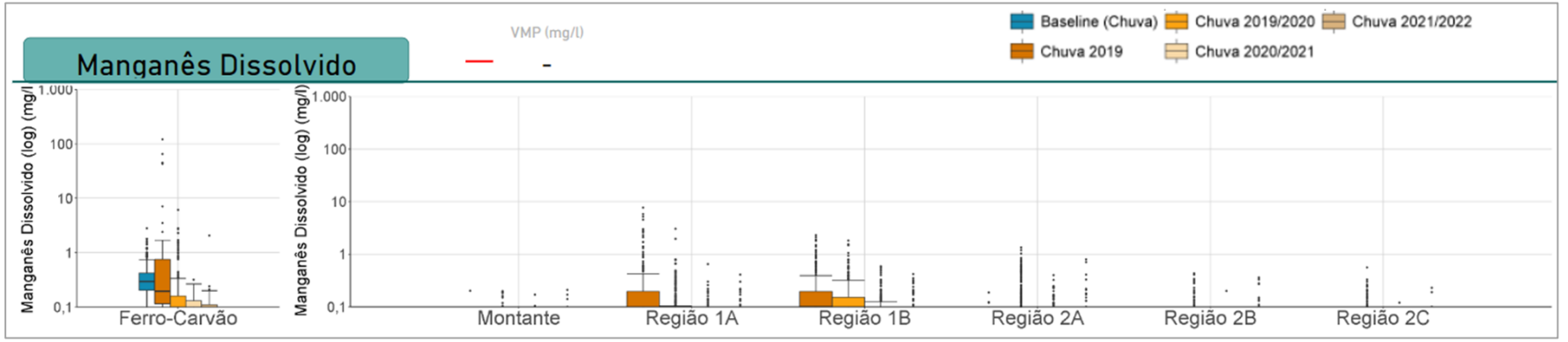
Legenda	
~	Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores da região B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores da região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

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	>	>	>	~	~	<
Ch.21/22 X Ch.19/20	<	>	<	<	<	<	<
Ch.21/22 X Ch.19	<	>	<	<	<	<	<
Ch.21/22 X Ch. Baseline	~	~	>	>	>	<	<
Ch.20/21 X Ch.19/20	<	~	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	~
Ch.20/21 X Ch. Baseline	~	~	~	~	>	<	<
Ch.19/20 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	>	~	>	>	>	~	~
Ch.19 X Ch. Baseline	>	~	>	>	>	~	~

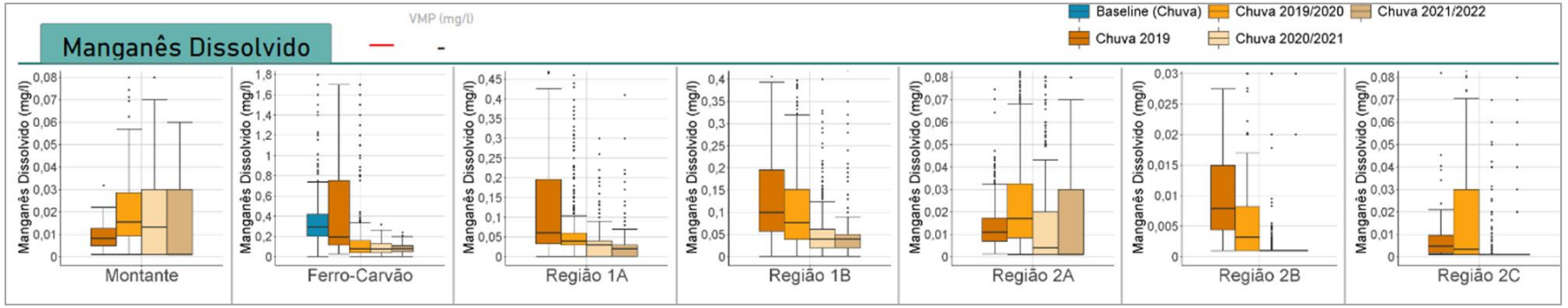
Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log, devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

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



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

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

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			>	>	~	<	<
Reg1A				>	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							~
Reg2C							

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	<	<	~	<	~	<
Ch.21/22 X Ch.19/20	>	<	<	<	<	<	<
Ch.21/22 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	<
Ch.21/22 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.19/20 X Ch.19	<	>	<	<	>	<	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	<	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.19 X Ch. Baseline	~	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Legenda:	
NA	Teste não aplicado por insuficiência de resultados de *baseline*
~	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: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

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). Nos períodos de chuva, as concentrações de Manganês total são mais variáveis e elevadas, com prevalência de resultados acima do padrão legal desde a região de Montante até o final da região 2A, tanto na condição pré-rompimento quanto na condição pós-rompimento.

Em termos espaciais, considerando todos os períodos de chuva 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 de estiagem, conforme detalhado em Arcadis (2021d). A partir da região 2A, as concentrações foram significativamente inferiores, não diferindo estatisticamente 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 os períodos de chuva separadamente (ANEXO IV-D), no período de chuva/2019, logo após o rompimento, as concentrações foram significativamente mais elevadas desde 1A até 2A se comparadas à região de Montante e, assim como observado para o período completo, no Ferro-Carvão foram estatisticamente mais elevadas que nas demais regiões. A partir do período de chuva 2019/2020, já houve indicativo de ausência de diferença significativa ou concentrações estatisticamente inferiores na região 2A em relação à região de Montante. Nos períodos seguintes, chuva 2020/2021 e 2021/2022, as regiões do Ferro Carvão até 2A apresentaram condições mais homogêneas, com prevalência de concentrações significativamente inferiores nas regiões mais distais, 2B e 2C.

Em termos de avaliação temporal, na região de Montante, monitorada no ponto PT-52, observou-se em todos os períodos de chuva avaliados, ausência de diferenças significativas em relação ao *baseline* (BP036). Especificamente no atual período de análise, chuva 2021/2022, as concentrações de Manganês total foram significativamente mais elevadas que nos períodos precedentes, refletindo a influência dos eventos de precipitação mais críticos que ocorreram neste período, enquanto para os demais períodos comparados não houve indicativo de diferenças estatisticamente significativas. Em todos os casos, incluindo a série histórica pré-rompimento, houve prevalência de concentrações acima do VMP (0,1 mg/L).

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 chuva mais próximos a ocorrência do rompimento e, portanto, concentrações significativamente inferiores nos períodos de chuva mais recentes, 2020/2021 e 2021/2022, potencialmente por efeitos das atividades de contenção e recuperação aplicados neste tributário. Em termos de comparação com a condição pré-rompimento, observa-se tanto no período de chuva/2019 quanto de chuva 2019/2020, valores significativamente superiores ao *baseline* da região, enquanto para os períodos de chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 chuva analisados, condição está também verificada ao longo dos períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). Entretanto, ainda assim, em todos os períodos, a maioria dos resultados ficaram acima do padrão legal (0,1 mg/L).

No que tange ao trecho do rio Paraopeba mais afetado, Região 1A, quando se comparam os períodos de chuva analisados, verifica-se redução gradual das concentrações entre os períodos de chuva/2019 e chuva 2020/2021, refletindo a influência do cenário rompimento/despejo de rejeitos no rio somada às condições de pluviosidade. Por outro lado, ao se compararem os dois últimos períodos chuvosos, notam-se concentrações significativamente superiores no período de chuva 2021/2022 em relação ao período de chuva 2020/2021, refletindo a influência dos maiores volumes precipitados no último período 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 chuvoso 2020/2021, nos demais as concentrações deste analito foram significativamente mais elevadas que àquelas registradas anteriormente ao rompimento. Nesta região, as concentrações de Manganês total foram predominantemente superiores ao VMP em todos os períodos de chuva avaliados, incluindo a condição de *baseline*.

Comportamento semelhante foi observado na Região 1B, com indicativo de redução sucessiva das concentrações de Manganês total entre os três primeiros períodos de chuva, seguido de elevação 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 do período chuvoso 2020/2021, nos demais as concentrações deste analito foram significativamente mais elevadas que aquelas registradas anteriormente ao rompimento. Ressalta-se também a prevalência de valores de Manganês total superiores ao VMP (0,1 mg/L) na região na condição pré e pós 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 chuva analisados, com destaque para concentrações significativamente superiores no período de chuva logo após o rompimento, chuva/2019. Nos dois períodos chuvosos seguintes, chuva 2019/2020 e chuva 2020/2021, as concentrações de Manganês total foram significativamente mais reduzidas, enquanto no último período avaliado (chuva 2021/2022),

não houve indicativo de diferença estatística se comparado ao período imediatamente precedente. Entretanto, 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 elevados.

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 chuva analisados, condição também indicada para os períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, os resultados não diferiram estatisticamente em relação ao período chuvoso precedente, chuva 2020/2021. Em comparação com os resultados de *baseline,* nos períodos de chuva avaliados, com exceção dos dois primeiros em que não houve indicativo de diferença estatística, 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). Entretanto, houve indicativo de concentrações significativamente superiores no período de chuva 2019/2020 em relação ao período de chuva/ 2019, refletindo os elevados índices pluviométricos registrados no referido período. Nas demais comparações estabelecidas entre os períodos chuvosos, as concentrações de Manganês total apresentaram-se mais reduzidas entre os períodos sucessivos ou não diferiram estatisticamente, incluindo a comparação com a condição pré-rompimento.

No que tange ao Manganês, em sua fração dissolvida, em geral, a comparação espacial englobando todos os períodos de chuva 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. Esse padrão das concentrações de Manganês dissolvido nas referidas regiões se manteve ao se considerar cada um dos períodos de chuva 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 chuva a partir do período chuvoso 2019/2020, em que as concentrações se apresentaram mais elevadas.

Já no ribeirão Ferro-Carvão, é possível verificar que as concentrações de Manganês dissolvido foram mais variáveis e significativamente mais elevadas no período chuvoso logo após o rompimento, chuva/2019. Entretanto, mesmo neste período, não houve diferença estatística frente aos resultados do *baseline* Vale. Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, as concentrações não diferiram do período anterior, chuva 2020/2021, e foram inferiores à condição do *baseline* e do período de chuva/2019.

Para a Região 1A, as concentrações de Manganês dissolvido foram significativamente inferiores, bem como menos variáveis, ao se comparar os períodos de chuva sucessivos. Comportamento semelhante foi observado para a Região 1B, porém sem indicativo de diferença estatística significativa entre as concentrações registradas no período de chuva 2021/2022 e chuva 2020/2021.

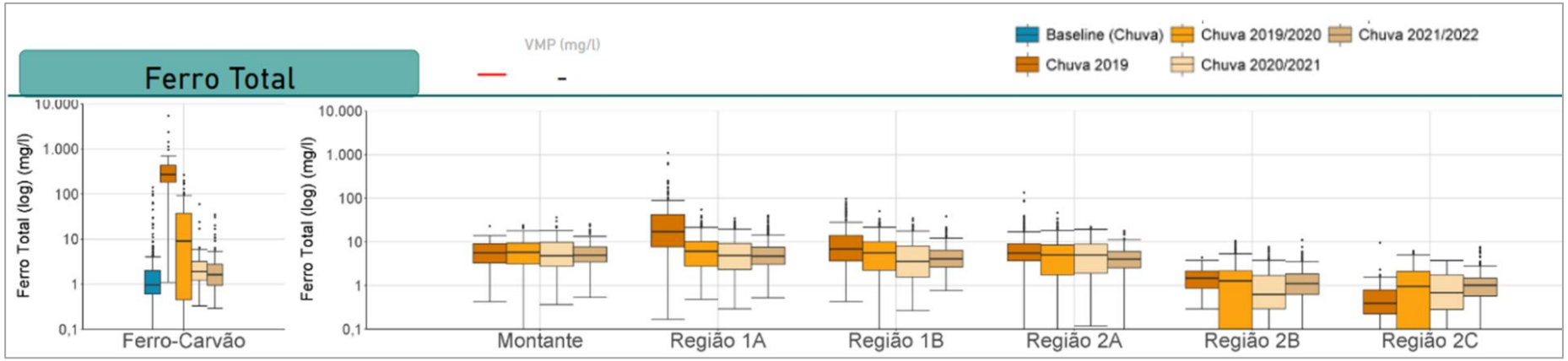
A partir da Região 2A, da mesma maneira que para fração total, as concentrações medianas de Manganês dissolvido se apresentam, em geral, mais reduzidas e com menor variabilidade dos resultados. Nesta região, o comportamento foi próximo ao observado na região de Montante, com concentrações mais reduzidas no atual período de análise, chuva 2021/2022, se comparado aos períodos anteriores e com destaque para concentrações significativamente superiores no período de chuva 2019/2020, em que os índices pluviométricos foram elevados.

Para as Regiões 2B e 2C, a redução das concentrações é mais perceptível em relação aos pontos a montante desse trecho. Como observado para as demais regiões, nota-se o predomínio de concentrações significativamente inferiores nas comparações estabelecidas entre os períodos de chuva sucessivos. Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, 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 estiagem analisado, conforme indicado em Arcadis (2021d).

5.3.1.2. Ferro total e dissolvido

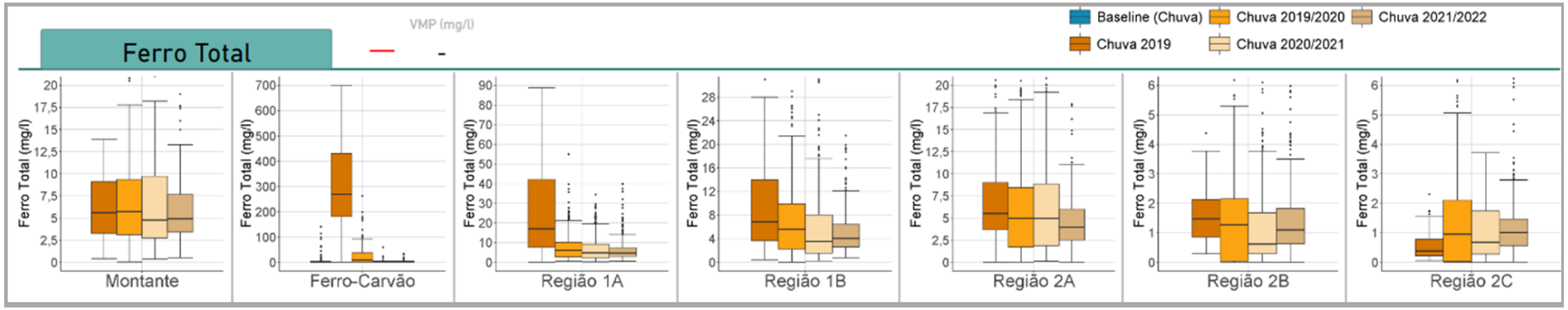
Nos Gráficos (5.3.1.2-1 e 2) e (5.3.1.2-3 e 4) são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Ferro total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.2-1 a 5.3.1.2-4 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

Gráfico 5.3.1.2-2: *Boxplot* Ferro total para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Ferro total.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		>	>	>	~	<	<
Mont.			~	~	<	<	<
Reg1A				<	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							<
Reg2C							

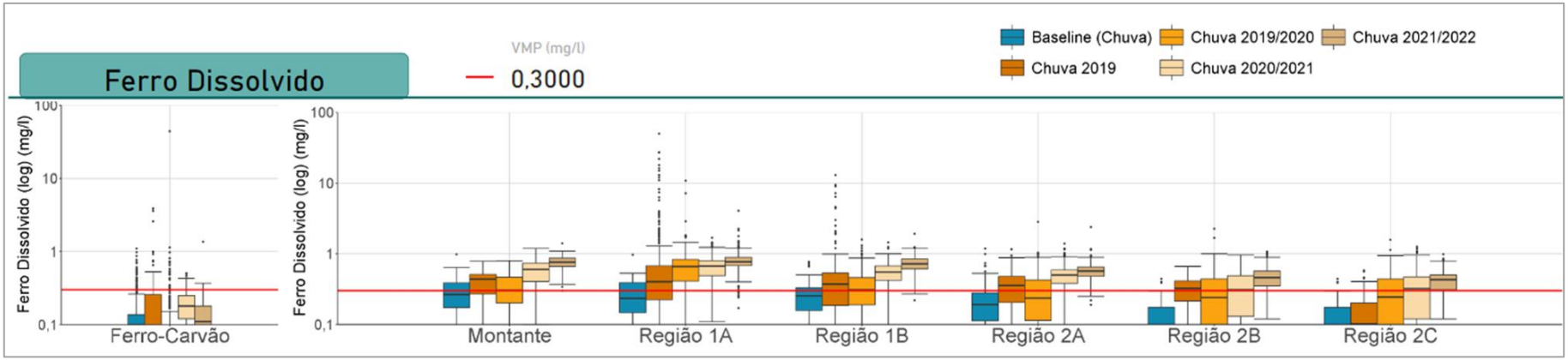
Legenda	
~	Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores da região B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores da região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

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	~	~	>	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	~	<	~	~	~	>
Ch.21/22 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	>
Ch.21/22 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	<	<	~	>	~
Ch.20/21 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	>
Ch.20/21 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.19/20 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.19 X Ch. Baseline	>	NA	NA	NA	NA	NA	NA

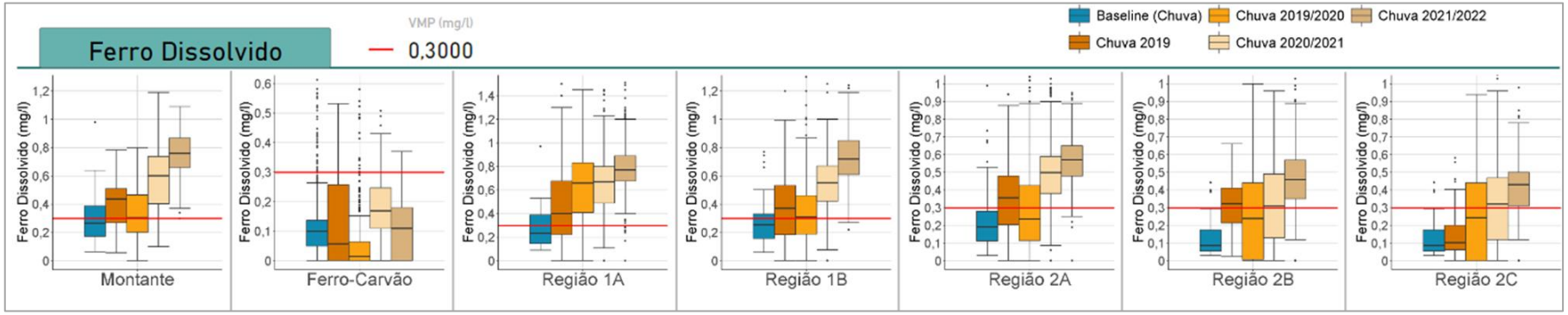
Legenda:	
NA	Teste não aplicado por insuficiência de resultados de *baseline*
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

Gráfico 5.3.1.2-4: *Boxplot* Ferro dissolvido para os períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Ferro dissolvido.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		>	>	>	>	>	>
Mont.			>	<	<	<	<
Reg1A				<	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							<
Reg2C							

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	<	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch.19	~	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch. Baseline	~	>	>	>	>	>	>
Ch.20/21 X Ch.19/20	>	>	~	>	>	>	>
Ch.20/21 X Ch.19	>	>	>	>	>	~	>
Ch.20/21 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	>	>
Ch.19/20 X Ch.19	~	~	>	<	<	~	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	~	~	>	>	>	>	~
Ch.19 X Ch. Baseline	~	~	>	>	>	>	~

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

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 chuva analisados conjuntamente, foram significativamente superiores nas regiões de Montante a 1B se comparadas às registradas no ribeirão Ferro-Carvão. 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. A partir da região 2A, as concentrações se mantêm significativamente inferiores, inclusive em relação a região de Montante. Esse padrão das concentrações de Ferro total nas referidas regiões vem ocorrendo desde o período de chuva

2020/2021, visto que nos períodos mais próximos do rompimento, em termos espaciais, as concentrações eram mais elevadas ou não deferiam no ribeirão Ferro-Carvão em relação as regiões do rio Paraopeba, 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 quatro períodos de chuva analisados, situação também verificada nas comparações estabelecidas entre os períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). É importante destacar que não há disponível *baseline* para o analito Ferro total.

No ribeirão Ferro-Carvão, as concentrações de Ferro total foram significativamente superiores no período chuvoso logo após o rompimento se comparado aos demais, refletindo as condições das precipitações associadas ao carreamento difuso e a ressuspensão dos materiais depositados no leito. Entre os demais períodos comparados, não houve indício de diferenças significativas entre as concentrações de Ferro total. Entretanto, em todos os períodos chuvosos pós-rompimento as concentrações deste analito foram significativamente superiores ao *baseline* Vale, condição também observada nos períodos de estiagem, conforme descrito em Arcadis (2021d).

Para as Regiões 1A e 1B mais afetadas pelo rompimento, da mesma forma, notam-se concentrações mais elevadas no período de chuva/2019 se comparado aos períodos de chuva posteriores e a partir daí redução sucessiva das concentrações. Nos últimos dois períodos avaliados, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, os resultados foram mais próximos, sem indicativo de diferença estatística significativa. Especificamente na região 1B, também não houve diferença significativa entre os resultados do período mais recente, chuva 2021/2022, e do período de chuva 2019/2020.

Nas regiões subsequentes, 2A e 2B, esse comportamento em relação ao período logo após o rompimento se manteve, com concentrações significativamente superiores no período de chuva/2019 se comparado aos demais períodos chuvosos monitorados. Especificamente para o período mais recente, chuva 2021/2022, não houve indicativo de diferenças significativas das concentrações de Ferro total em relação ao período de chuva 2019/2020, enquanto em relação ao período de chuva 2020/2021 as concentrações foram significativamente mais elevadas. Tal condição pode refletir as contribuições difusas da bacia devido à ocorrência de chuvas intensas.

Por outro lado, na região 2C, mais distante do local do rompimento e com mudança da litologia regional, as concentrações de Ferro total foram inferiores no período de chuva/2019 se comparado aos períodos chuvosos posteriores. Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, as concentrações deste analito também superaram àquelas registradas no período de chuva 2019/2020 e não diferiram no período de chuva 2020/2021.

O comportamento do parâmetro Ferro na fração dissolvida, não se assemelha ao observado para a fração total. Em termos espaciais, considerando todos os períodos chuvosos, notam-se concentrações significativamente mais elevadas em todas as regiões do rio Paraopeba 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 as 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 chuva separadamente, conforme indicado no ANEXO IV-D, bem como, em geral, nos períodos de estiagem, conforme detalhado em Arcadis (2021d).

Em termos temporais, para a Região Montante, as concentrações tornaram-se significativamente maiores nas comparações estabelecidas a partir do período de chuva 2020/2021, 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 estiagem, com maiores concentrações deste analito no período mais recente (ARCADIS, 2021d). Além disso, nos períodos de chuva monitorados após o rompimento, nota-se prevalência de resultados acima do VMP (0,3 mg/L), com mais de 50% dos dados superando este limite.

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 chuva 2020/2021 se comparadas aos demais períodos monitorados após o rompimento, bem como se comparadas à condição de *baseline*.

Na região 1A, houve predomínio de concentrações de Ferro dissolvido significativamente superiores entre os períodos de chuva sucessivos, com exceção da comparação estabelecida entre chuva 2020/2021 e chuva 2019/2020, no qual não houve diferença estatística. Em todos os períodos pós-rompimento as concentrações deste analito também superaram o *baseline* de chuva e, em grande maioria, superaram o VMP.

Nas regiões subsequentes, 1B e 2A, também houve indicativo de concentrações mais elevadas ao longo dos períodos sucessivos de chuva. Exceção se deu para a comparação estabelecida entre os períodos de chuva 2019/2020 e 2019. Além disso, em todos os períodos analisados pós-rompimento, as concentrações foram significativamente mais elevadas que os resultados de *baseline*. 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.

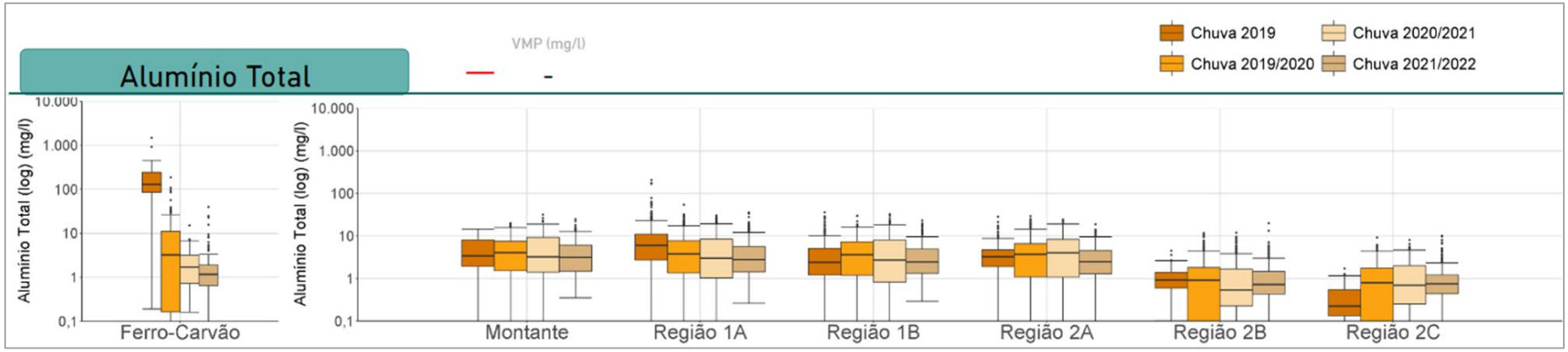
Da mesma forma, nas regiões mais distais, 2B e 2C, também é possível observar concentrações mais elevadas nos períodos de chuva mais recentes, bem como se comparado a série de *baseline*, no caso da região 2B. Nessas regiões, ainda que a concentração deste analito sejam espacialmente mais reduzidas, permanecem em grande maioria superiores ao

VMP (0,3 mg/L), com destaque para o período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, em que mais de 75% dos resultados superaram este limite legal.

5.3.1.3. Alumínio total e dissolvido

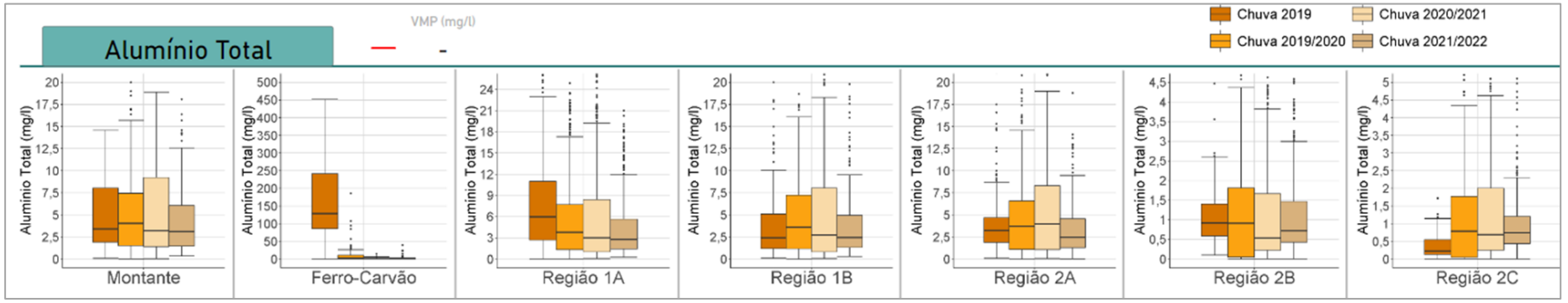
Nos Gráficos (5.3.1.3-1 e 2) e (5.3.1.3-3 e 4) são apresentados os *boxplots* dos parâmetros Alumínio total e dissolvido, respectivamente. Nas Tabelas 5.3.1.3-1 a 5.3.1.3-4 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros.

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

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



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

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

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		>	>	>	>	<	<
Mont.			~	<	<	<	<
Reg1A				<	<	<	<
Reg1B					~	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							~
Reg2C							

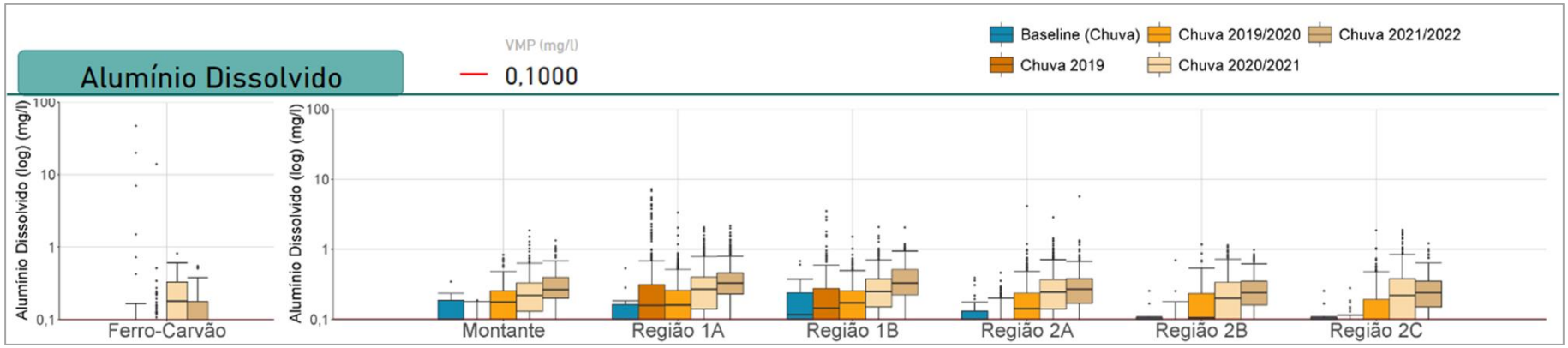
Legenda	
~	Não há diferença significativa entre a região A (montante) e B (jusante) (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05)
<	Os valores da região B (jusante) são significativamente inferiores aos da região A (Montante) (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05)
>	Os valores da região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

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	~	~	<	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	~	<	~	<	~	>
Ch.21/22 X Ch.19	<	~	<	~	<	~	>
Ch.21/22 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	~	~	>	~	>
Ch.20/21 X Ch.19	<	~	<	~	>	<	>
Ch.20/21 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.19/20 X Ch.19	<	~	<	~	~	>	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Ch.19 X Ch. Baseline	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

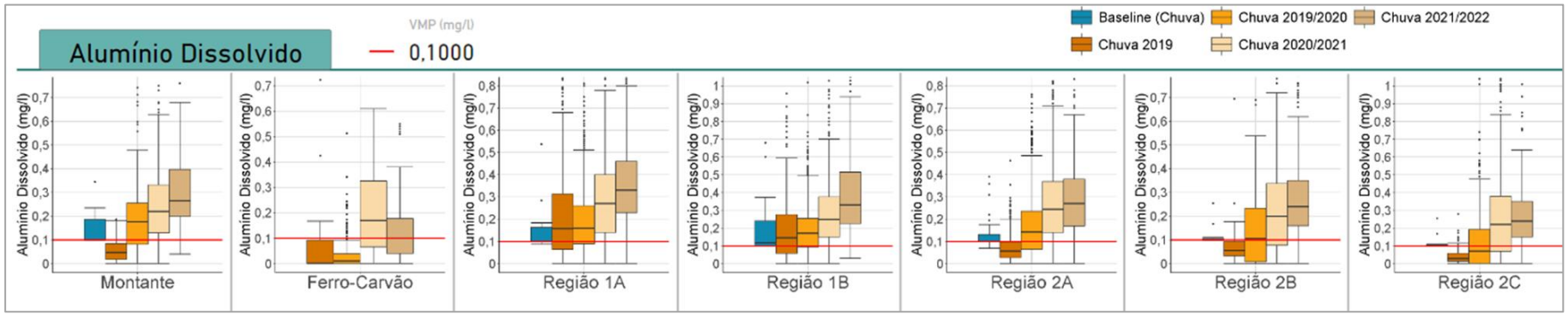
Legenda:	
NA	Teste não aplicado por insuficiência de resultados de *baseline*
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	Os valores do período climático mais recente são significativamente inferiores aos do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas ≤ 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

Gráfico 5.3.1.3-4:*Boxplot* Alumínio dissolvido para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Alumínio dissolvido.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		>	>	>	>	>	>
Mont.			>	~	<	<	<
Reg1A				<	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						~	<
Reg2B							<
Reg2C							

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	<	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch.19/20	>	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch.19	>	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch. Baseline	NA	>	>	>	>	>	>
Ch.20/21 X Ch.19/20	>	>	>	>	>	>	>
Ch.20/21 X Ch.19	>	>	>	>	>	>	>
Ch.20/21 X Ch. Baseline	NA	>	>	>	>	>	>
Ch.19/20 X Ch.19	~	>	~	>	>	>	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	NA	>	~	~	>	~	~
Ch.19 X Ch. Baseline	NA	~	>	~	~	~	~

Legenda:	
NA	Teste não aplicado por insuficiência de resultados de *baseline*
~	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: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

Para Alumínio total, em termos espaciais, as concentrações registradas nas regiões do rio Paraopeba, especificamente de montante à 2A foram significativamente superiores em relação à região do ribeirão Ferro-Carvão. Nos trechos mais distais, regiões 2B e 2C, as concentrações se apresentaram mais reduzidas, assim como indicado para a fração total de Manganês e Ferro. Esse padrão espacial, em geral, se manteve ao se considerarem os períodos de chuva separadamente, com exceção do período logo após o rompimento, chuva/2019, em que as

concentrações em todos as regiões do rio Paraopeba foram inferiores se comparadas àquelas monitoradas no ribeirão Ferro-Carvão, conforme indicado no ANEXO IV-D.

De acordo com a avaliação temporal, verifica-se que, na Região Montante, não houve diferença significativa entre as concentrações de Alumínio total registradas nos períodos sazonais sucessivos de chuva, condição também identificada ao se comparar os períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d).

No ribeirão Ferro-Carvão observa-se concentrações de Alumínio total significativamente superiores logo após o rompimento, no período de chuva/2019, nos demais não foi identificada diferença estatística significativa entre os resultados. A redução das concentrações após a chuva/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 a Região 1A, trecho mais afetado do rio Paraopeba, foi identificada situação semelhante com concentrações de Alumínio total significativamente inferiores nos períodos de chuva após chuva/2019. Também foi identificada diferença significativa entre as concentrações deste analito no atual período de análise, chuva 2021/2022, e no período de chuva 2019/2020, com menores concentrações no período mais recente. Tal fato também pode estar relacionado a contenção do material e consequente disponibilização para água.

Na região 1B, o resultado das comparações estabelecidas entre os períodos de chuva foi semelhante ao encontrado para a região de Montante, em que não houve diferença significativa entre as concentrações registradas nos períodos sazonais sucessivos de chuva.

Na região 2A as concentrações de Alumínio total foram mais elevadas e variáveis no período de chuva 2020/2021 e especificamente no período mais recente, chuva 2021/2022, foram mais reduzidas em relação aos demais períodos monitorados.

Já na região 2B, houve maior variabilidade entre os resultados das comparações estabelecidas. Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, houve indicativo de concentrações significativamente superiores em relação ao período de chuva imediatamente anterior, chuva 2020/2021.

Por fim, na região 2C, apesar das concentrações apresentarem-se mais reduzidas se comparadas as demais regiões, notou-se resultados significativamente superiores entre os períodos de chuva sucessivos, com exceção dos dois últimos períodos avaliados em que não houve indicativo de diferença estatística significativa. 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 chuva, 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 estiagem (ARCADIS, 2021d). No Paraopeba,

destaca-se que as regiões Montante, 1A e 1B apresentaram comportamento próximo, com concentrações significativamente superiores às demais. Em geral esse padrão espacial se manteve ao se considerar os períodos de chuva individualmente (ANEXO IV-D)

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 chuva, sendo essa condição também observada nas comparações estabelecidas entre os períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). Como referência, o *baseline* sazonal mediano de chuva para a região equivale a 0,10 mg/L, valor este significativamente inferior aos resultados registrados nos períodos de chuva pós-rompimento, com exceção do período de chuva/2019, em que não houve indicativo de diferença estatística com a condição de referência. Destaca-se também, com exceção do primeiro período de 2019, 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.

Para a região do ribeirão Ferro-Carvão, as comparações estabelecidas também indicaram incremento das concentrações, principalmente entre os períodos de chuva 2019/2020 e chuva 2020/2021, com ausência de diferença significativa entre este último e o período de chuva mais recente, chuva 2021/2022. Para este analito, nesta região, não há *baseline* comparativo. Se comparado ao VMP, nos dois primeiros períodos de chuva avaliados praticamente não houve superação do limite legal, entretanto, nos dois últimos, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022 mais de 50% dos resultados ultrapassaram este limite.

Da região 1A em diante prevalece condição de incremento das concentrações entre os períodos de chuva sucessivos, assim como identificado para a região de Montante não afetadas, e em geral, também nos períodos de estiagem comparados (ARCADIS, 2021d). Nesta região, destaca-se a prevalência de valores superiores ao VMP, inclusive na condição de *baseline*. Além disso, nessa região, com exceção da chuva/2019 e chuva 2019/2020, os resultados foram estatisticamente superiores aos resultados do *baseline* (mediana equivalente a 0,10 mg/L).

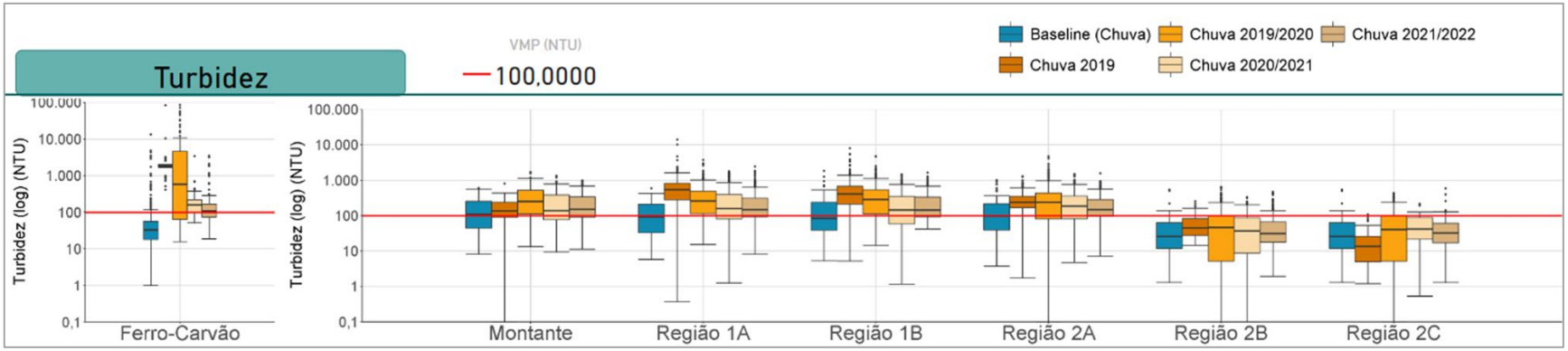
Na Região 1B, notam-se concentrações significativamente mais elevadas entre todos os períodos de chuvas sucessivos. Com exceção das concentrações de Al dissolvido nos dois primeiros períodos de chuva, 2019 e 2019/2020, nos períodos pós-rompimento as concentrações também foram significativamente superiores aos resultados dos pontos de *baseline* da região (concentração mediana igual a 0,12 mg/L). Destaca-se que a maioria dos resultados ao longo dos períodos monitorados, em geral mais de 75%, incluindo a condição do *baseline*, ultrapassaram o VMP (0,1 mg/L).

Situação semelhante foi identificada nas regiões 2A, 2B e 2C, com elevação sucessiva das concentrações ao longo dos períodos chuvosos. Especificamente nos dois últimos períodos chuvosos, 2020/2021 e 2021/2022, as concentrações também foram mais elevadas que a condição do *baseline* (0,1 mg/L) e que o VMP (0,1 mg/L).

5.3.1.4. Turbidez

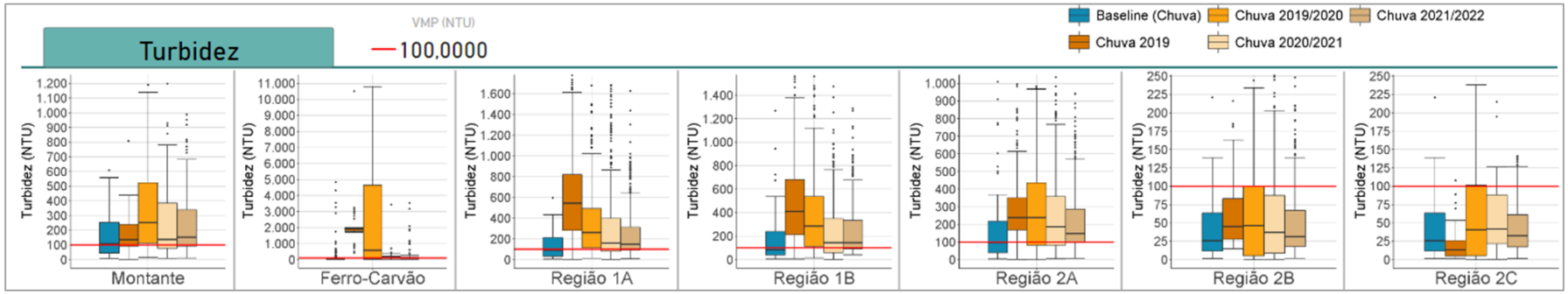
Nos Gráficos 5.3.1.4.1 e 2 são apresentados os *boxplot* do parâmetro Turbidez. Nas Tabelas 5.3.1.4-1 e 5.3.1.4-2 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros, respectivamente.

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



Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: escala ajustada em log devido aos valores mais elevados na chuva/2019.

Gráfico 5.3.1.4-2: *Boxplot* Turbidez para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro turbidez.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			>	>	~	<	<
Reg1A				~	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							~
Reg2C							

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	~	~	~	~	<
Ch.21/22 X Ch.19/20	<	<	<	<	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	>
Ch.21/22 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	<	<	<	~	~
Ch.20/21 X Ch.19	<	~	<	<	<	<	>
Ch.20/21 X Ch. Baseline	>	~	>	>	>	~	~
Ch.19/20 X Ch.19	<	>	<	<	<	>	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch.19 X Ch. Baseline	>	~	>	>	>	~	<

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

Para o parâmetro Turbidez, tendo em vista que o mesmo não é um marcador principal e pode, ademais, sofrer influência de várias contribuições difusas, 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 chuva 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 estiagem conjuntamente (ARCADIS, 2021d). Em geral, esse padrão dos teores de Turbidez nas regiões se manteve nos períodos de chuva analisados individualmente (ANEXO IV-D). Além disso, até a região 1B, os teores de turbidez foram significativamente mais elevados em relação à região de Montante, não impactada. A região 2C, localizada após o reservatório de Retiro Baixo, apresentou os menores valores de turbidez, indicando a capacidade de sedimentação e retenção de sólidos no interior do mesmo 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 chuva 2019/2020, quando os índices pluviométricos foram muito elevados, contribuindo de forma expressiva para o carreamento difuso de material para o curso d'água. Ainda assim, em todos os períodos chuvosos avaliados, os teores, em geral, ficaram acima 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 chuvosos, os maiores teores de Turbidez foram registrados logo após o rompimento, no período de chuva/2019. Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, os teores de Turbidez foram mais reduzidos se comparados aos períodos de chuva/2019 e chuva 2019/2020 e não diferiram estatisticamente do período de chuva 2020/2021. No entanto, ainda assim, nos quatro períodos chuvosos pós-rompimento os valores foram significativamente superiores à condição de *baseline* da região (mediana igual a 32,65 NTU) e, em grande parte, acima do VMP (100 NTU), com destaque para o período de chuva/2019 em que todos os resultados superaram este limite. Condição semelhante foi observada nos períodos de estiagem, onde apesar dos teores serem inferiores no último período de estiagem analisado, nos três períodos sazonais de estiagem foram significativamente superiores à condição de *baseline* da região e, em grande parte, acima do VMP (ARCADIS, 2021d).

Nas regiões mais afetadas do rio Paraopeba, Região 1A e Região 1B, bem como na região 2A prevaleceram as mesmas condições, com ocorrência de teores de Turbidez significativamente inferiores entre os períodos de chuva sucessivos, condição também verificada para as comparações estabelecidas estre os períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). Especificamente no último período avaliado, chuva 2021/2022, não houve indicativo de diferença estatística se comparado ao período de chuva 2020/2021. Importante destacar que, ainda que tenham sido observadas reduções, em todos os períodos chuvosos pós-rompimento os teores de Turbidez foram significativamente mais elevados se comparados à condição do *baseline* de chuvas para as três regiões. Além disso, em todas elas, em geral, mais de 75% dos resultados ultrapassaram o VMP (100 NTU).

Por fim, na região 2B, sob influência do reservatório da UHE Retiro Baixo as comparações entre os períodos de chuva oscilaram, mas especificamente em relação ao período mais recente, chuva 2021/2022, predominaram ausência de diferenças significativas entre as comparações estabelecidas ou terrores inferiores em relação aos períodos precedentes. Entretanto, cabe ressaltar que mesmo no período sazonal de chuva, nessa região os teores

ficaram majoritariamente inferiores ao VMP (100 NTU) e não diferiram da condição do *baseline* sazonal, condição também observada nos períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d).

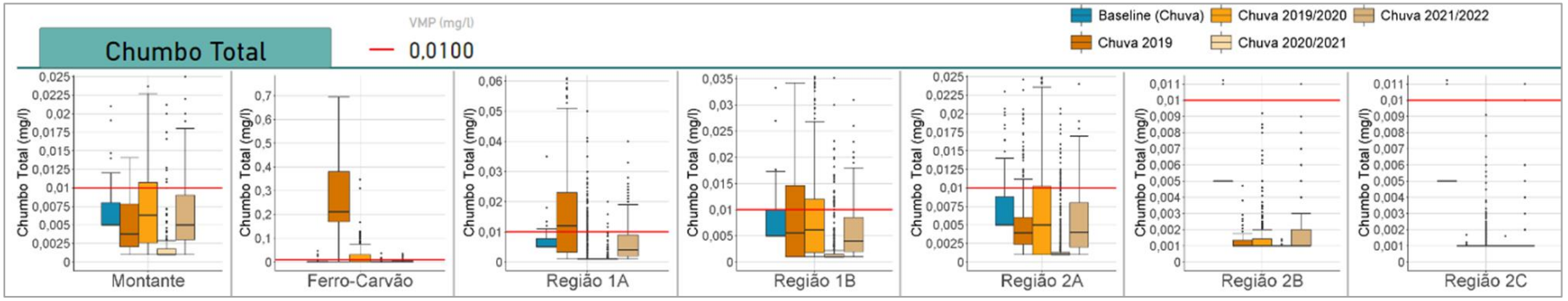
Já na região 2C, mais distal em relação a região de ocorrência do rompimento da barragem, condição contrária foi observada, com menores teores de Turbidez no período chuvoso de 2019. Nas demais comparações estabelecidas entre os períodos de chuva, prevaleceu ausência de diferença estatística significativa, incluindo as comparações com a condição de *baseline.* Ressalta-se que, em todos os períodos de chuva avaliados, os teores de Turbidez permaneceram majoritariamente abaixo do VMP (100 NTU), condição também verificada nos períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d).

5.3.1.5. Chumbo total

Nos Gráficos 5.3.1.5.1 e 5.3.1.5.2 são apresentados o *boxplot* do parâmetro Chumbo total. Nas Tabelas 5.3.1.5-1 e 5.3.1.5-2 são apresentados os resultados do teste de comparações múltiplas de Dunn para a avaliação espacial e temporal dos parâmetros, respectivamente.

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

Gráfico 5.3.1.5-2: *Boxplot* Chumbo total para períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, 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 chuva (chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022) para o parâmetro Chumbo total.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		~	<	~	~	<	<
Mont.			<	~	<	<	<
Reg1A				>	>	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						<	<
Reg2B							<
Reg2C							

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

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	>	>	>	>	>	>
Ch.21/22 X Ch.19/20	<	~	>	<	~	~	>
Ch.21/22 X Ch.19	<	~	<	~	~	~	>
Ch.21/22 X Ch. Baseline	>	>	>	>	>	~	~
Ch.20/21 X Ch.19/20	<	<	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19	<	<	<	<	<	<	~
Ch.20/21 X Ch. Baseline	>	<	<	<	<	~	<
Ch.19/20 X Ch.19	<	~	<	>	~	~	>
Ch.19/20 X Ch. Baseline	>	>	<	>	>	~	~
Ch.19 X Ch. Baseline	>	~	>	>	>	~	~

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

Para Chumbo total, verificam-se maiores concentrações no ribeirão Ferro-Carvão e nas regiões de Montante, 1B e 2A, ao se analisar os períodos de chuva conjuntamente. Conforme indicado no ANEXO IV-D, em geral, esse padrão espacial das concentrações de Chumbo total se mantém até o período de chuva 2019/2020, enquanto nos períodos mais recentes, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, maiores concentrações deste analito foram registradas nas regiões de Montante, 1B e 2A. Ademais, vale destacar que em todos os períodos e regiões, incluindo os períodos de estiagem, a maioria das amostras apresentaram resultados pouco variáveis e inferiores ao VMP, tal como os *baselines* respectivos. Vale destacar, também, a

presença de resultados *outliers*, principalmente nos trechos mais afetados (Região 1A e 1B), o que poderia indicar comportamento pontual não recorrente.

Em termos de comparação temporal, na região do Ribeirão Ferro-Carvão as concentrações deste analito foram significativamente superiores no período chuvoso logo após o rompimento, chuva/2019 e a partir daí tornaram-se mais atenuadas. Nos períodos seguintes, a maioria dos valores foram inferiores ao VMP (0,01 mg/L) mas ainda assim superaram a condição do *baseline* sazonal.

Nas regiões de Montante até 2A, em geral, as concentrações foram significativamente mais elevadas nos períodos de chuva/2019 e chuva 2019/2020. Especificamente no período mais recente, chuva 2021/2022 foi possível observar concentrações deste analito significativamente mais elevadas frente ao período chuvoso anterior (chuva 2020/2021), bem como em relação as condições do *baseline* sazonal, o que pode refletir os elevados índices pluviométricos registrado no último período analisado. Ainda assim, mesmo com esta elevação, a maioria dos resultados, mais de 75% em todos os casos, permaneceram abaixo do VMP (0,01 mg/L).

Na região 2B, sob influência do regime hidráulico do reservatório de Retiro Baixo, houve prevalência de ausência de diferenças significativas das concentrações de Chumbo total entre os períodos de chuva comparados, com a maioria dos resultados pouco variáveis e inferiores ao limite de quantificação do método analítico. Especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, as concentrações foram superiores em relação ao período de chuva 2020/2021, da mesma forma que verificado para as demais regiões do rio Paraopeba monitoradas pela Vale. Entretanto todos os resultados permaneceram abaixo do limite legal.

Por fim, na região 2C, apesar do indicativo de concentrações significativamente superiores no período mais recente, chuva 2021/2022, se comparado aos demais períodos de chuva monitorados, nota-se ainda prevalência de baixa variabilidade dos resultados, maioria abaixo do LQ, e conformidade integral com o limite estabelecido na legislação vigente (0,01 mg/L).

Destaca-se que as diferenças estatísticas indicadas entre o período mais recente, chuva 2021/2022, e o período anterior, chuva 2020/2021, podem ser justificadas pela alteração do limite de quantificação do método analítico. No período mais recente o LQ reduziu, permitindo identificar maior variação de resultados quantificados que o período anterior.

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, e na Tabela 5.3.2-1, para a série de chuva. 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 estiagem podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem (25/01/2019 a 30/09/2021) (ARCADIS, 2021d).

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 – medianas mensais.

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

Tabela 5.3.2-2: Resultados do teste de tendência temporal para os parâmetros de qualidade da água superficial para a série de chuva – medianas mensais.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.		UHE TM
	Mont.	Ferro Carvão		Região 1A					Região 1B				Região 2A									Região 2B			Região 2C		
	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-15	PT-53	PT-54	PT-43	PT-16	PT-17	PT-18	PT-49	PT-19	PT-55	PT-20	PT-28	PT-21	PT-57	CE-02	PT-22
MAJORITÁRIOS																											
Manganês Total	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST
Manganês Dissolvido	ST	T↑	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST
Ferro Total	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑
Ferro Dissolvido	T↑	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑
Alumínio Total	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑
Alumínio Dissolvido	T↑	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	ST	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑	T↑
Turbidez	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑
TRAÇOS																											
Chumbo Total	ST	ST	T↓	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	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 nula para a série completa de dados na maior parte dos pontos distribuídos nas diferentes regiões, com exceção da região Ferro-Carvão e os pontos PT-05 (região 1A), PT-28 e PT-21 (região 2B) e CE-02 (Região 2C) com tendências de redução significativa. Nota-se, no entanto, não ter havido nenhuma indicação de aumento ao longo do eixo longitudinal do rio Paraopeba. Entre os períodos sazonais de chuvas consecutivas, pode ser verificado que tendências de redução 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). Para todos os demais pontos, manteve-se a condição de nulidade tendencial. Como já mencionado no relatório de Fechamento de Ciclo de Estiagem 2021(ARCADIS, 2021d), entre as estiagens sucessivas também não houve indicativo de aumento de Manganês total ao longo do curso de água e os pontos com tendências de atenuação, também, estiveram concentrados nas regiões mais afetadas, com alguns pontos, entretanto, das regiões 2A, 2B e 2C, também apresentando tendência de redução entre os períodos de estiagem sucessivos.

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, em todos os pontos da Região 1A, no ponto PT-12 localizado no ribeirão Ferro-Carvão, em alguns pontos da região 1B e 2A, bem como em todos os pontos das regiões 2B e 2C (exceto PT-22 em condição nula), indicando condição de melhora predominante da qualidade da água ao longo do monitoramento efetuado. Não houve nenhum ponto com tendência de aumento considerando todo o período analisado.

Nas condições entre as chuvas, em grande parte dos pontos, percebe-se tendência de atenuação. Para os demais pontos, em grande monta concentrados na região montante, 1B e 2A, verifica-se nulidade de tendência. Excepcionalmente, nota-se tendência de aumento apenas no ponto PT-11, diferentemente do relatório de fechamento de ciclo anterior que, entre os períodos de estiagem, verificava-se tendência de aumento para os pontos PT-54 e PT-17 da Região 2A.

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. Apenas os pontos localizados no ribeirão Ferro-Carvão apresentaram tendência significativa de redução, indicando, portanto, estabilidade ou melhoria das condições de qualidade da água.

Especificamente para as chuvas, manteve-se a predominância de nulidade de tendência ao longo do rio Paraopeba e ribeirão Ferro-Carvão, com exceção dos pontos PT-09 e PT-05, que indicaram tendência de redução, e do ponto PT-22, com indicativo de elevação. Esse

comportamento destoa do verificado para o período de estiagem relatado no relatório anterior (ARCADIS, 2021d), em que houve predomínio de tendência significativa de redução, principalmente nas regiões mais afetadas (Ferro-Carvão, 1A e 1B).

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, 1A e 1B, principalmente. Para a série dos períodos de chuva sucessivos, 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.

Não foi identificado nenhum ponto com tendência de redução significativa tanto para a série completa de dados quanto para a série de chuvas consecutivas. Esse comportamento é destoante dos resultados do relatório anterior de fechamento de ciclo, em que, para a série de estiagens, houve prevalência de ausência de tendência e tendência significativa de redução em alguns pontos mais distais do local do rompimento, sendo eles os pontos PT-28 e PT-21 (Região 2B) e CE-02 (Região 2C).

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 chuva, 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. No geral, apenas nos pontos PT-11 e PT-12, localizados na região do ribeirão Ferro-Carvão, houve indicativo de tendência de redução na série completa, o que no relatório de fechamento de ciclo anterior, ademais, indicou também redução na série de estiagem. Especificamente no ponto PT-22 houve indicativo de tendência significativa de aumento tanto na série completa de dados quanto na série de chuva. Condição semelhante a esta também foi detectada no âmbito do relatório de fechamento de ciclo anterior (estiagem), 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 Bambui, 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 que permite a disponibilização de materiais solúveis 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 tanto para a série completa quanto para as séries de chuvas sucessivas, inclusive no ponto de montante, sendo neste último cenário, identificados apenas alguns poucos pontos com tendência nula (PT-11, PT-13, PT-02 e PT-48). Não foram detectadas tendência de redução em nenhum dos cenários. Já para a série temporal de estiagem evidenciada no relatório de fechamento de ciclo anterior (ARCADIS, 2021d), não houve indicativo de tendência significativa, seja de aumento ou de redução.

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 na região Ferro-Carvão. Para a série de chuvas sucessivas, 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. Por outro lado, para a série de estiagem, conforme indicado em ARCADIS (2021d), alguns pontos, além dos localizados nas regiões mais afetadas, também apresentaram tendência de redução significativa, como o ponto PT-52, localizado na região de montante, e a maioria dos pontos localizados na região 2A. Tal condição reforça a influência da sazonalidade, principalmente nos resultados de Turbidez e na fração total dos parâmetros majoritários, com mais indicativos de tendência de redução dos teores nos períodos de estiagem, quando o carreamento de materiais da área de contribuição para o curso d'água é reduzido em virtude da atenuação das precipitações.

5.3.2.5. Chumbo total

Quanto ao analito Chumbo total, é possível verificar predominância de ausência de tendência ao longo do corpo hídrico e, considerando-se os diferentes cenários avaliados, nota-se

tendência geral de redução dos teores na região Ferro-Carvão e aumento nos pontos PT-01 (montante, mas em trecho afetado) e no ponto PT-13 no início da região 1A.

Com exceção dos pontos PT-01 e PT-13, as concentrações de Chumbo total oscilaram ao longo dos períodos monitorados (concentrações maiores em 2019, majoritariamente inferiores ao LQ em 2020 e 2021, e mais variáveis em 2022 devido à redução do LQ), contribuindo para a prevalência de não detecção de tendência temporal significativa. Para esses dois pontos, as concentrações foram majoritariamente inferiores ao LQ até o início da estiagem/2021. A partir daí, com a redução do LQ, ocorreu maior variação de dados quantificados no período de chuva 2021/2022, contribuindo para o indicativo de aumento das concentrações de Chumbo total ao longo do período avaliado.

Ressalta-se que, para o PT-13, os resultados válidos estão disponíveis somente a partir de maio/2019. Embora o PT-13, localizado a 200 m a jusante da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão, tenha sido monitorada desde a data do rompimento, após a verificação e validação de seus resultados, foram desconsiderados os dados do período de 25/01/2019 a 14/05/2019, pois constatou-se que, devido a limitações de acesso e amostragem ocorridas neste período, estes resultados não representavam as condições de qualidade da água do trecho após o rompimento. Tal procedimento de validação específica deste ponto foi aprovado pelo IGAM em discussão técnica do Capítulo 2 do Plano de Reparação ocorrida em 29 de maio de 2020 (Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba. Capítulo 2 - Volume 2, março/2022).

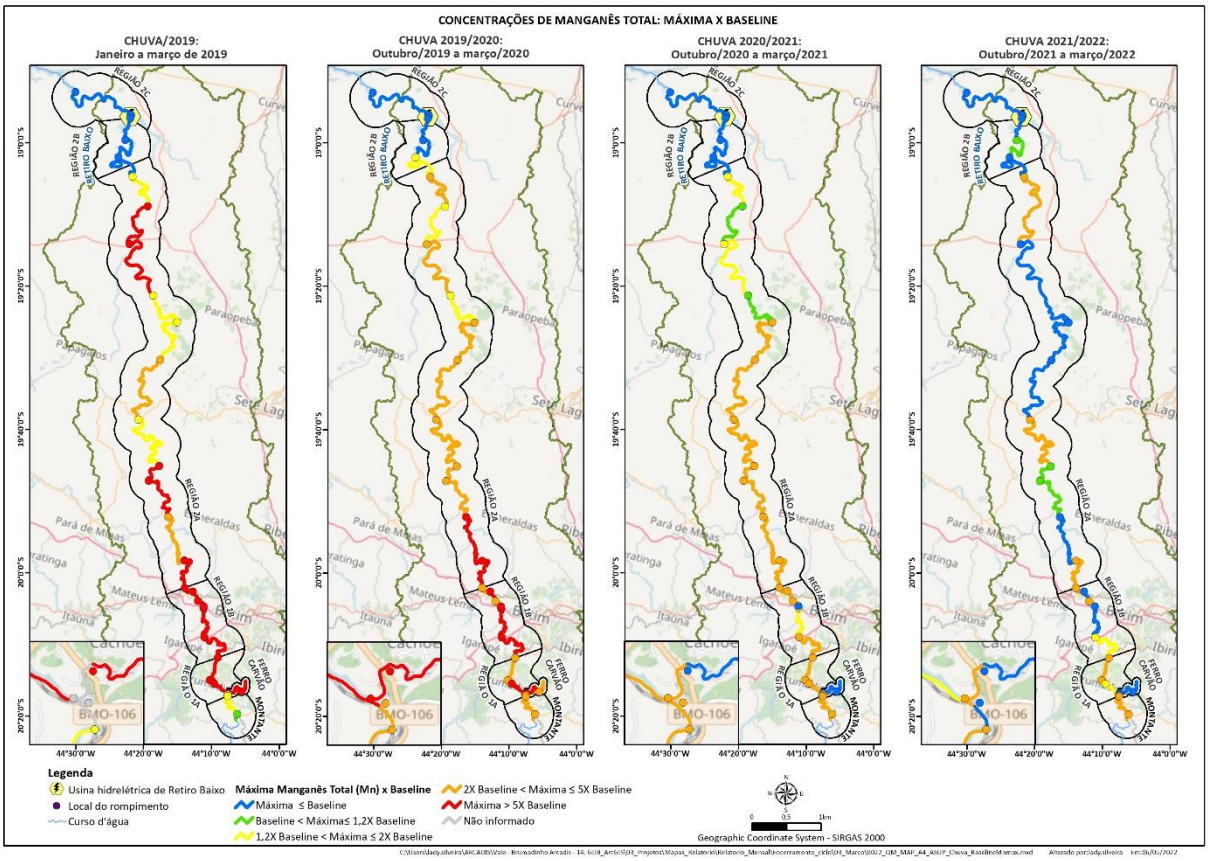
5.3.3. Mapas temáticos - *baseline*

Considerando-se nesta análise os meses dos períodos de chuva agregados (Figuras 5.3.3.1 a 5.3.3.4), observa-se um comportamento de atenuação dos parâmetros ao longo dos períodos monitorados na maior parte das regiões, com destaque para as regiões mais afetadas (Ferro Carvão a 1B). Nessas regiões, maiores concentrações de Manganês total, Ferro dissolvido e dos teores de Turbidez e consequente afastamento dos valores de *baseline*, foram verificados principalmente no período de chuva/2019, mais próximo da ocorrência do rompimento. A partir da chuva 2019/2020, os teores dos referidos analitos foram minimizados, mas ainda foram mantidos afastamentos pronunciados das condições de *baseline* principalmente para os analitos Manganês total e Turbidez. Especificamente para o parâmetro Alumínio dissolvido observa-se a recorrência de maiores afastamentos ao *baseline* ao longo dos períodos de chuva em toda a extensão da bacia, incluindo as regiões mais distais.

Ao analisar o analito Manganês total (Figura 5.3.3.1) nota-se que houve uma atenuação expressiva de suas concentrações máximas ao longo dos períodos sucessivos de chuva nas regiões do ribeirão Ferro-Carvão até 2A. Na chuva/2019, nestas regiões houve predomínio de concentrações máximas superiores a 5 vezes o valor do *baseline*. Na chuva de 2019/2020 essa condição de afastamento manteve-se recorrente, porém já foi possível observar atenuação das concentrações na região 2A, com predomínio de concentrações máximas entre 2 e 5 vezes superiores ao *baseline*. No período de chuva 2020/2021 a condição de atenuação das concentrações máximas se estendeu nas regiões do ribeirão Ferro Carvão até 2A, com a maior

parte dos pontos das referidas regiões com concentrações entre 2 e 5 vezes superiores ao *baseline,* destacando-se as melhores condições ao final da região 2A, com pontos com concentrações de Mn total até 1,2 vezes maiores que a condição do *baseline* chuvoso. No período de chuvas mais recente, chuva 2021/2022, notam-se menores afastamentos deste analito nas referidas regiões, destacando-se a ocorrência de condições inferiores ao máximo do *baseline* em pontos das regiões do ribeirão Ferro-Carvão, 1B e 2A. Na região não afetada de Montante e nas regiões mais distais a ocorrência do rompimento, 2B e 2C, as comparações das concentrações máximas de Manganês total frente ao máximo do *baseline* chuvoso foram menos variáveis ao longo dos períodos. Na região de Montante, houve indicativo de maior afastamento no período de chuva 2019/2020 (entre 2 e 5 vezes) em relação ao período de chuva/2019 (entre 1,2 e 2 vezes) e essa condição observada no período de chuva 2019/2020 se manteve nos demais períodos, incluindo o período de chuva mais recente, chuva 2021/2022. Por outro lado, nas regiões 2B e 2C, em todos os períodos houve predomínio de condições inferiores ao *baseline.*

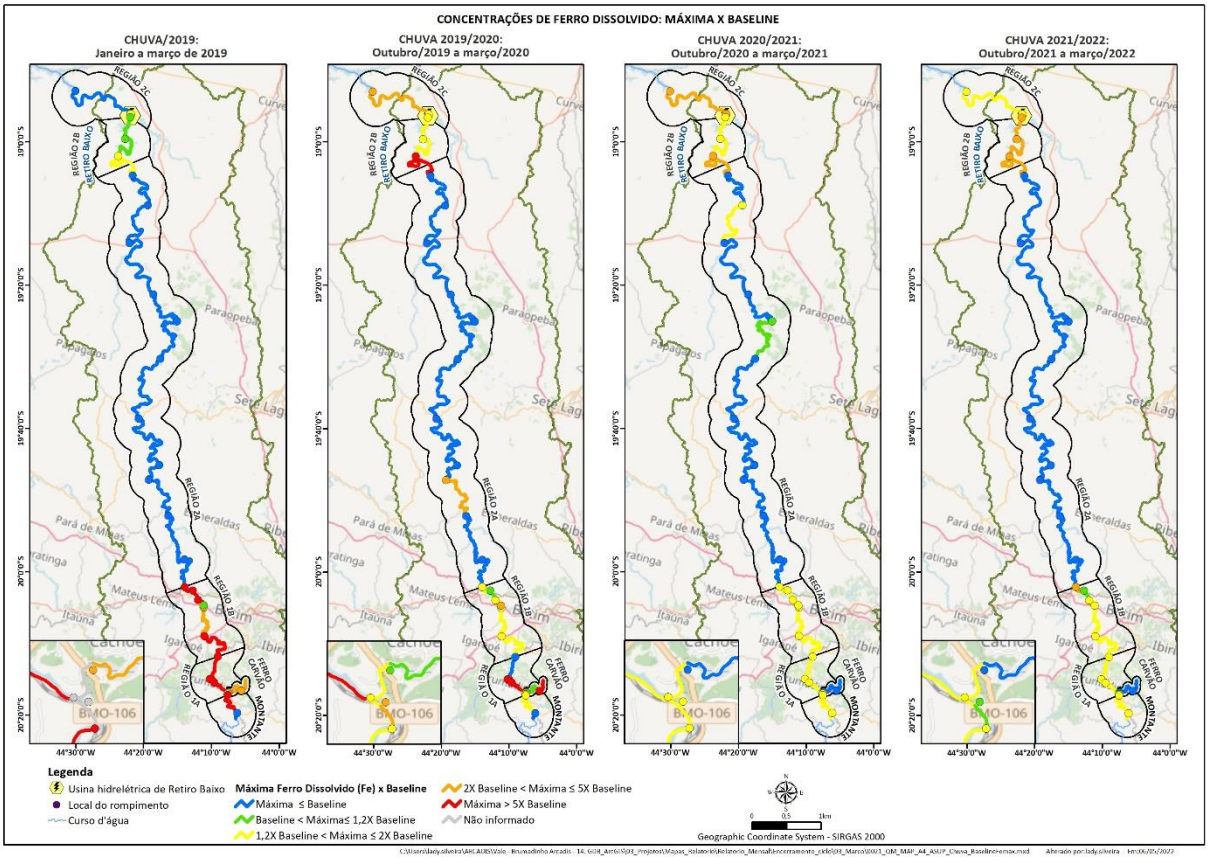
Figura 5.3.3.1: Mapa de comparação das concentrações máximas de Mn total com os máximos do *baseline*.



Para o Ferro dissolvido (5.3.3.2), em termos das concentrações máximas, observa-se menores condições de afastamento ao *baseline* ao longo dos períodos de chuva sucessivos desde Montante até a região 1B. No período de chuva/2019 as concentrações máximas deste analito

eram predominantemente 5 vezes superiores ao máximo do *baseline* de chuvas. Nos períodos seguintes, incluindo o período mais recente de chuva 2021/2022, predominaram concentrações máximas deste analito entre 1,2 e 5 vezes superiores à condição do *baseline*. Na região 2A em todos os períodos de chuva monitorados pós-rompimento houve predomínio de concentrações máximas de Fe dissolvido inferiores ao *baseline* máximo. Já nas regiões mais distais, 2B e 2C, diferentemente do observado para as demais regiões, notou-se maiores condições de afastamento no período de chuva 2019/2020 (em geral, entre 1,2 e 5 vezes o *baseline*) se comparado ao período de chuva/2019 (em geral, inferior ou até 2 vezes o *baseline*). Essa condição de afastamento de até 5 vezes o *baseline* se manteve nos períodos chuvosos seguintes nas regiões 2B e 2C.

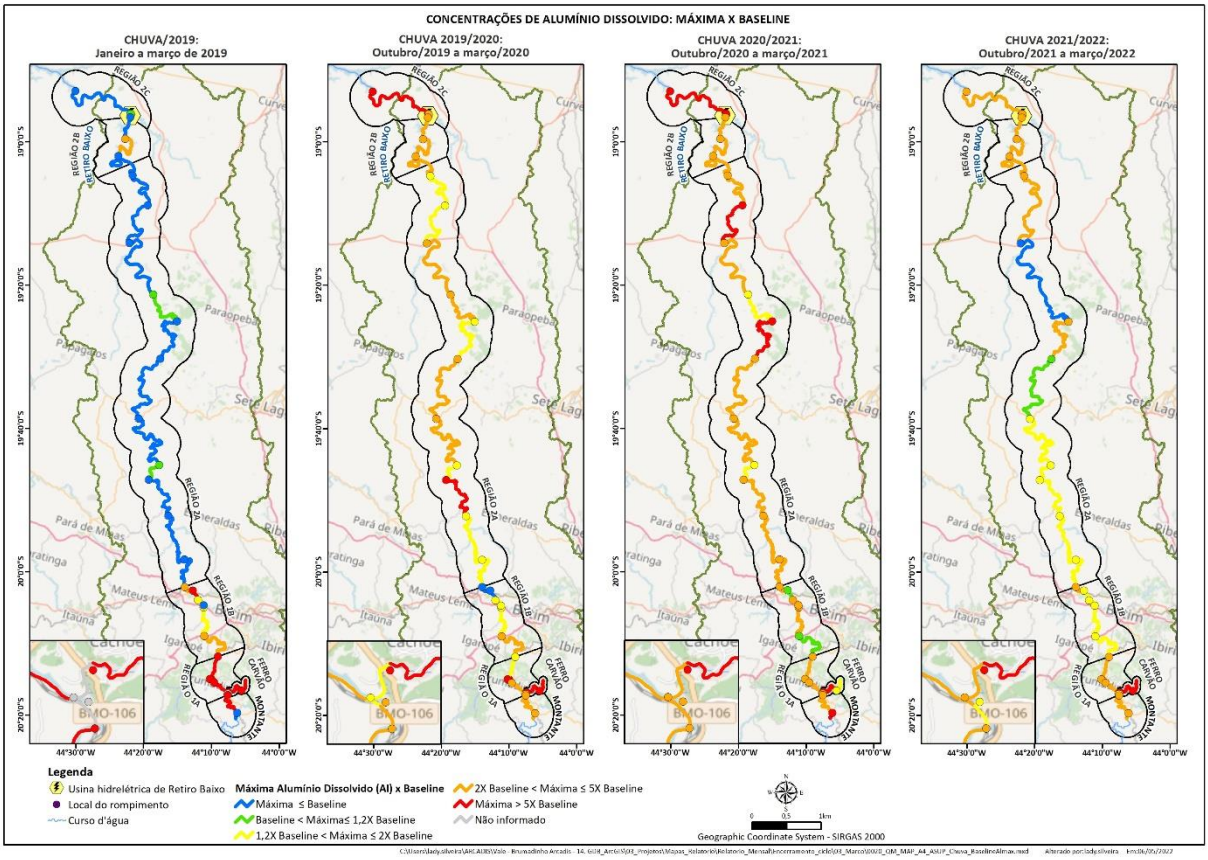
Figura 5.3.3.2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com os máximos do *baseline*.



Em relação ao Alumínio dissolvido (5.3.3.3), com exceção das regiões do ribeirão Ferro-Carvão e 1A, mais afetadas, observou-se menores condições de afastamento ao *baseline* no período de chuva/2019 se comparado os períodos de chuva posteriores. Especialmente no ribeirão Ferro-Carvão no ponto PT-11 houve aumento do valor máximo observado no período chuvoso 21/22 em relação ao período chuvoso 20/21. Tal valor foi observado no dia 14/02/22, com aumento dos demais parâmetros majoritários, porém, sem permanência destes nas sucessivas amostragens. No período de chuva/2019 observaram-se concentrações máximas de Al dissolvido até 5 vezes superiores ao máximo do *baseline* desde montante até a região 1B,

enquanto da região 2A em diante houve predomínio de concentrações máximas inferiores à condição de referência pré-rompimento. No período de chuvoso seguinte, chuva 2019/2020, as concentrações máximas deste analito se elevaram desde a região 2A até a região 2C, variando, em geral, entre 1,2 e 5 vezes superiores ao máximo do *baseline*. No período de chuva 2020/2021 essa condição de afastamento se manteve ao longo das regiões, destacando-se recorrência de concentrações máximas de Al dissolvido até 5 vezes maiores que a condição de referência. No período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, houve breve redução das condições de afastamento ao *baseline* se comparado aos períodos de chuva 2019/2020 e 2020/2021, com destaque para as regiões 2A e 2C.

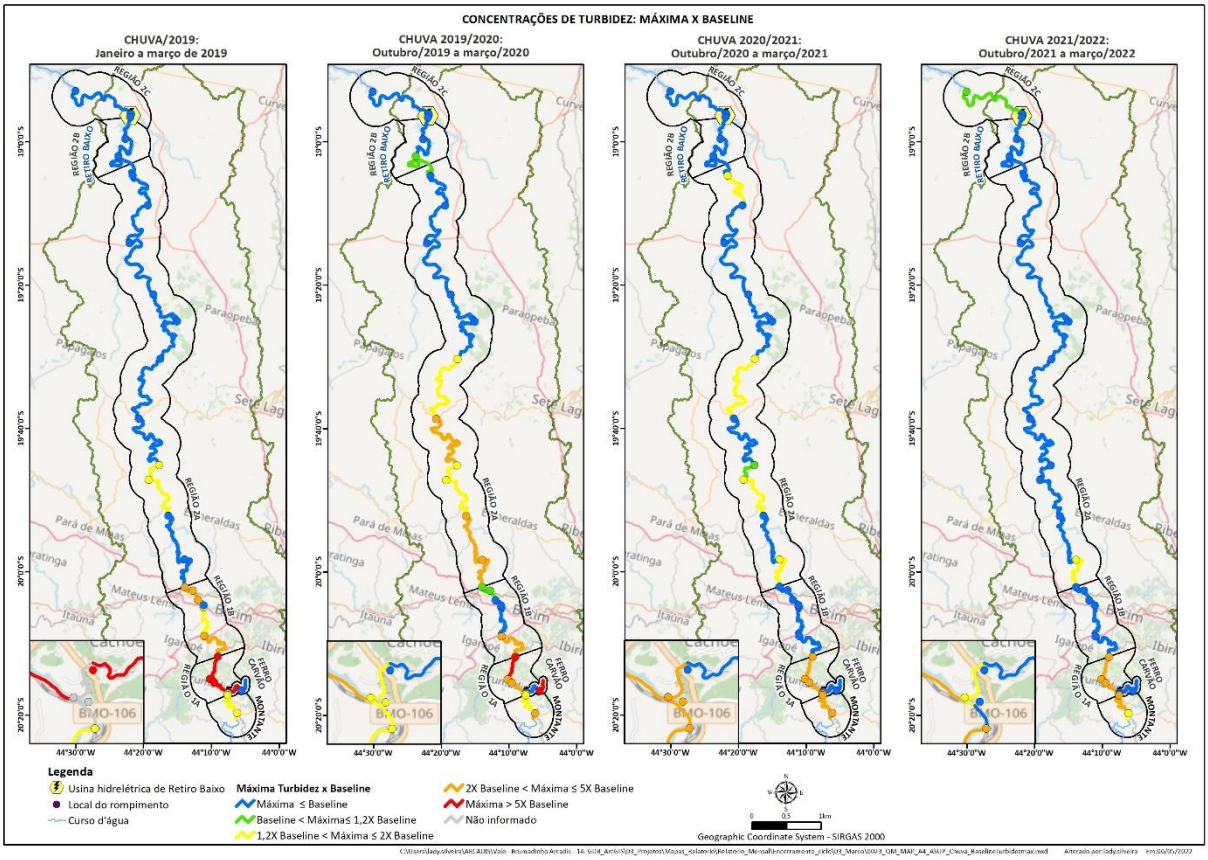
Figura 5.3.3.3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com os máximos do *baseline*.



Por fim, em relação ao parâmetro Turbidez (5.3.3.4), nota-se nítida evolução da redução dos teores máximos entre os períodos de chuva, com menor afastamento aos *baselines* entre os períodos sucessivos, principalmente nas regiões mais afetadas (ribeirão Ferro-Carvão a 1B). Nos períodos de chuva/2019 e chuva 2019/2020, os valores máximos de Turbidez ficaram mais distantes da condição de referência nas regiões 1A e 1B, com valores mais que 5 vezes e entre 2 e 5 vezes superiores ao *baseline*, respectivamente. Nos períodos seguintes, incluindo o período mais recente de chuva 2021/2022, na região 1A os teores de Turbidez foram 2 a 5 vezes maiores que o máximo do *baseline,* enquanto na 1B foram inferiores à condição de

referência pré-rompimento. Na região 2A, as maiores condições de afastamento foram registradas no período de chuva 2019/2020, com teores até 5 vezes maiores que o *baseline,* o que pode estar relacionado ao elevado volume pluviométrico registrado neste período. Nos demais períodos chuvosos monitorados nesta região houve prevalência de teores de Turbidez inferiores ao máximo do *baseline.* Na região 2B, em todos os períodos de chuva monitorados, desde 2019 até 2022, houve prevalência de teores inferiores ao *baseline.* Na região 2C, esta condição se estendeu até o período de chuva 2020/2021, com leve piora no período mais recente e indicativo de teores máximos de Turbidez até 1,2 vezes superiores ao *baseline*.

Figura 5.3.3.4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com os máximos do *baseline.*



Logo, de forma geral, no período de chuva 2021/2022, mais regiões ao longo do rio Paraopeba foram identificadas com teores máximos dos parâmetros próximos ou inferiores às condições máximas de referência, indicando maior aproximação das condições de qualidade da água pré-rompimento. Essa condição ficou mais evidente para os parâmetros marcadores Manganês total, Ferro dissolvido e Turbidez nas regiões mais afetadas, desde o ribeirão Ferro-Carvão até a região 1B.

Comparativamente, nos períodos de estiagem tem-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 teores máximos mais pronunciados dos

parâmetros majoritários de qualidade da água na bacia e consequente afastamento das condições do *baseline* sazonal ocorreram, principalmente, no período de estiagem/2019, a partir da Região do ribeirão Ferro-Carvão até a Região 2A. A partir da estiagem/2020 os teores dos referidos analitos foram se reduzindo, mantendo de forma majoritária, uma atenuação até o mês de setembro de 2021, conforme indicado no relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2021 (ARCADIS, 2021d).

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 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, nos primeiros meses subsequentes ao rompimento e nos períodos sazonais de chuva, como analisado no presente documento, que os parâmetros de qualidade da água apresentaram, em geral, teores superiores às condições de *baseline*, indicando os impactos decorrentes do evento, assim como a influência das precipitações no aumento das vazões fluviais. Nos períodos de estiagem, por outro lado, é possível observar menores teores, com valores mais próximos das condições de *baseline*, em função da redução de arraste hidráulico das vazões do rio Paraopeba.

De maneira geral, para os períodos chuvosos, 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 inferiores em relação à região de montante não afetada. Em termos temporais, para a maior parte das regiões, verifica-se que o período chuvoso de 2019 apresentou teores mais elevados, exceto para a região Montante, sendo que, para os demais períodos, em geral, os resultados mantiveram-se mais próximos ou inferiores entre as comparações estabelecidas. Por outro lado, na região mais distal 2C, localizada a jusante do reservatório de Retiro Baixo, os dois períodos chuvosos mais recentes apontaram, em geral, teores similares entre si e até mais elevados em relação ao período de chuvas de 2019.

Os elementos ferro e alumínio em suas frações dissolvidas, em geral, se assemelham em comportamento e, em termos espaciais, considerando todos os períodos chuvosos, notam-se concentrações significativamente mais elevadas em todas as regiões do rio Paraopeba em relação à região do ribeirão Ferro-Carvão, indicando que a disponibilização dessas frações está predominante no rio Paraopeba. A região 1A apresenta concentrações significativamente mais elevadas em relação às demais, com redução progressiva das mesmas à medida que se

avança para os trechos de jusante. No âmbito temporal, é indicado aumento sucessivo em todas as regiões, inclusive em montante, ao se comparar os períodos chuvosos, especialmente em 2021/2022, situação esta que se aproxima, relativamente, ao comportamento observado também entre as estiagens. Para a fração dissolvida de Manganês, por outro lado, é apontada redução gradual ao longo dos períodos chuvosos 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, até a região 1B, os teores de turbidez foram significativamente mais elevados em relação à região de Montante, não impactada, situação que se assemelha ao parâmetro Manganês total. Temporalmente, as chuvas de 2019 (período pós rompimento) e as chuvas de 2019/2020 implicaram em maiores concentrações para o rio Paraopeba, especialmente nas regiões mais afetadas (1A e 1B) e região 2A. Para a região Montante e as regiões mais distais (2B e 2C), o período chuvoso 2019/2020 foi mais relevantes para os teores de Turbidez. 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.

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

Dessa forma, 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. Esta 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 do rio Paraopeba. 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

Através desse tópico, objetiva-se avaliar as violações frente aos padrões legais na matriz de água superficial do rio Paraopeba, com base no que é estabelecido pela DN CERH-COPAM 01/2008. Essa avaliação é feita a partir da análise dos períodos sazonais chuvosos com foco nos resultados obtidos durante o período de chuvas do ano de 2021/2022.

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 chuva relativos aos anos de 2019 a 2022. Especial recorte é feito entre outubro/2021 e março/2022, uma vez que se trata do período de chuvas mais recente.

Confere a esta análise um conjunto de parâmetros do grupo de físico-químicos, sanitários e traços, 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 chuva, sendo eles, chuva/2019, chuva/2020 e chuva/2021, 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 chuvas, outubro/2021 a março de 2022, conforme Tabela 6.3.8.

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

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

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

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

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

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

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

Ferro - Carvão

-	Baseline chuva Vale			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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
Físico-químico															
Cor verdadeira	385	0	0,0 %	53	1	↗ 1,9 %	309	47	↗ 15,2 %	78	8	↓ 10,3 %	45	0	↓ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	443	3	0,7 %	51	38	↗ 74,5 %	309	93	↓ 30,1 %	78	34	↗ 43,6 %	114	34	↓ 29,8 %
pH	458	1	0,2 %	52	4	↗ 7,7 %	309	3	↓ 1,0 %	78	3	↗ 3,8 %	117	1	↓ 0,9 %
Sólidos suspensos totais	438	25	5,7 %	53	52	↗ 98,1 %	295	142	↓ 48,1 %	78	17	↓ 21,8 %	117	24	↓ 20,5 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	-	0	0,0 %	53	12	↗ 22,6 %	309	28	↓ 9,1 %	78	52	↗ 66,7 %	117	63	↓ 53,8 %
Ferro Dissolvido	443	48	10,8 %	53	13	↗ 24,5 %	309	21	↓ 6,8 %	78	11	↗ 14,1 %	117	11	↓ 9,4 %
Manganês Total	439	436	99,3 %	53	53	↗ 100,0 %	309	303	↓ 98,1 %	78	77	↗ 98,7 %	116	116	↗ 100,0 %
Turbidez	448	34	7,6 %	50	50	↗ 100,0 %	309	195	↓ 63,1 %	78	56	↗ 71,8 %	117	62	↓ 53,0 %
Outros															
Cianeto livre	-	0	0,0 %	53	11	↗ 20,8 %	309	0	↓ 0,0 %	78	0	— 0,0 %	116	0	— 0,0 %
Coliformes termotolerantes	15	10	66,7 %	53	30	↓ 56,6 %	90	32	↓ 35,6 %	78	16	↓ 20,5 %	43	2	↓ 4,7 %
DBO	438	11	2,5 %	53	4	↗ 7,5 %	308	0	↓ 0,0 %	78	2	↗ 2,6 %	117	1	↓ 0,9 %
Escherichia coli	15	6	40,0 %	-	0	↓ 0,0 %	255	64	↗ 25,1 %	77	21	↗ 27,3 %	45	3	↓ 6,7 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	192	40	20,8 %	53	52	↗ 98,1 %	309	156	↓ 50,5 %	78	18	↓ 23,1 %	116	30	↗ 25,9 %
Nitrato (como N)	192	0	0,0 %	53	0	— 0,0 %	309	0	— 0,0 %	78	0	— 0,0 %	45	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	180	0	0,0 %	53	7	↗ 13,2 %	309	0	↓ 0,0 %	78	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Sulfeto de Hidrogênio	-	0	0,0 %	53	2	↗ 3,8 %	309	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	370	0	0,0 %	53	40	↗ 75,5 %	309	1	↓ 0,3 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Bário Total	-	0	0,0 %	53	48	↗ 90,6 %	309	4	↓ 1,3 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Berílio Total	-	0	0,0 %	53	2	↗ 3,8 %	287	0	↓ 0,0 %	78	0	— 0,0 %	45	0	— 0,0 %
Cádmio Total	-	0	0,0 %	53	50	↗ 94,3 %	309	29	↓ 9,4 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Chumbo Total	370	4	1,1 %	53	51	↗ 96,2 %	309	152	↓ 49,2 %	78	4	↓ 5,1 %	117	5	↓ 4,3 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	53	51	↗ 96,2 %	309	18	↓ 5,8 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	-	0	0,0 %	53	3	↗ 5,7 %	309	1	↓ 0,3 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Cromo Total	370	0	0,0 %	53	26	↗ 49,1 %	309	3	↓ 1,0 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	366	0	0,0 %	53	49	↗ 92,5 %	309	19	↓ 6,1 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Níquel Total	-	0	0,0 %	53	51	↗ 96,2 %	309	23	↓ 7,4 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Selênio Total	-	0	0,0 %	53	50	↗ 94,3 %	293	7	↓ 2,4 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Urânio Total	-	0	0,0 %	53	50	↗ 94,3 %	309	18	↓ 5,8 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Vanádio Total	-	0	0,0 %	53	0	— 0,0 %	309	1	↗ 0,3 %	78	0	↓ 0,0 %	117	0	— 0,0 %
Zinco Total	-	0	0,0 %	53	48	↗ 90,6 %	309	3	↓ 1,0 %	78	0	↓ 0,0 %	117	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.

Montante															
-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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
Físico-químico															
Cor verdadeira	31	10	32,3 %	35	3	↓ 8,6 %	174	97	↗ 55,7 %	117	36	↓ 30,8 %	178	13	↓ 7,3 %
Oxigênio dissolvido	38	1	2,6 %	35	2	↗ 5,7 %	174	29	↗ 16,7 %	162	59	↗ 36,4 %	176	4	↓ 2,3 %
pH	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	10	↗ 5,7 %	161	3	↓ 1,9 %	178	4	↗ 2,2 %
Sólidos suspensos totais	38	21	55,3 %	35	16	↓ 45,7 %	174	83	↗ 47,7 %	162	101	↗ 62,3 %	177	136	↗ 76,8 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	5	45,5 %	35	6	↓ 17,1 %	174	126	↗ 72,4 %	162	132	↗ 81,5 %	178	168	↗ 94,4 %
Ferro Dissolvido	38	13	34,2 %	35	24	↗ 68,6 %	174	88	↓ 50,6 %	162	135	↗ 83,3 %	178	177	↗ 99,4 %
Manganês Total	38	37	97,4 %	35	33	↓ 94,3 %	174	157	↓ 90,2 %	162	144	↓ 88,9 %	178	176	↗ 98,9 %
Turbidez	38	19	50,0 %	35	23	↗ 65,7 %	174	136	↗ 78,2 %	160	106	↓ 66,3 %	178	119	↗ 66,9 %
Outros															
Cianeto livre	9	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	117	0	— 0,0 %	176	0	— 0,0 %
Coliformes termotolerantes	26	18	69,2 %	31	19	↓ 61,3 %	2	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Densidade de Cianobactérias	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Escherichia coli	12	7	58,3 %	29	21	↗ 72,4 %	174	107	↓ 61,5 %	116	76	↗ 65,5 %	178	128	↗ 71,9 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	38	9	23,7 %	35	11	↗ 31,4 %	174	34	↓ 19,5 %	162	66	↗ 40,7 %	178	111	↗ 62,4 %
Traços															
Arsênio Total	19	1	5,3 %	35	0	↓ 0,0 %	174	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	178	0	— 0,0 %
Chumbo Total	38	7	18,4 %	35	6	↓ 17,1 %	174	51	↗ 29,3 %	162	9	↓ 5,6 %	178	39	↗ 21,9 %
Cobre Dissolvido	13	1	7,7 %	35	0	↓ 0,0 %	174	0	— 0,0 %	155	0	— 0,0 %	178	0	— 0,0 %
Cromo Total	25	1	4,0 %	35	0	↓ 0,0 %	174	3	↗ 1,7 %	162	1	↓ 0,6 %	178	0	↓ 0,0 %
Níquel Total	19	1	5,3 %	35	0	↓ 0,0 %	174	2	↗ 1,1 %	162	0	↓ 0,0 %	178	0	— 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	1	↗ 0,6 %	162	0	↓ 0,0 %	178	0	— 0,0 %

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

Região 1A

-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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**
Físico-químico															
Cor verdadeira	30	11	36,7 %	252	71	↓ 28,2 %	988	365	↑ 36,9 %	549	117	↓ 21,3 %	547	25	↓ 4,6 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	305	94	↑ 30,8 %	983	143	↓ 14,5 %	963	41	↓ 4,3 %	736	5	↓ 0,7 %
pH	37	0	0,0 %	309	9	↑ 2,9 %	984	13	↓ 1,3 %	958	11	↓ 1,1 %	750	13	↑ 1,7 %
Sólidos suspensos totais	37	15	40,5 %	356	312	↑ 87,6 %	980	664	↓ 67,8 %	963	599	↓ 62,2 %	747	551	↑ 73,8 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	10	3	30,0 %	358	228	↑ 63,7 %	988	677	↑ 68,5 %	963	796	↑ 82,7 %	750	724	↑ 96,5 %
Ferro Dissolvido	37	11	29,7 %	358	231	↑ 64,5 %	988	849	↑ 85,9 %	962	849	↑ 88,3 %	748	738	↑ 98,7 %
Manganês Total	37	36	97,3 %	360	355	↑ 98,6 %	989	980	↑ 99,1 %	963	903	↓ 93,8 %	749	747	↑ 99,7 %
Turbidez	37	15	40,5 %	327	289	↑ 88,4 %	970	768	↓ 79,2 %	951	633	↓ 66,6 %	750	523	↑ 69,7 %
Outros															
Cianeto livre	9	0	0,0 %	251	1	↑ 0,4 %	988	1	↓ 0,1 %	549	3	↑ 0,5 %	541	0	↓ 0,0 %
Coliformes termotolerantes	25	23	92,0 %	252	187	↓ 74,2 %	481	305	↓ 63,4 %	186	105	↓ 56,5 %	42	29	↑ 69,0 %
DBO	37	0	0,0 %	252	27	↑ 10,7 %	985	6	↓ 0,6 %	549	4	↑ 0,7 %	547	2	↓ 0,4 %
Escherichia coli	12	12	100,0 %	56	46	↓ 82,1 %	820	675	↑ 82,3 %	548	436	↓ 79,6 %	547	479	↑ 87,6 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fluoreto	-	0	0,0 %	252	0	— 0,0 %	481	5	↑ 1,0 %	173	0	↓ 0,0 %	23	0	— 0,0 %
Fósforo Total	37	8	21,6 %	303	225	↑ 74,3 %	985	576	↓ 58,5 %	955	510	↓ 53,4 %	748	454	↑ 60,7 %
Nitrato (como N)	-	0	0,0 %	252	1	↑ 0,4 %	988	0	↓ 0,0 %	549	0	— 0,0 %	545	0	— 0,0 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	252	0	— 0,0 %	988	0	— 0,0 %	549	0	— 0,0 %	545	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	251	3	↑ 1,2 %	988	0	↓ 0,0 %	549	0	— 0,0 %	548	0	— 0,0 %
Sulfeto de Hidrogênio	-	0	0,0 %	250	7	↑ 2,8 %	848	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	18	2	11,1 %	352	1	↓ 0,3 %	989	2	↓ 0,2 %	963	0	↓ 0,0 %	750	0	— 0,0 %
Bário Total	18	0	0,0 %	360	10	↑ 2,8 %	986	0	↓ 0,0 %	549	0	— 0,0 %	548	0	— 0,0 %
Cádmio Total	37	1	2,7 %	360	40	↑ 11,1 %	989	1	↓ 0,1 %	963	1	↑ 0,1 %	749	0	↓ 0,0 %
Chumbo Total	30	6	20,0 %	360	201	↑ 55,8 %	989	113	↓ 11,4 %	963	4	↓ 0,4 %	746	165	↑ 22,1 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	360	27	↑ 7,5 %	988	1	↓ 0,1 %	548	0	↓ 0,0 %	548	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	12	0	0,0 %	358	19	↑ 5,3 %	988	7	↓ 0,7 %	957	1	↓ 0,1 %	748	1	↑ 0,1 %
Cromo Total	24	1	4,2 %	360	11	↓ 3,1 %	989	6	↓ 0,6 %	963	1	↓ 0,1 %	750	5	↑ 0,7 %
Mercúrio Total	18	0	0,0 %	352	14	↑ 4,0 %	989	0	↓ 0,0 %	963	0	— 0,0 %	749	0	— 0,0 %
Níquel Total	18	0	0,0 %	360	54	↑ 15,0 %	989	4	↓ 0,4 %	963	0	↓ 0,0 %	750	2	↑ 0,3 %
Selênio Total	18	0	0,0 %	352	3	↑ 0,9 %	468	0	↓ 0,0 %	173	0	— 0,0 %	23	0	— 0,0 %
Urânio Total	-	0	0,0 %	352	12	↑ 3,4 %	989	0	↓ 0,0 %	963	0	— 0,0 %	749	0	— 0,0 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	360	11	↑ 3,1 %	989	1	↓ 0,1 %	963	1	↑ 0,1 %	749	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 chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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**
Físico-químico															
Cor verdadeira	62	28	45,2 %	353	135	↓ 38,2 %	1020	662	↑ 64,9 %	522	245	↓ 46,9 %	207	11	↓ 5,3 %
Oxigênio dissolvido	76	3	3,9 %	353	128	↑ 36,3 %	1020	368	↓ 36,1 %	522	95	↓ 18,2 %	205	14	↓ 6,8 %
pH	76	0	0,0 %	353	8	↑ 2,3 %	1019	57	↑ 5,6 %	515	61	↑ 11,8 %	207	9	↓ 4,3 %
Sólidos suspensos totais	76	30	39,5 %	353	194	↑ 55,0 %	975	486	↓ 49,8 %	522	272	↑ 52,1 %	207	147	↑ 71,0 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	22	13	59,1 %	353	215	↑ 60,9 %	1020	747	↑ 73,2 %	522	436	↑ 83,5 %	207	202	↑ 97,6 %
Ferro Dissolvido	76	28	36,8 %	353	213	↑ 60,3 %	1020	529	↓ 51,9 %	522	464	↑ 88,9 %	207	203	↑ 98,1 %
Manganês Total	76	73	96,1 %	353	353	↑ 100,0 %	1020	1011	↓ 99,1 %	522	497	↓ 95,2 %	207	206	↑ 99,5 %
Turbidez	76	34	44,7 %	353	329	↑ 93,2 %	1017	778	↓ 76,5 %	520	313	↓ 60,2 %	207	149	↑ 72,0 %
Outros															
Cianeto livre	28	1	3,6 %	353	0	↓ 0,0 %	1020	0	— 0,0 %	521	1	↑ 0,2 %	205	0	↓ 0,0 %
Coliformes termotolerantes	52	47	90,4 %	330	265	↓ 80,3 %	130	115	↑ 88,5 %	-	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %
DBO	76	1	1,3 %	353	45	↑ 12,7 %	1007	0	↓ 0,0 %	522	6	↑ 1,1 %	207	2	↓ 1,0 %
Escherichia coli	24	22	91,7 %	110	92	↓ 83,6 %	891	834	↑ 93,6 %	522	495	↑ 94,8 %	206	198	↑ 96,1 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fluoreto	-	0	0,0 %	353	1	↑ 0,3 %	155	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	76	38	50,0 %	353	196	↑ 55,5 %	1020	363	↓ 35,6 %	522	195	↑ 37,4 %	207	159	↑ 76,8 %
Nitrato (como N)	-	0	0,0 %	353	2	↑ 0,6 %	1020	0	↓ 0,0 %	522	0	— 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	353	0	— 0,0 %	1020	1	↑ 0,1 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	76	0	0,0 %	353	0	— 0,0 %	1020	17	↑ 1,7 %	521	1	↓ 0,2 %	207	0	↓ 0,0 %
Sulfeto de Hidrogênio	-	0	0,0 %	353	3	↑ 0,8 %	1017	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	38	3	7,9 %	353	3	↓ 0,8 %	1020	0	↓ 0,0 %	522	3	↑ 0,6 %	207	0	↓ 0,0 %
Bário Total	38	0	0,0 %	353	1	↑ 0,3 %	1020	1	↓ 0,1 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Cádmio Total	76	0	0,0 %	353	6	↑ 1,7 %	1020	2	↓ 0,2 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Chumbo Total	76	18	23,7 %	353	118	↑ 33,4 %	1020	310	↓ 30,4 %	522	35	↓ 6,7 %	207	39	↑ 18,8 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	353	9	↑ 2,5 %	1019	1	↓ 0,1 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	26	0	0,0 %	353	16	↑ 4,5 %	1020	1	↓ 0,1 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Cromo Total	57	1	1,8 %	353	1	↓ 0,3 %	1020	10	↑ 1,0 %	522	0	↓ 0,0 %	207	1	↑ 0,5 %
Mercúrio Total	38	0	0,0 %	353	1	↑ 0,3 %	1020	0	↓ 0,0 %	522	0	— 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Níquel Total	57	1	1,8 %	353	23	↑ 6,5 %	1020	10	↓ 1,0 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Selênio Total	38	0	0,0 %	353	3	↑ 0,8 %	156	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Urânio Total	-	0	0,0 %	353	1	↑ 0,3 %	1020	0	↓ 0,0 %	522	0	— 0,0 %	207	0	— 0,0 %
Zinco Total	57	2	3,5 %	353	10	↓ 2,8 %	1020	3	↓ 0,3 %	522	0	↓ 0,0 %	207	0	— 0,0 %

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

Região 2A															
-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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
Físico-químico															
Cor verdadeira	93	34	36,6 %	477	114	↓ 23,9 %	1856	1122	↑ 60,5 %	905	381	↓ 42,1 %	312	14	↓ 4,5 %
Oxigênio dissolvido	114	2	1,8 %	470	84	↑ 17,9 %	1855	210	↓ 11,3 %	905	87	↓ 9,6 %	310	21	↓ 6,8 %
pH	114	0	0,0 %	476	1	↑ 0,2 %	1856	5	↑ 0,3 %	903	34	↑ 3,8 %	310	6	↓ 1,9 %
Sólidos dissolvidos totais	99	0	0,0 %	477	2	↑ 0,4 %	1851	0	↓ 0,0 %	905	0	– 0,0 %	312	0	– 0,0 %
Sólidos suspensos totais	114	55	48,2 %	477	231	↑ 48,4 %	1851	783	↓ 42,3 %	905	557	↑ 61,5 %	312	225	↑ 72,1 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	33	15	45,5 %	477	114	↓ 23,9 %	1856	1124	↑ 60,6 %	905	754	↑ 83,3 %	312	280	↑ 89,7 %
Ferro Dissolvido	114	21	18,4 %	477	290	↑ 60,8 %	1856	689	↓ 37,1 %	905	788	↑ 87,1 %	311	304	↑ 97,7 %
Manganês Total	114	87	76,3 %	477	463	↑ 97,1 %	1855	1462	↓ 78,8 %	905	786	↑ 86,9 %	318	310	↑ 97,5 %
Turbidez	114	57	50,0 %	477	455	↑ 95,4 %	1852	1313	↓ 70,9 %	900	605	↓ 67,2 %	310	225	↑ 72,6 %
Outros															
Cianeto livre	37	1	2,7 %	477	0	↓ 0,0 %	1856	0	– 0,0 %	905	1	↑ 0,1 %	308	0	↓ 0,0 %
Clorofila-a	71	2	2,8 %	475	0	↓ 0,0 %	1852	0	– 0,0 %	905	0	– 0,0 %	311	0	– 0,0 %
Coliformes termotolerantes	78	51	65,4 %	356	183	↓ 51,4 %	37	0	↓ 0,0 %	-	0	– 0,0 %	-	0	– 0,0 %
DBO	114	1	0,9 %	477	0	↓ 0,0 %	1825	1	↑ 0,1 %	902	5	↑ 0,6 %	312	4	↑ 1,3 %
Densidade de Cianobactérias	-	0	0,0 %	477	0	– 0,0 %	298	0	– 0,0 %	-	0	– 0,0 %	-	0	– 0,0 %
Escherichia coli	36	9	25,0 %	421	244	↑ 58,0 %	1854	888	↓ 47,9 %	901	473	↑ 52,5 %	312	141	↓ 45,2 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	– 0,0 %	-	0	– 0,0 %	-	0	– 0,0 %	-	0	– 0,0 %
Fósforo Total	114	52	45,6 %	477	288	↑ 60,4 %	1856	645	↓ 34,8 %	904	470	↑ 52,0 %	312	222	↑ 71,2 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	473	0	– 0,0 %	1855	0	– 0,0 %	905	0	– 0,0 %	311	0	– 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	114	0	0,0 %	477	0	– 0,0 %	1855	3	↑ 0,2 %	904	0	↓ 0,0 %	312	0	– 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	57	1	1,8 %	477	0	↓ 0,0 %	1856	0	– 0,0 %	905	2	↑ 0,2 %	318	0	↓ 0,0 %
Cádmio Total	114	0	0,0 %	477	2	↑ 0,4 %	1856	2	↓ 0,1 %	905	0	↓ 0,0 %	318	0	– 0,0 %
Chumbo Total	114	22	19,3 %	477	48	↓ 10,1 %	1856	432	↑ 23,3 %	905	33	↓ 3,6 %	316	53	↑ 16,8 %
Cobre Dissolvido	67	1	1,5 %	477	0	↓ 0,0 %	1856	3	↑ 0,2 %	905	0	↓ 0,0 %	311	2	↑ 0,6 %
Cromo Total	75	0	0,0 %	477	1	↑ 0,2 %	1856	2	↓ 0,1 %	905	0	↓ 0,0 %	318	0	– 0,0 %
Mercúrio Total	57	0	0,0 %	477	1	↑ 0,2 %	1856	0	↓ 0,0 %	905	0	– 0,0 %	318	0	– 0,0 %
Níquel Total	57	1	1,8 %	477	2	↓ 0,4 %	1856	3	↓ 0,2 %	905	0	↓ 0,0 %	318	0	– 0,0 %
Zinco Total	76	1	1,3 %	477	2	↓ 0,4 %	1856	5	↓ 0,3 %	905	2	↓ 0,2 %	317	0	↓ 0,0 %

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

Região 2B

-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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**
Físico-químico															
Cor verdadeira	22	5	22,7 %	82	9	↓ 11,0 %	536	273	↗ 50,9 %	467	78	↓ 16,7 %	510	8	↓ 1,6 %
Oxigênio dissolvido	22	0	0,0 %	82	13	↗ 15,9 %	534	66	↓ 12,4 %	466	26	↓ 5,6 %	509	10	↓ 2,0 %
pH	22	1	4,5 %	82	0	↓ 0,0 %	534	9	↗ 1,7 %	467	1	↓ 0,2 %	510	7	↗ 1,4 %
Sólidos dissolvidos totais	19	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	534	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	511	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	22	4	18,2 %	82	2	↓ 2,4 %	534	24	↗ 4,5 %	467	27	↗ 5,8 %	511	37	↗ 7,2 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	4	36,4 %	82	16	↓ 19,5 %	536	274	↗ 51,1 %	467	336	↗ 71,9 %	510	435	↗ 85,3 %
Ferro Dissolvido	22	3	13,6 %	82	45	↗ 54,9 %	536	232	↓ 43,3 %	467	243	↗ 52,0 %	510	421	↗ 82,5 %
Manganês Total	22	6	27,3 %	82	31	↗ 37,8 %	536	118	↓ 22,0 %	466	34	↓ 7,3 %	510	48	↗ 9,4 %
Turbidez	22	4	18,2 %	82	16	↗ 19,5 %	536	130	↗ 24,3 %	463	96	↓ 20,7 %	507	82	↓ 16,2 %
Outros															
Cianeto livre	16	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	505	0	— 0,0 %
Clorofila-a	21	1	4,8 %	82	0	↓ 0,0 %	534	3	↗ 0,6 %	467	0	↓ 0,0 %	506	0	— 0,0 %
Coliformes termotolerantes	11	7	63,6 %	81	0	↓ 0,0 %	30	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
DBO	22	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	531	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	511	3	↗ 0,6 %
Densidade de Cianobactérias	14	0	0,0 %	82	1	↗ 1,2 %	82	36	↗ 43,9 %	-	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Escherichia coli	11	1	9,1 %	66	1	↓ 1,5 %	536	26	↗ 4,9 %	467	12	↓ 2,6 %	509	15	↗ 2,9 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	22	3	13,6 %	82	25	↗ 30,5 %	536	157	↓ 29,3 %	465	113	↓ 24,3 %	511	154	↗ 30,1 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	511	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	22	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	511	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	11	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	510	0	— 0,0 %
Cádmio Total	22	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	510	0	— 0,0 %
Chumbo Total	22	3	13,6 %	82	1	↓ 1,2 %	536	1	↓ 0,2 %	467	0	↓ 0,0 %	510	1	↗ 0,2 %
Cobre Dissolvido	22	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	466	0	— 0,0 %	510	0	— 0,0 %
Cromo Total	16	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	510	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	11	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	510	0	— 0,0 %
Níquel Total	11	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	0	— 0,0 %	467	0	— 0,0 %	510	0	— 0,0 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	82	0	— 0,0 %	536	6	↗ 1,1 %	467	0	↓ 0,0 %	509	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 chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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
Físico-químico															
Cor verdadeira	22	5	22,7 %	101	0	↓ 0,0 %	520	219	↗ 42,1 %	421	42	↓ 10,0 %	310	7	↓ 2,3 %
Oxigênio dissolvido	22	0	0,0 %	101	15	↗ 14,9 %	520	105	↗ 20,2 %	421	52	↓ 12,4 %	311	11	↓ 3,5 %
pH	22	1	4,5 %	101	0	↓ 0,0 %	518	7	↗ 1,4 %	421	2	↓ 0,5 %	311	20	↗ 6,4 %
Sólidos suspensos totais	22	4	18,2 %	101	0	↓ 0,0 %	517	11	↗ 2,1 %	420	1	↓ 0,2 %	310	7	↗ 2,3 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	4	36,4 %	101	10	↓ 9,9 %	520	218	↗ 41,9 %	421	292	↗ 69,4 %	310	257	↗ 82,9 %
Ferro Dissolvido	22	3	13,6 %	101	11	↓ 10,9 %	520	223	↗ 42,9 %	421	218	↗ 51,8 %	310	234	↗ 75,5 %
Manganês Total	22	6	27,3 %	101	3	↓ 3,0 %	519	113	↗ 21,8 %	421	4	↓ 1,0 %	322	17	↗ 5,3 %
Turbidez	22	4	18,2 %	101	1	↓ 1,0 %	520	132	↗ 25,4 %	418	62	↓ 14,8 %	309	42	↓ 13,6 %
Outros															
Cianeto livre	16	0	0,0 %	101	0	— 0,0 %	491	0	— 0,0 %	421	0	— 0,0 %	305	0	— 0,0 %
Clorofila-a	21	1	4,8 %	101	0	↓ 0,0 %	517	0	— 0,0 %	421	0	— 0,0 %	307	0	— 0,0 %
Coliformes termotolerantes	11	7	63,6 %	68	2	↓ 2,9 %	31	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
DBO	22	0	0,0 %	101	0	— 0,0 %	516	2	↗ 0,4 %	420	0	↓ 0,0 %	310	0	— 0,0 %
Densidade de Cianobactérias	14	0	0,0 %	101	40	↗ 39,6 %	55	7	↓ 12,7 %	-	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Escherichia coli	11	1	9,1 %	91	2	↓ 2,2 %	520	15	↗ 2,9 %	420	3	↓ 0,7 %	311	1	↓ 0,3 %
Fenois Totais	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	22	3	13,6 %	101	5	↓ 5,0 %	515	79	↗ 15,3 %	421	66	↗ 15,7 %	310	18	↓ 5,8 %
Sulfato	11	0	0,0 %	101	1	↗ 1,0 %	519	0	↓ 0,0 %	421	0	— 0,0 %	310	0	— 0,0 %
Traços															
Chumbo Total	22	3	13,6 %	101	0	↓ 0,0 %	520	0	— 0,0 %	421	0	— 0,0 %	322	3	↗ 0,9 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	101	0	— 0,0 %	520	1	↗ 0,2 %	421	1	↗ 0,2 %	322	1	↗ 0,3 %

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 na chuva 2021/2022.

Parâmetro	Rio Paraopeba																																UHE Retiro Baixo			Rio Paraop.			UHE TM
	Mont.		Ferro Carvão					Região 1A						Região 1B							Região 2A													Região 2B			Região 2C			
	BP036	PT-52	FEI-COR-01	FEI-COR-03-AS	FEI-COR-07	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	BP068	PT-05	BP070	PT-03	PT-14	PT-48	BP072	PT-04	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	PT-22
MAJORITÁRIOS																																							
Manganês Total	97	99	99	100	100	100	100	100	100	99	99	97	100	97	100	94	100	95	100	100	100	100	100	79	100	100	100	76	100	74	100	95	22	4	2	1	4	27	28
Ferro Dissolvido	34	99	11	16	9	5	4	98	97	99	99	30	99	34	100	100	100	39	100	97	100	100	100	26	100	100	100	13	95	16	94	97	92	81	74	75	77	14	73
Alumínio Dissolvido	45	94	-	-	-	15	56	95	97	98	98	30	94	55	100	94	100	64	100	97	100	83	100	45	93	86	95	36	95	55	88	88	91	85	79	82	83	36	88
Turbidez	50	67	10	-	6	90	43	65	66	67	67	41	72	45	90	38	69	45	100	73	57	50	46	47	47	72	90	50	73	53	65	79	31	12	6	10	13	18	35
TRAÇOS																																							
Chumbo Total	18	21	1	-	1	25	-	21	23	20	21	20	22	16	20	6	19	32	-	20	14	8	23	18	27	25	15	21	18	18	6	15	1	-	-	-	-	14	8
Cromo Total	4	-	-	-	-	-	-	1	-	1	1	4	1	-	-	-	-	3	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Níquel Total	5	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinco Total	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-
OUTROS																																							
Cor verdadeira	32	7	-	-	-	-	-	-	-	4	5	37	6	42	-	-	-	48	-	7	-	8	-	32	-	8	-	35	-	42	6	6	2	2	1	3	1	23	4
DBO	-	1	3	-	3	-	1	5	-	-	-	-	1	-	5	-	-	3	-	1	-	-	8	-	7	-	-	-	-	3	-	1	1	1	1	-	-	-	-
Escherichia coli	66	72	67	50	-	-	12	73	67	80	96	95	91	92	100	88	100	89	100	96	100	92	85	66	87	44	45	53	36	39	24	33	8	1	-	-	1	36	-
Fósforo Total	24	62	19	50	17	95	9	56	60	61	61	22	62	37	90	44	75	63	100	79	64	75	92	55	93	83	80	37	77	45	71	63	57	20	13	-	1	14	65
Oxigênio dissolvido	3	2	1	-	1	26	30	-	2	-	1	-	1	3	-	-	-	5	-	9	14	8	8	3	13	31	15	-	5	3	-	-	3	1	1	2	5	-	4
pH	-	2	-	-	0,5	-	1	1	-	-	-	-	6	-	-	19	19	-	-	2	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-	2	2	1	1	7	7	5	-
Sólidos suspensos totais	55	77	7	3	5	90	6	70	72	72	73	41	73	37	95	44	75	42	100	70	71	58	62	53	53	78	95	47	77	45	65	72	18	4	1	1	2	18	8
N amostral	38	178	212	38	208	20	74	88	86	164	171	37	172	38	20	16	16	38	1	154	14	12	13	38	15	36	20	38	28	38	17	163	171	171	169	135	150	22	39

Elaboração: Arcadis, 2022.

Na região de Montante, de acordo com a Tabela 6.3-2, as violações dos parâmetros físico-químicos no período de chuva que apresentaram aumento em 2021/2022 em relação aos anos anteriores foram registradas para pH (2,2%) e Sólidos Suspensos totais (76,8%). Já para Cor verdadeira (7,3%) e Oxigênio dissolvido (2,3%), nota-se redução. Quanto aos parâmetros majoritários, todos apresentaram aumento se comparados com o período de chuva dos anos anteriores e com ultrapassagem ao *baseline* de chuva, respectivamente, como observado para Alumínio dissolvido (94,4%), Ferro dissolvido (99,4%), Manganês total (98,9%) e Turbidez (66,9%). Estes valores são superiores ao que foi registrado nas chuvas de 2019 e 2020. Quanto aos parâmetros sanitários, *Escherichia coli* (71,9%) e Fósforo total (62,4%), ambos apontaram aumento, mantendo-se superior ao *baseline*. Já para os demais parâmetros, apenas Chumbo apresentou violação (21,9%). Estes resultados indicam que, mesmo nas áreas não afetadas pelo rejeito, alguns parâmetros apresentam valores acima do VMP, evidenciado outras possíveis contribuições para o aumento destes analitos no meio. Nessa região a montante, tais violações podem refletir as atividades de mineração da porção mais alta da bacia e a constituição geológica regional no alto rio Paraopeba. Ressalta-se que esta região, representada pelo ponto PT-52, como pode ser visto na Tabela 6.3-8 apresentou elevados percentuais de violação para os parâmetros majoritários, com violações acima de 90% para o Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido e Manganês, sendo a máxima registrada para estes dois últimos parâmetros citados igual a 99%.

Na região do ribeirão Ferro-Carvão de acordo com a Tabela 6.3-1, todos os parâmetros majoritários violaram os padrões estabelecidos no período de chuva 2021/2022. O Alumínio dissolvido apresentou percentual de violação de 53,8%, Ferro dissolvido, 9,4% (valor inferior ao *baseline* de chuva Vale de 10,8%) e para a Turbidez, o percentual de 53%, valor este sete vezes maior que o *baseline* do parâmetro. No entanto, todos esses parâmetros apresentaram comportamento de redução se comparados com o último período de chuva. Para o Manganês total, observa-se violação para todas as amostras, ou seja, 100% dos resultados acima do VMP de 0,1 mg/L, o que é semelhante ao *baseline* de chuva da região (99,3%). Em termos históricos, observa-se que em todos os pontos monitorados nesta região, o percentual de violação para Manganês total sempre foi elevado, sendo para o período de chuva/2019, violações de 100% das amostras, chuva/2020, 98,1%, chuva/2021 98,7% e para chuva/2022 100%.

Cabe destacar que esta região, monitorada pelos pontos FEI-COR-01; FEI-COR-03-AS; FEI-COR-07 (*baseline* VALE) e PT12, como pode ser visto pela Tabela 6.3-8, 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. Atualmente, seu leito ainda se encontra assoreado, com fluxo reduzido ou nulo de água, além das interferências imediatas das obras de intervenção, de escavações e de reconstrução do canal fluvial.

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. Objetiva-se com as obras de regularização de vazão ganhos com a retenção de sedimentos nas barreiras hidráulicas,

dique de contenção e barreiras de estabilização de calha fazendo com que o ribeirão Ferro-Carvão apresente melhorias em suas águas e em sua morfologia ao longo do tempo. Isto pode ser evidenciado pelos menores percentuais de violação nos anos posteriores a 2019, em especial, para o Ferro dissolvido e Turbidez.

Em relação aos demais parâmetros, no período de chuva de 2021/2022, na região do ribeirão Ferro-Carvão, também foram registradas violações para Oxigênio dissolvido (29,8%), pH (0,9%) Sólidos Suspensos totais (20,5%), Fósforo total (25,9%), *Escherichia coli* (6,7%), DBO (0,9%), Coliformes Termotolerantes (4,7%) e Chumbo total (4,3%), com percentuais superiores aos percentuais de violação para condição do *baseline* de chuva. Neste contexto, apenas os Coliformes Termotolerantes, DBO e *Escherichia coli* apresentaram um comportamento de redução progressiva ao longo das chuvas de 2019, 2020 e 2021.

Após a região do ribeirão Ferro-Carvão, a Região 1A, que pode ser observada pela 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, mais sujeita a alterações, especialmente quando sob influência dos períodos chuvosos e das intervenções de recuperação que ainda estão ativas nesse trecho fluvial. Para os parâmetros físico-químicos, o pH (1,7%) e Sólidos Suspensos totais (73,8%), apresentaram aumento em relação ao ano anterior, já Cor Verdadeira (4,6%) e Oxigênio dissolvido, se percebe redução das violações. Para os parâmetros de cunho sanitário, é possível observar um decréscimo apenas para DBO (0,4%), já para Coliformes Termotolerantes (69,0%), *Escherichia coli* (87,6%), e Fósforo total (60,7%), nota-se um aumento das violações, porém sem ultrapassar o *baseline,* com exceção para Fósforo total que se manteve acima dos padrões.

No período de chuva 2021/2022, verificou-se que a região 1A apresentou, para os marcadores principais, percentuais de violação mais elevados que a região Montante. As inconformidades atingiram para o Ferro dissolvido, 96,5% para o Alumínio dissolvido, 99,7% para o Manganês total e 69,7% para a Turbidez. Nesta condição, os percentuais foram superiores aos respectivos *baselines* de estiagem da região.

Além dos parâmetros majoritários, na região 1A também ocorreram violações para o Chumbo total (22,1%), Cobre dissolvido (0,1%), Cromo total (0,7%) e Níquel total (0,3%). Sendo a máxima observada no PT-13.

Nos pontos da Região 1A, com exceção do PT-01, foram verificadas violações de *Escherichia coli*, entre 67% e 96%, sendo a máxima verificada no PT-02. Violações de Ferro em sua parcela dissolvida, foram observadas nos pontos PT-09 e PT-02, sendo o máximo constatado 99%.

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, PT-04 e PT-15 (VALE) é importante considerar a marcante influência urbana, 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 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, principalmente nos períodos chuvosos.

Assim, no período de chuva 2021/2022, na Região 1B, em relação aos parâmetros majoritários, os percentuais de violação para Ferro dissolvido (98,1%), Manganês total (99,5%), Alumínio dissolvido (97,6%) e Turbidez (72,0%) superaram seus respectivos *baseline*. Para os parâmetros de cunho sanitário, houve registro de violações para *Escherichia coli* (96,1%), Fósforo total (76,8%), DBO (1,0%) e, para os físico-químicos, como OD (6,8%), pH (4,3%), Cor verdadeira (5,3%) e Sólidos Suspensos totais (71,0%) que foi o único parâmetro a apresentar aumento em relação aos anos anteriores e superando seu *baseline*. Já para os outros parâmetros como, Chumbo total (18,8%) e Cromo total (0,5%), ambos apresentaram aumento, estando abaixo do *baseline*. Considerando os pontos dessa região, como pode ser observado na Tabela 6.3-4, nota-se que o Fósforo total foi violado em maior amplitude no PT-03 e PT-04. Para a *Escherichia coli*, 100% das amostras ultrapassaram os limites legais no PT-04, PT-03 e PT-48.

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 se comparados àqueles registrados nas regiões anteriormente analisadas para os parâmetros físico-químicos, Cor Verdadeira (4,5%), Oxigênio dissolvido (6,8%), pH (1,9%), com exceção para o analito Sólidos Suspensos totais que se elevou em (72,1%).

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 contribuição da mesma nesse trecho.

Em termos dos parâmetros majoritários, foram registradas inconformidades para Alumínio dissolvido (89,7%), Ferro dissolvido (97,7%), Manganês total (97,5%) e Turbidez (72,6%). Para esses mesmos parâmetros, os percentuais de violação se apresentaram mais elevados que os valores de *baseline* de chuva da região.

Considerando os pontos monitorados na região 2A, observa-se que o PT-53 e PT-43 apresentaram violação do parâmetro Alumínio dissolvido em 100%, como verificado na Tabela 6.3-5. Os demais pontos também apresentaram violações, contanto, em menor escala, mas ainda sendo consideradas porcentagens elevadas de violação. A recorrência de violações do Alumínio dissolvido pode ser explicada pelo fato da região se encontrar em meio à formação

geológica do Complexo Bambuí, rica em Alumínio. Para o Manganês total foram apontadas violações que variaram de 74% a 100%.

Para a região 2B, Tabela 6.3-6, a qual compreende os pontos de monitoramento PT20, PT28 e PT21 (VALE), que se localizam no interior do reservatório da UHE Retiro Baixo, no período de chuva 2021/2022, foi registrado aumento da violação para os parâmetros físico-químicos apenas para o pH (1,4%) e para Sólidos Suspensos totais (7,2%). Já para Cor verdadeira (1,6%) e Oxigênio dissolvido (2,0%), nota-se uma pequena redução. Em relação aos majoritários, o Alumínio e Ferro dissolvidos ultrapassaram o limite de *baseline* para violações, quantificando para ambos um percentual de 85,3% e 82,5%, respectivamente. Já para Manganês total (9,4%), apesar de apresentar aumento, não ultrapassou o *baseline* e, para Turbidez, percebe-se uma redução (16,2%). Para os parâmetros sanitários, nota-se aumento para DBO (0,6%), *Escherichia coli* (2,9%) e Fósforo total (30,1%). Outros, como Chumbo total (0,2%) e Zinco total (0,2%), também apresentaram um pequeno aumento.

Importante destacar que 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.

A região 2C, Tabela 6.3-8, 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 mais baixos que os das demais regiões. O Alumínio dissolvido violou em 82,9%, Manganês total em 5,3%, Ferro dissolvido em 75,5%, sendo que todos apresentaram aumento. Já Turbidez, percebe-se uma pequena redução de 13,6%.

Além destes, foi verificada redução das violações para o Oxigênio dissolvido (3,5%) e Cor verdadeira (2,3%) e aumento para pH (6,4%) e Sólidos Suspensos totais (2,3%).

Nota-se um aumento de violação para todos os parâmetros traços ao longo dos períodos sazonais de chuva 2020, 2021 e 2022, com destaque para Chumbo total (0,9%) e Zinco total (0,3%). Já para os parâmetros sanitários, verifica-se redução das violações para Fósforo total (5,8%) e para *Escherichia coli* (0,3%).

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 01/2008. 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 chuva/2019,

chuva/2020 e chuva 2021/2022. Os mapas para cada mês, compreendido entre janeiro/2019 e março/2022, são apresentados no ANEXO VI-B.

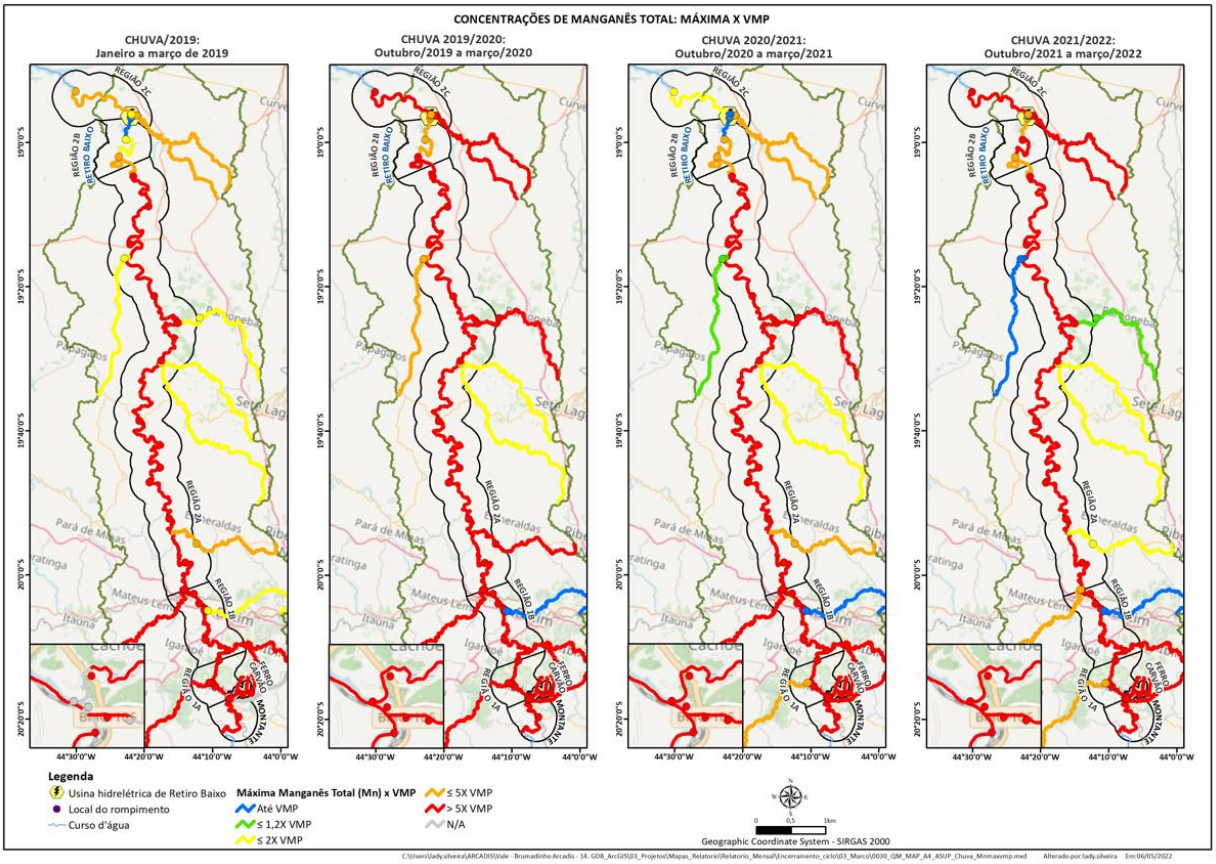
Verifica-se que, após o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, nos primeiros meses subsequentes, os metais marcadores apresentaram substancial comportamento de violações aos padrões em função dos impactos do citado evento e tendência de aumento em função das precipitações registradas na época.

Nos referidos mapas temáticos, registra-se visualmente a síntese das discussões anteriormente realizadas. Assim, verifica-se que após o rompimento das barragens B1, B4 e B4-A, nos primeiros meses subsequentes, os metais marcadores apresentaram teores superiores às condições de *baseline*, em função dos impactos do evento e com tendência de aumento em função das precipitações. Ao longo dos meses, especialmente com o avanço do período de estiagem de 2019, com consequente redução de arraste hidráulico das vazões do rio Paraopeba, as respectivas concentrações se atenuaram no tempo e no espaço, aproximando-se às condições naturais do corpo d'água. Com o retorno das chuvas em novembro/2019 e as intensas condições pluviométricas observadas, especialmente, nos meses de dezembro e janeiro/2020, ocorreram alterações mais pronunciadas, principalmente a partir da Região 1B, e foram sendo minimizadas a partir do início do período de estiagem em abril/2020, mantendo-se esta tendência de atenuação até setembro do mesmo ano.

Já em outubro/2020, novamente com o retorno de mais um período chuvoso, observou-se, de maneira geral, através destes mapas temáticos, um comportamento ainda próximo aos meses de estiagem. Porém, a partir de novembro de 2020, com a retomada do aumento da pluviosidade e das alterações de nível e vazão, já se percebeu uma efetiva alteração nas concentrações destes elementos na bacia.

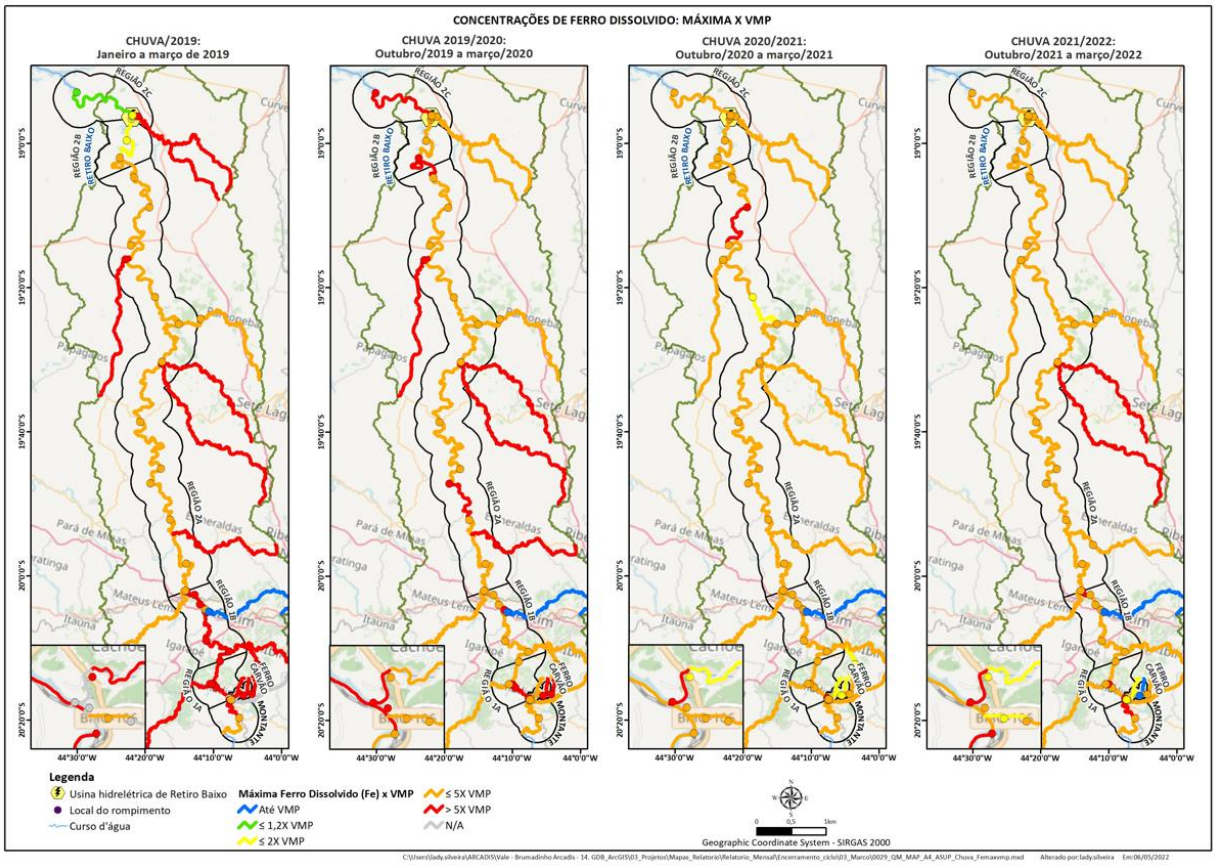
Em relação ao retorno do período chuvoso iniciado em outubro/2021 a março/2022, foram observadas intensas chuvas, especialmente, no mês de janeiro/2022, em que ocorreram alterações mais pronunciadas e foram gradualmente sendo atenuadas em função do início do período de estiagem.

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



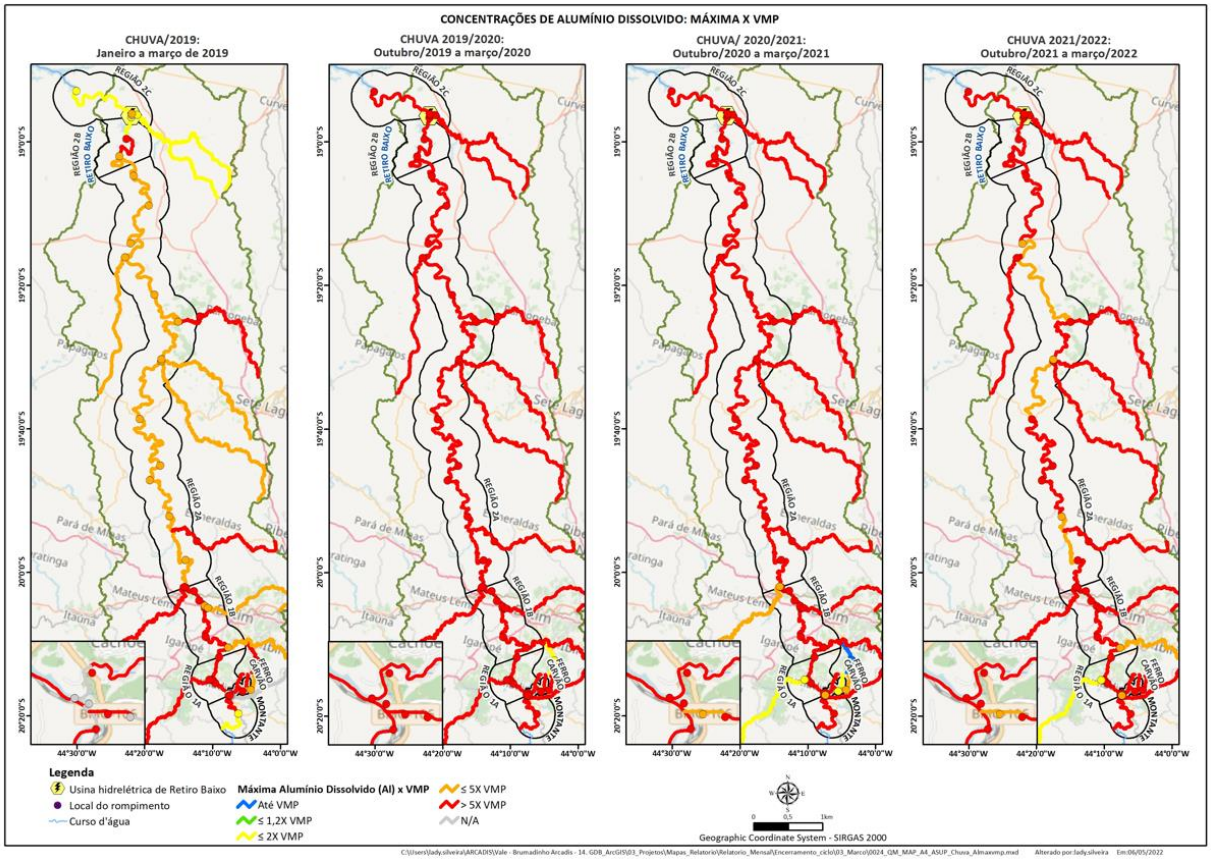
Para o Manganês total (Figura 6.3.1), os mapas temáticos permitem, em termos de valores máximos para as concentrações, visualizar o comportamento de afastamento aos *baselines* naturalmente ocorrentes nos períodos chuvosos ao longo do espaço. Dessa mesma maneira, é possível notar tendências de aproximação em relação aos anos anteriores com o período de chuva atual. Se percebe uma atenuação das violações na região 1A para o período de chuva de 2020/2021 e 2021/2022. Já para as regiões 1B e 2A, nota-se um comportamento de proximidade com exceção dos tributários no qual é possível perceber redução das violações na região. No entanto, para a região 2B e 2C no ano de 2019 e 2020/2021, manteve-se com o mesmo comportamento. Já em 2019/2020 e 2021/2022, nota-se aumento, reflexo das chuvas intensas que ocorreram neste período.

Figura 6.3.2: Mapa de comparação das concentrações máximas de Fe dissolvido com o VMP.



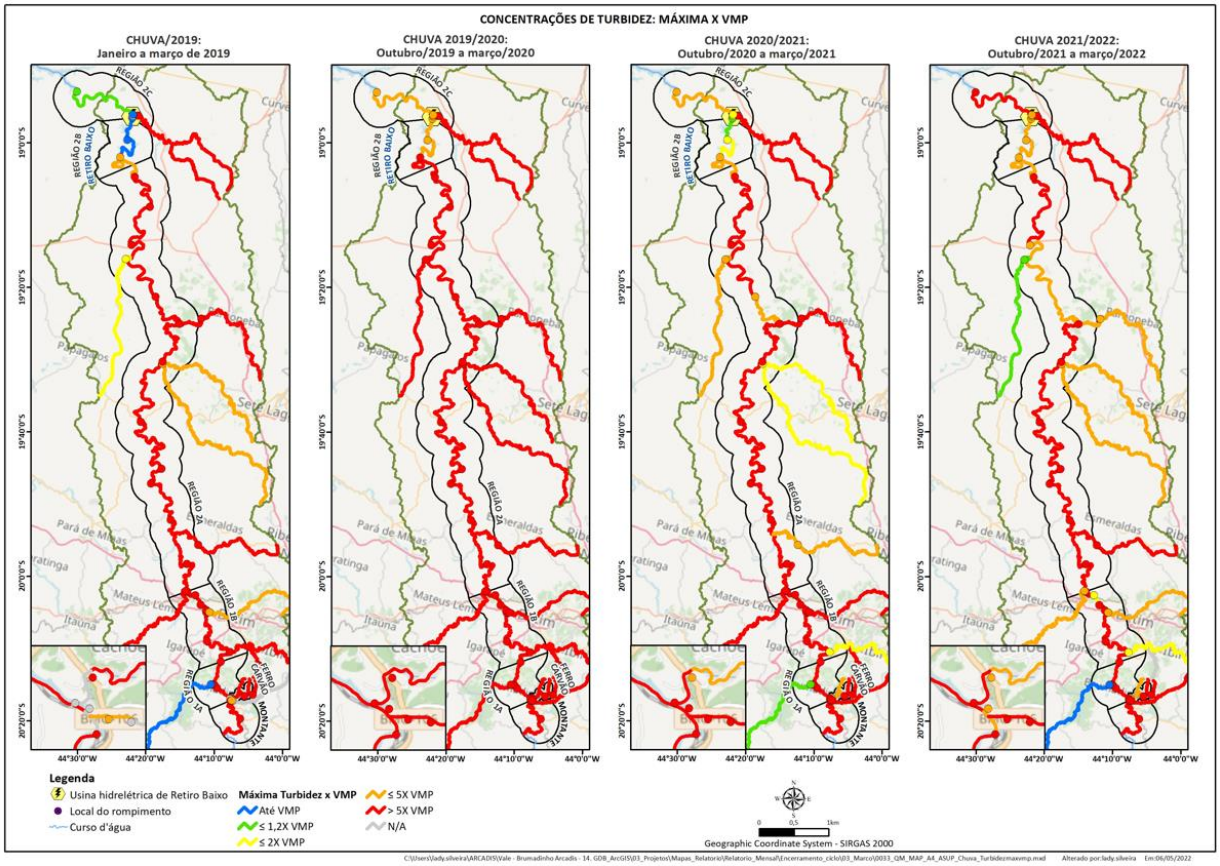
Em relação aos valores de Ferro dissolvido (6.3.1.2), comparando-se os períodos de chuva dos anos de 2020/2021 e 2021/2022, é notória a manutenção dos valores reportados para esse parâmetro em grande parte do curso d'água, com exceção dos tributários ribeirão São João e ribeirão dos Macacos que apresentaram um aumento em 2021/2022 se comparados com 2020/2021. Registros acima do VMP se estendem por todo rio Paraopeba para o período de chuva analisado, no entanto, percebe-se comportamento de redução se comparado com 2019 e 2019/2020.

Figura 6.3.3: Mapa de comparação das concentrações máximas de Al dissolvido com o VMP.



Para o Alumínio dissolvido (Figura 6.3.3), observa-se manutenção em grande parte das regiões monitoradas para o período de chuva atual 2021/2022. A região 1A, apresenta redução se comparado com o ano do rompimento 2019. Para a região 2A é possível um pequeno declínio em alguns trechos no início e final da região. De modo geral, no período de chuva recente, as maiores violações para o Alumínio dissolvido se centralizaram entre os trechos de Montante e 2A, indicando registros de até cinco vez mais o VMP, em grande parte da extensão do rio. Conforme indicado no tópico anterior, as violações observadas na Região Montante refletem as atividades de mineração da porção mais alta da bacia e a constituição geológica regional no alto rio Paraopeba. De forma similar, a Região 2A configura uma área de condições geológicas regionais com riqueza natural de compostos contendo alumínio.

Figura 6.3.4: Mapa de comparação dos teores máximos de Turbidez com o VMP.



Por fim, em relação aos valores analisados para Turbidez (Figura 6.3.4), nota-se comportamento de redução para a região 1A, mantendo-se abaixo do VMP e redução para o tributário rio Pardo localizado na região 2A em 2021/2022. As demais regiões apresentaram manutenção das concentrações se comparados com os períodos de chuva anteriores com exceção dos tributários ribeirão dos macacos e ribeirão São João que se observa aumento em 2021/2022 se comprado com 2020/2021.

6.4. Considerações

No período de chuva 2021/2022, observa-se um maior número de parâmetros violados em relação aos períodos de chuva anteriores para grande parte das regiões. Neste contexto, têm-se um maior quantitativo de violações para os metais majoritários, seguido dos físico-químicos, parâmetros sanitários e, por fim, metais traços. Vale apontar, ademais, que violações mais recorrentes ocorreram nas regiões mais afetadas (1A, 1B e início da 2A), além de serem percebidas, também, na Região Montante e tributários.

Em termos dos parâmetros sanitários, notam-se aumento das violações de Fósforo total em todas as regiões, com exceção da região 2C. Para *Escherichia coli,* região Montante, 1A, 1B e 2B. Já para os Coliformes Termotolerantes, apenas na região 1A e para DBO nas regiões 2A e 2B.

Quanto aos metais traços, observou-se que, no período de chuva/2022, foram registradas violações para os parâmetros relacionados aos seguintes analitos: Chumbo total (Região Montante, 1A, 1B, 2A e 2C); Cobre dissolvido (Região 1A, 2A e 2B); Cromo total (Região 1A e 1B); Níquel (Região 1A) e Zinco total (Região 2B e 2C).

Considerando a avaliação do último período de estiagem/2021, nota-se uma redução nas concentrações dos metais traçadores se comparados aos anos de 2019 e 2021, o que evidencia que existe uma progressiva redução das concentrações, indicando registros próximos ao *baseline* do período de estiagem. Em contrapartida essa avaliação, no que tange ao período de chuva em análise 2021/2022, apresentou manutenção e aumento pouco expressivo nas concentrações dos metais marcadores para algumas regiões quando são comparados os 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.

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022 bem como comparar com os resultados históricos dos pontos de monitoramento do Igam.

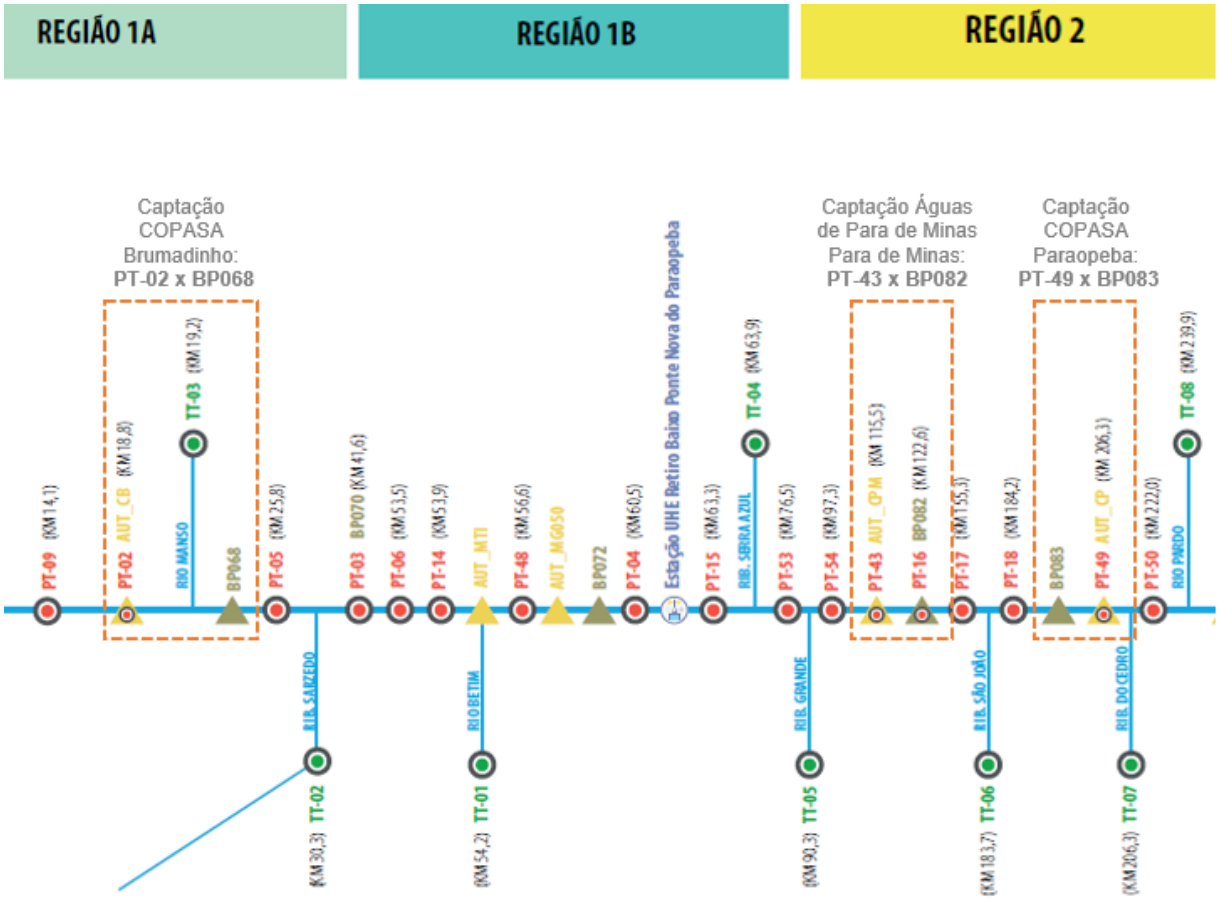
7.2. Metodologia

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 01/2008.

Os resultados de monitoramento foram analisados, considerando os teores registrados no período de chuva/2019 (janeiro a março/2019), chuva 2019/2020 (outubro/2019 a março/2020), chuva 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021) e chuva 2021/2022 (outubro/2021 a março/2022). Em seguida, os percentuais de violação foram verificados ao longo dos quatro períodos sazonais de chuva mencionados. Os resultados dos períodos de estiagem monitorados, podem ser consultados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2021 (ARCADIS, 2021d).

No ANEXO VII estão apresentados gráficos com a comparação dos resultados máximos mensais dos períodos de chuva, 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.

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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022 relativos a este trecho de captação (ponto Vale PT-02 e ponto Igam BP068).

Na comparação entre os períodos de chuva, em linhas gerais, foi possível observar valores mais elevados nos meses referentes ao período de chuva/2019, principalmente no mês de janeiro/2019, justificado pela 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 exceção dos valores extremos identificados em 2019, nota-se incremento das concentrações e prevalência de maiores resultados no atual período de análise, chuva 2021/2022. Importante ressaltar que tal condição também foi verificada no ponto PT-52 localizado na região de Montante não afetada e por isso pode estar atrelada a condições de solubilização inerentes à própria bacia.

Para Manganês total, as concentrações registradas no período de chuva 2021/2022 mantiveram-se próximas dos resultados do período anterior, chuva 2020/2021, e mais reduzidas do que nos períodos de chuva/2019 e chuva 2019/2020. Ainda assim, a maioria dos resultados superaram o VMP (0,1 mg/L), condição também verificada ao se analisar o *baseline*. As concentrações máximas mensais deste analito, no período de chuva/2019 variaram entre 23 mg/L e 126 mg/L, no período de chuva 2019/2020 variaram entre 0,61 mg/L e 6,55 mg/L, enquanto nos períodos de chuva 2020/2021 e 2021/2022 variaram entre 0,69 mg/L e 4,53 mg/L e 0,73 mg/L e 5,77 mg/L, respectivamente. Para a condição do *baseline* a concentração máxima deste analito é 1,69 mg/L. Em termos de inconformidades, nota-se uma breve redução do percentual se comparado ao período de chuva/2019, quando 100% das amostras violaram o limite legal. Nos demais períodos, os percentuais foram equivalentes a 99,4% (chuva

2019/2020), 95,1% (chuva 2020/2021) e 99,4% (chuva 2021/2022), e para o *baseline* de chuva equivalente a 97,3%, valor este compatível com os resultados apresentados.

Já para o parâmetro Ferro dissolvido, com exceção dos valores mais extremos identificados no período de chuva/2019 (até 50,00 mg/L no mês de janeiro), logo após o rompimento, e no mês de janeiro/2020 (até 10,80 mg/L), quando foram registrados elevados índices pluviométricos na região, observou-se prevalência de maiores concentrações e violações no atual período de chuva analisado. As concentrações máximas mensais deste analito nos períodos de chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 variaram entre, respectivamente: 0,83 mg/L e 10,80 mg/L, 1,0 mg/L e 1,18 mg/L e 1,03 e 1,51 mg/L. Destaca-se que a concentração máxima para o *baseline* de chuva neste ponto é equivalente a 0,97 mg/L, valor este majoritariamente inferior ao máximo registrado nos meses monitorados. Em termos de percentual de violação, houve incremento de inconformidades ao longo dos períodos de chuva: chuva/2019 (79,4%), chuva 2019/2020 (92,7%), chuva 2020/2021 (92,6%) e chuva 2021/2021 (99,4%). Em todos os casos, os percentuais de violação registrados pós-rompimento foram substancialmente superiores ao *baseline* (29,7%).

Da mesma forma, quanto ao Alumínio dissolvido, notou-se predomínio de concentrações mais elevadas no atual período de análise, com exceção dos valores extremos registrados no período de chuva/2019 (até 6,80 mg/L no mês de janeiro) e no mês de janeiro/2020 (até 3,34 mg/L). Nos dois últimos períodos de chuva avaliados, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022, as concentrações de Alumínio dissolvido apresentaram comportamento aproximado, com máximos mensais variando entre 0,59 mg/L e 1,33 mg/L e 0,74 mg/L e 2,16 mg/L, respectivamente, sendo a maioria dos resultados superiores ao VMP (0,1 mg/L). Logo, em termos do registro de inconformidades, em relação aos períodos de chuva anteriores, o percentual de violação do atual período de análise, chuva 2021/2022, também foi mais elevado, conforme indicado a seguir: chuva/2019 (84,1%), chuva 2019/2020 (62,4%), chuva 2020/2021 (87,7%) e chuva 2021/2022 (97,7%). Vale destacar, ainda, que o *baseline* de estiagem indica 30% de violações para Alumínio dissolvido, valor este bem inferior aos percentuais observados pós rompimento.

Por outro lado, para Turbidez, notou-se redução dos teores entre os períodos sazonais de chuva sucessivos, bem como comportamento mais próximo entre os períodos de chuva 2020/2021 e 2021/2022, de forma semelhante ao observado para o parâmetro Manganês total. Apesar de a maioria dos resultados permaneceram superiores ao VMP (100 NTU), também houve redução dos percentuais de violação para os períodos mencionados. Nos períodos de chuva analisados, os teores máximos mensais de Turbidez variaram entre 906 NTU e 10.220 NTU (chuva/2019), 60 NTU e 1.200 NTU (chuva 2019/2020), 160 NTU e 1.574 NTU (chuva 2020/2021) e entre 289 NTU e 1.868 NTU (chuva 2021/2022). Destaca-se que o teor máximo de Turbidez na condição de *baseline* para o período chuvoso é de 596 NTU. Em termos de violação, os percentuais foram equivalentes a 100% (chuva/2019), 79% (chuva 2019/2020), 66,5% (chuva 2020/2021) e 67,3% (chuva 2020/2021), em todos os casos, ainda superiores à condição do *baseline* (40,5%).

Em relação aos parâmetros traços, nota-se incremento dos percentuais de violação no atual período de análise se comparado ao período anterior de chuva 2020/2021 para Chumbo total (de 0,6% para 21,2%), para Cromo total (de 0% para 1,2%) e Níquel total (0 para 0,6%). Cabe destacar que esses incrementos podem estar atrelados a ocorrência de chuvas mais expressivas no período de 2021/2022, entretanto em períodos pretéritos, incluindo o pré-rompimento com exceção de Níquel total, já haviam sido registradas violações para estes parâmetros em percentual próximo ou superior. Para os demais (Arsênio total, Bário total, Cádmio total, Cobalto total, Cobre dissolvido, Mercúrio total, Selênio total e Zinco total), não houve registro de violações no atual período avaliado.

Para os parâmetros físico-químicos (cor verdadeira, oxigênio dissolvido, pH, sólidos dissolvidos totais e sólidos suspensos totais), ocorreram violações pontuais para cor verdadeira (4,7%) e oxigênio dissolvido (0,6%) no atual período de análise. De forma mais expressiva, destaca-se o percentual de violação de Sólidos Suspensos Totais, correspondente a 74,1%, superior a condição de *baseline* (40,5%), mas próximo dos percentuais já registrados nos demais períodos monitorados.

Para os parâmetros associados à origem sanitária, no período de chuva 2021/2022 somente ocorreu violação para *Escherichia coli* (95,9%) e Fósforo total (61,4%). Para *E. coli*, este percentual de violação foi, em geral, inferior ao registrado nos períodos anteriores, incluindo o *baseline* (100%). Já para Fósforo total, o percentual para o atual período de análise foi superior se comparado ao período de chuva 2020/2021 (55,6%) e ao *baseline* (21,6%), mas inferior aos percentuais dos períodos de chuva 2019 (88,9%) e chuva 2019/2020 (70,1%).

Nesse contexto, cabe destacar, a proximidade das condições da qualidade da água no período de chuva 2021/2022 em relação período de chuva 2020/2021, 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 chuva mais próximos a ocorrência do rompimento. Especificamente para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, os resultados apresentaram-se mais elevados no período de chuva 2021/2022 e, com isso, maiores percentuais de violação foram registrados.

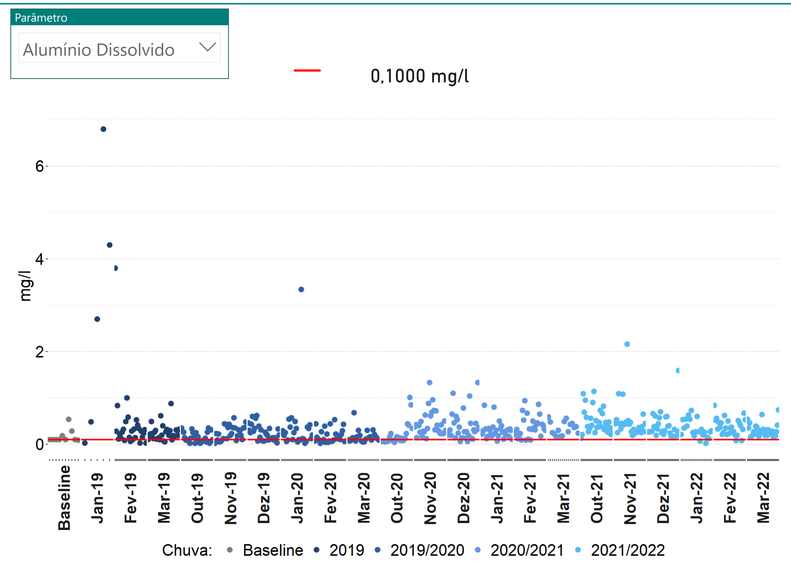
Comparativamente, em relação aos períodos de estiagem monitorados, para o PT-02, notou-se o predomínio de melhores condições da qualidade da água no período de estiagem/2021 em relação aos demais períodos de estiagem. Os resultados mais elevados ocorreram nos primeiros meses da estiagem/2019, reduzindo progressivamente nos períodos de estiagem seguintes. Em termos de violação, destaca-se a menor recorrência de resultados acima do VMP nos períodos de estiagem se comparados aos períodos chuvosos, com condições inferiores ou mais próximas da condição do *baseline.* Maiores detalhamentos sobre os resultados dos períodos de estiagem são apresentados no Relatório de Fechamento de Ciclo referente ao período de 25/01/2019 a 30/09/2021 (ARCADIS, 2021d).

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

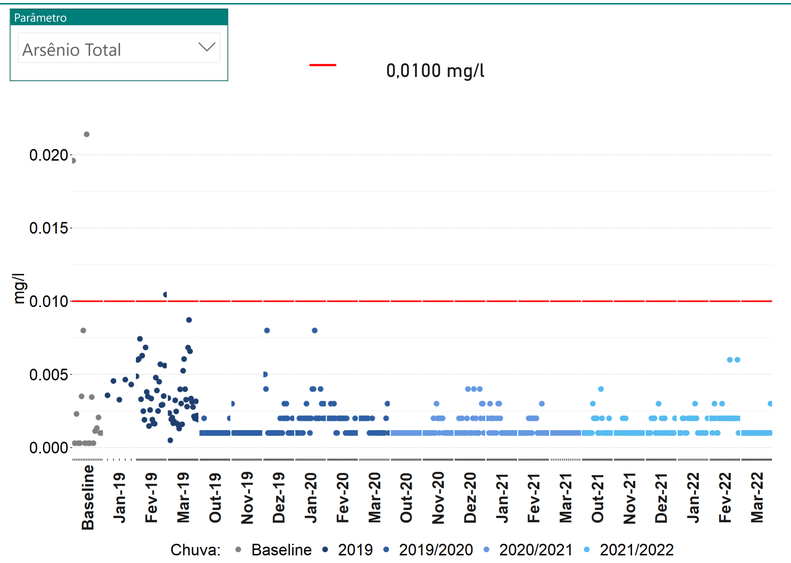
Tabela 7.3.1-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP068) e da Vale (PT-02) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

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

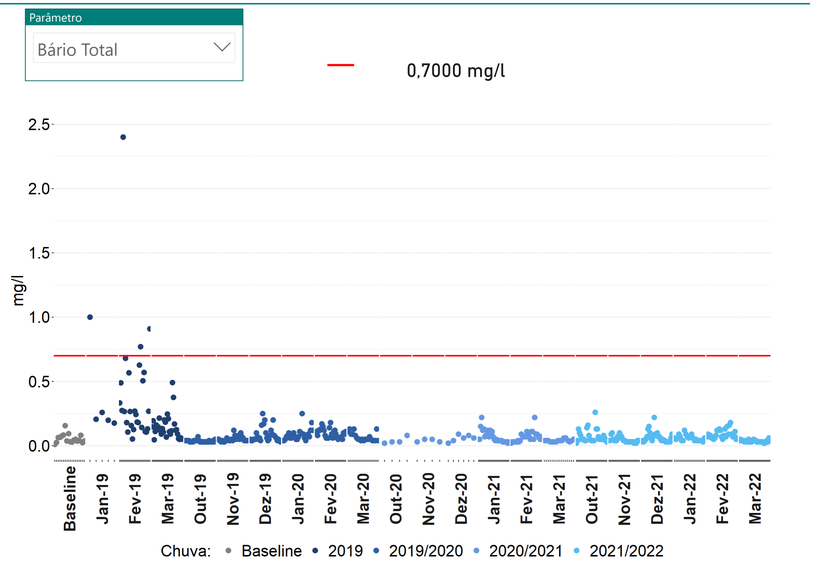
Parâmetro: Alumínio Dissolvido



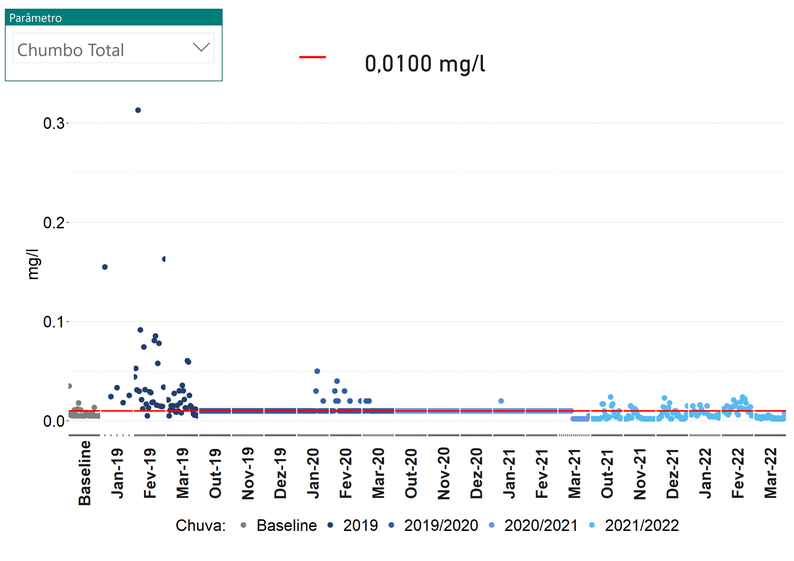
Parâmetro: Arsênio Total



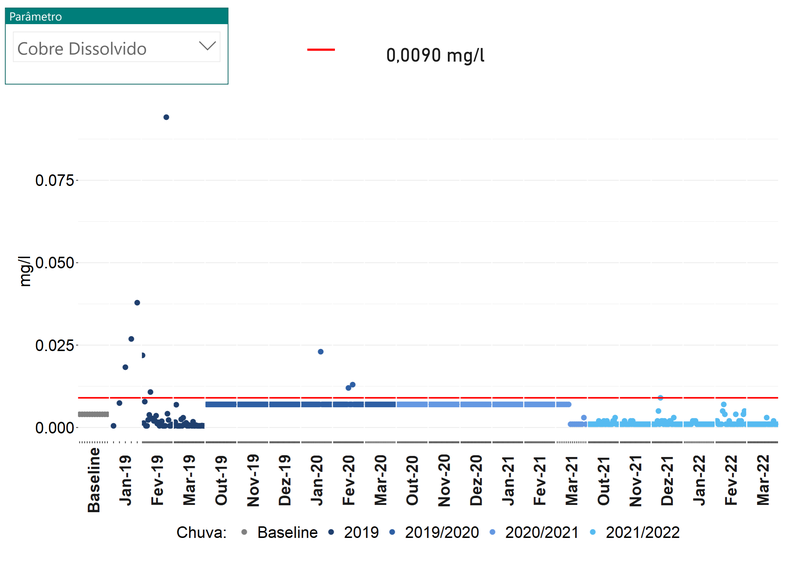
Parâmetro: Bário Total



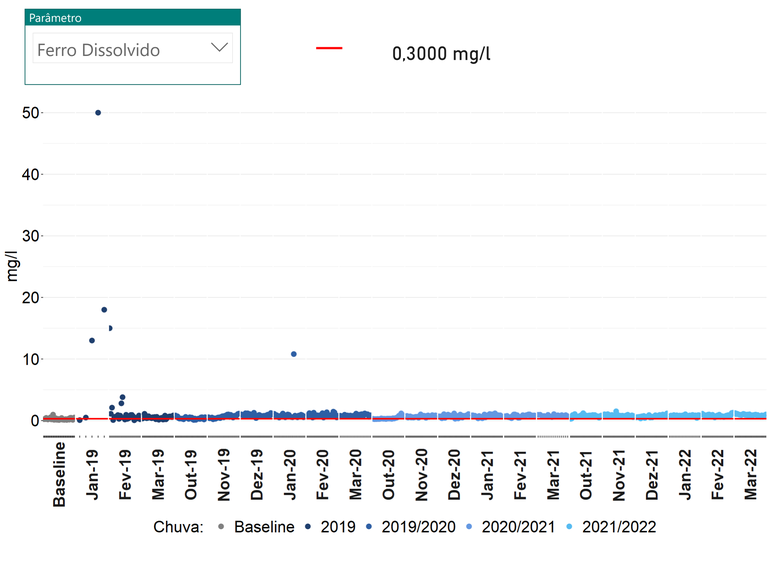
Parâmetro: Chumbo Total



Parâmetro: Cobre Dissolvido

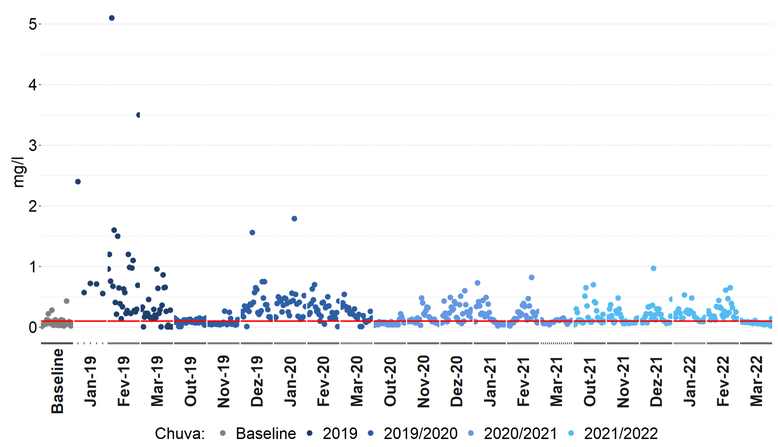


Parâmetro: Ferro Dissolvido

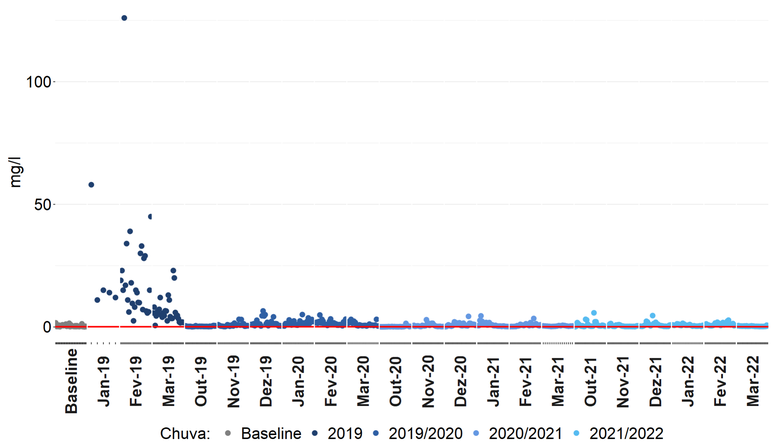


Análise do período Chuva - Baseline IGAM(BP068) e Vale(PT-02)

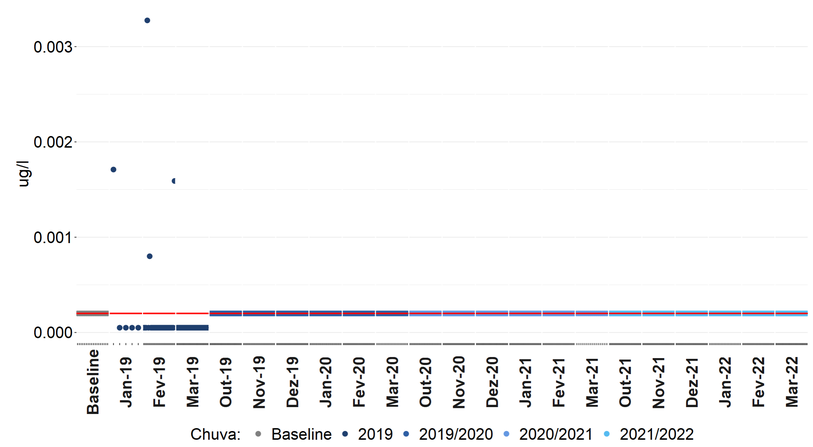
Parâmetro: Fósforo Total — 0,1000 mg/l



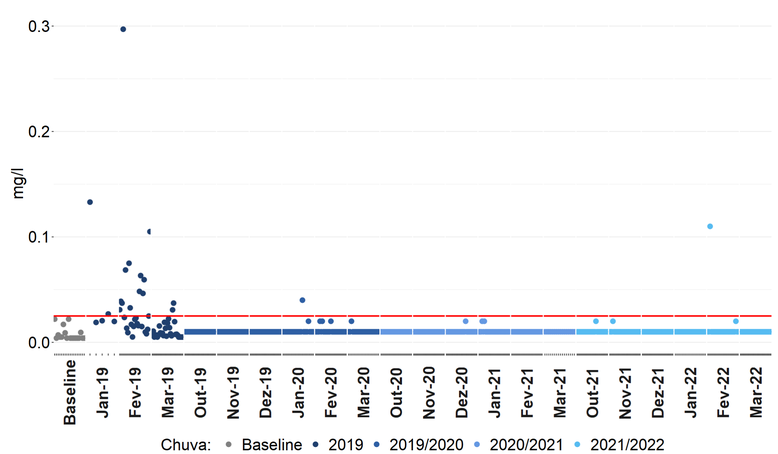
Parâmetro: Manganês Total — 0,1000 mg/l



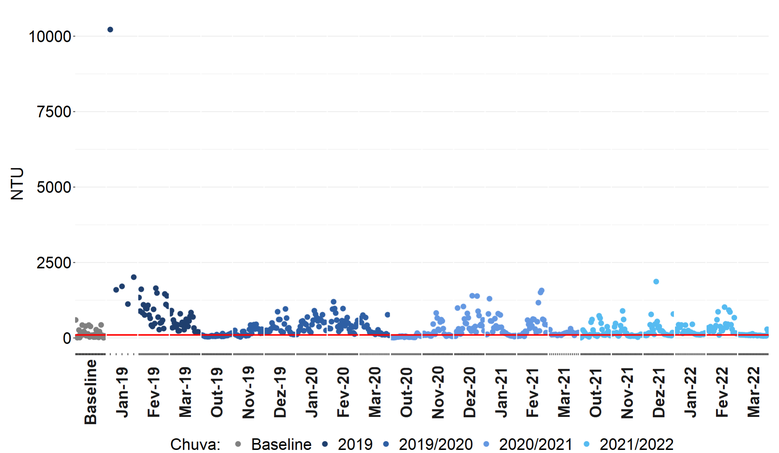
Parâmetro: Mercúrio Total — 0,0002 mg/l



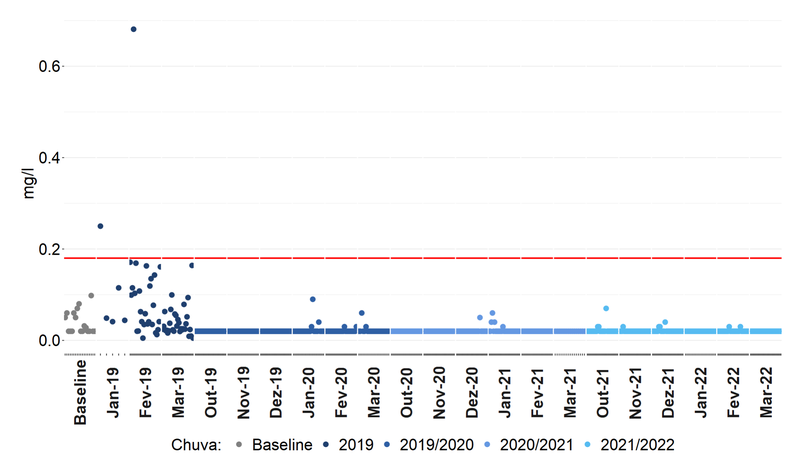
Parâmetro: Níquel Total — 0,0250 mg/l



Parâmetro: Turbidez — 100,0000 NTU



Parâmetro: Zinco Total — 0,1800 mg/l



BP068 e PT-02

-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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**
Físico-químico															
Cor verdadeira	30	11	36,7 %	63	18	↓ 28,6 %	165	69	↑ 41,8 %	88	17	↓ 19,3 %	170	8	↓ 4,7 %
Oxigênio dissolvido	37	0	0,0 %	62	14	↑ 22,6 %	164	26	↓ 15,9 %	162	1	↓ 0,6 %	170	1	↓ 0,6 %
pH	37	0	0,0 %	63	1	↑ 1,6 %	164	0	↓ 0,0 %	162	3	↑ 1,9 %	171	0	↓ 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	32	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	37	15	40,5 %	63	63	↑ 100,0 %	165	115	↓ 69,7 %	162	99	↓ 61,1 %	170	126	↑ 74,1 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	10	3	30,0 %	63	53	↑ 84,1 %	165	103	↓ 62,4 %	162	142	↑ 87,7 %	171	167	↑ 97,7 %
Ferro Dissolvido	37	11	29,7 %	63	50	↑ 79,4 %	165	153	↑ 92,7 %	162	150	↓ 92,6 %	171	170	↑ 99,4 %
Manganês Total	37	36	97,3 %	63	63	↑ 100,0 %	165	164	↓ 99,4 %	162	154	↓ 95,1 %	171	170	↑ 99,4 %
Turbidez	37	15	40,5 %	63	63	↑ 100,0 %	162	128	↓ 79,0 %	161	107	↓ 66,5 %	171	115	↑ 67,3 %
Outros															
Alumínio Total	-	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Carbono orgânico total	-	0	0,0 %	53	0	— 0,0 %	164	0	— 0,0 %	88	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %
Cianeto livre	9	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	88	1	↑ 1,1 %	168	0	↓ 0,0 %
Cloreto	37	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	88	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Clorofila-a	24	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	88	0	— 0,0 %	169	0	— 0,0 %
Condutividade elétrica	37	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	164	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
DBO	37	0	0,0 %	63	8	↑ 12,7 %	165	3	↓ 1,8 %	88	0	↓ 0,0 %	170	0	— 0,0 %
Densidade de Cianobactérias	-	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	45	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
DQO	29	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	9	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %	12	0	— 0,0 %
Escherichia coli	12	12	100,0 %	14	13	↓ 92,9 %	136	135	↑ 99,3 %	88	86	↓ 97,7 %	170	163	↓ 95,9 %
Ferro Total	-	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Fosfato (como P)	-	0	0,0 %	-	0	— 0,0 %	52	0	— 0,0 %	1	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	37	8	21,6 %	63	56	↑ 88,9 %	164	115	↓ 70,1 %	162	90	↓ 55,6 %	171	105	↑ 61,4 %
Manganês Dissolvido	-	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Nitrato (como N)	-	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	88	0	— 0,0 %	170	0	— 0,0 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	88	0	— 0,0 %	170	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	37	0	0,0 %	63	2	↑ 3,2 %	165	0	↓ 0,0 %	88	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Nitrogênio orgânico	31	0	0,0 %	53	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	88	0	— 0,0 %	167	0	— 0,0 %
Sólidos Totais	37	0	0,0 %	63	0	— 0,0 %	165	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	170	0	— 0,0 %
Sulfeto de Hidrogênio	-	0	0,0 %	63	4	↑ 6,3 %	137	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Temperatura	37	0	0,0 %	1	0	— 0,0 %	164	0	— 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	18	2	11,1 %	63	1	↓ 1,6 %	165	0	↓ 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Bário Total	18	0	0,0 %	63	4	↑ 6,3 %	165	0	↓ 0,0 %	88	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Cádmio Total	37	1	2,7 %	63	10	↑ 15,9 %	165	1	↓ 0,6 %	162	0	↓ 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Chumbo Total	30	6	20,0 %	63	53	↑ 84,1 %	165	12	↓ 7,3 %	162	1	↓ 0,6 %	171	36	↑ 21,1 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	63	11	↑ 17,5 %	165	0	↓ 0,0 %	88	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	12	0	0,0 %	63	6	↑ 9,5 %	165	3	↓ 1,8 %	162	0	↓ 0,0 %	170	0	— 0,0 %
Cromo Total	24	1	4,2 %	63	4	↑ 6,3 %	165	1	↓ 0,6 %	162	0	↓ 0,0 %	171	2	↑ 1,2 %
Mercúrio Total	18	0	0,0 %	63	4	↑ 6,3 %	165	0	↓ 0,0 %	162	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %
Níquel Total	18	0	0,0 %	63	16	↑ 25,4 %	165	1	↓ 0,6 %	162	0	↓ 0,0 %	171	1	↑ 0,6 %
Selênio Total	18	0	0,0 %	63	2	↑ 3,2 %	44	0	↓ 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Zinco Total	18	0	0,0 %	63	2	↑ 3,2 %	165	0	↓ 0,0 %	162	0	— 0,0 %	170	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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022 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 chuva para este trecho, no geral, observam-se maiores resultados dos parâmetros majoritários na fração total e parâmetros traços nos dois primeiros períodos, chuva/2019 e chuva 2019/2020, com destaque para este último mencionado, quando o volume precipitado 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, nota-se incremento das concentrações entre os períodos de chuvas sucessivos, com 100% dos resultados do período atual acima dos limites legais estabelecidos na legislação vigente.

Para o parâmetro Manganês total no período de chuva 2021/2022, ainda que todos os resultados tenham sido superiores ao VMP (0,1 mg/L), observa-se menor magnitude das concentrações no atual período se comparado aos períodos de chuva anteriores, com condição mais próxima do respectivo *baseline*. No período de chuva 2021/2022, as concentrações máximas mensais deste analito variaram entre 0,26 e 1,52 mg/L, enquanto nos períodos de chuva anteriores variaram entre 0,06 mg/L e 9,41 mg/L (chuva/2019), 0,41 mg/L e 4,57 mg/L (chuva 2019/2020) e entre 0,12 mg/L e 3,83 mg/L (chuva 2020/2021). Na condição de *baseline*, a concentração máxima de Manganês total é equivalente a 1,14 mg/L. Entretanto, ainda que os resultados tenham sido inferiores no atual período de análise se comparado aos demais, houve acréscimo no percentual de violação ao padrão legal, com 100% dos resultados acima do VMP. Destaca-se neste caso, o menor número de resultados disponíveis para o atual período de análise, dada a frequência de amostragem semanal, bem como a não realização de coletas nos meses de fevereiro/2022 e março/2022 devido as condições inseguras de acesso decorrentes das chuvas de janeiro/2022. Os seguintes percentuais de violação foram registrados nos demais períodos de chuva analisados: *baseline* (78,9%), chuva/2019 (90,2%); chuva 2019/2020 (87,3%) e chuva 2020/2021 (96,8%).

Quanto ao Ferro dissolvido, observa-se elevação das concentrações ao longo dos períodos de chuva sucessivos, com todos os resultados acima do VMP (0,3 mg/L) no período de chuva 2021/2022. Em termos das concentrações máximas mensais, no período de chuva atual ocorreu variação entre 0,45 mg/L e 0,70 mg/L, na chuva 2020/2021 entre 0,38 mg/L e 1,16 mg/L, na chuva 2019/2020 entre 0,47 mg/L e 2,82 mg/L e na chuva/2019 entre 0,07 mg/L e 0,68 mg/L. Na condição de *baseline*, a concentração máxima de Ferro dissolvido é equivalente a 0,99 mg/L. Em relação aos percentuais de violação ao padrão, também houve incremento entre os períodos: chuva/2019 (41,0%), chuva 2019/2020 (39,9%), chuva 2020/2021 (95,7%)

e chuva 2021/2022 (100%). Em todos os casos, os percentuais pós rompimento foram superiores a condição do *baseline* de chuvas para a região (26,3%).

No que se refere ao parâmetro Alumínio dissolvido, o comportamento dos resultados foi próximo ao apresentado para o parâmetro Ferro dissolvido, com elevação das concentrações ao longo dos períodos de chuva sucessivos e todos os resultados acima do VMP (0,1 mg/L) no período de chuva 2021/2022. Ao se analisar as concentrações máximas mensais, notam-se as seguintes variações: chuva/2019 (0,01 mg/L e 0,28 mg/L), chuva 2019/2020 (0,21 mg/L e 4,15 mg/L), chuva 2020/20201 (0,27 mg/L e 1,43 mg/L) e chuva 2021/2022 (0,30 mg/L e 0,76 mg/L). Na condição de *baseline*, a concentração máxima de Alumínio dissolvido é equivalente a 0,36 mg/L. Em termos de percentual de violação, também houve acréscimo em relação aos períodos anteriores. Nos períodos de chuva/2019, chuva 2019/2020 e chuva 2020/2021 os percentuais de violação foram, nesta ordem, 14,8%, 69,9% e 84,9%, enquanto no atual período de análise, chuva 2021/2022, o percentual de violação foi correspondente a 100%. Além disso, o *baseline* de estiagem é substancialmente inferior para este analito, correspondente a 45,5% de inconformidades.

Para Turbidez, da mesma forma que para Manganês total, observa-se menor magnitude dos teores no atual período se comparado aos períodos de chuva anteriores, com condição mais próxima do respectivo *baseline*. Em termos dos resultados máximos mensais, no período atual os teores variaram entre 87,20 NTU e 729 NTU, inferiores ao máximo do *baseline* de chuva (1.010 NTU), enquanto nos períodos anteriores foram observadas as seguintes variações: 29 NTU a 1.260 NTU (chuva/2019), 61,90 NTU a 1.970 NTU (chuva 2019/2020), 36,10 NTU a 1.430 NTU (chuva 2020/2021). Em relação aos percentuais de violação, ocorreu redução acentuada no período atual se comparado aos períodos anteriores, sendo este percentual inferior inclusive ao registrado na condição pré-rompimento, conforme indicado a seguir: 47,4% (*baseline*), 88,5% (chuva/2019), 75,6% (chuva 2019/2020), 71,4% (chuva 2020/2021) e 46,2% (chuva 2021/2022).

Em relação aos parâmetros traços, os resultados foram pouco variáveis ao longo dos períodos de monitoramento avaliados e, em geral, abaixo dos respectivos VMP. Especificamente para Chumbo total, observa-se ocorrências pontuais de valores acima no VMP no período de chuva 2021/2022 (3 das 13 amostras analisadas), com percentual de violação equivalente a 23,1% de violação. Este percentual foi superior ao registrado nos períodos de chuva anteriores, incluindo a condição de *baseline* (18,4%), com exceção do período de chuva 2019/2020 (27,2%). Entretanto, é importante destacar que em termos de magnitude das concentrações deste analito, foram registrados valores superiores nos períodos pretéritos, com destaque para o período de chuva 2019/2020, incluindo à condição de *baseline.* Para os outros parâmetros traços não houve violações.

Para os parâmetros físico-químicos, no atual período de análise ocorreu violação apenas para oxigênio dissolvido (7,7%) e sólidos suspensos totais (61,5%), mas esses percentuais foram inferiores se comparados aos registrados no período de chuva 2020/2021 (10,8% para oxigênio dissolvido e 72% para sólidos suspensos totais). Os percentuais de violação para esses

parâmetros no âmbito do *baseline* de chuva foram equivalentes a 2,6% e 52,6%, respectivamente.

Em relação aos parâmetros associados à origem sanitária, no período atual, houve acréscimo dos percentuais de violação para os parâmetros DBO (7,7%), *E.coli* (84,6%) e Fósforo total (92,3%) se comparado aos períodos anteriores, inclusive a condição de *baseline*: (DBO: 0% em todos os períodos; *E.coli: 33,3% no baseline,* 80% na chuva/2019, 59,9% na chuva 2019/2020 e 73,1% na chuva 2020/2021; Fósforo total: 53,3% no *baseline*, 60,7% na chuva/2019, 39,9% na chuva 2019/2020, 68,8% na chuva 2020/2021).

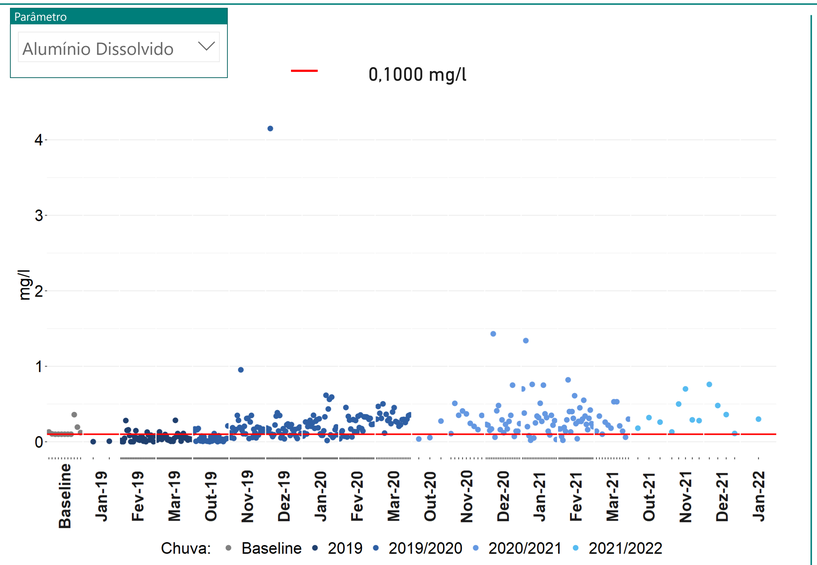
Nesse contexto, em geral, observou-se menores teores dos parâmetros majoritários de qualidade da água na fração total, bem como manutenção ou menores percentuais de violação, no atual período de análise. Enquanto, para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, os resultados e percentuais de violação apresentaram-se mais elevados no período de chuva 2021/2022. Ressalta-se, contudo, mais uma vez, o menor número de resultados disponíveis para o ponto PT-43 no período de chuva 2021/2022, em virtude da dificuldade de acesso provocada pelas chuvas intensas que ocorreram no mês de janeiro/2022.

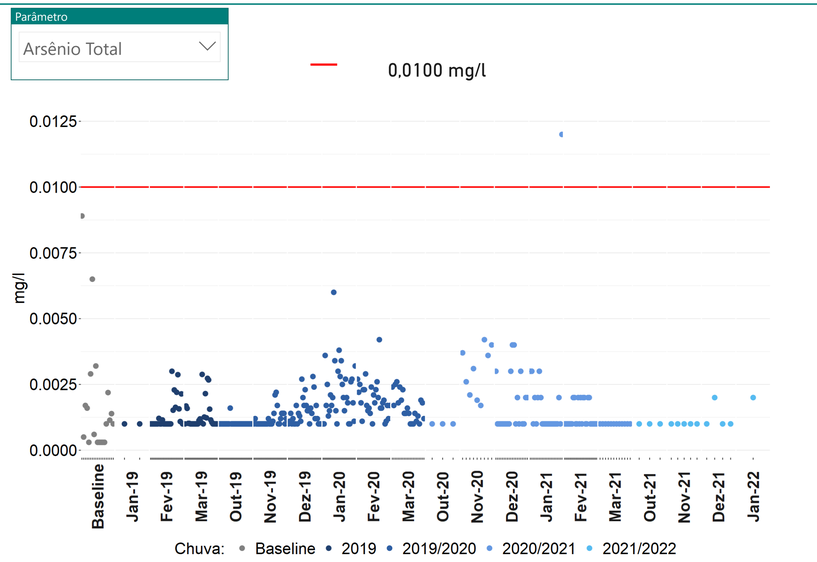
Na estiagem, o comportamento dos resultados dos analitos para os diferentes períodos avaliados foi menos variável e mais próximo da condição de *baseline* se comparado aos períodos chuvosos, conforme esperado. Em geral houve indicativo de melhoria da qualidade da água ao longo dos períodos de estiagem sucessivos, com teores mais reduzidos dos parâmetros de qualidade da água avaliados na estiagem/2021, bem como menores percentuais de violação (Arcadis, 2021d).

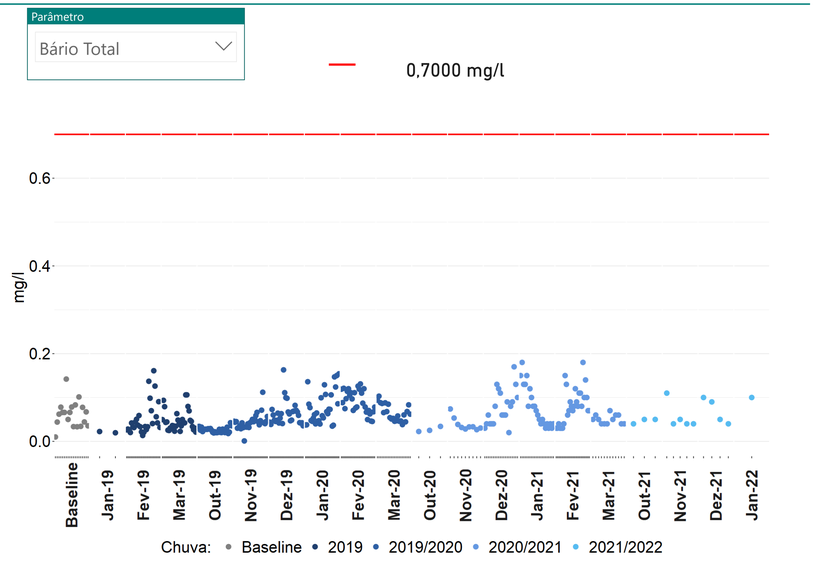
Gráfico 7.3.2-1:Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

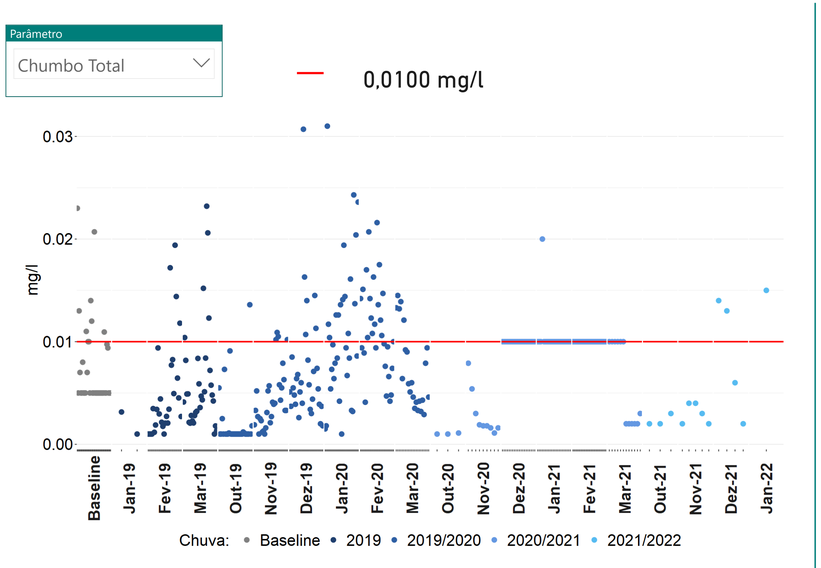
Tabela 7.3.2-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP082) x (BPE03) e da Vale (PT-43) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

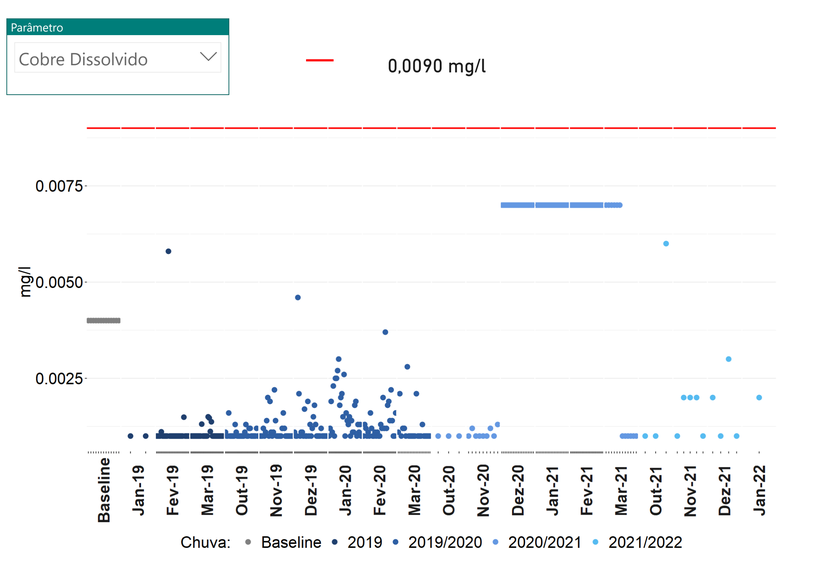
Análise do período Chuva - Baseline IGAM(BP082)x(BPE03) e Vale(PT-43)

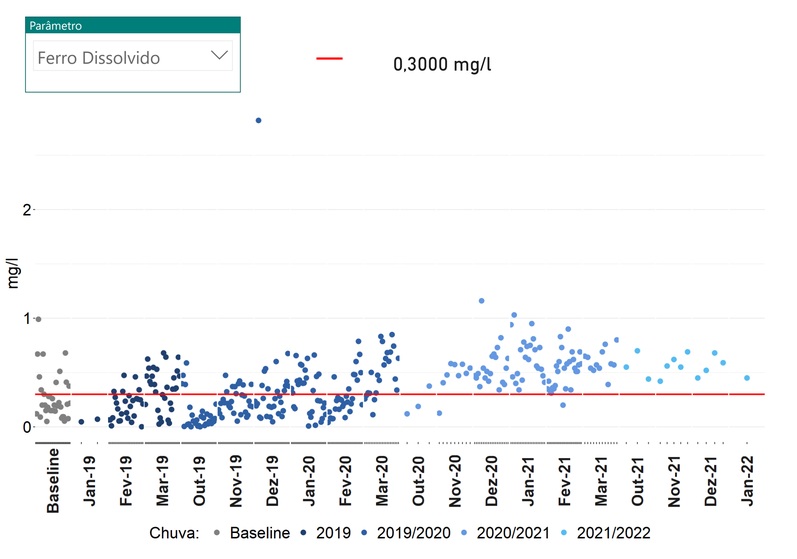






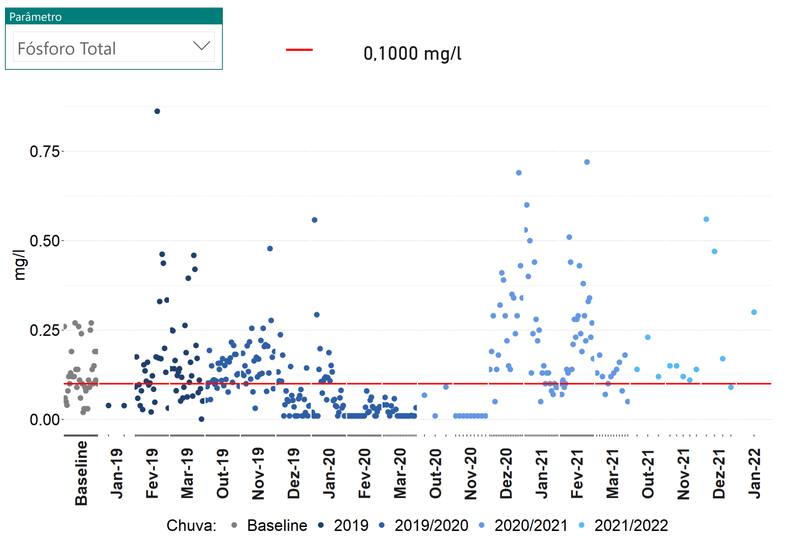




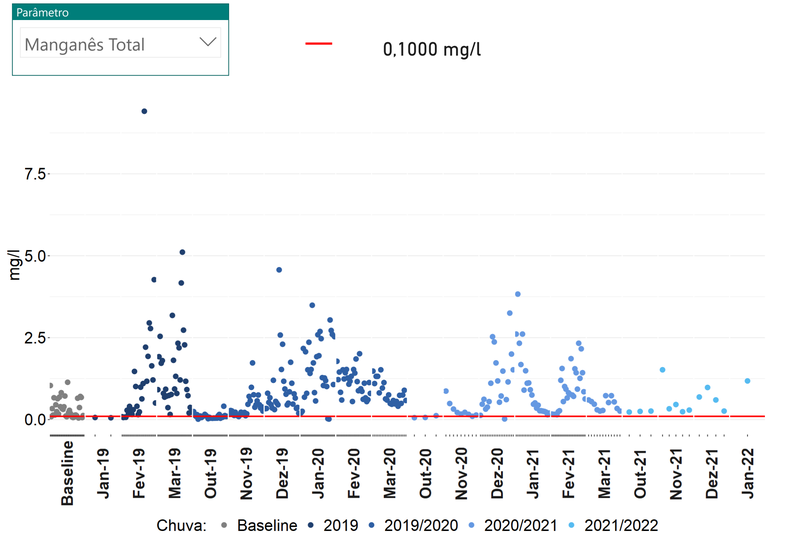


Análise do período Chuva - Baseline IGAM(BP082)x(BPE03) e Vale(PT-43)

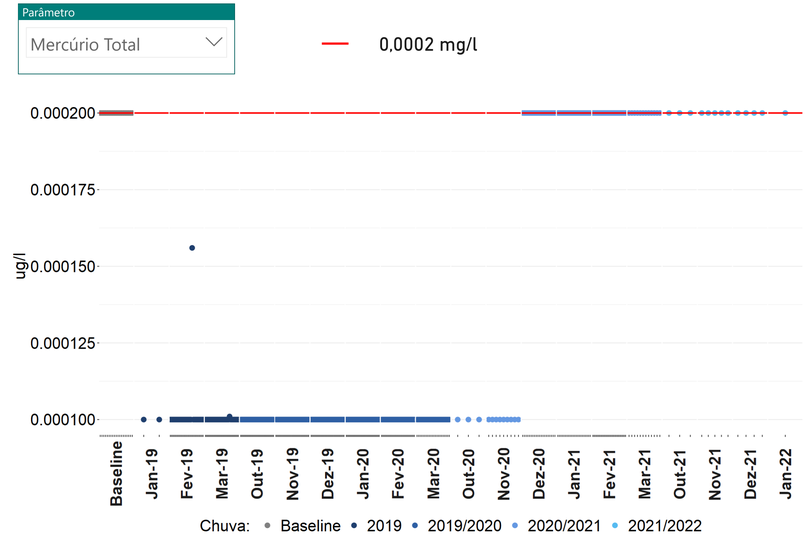
Parâmetro: Fósforo Total



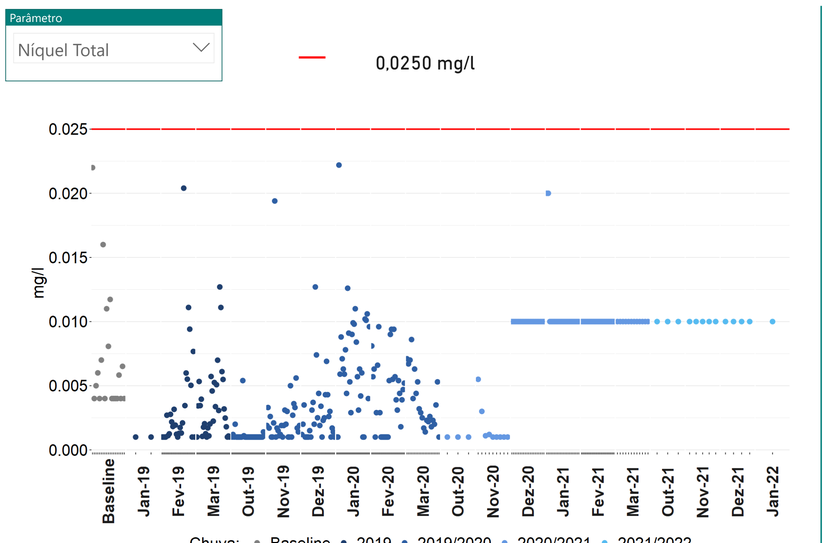
Parâmetro: Manganês Total



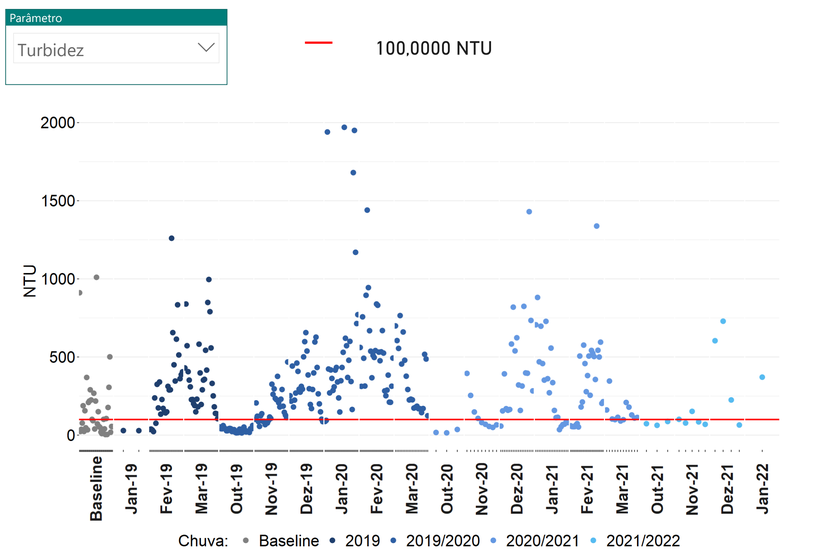
Parâmetro: Mercúrio Total



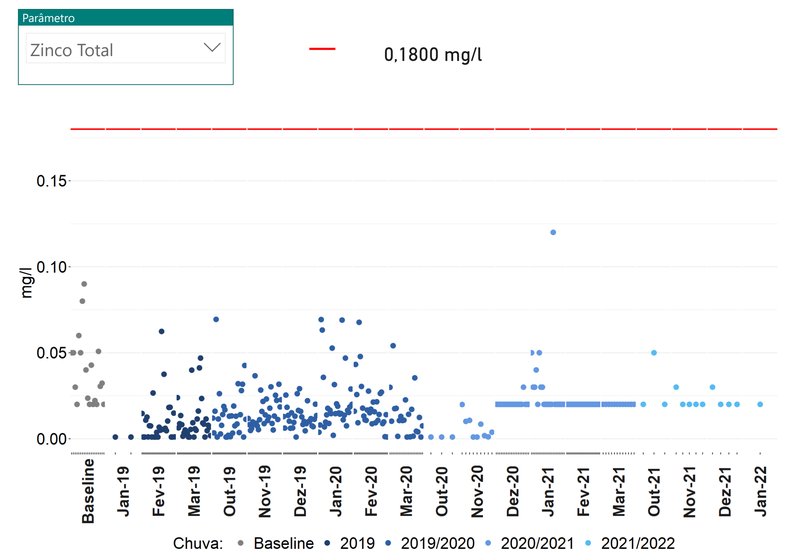
Parâmetro: Níquel Total



Parâmetro: Turbidez



Parâmetro: Zinco Total



BP082, BPE03 e PT-43

-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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**
Físico-químico															
Cor verdadeira	31	10	32,3 %	61	13	↓ 21,3 %	173	108	↗ 62,4 %	93	36	↓ 38,7 %	13	0	↓ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	38	1	2,6 %	61	0	↓ 0,0 %	173	22	↗ 12,7 %	93	10	↓ 10,8 %	13	1	↓ 7,7 %
pH	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	1	↗ 0,6 %	93	13	↗ 14,0 %	13	0	↓ 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	33	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	38	20	52,6 %	61	34	↗ 55,7 %	173	75	↓ 43,4 %	93	67	↗ 72,0 %	13	8	↓ 61,5 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	5	45,5 %	61	9	↓ 14,8 %	173	121	↗ 69,9 %	93	79	↗ 84,9 %	13	13	↗ 100,0 %
Ferro Dissolvido	38	10	26,3 %	61	25	↗ 41,0 %	173	69	↓ 39,9 %	93	89	↗ 95,7 %	13	13	↗ 100,0 %
Manganês Total	38	30	78,9 %	61	55	↗ 90,2 %	173	151	↓ 87,3 %	93	90	↗ 96,8 %	13	13	↗ 100,0 %
Turbidez	38	18	47,4 %	61	54	↗ 88,5 %	172	130	↓ 75,6 %	91	65	↓ 71,4 %	13	6	↓ 46,2 %
Outros															
Alumínio Total	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Carbono orgânico total	-	0	0,0 %	53	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Cianeto livre	9	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Cloreto	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Clorofila-a	24	1	4,2 %	61	0	↓ 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Condutividade elétrica	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	92	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
DBO	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	171	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	1	↗ 7,7 %
Densidade de Cianobactérias	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
DQO	30	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	12	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Escherichia coli	12	4	33,3 %	55	44	↗ 80,0 %	172	103	↓ 59,9 %	93	68	↗ 73,1 %	13	11	↗ 84,6 %
Ferro Total	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Fosfato (como P)	-	0	0,0 %	60	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	38	21	55,3 %	61	37	↗ 60,7 %	173	69	↓ 39,9 %	93	64	↗ 68,8 %	13	12	↗ 92,3 %
Manganês Dissolvido	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Nitrato (como N)	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	1	↗ 0,6 %	92	0	↓ 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Nitrogênio orgânico	32	0	0,0 %	55	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Sólidos Totais	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Sulfeto de Hidrogênio	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Temperatura	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	1	↗ 1,1 %	13	0	↓ 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Cádmio Total	38	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Chumbo Total	38	7	18,4 %	61	9	↓ 14,8 %	173	47	↗ 27,2 %	93	1	↓ 1,1 %	13	3	↗ 23,1 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	13	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Cromo Total	25	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	0	— 0,0 %
Selênio Total	19	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Zinco Total	19	0	0,0 %	61	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	93	0	— 0,0 %	13	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 e acima do VMP para os parâmetros majoritários no atual período de análise, mas com resultados máximos inferiores aos registrados nos períodos anteriores, conforme indicado 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 chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

Para o parâmetro Manganês total, as concentrações registradas na chuva 2021/2022 foram todas superiores ao VMP (0,1 mg/L), mas, em geral, com magnitude inferior em relação aos períodos monitorados anteriormente. Em termos de concentrações máximas mensais, na chuva 2021/2022, os resultados variaram entre 0,41 e 0,93 mg/L, enquanto nos demais períodos de chuva, variaram entre: 1,54 mg/L e 2,04 mg/L (chuva/2019), 0,14 mg/L e 3,70 mg/L (chuva 2019/2020), 0,14 mg/L e 2,87 mg/L (chuva 2020/2021). Na condição pré-rompimento, a concentração máxima mensal para o período chuvoso foi equivalente a 0,88 mg/L, também acima do referido VMP. No atual período de análise houve 100% de violação para este analito, sendo este percentual superior a todos os outros registrados anteriormente, incluindo a condição de *baseline* (76,3%): chuva/2019 (97,1%), chuva 2019/2020 (72,4%), chuva 2020/2021 (90,2%).

Para Ferro dissolvido, assim como observado para os pontos PT-02 e PT-43, no período de chuva 2021/2022 as concentrações foram mais elevadas e predominantemente acima do VMP (0,3 mg/L), destacando-se o incremento sucessivo dos resultados ao longo dos períodos de chuva avaliados. Em termos de máximas mensais, as concentrações deste analito variaram entre 0,62 mg/L e 0,69 mg/L no atual período de análise, enquanto nos períodos anteriores variaram entre: 0,80 mg/L e 1,16 mg/L (chuva/2019), 0,24 mg/L e 0,73 mg/L (chuva 2019/2020), 0,22 mg/L a 1,39 mg/L (chuva 2021/2022). Na condição pré-rompimento, a concentração máxima mensal para o período chuvoso foi equivalente a 0,56 mg/L, também acima do referido VMP. Da mesma forma, em termos de violação, houve maior percentual de inconformidades na chuva 2021/2022 em relação aos períodos de chuva precedentes: chuva/2019 (80%), chuva 2019/2020 (27,6%), chuva 2010/2021 (91,7%), chuva 2021/2022 (95,5%). Em todos os períodos de chuva os percentuais foram substancialmente mais elevados que a condição do *baseline* (13,2%).

Comportamento semelhante foi observado para parâmetro Alumínio dissolvido, com incremento das concentrações ao longo dos períodos sucessivos de chuva e concentrações predominantemente acima do VMP (0,1 mg/L) no atual período analisado. Em termos de concentrações máximas mensais, registraram-se as seguintes variações: entre 0,24 mg/L e 0,27 mg/L na chuva/2019, entre 0,12 mg/L e 0,76 mg/L na chuva 2019/2020, entre 0,11 e 2,86 mg/L na chuva 2020/2021 e entre 0,25 mg/L e 1,16 mg/L na chuva 2021/2022. Na condição pré-rompimento, a concentração máxima mensal para o período chuvoso foi equivalente a 0,18 mg/L, também acima do referido VMP. Em termos de percentual de violação, da mesma forma, notou-se incremento entre os períodos de chuva sucessivos: chuva/2019 (28,6%), chuva

2019/2020 (56,9%), chuva 2020/2021 (84,2%) e chuva 2021/2022 (95,5%). Destaca-se o *baseline* de chuva substancialmente inferior para este analito, correspondente a 36,4% de inconformidades.

Para Turbidez, os teores registrados na chuva 2021/2022 foram, em geral, superiores ao VMP (100 NTU), mas com magnitude inferior em relação aos períodos monitorados anteriormente. Em termos dos teores máximos registrados nos meses, na chuva 2021/2022 os resultados variaram entre 138 NTU e 702 NTU, enquanto nos períodos anteriores variaram entre 432 NTU e 548 NTU (chuva/2019), entre 55,40 NTU e 942 NTU (chuva 2019/2020) e entre 39,90 NTU e 805 NTU (chuva 2020/2021). Para o *baseline* chuvoso o teor máximo mensal de Turbidez foi equivalente a 775 NTU. Em relação ao limite legal, os percentuais de violação foram equivalentes a 100% (chuva/2019), 68,4% (chuva 2019/2020), 69,9% (chuva 2020/2021) e 72,2% (chuva 2021/2022). Ressalta-se que, no âmbito do *baseline* de chuva, o percentual de inconformidades equivale a 50%, valor este inferior àqueles registrados na condição pós-rompimento.

Em relação aos parâmetros traços, no atual período de análise houve violação apenas para Chumbo total (17,9%), com percentual superior ao período de chuva anterior, chuva 2020/2021 (3%). Entretanto, em períodos pretéritos incluindo a condição de *baseline,* já havia sido registrado percentual superior ao do período atual, com os seguintes valores: *baseline* (21,1%) e chuva 2019/2020 (18,4%). Para os demais parâmetros traços (Arsênio total, Bário total, Cádmio total, Cobalto total, Cobre dissolvido, Cromo total, Níquel total, Selênio total e Zinco total), não houve registro de violações no período de chuva 2021/2022.

Para os parâmetros físico-químicos, no período de chuva 2021/2022 houve registro de violação apenas para Oxigênio dissolvido, com percentual de inconformidades equivalente a 4,5%, e Sólidos suspensos totais, com percentual de 77,3%. Apenas no período de chuva/2019, o percentual de violação para Oxigênio dissolvido superou o do período atual, com valor equivalente a 47,1%. Já para Sólidos suspensos totais, em todos os demais períodos foram registrados percentuais de violação inferiores ao do período atual de análise.

Para os parâmetros associados à origem sanitária, manteve-se o registro de inconformidades para *E.coli* e Fósforo total no período de chuva 2021/2022, com percentual equivalente a 36,4% e 77,3%, respectivamente. Para *E.coli,* este percentual foi inferior se comparado aos outros períodos (chuva/2019: 43,3%; chuva 2019/2020: 44,3%, chuva 2020/2021: 50%), com exceção do *baseline* (25%). Já para Fósforo total, esse percentual foi mais elevado se comparado a todos os outros períodos (*baseline:* 36,8%, chuva/2019: 60%, chuva 2019/2020: 22,4% e chuva 2020/2021: 57,1%.

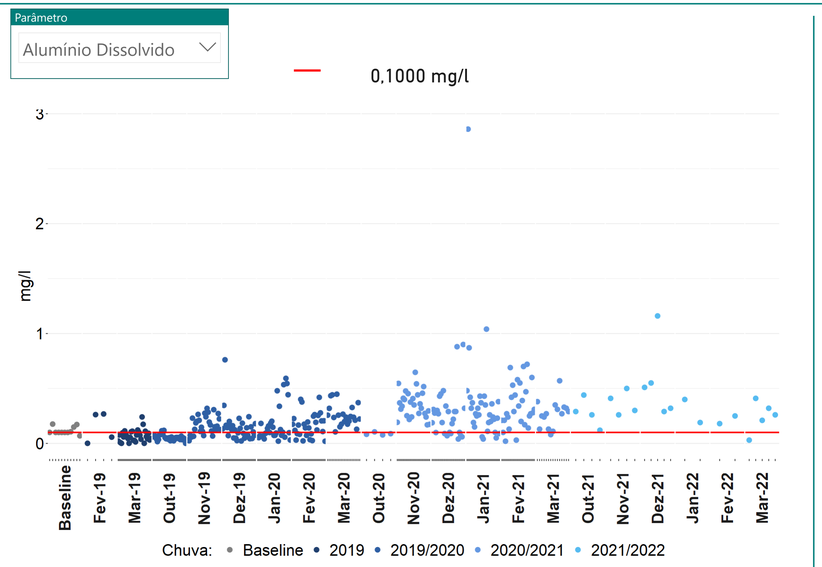
Nesse contexto, destaca-se, no geral, resultados próximos ou mais elevados no atual período de chuva em relação aos períodos anteriormente analisados, mas com magnitude de acordo com as condições já observadas. Além disso, os percentuais de violação, para a maioria dos parâmetros discutidos, também foram 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.

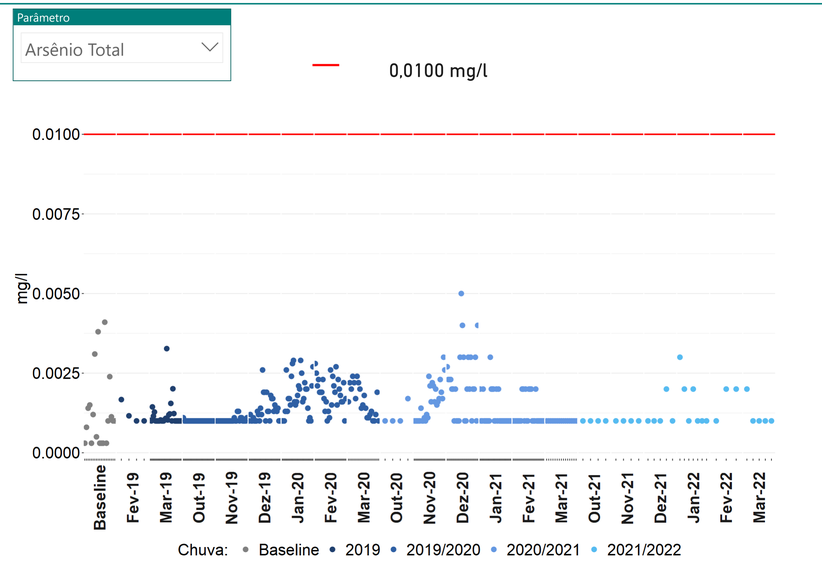
Por outro lado, de forma complementar, nos períodos de estiagem monitorados, observou-se menores teores dos parâmetros de qualidade da água ao longo dos períodos sucessivos, bem como prevalência de condições inferiores ou próximas ao *baseline* sazonal, principalmente para Turbidez e Manganês total (ARCADIS, 2021d). Tal fato reforça a influência da sazonalidade na qualidade da água da bacia.

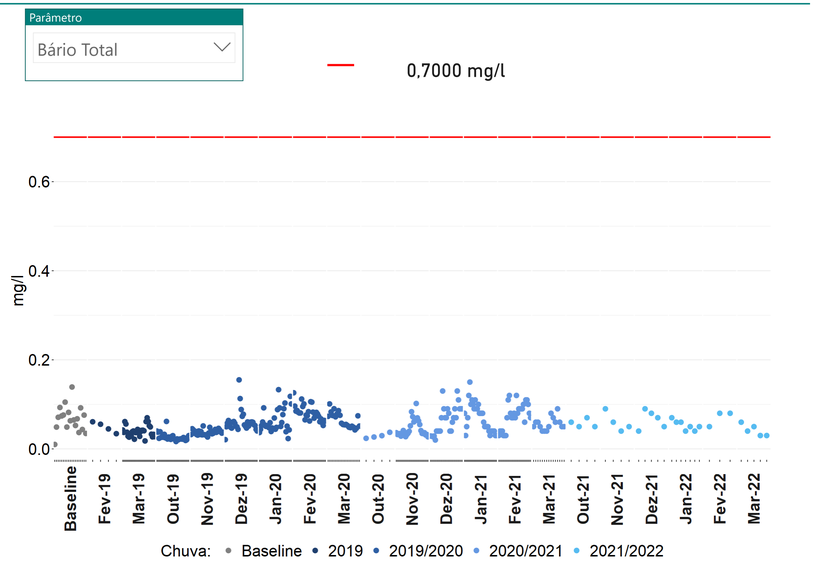
Gráfico 7.3.3-1: Resultados dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos pontos do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

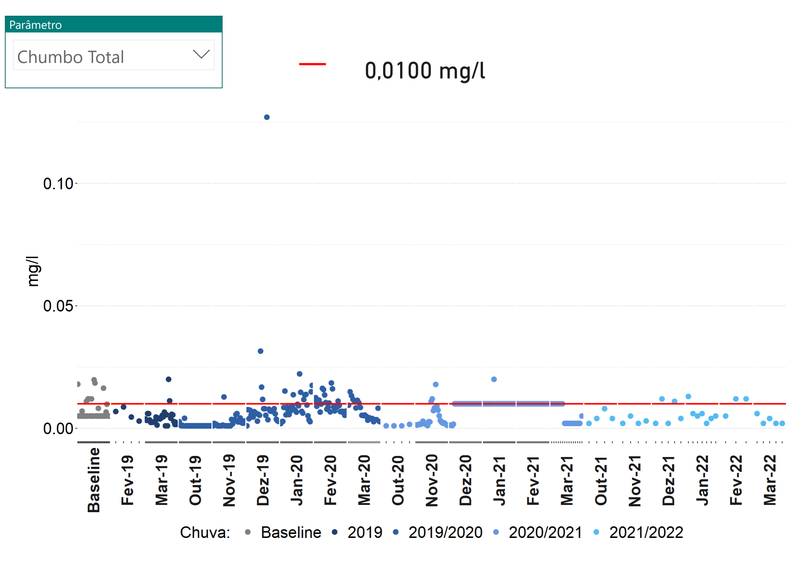
Tabela 7.3.3-1: Percentuais de violação registrados nos pontos de monitoramento do IGAM (BP083) e da Vale (PT-49) para chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

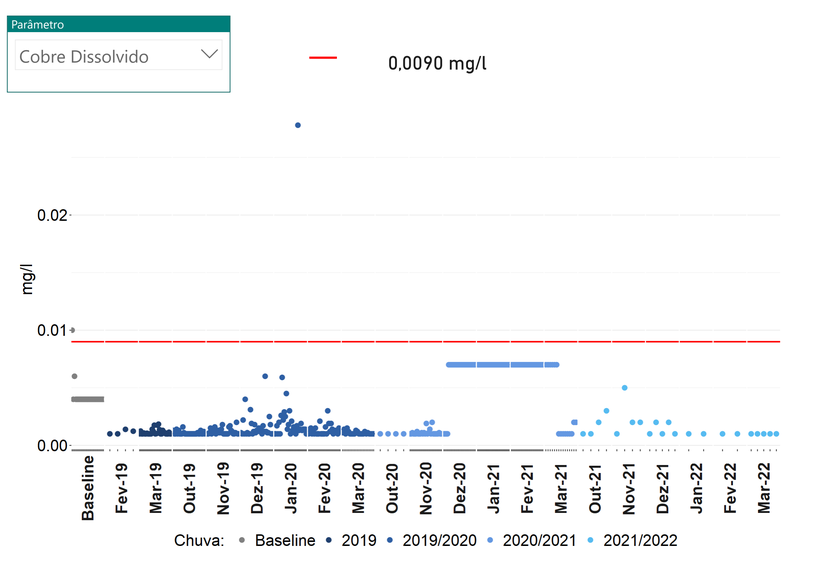
Análise do período Chuva - Baseline IGAM(BP083) e Vale(PT-49)

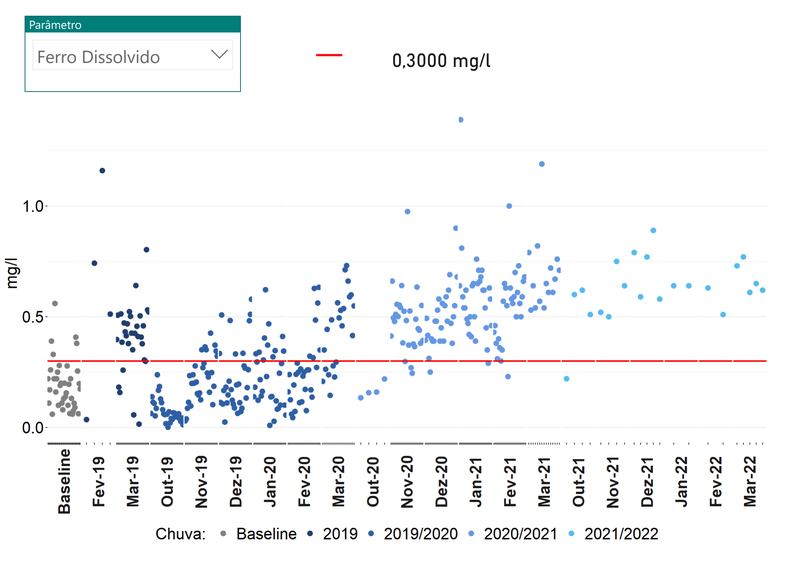




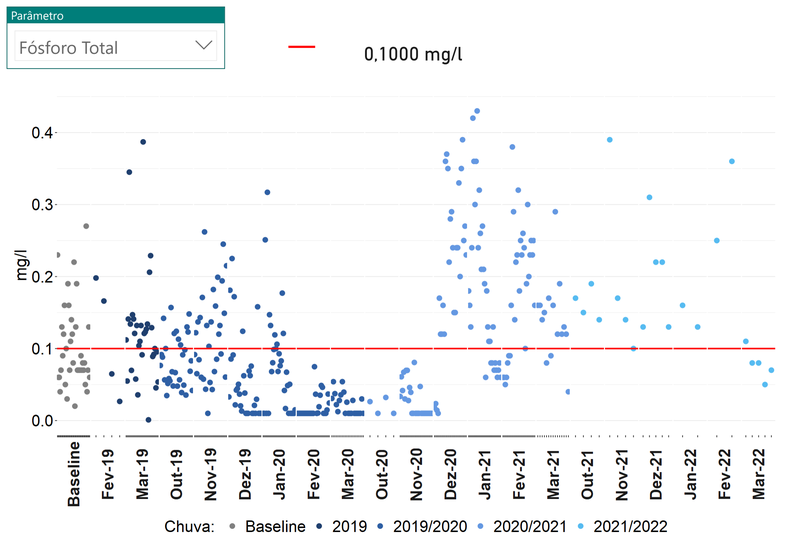


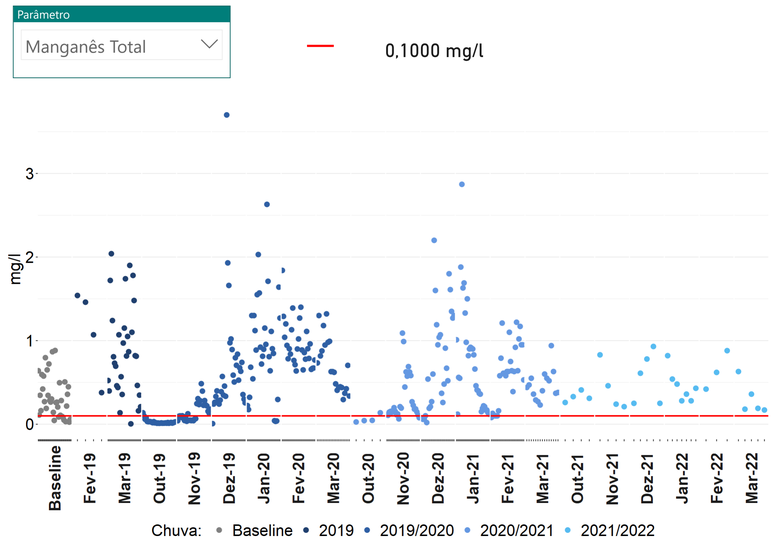


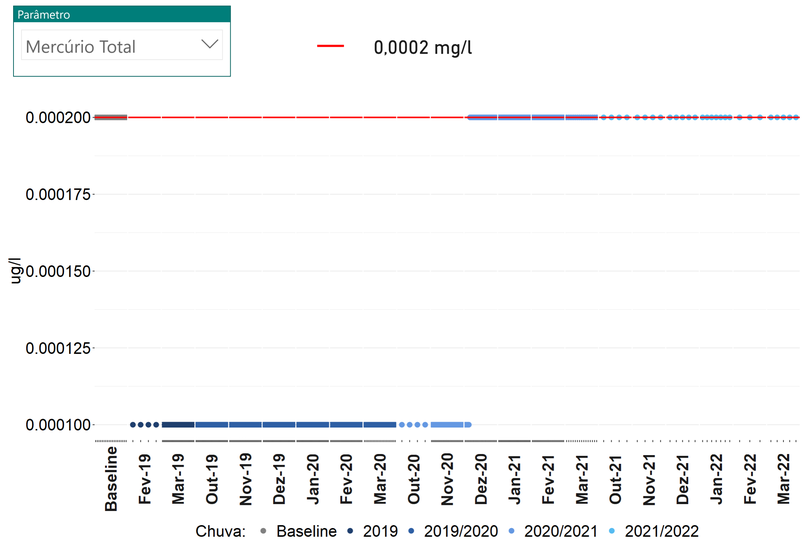


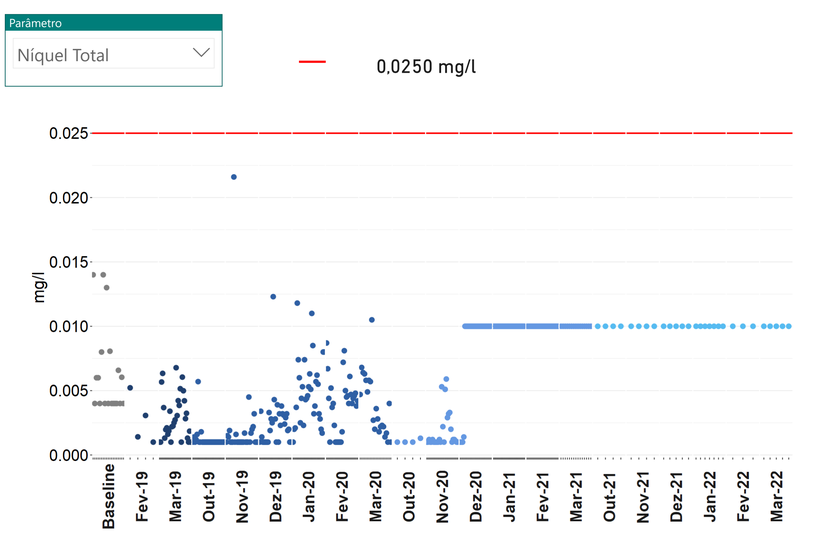


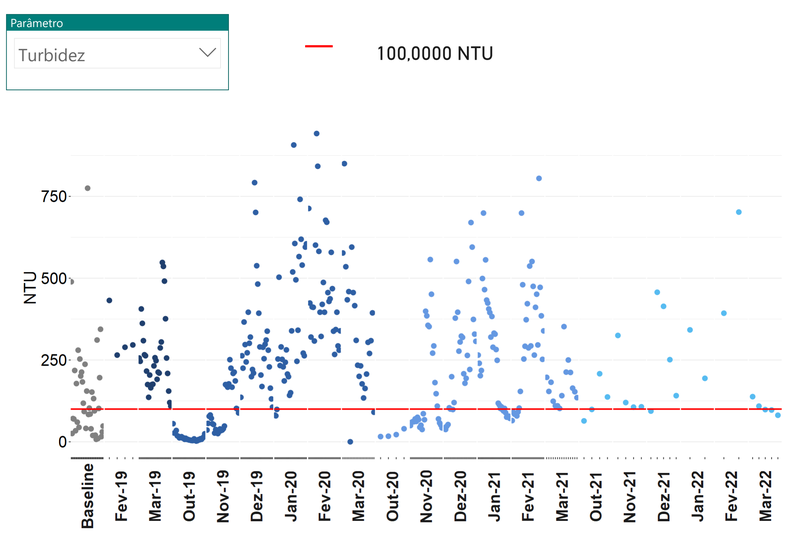
Análise do período Chuva - Baseline IGAM(BP083) e Vale(PT-49)

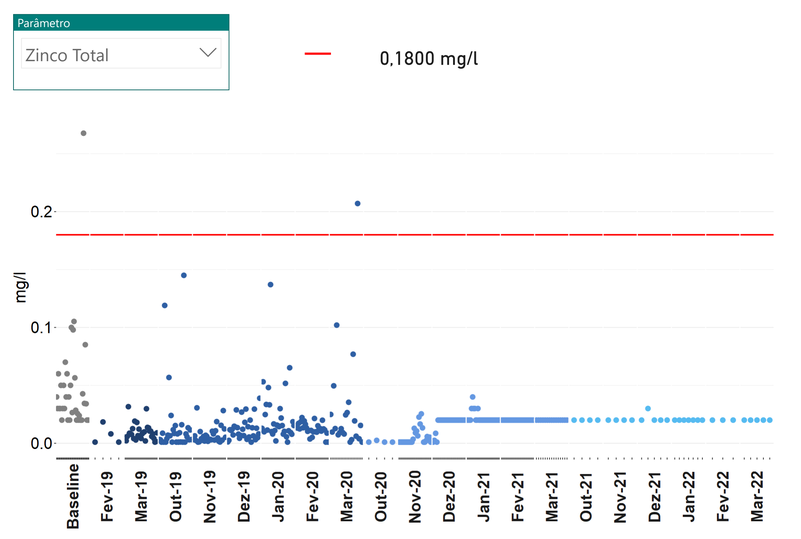












BP083 e PT-49

-	Baseline chuva IGAM			Chuva - Janeiro a Março/2019			Chuva - Outubro/2019 a Março/2020			Chuva - Outubro/2020 a Março/2021			Chuva - Outubro/2021 a Março/2022		
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**
Físico-químico															
Cor verdadeira	31	11	35,5 %	35	11	↓ 31,4 %	174	116	↑ 66,7 %	133	43	↓ 32,3 %	22	0	↓ 0,0 %
Oxigênio dissolvido	38	0	0,0 %	34	16	↑ 47,1 %	174	3	↓ 1,7 %	133	4	↑ 3,0 %	22	1	↑ 4,5 %
pH	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	132	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Sólidos dissolvidos totais	33	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Sólidos suspensos totais	38	18	47,4 %	35	14	↓ 40,0 %	174	67	↓ 38,5 %	133	88	↑ 66,2 %	22	17	↑ 77,3 %
Majoritários															
Alumínio Dissolvido	11	4	36,4 %	35	10	↓ 28,6 %	174	99	↑ 56,9 %	133	112	↑ 84,2 %	22	21	↑ 95,5 %
Ferro Dissolvido	38	5	13,2 %	35	28	↑ 80,0 %	174	48	↓ 27,6 %	133	122	↑ 91,7 %	22	21	↑ 95,5 %
Manganês Total	38	29	76,3 %	35	34	↑ 97,1 %	174	126	↓ 72,4 %	133	120	↑ 90,2 %	28	28	↑ 100,0 %
Turbidez	38	19	50,0 %	35	35	↑ 100,0 %	174	119	↓ 68,4 %	133	93	↑ 69,9 %	22	16	↑ 72,7 %
Outros															
Alumínio Total	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Carbono orgânico total	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	21	0	— 0,0 %
Cianeto livre	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	21	0	— 0,0 %
Cloreto	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Clorofila-a	24	0	0,0 %	34	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Condutividade elétrica	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	132	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
DBO	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	172	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Densidade de Cianobactérias	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
DQO	30	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	36	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Escherichia coli	12	3	25,0 %	30	13	↑ 43,3 %	174	77	↑ 44,3 %	132	66	↑ 50,0 %	22	8	↓ 36,4 %
Ferro Total	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Fosfato (como P)	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Fósforo Total	38	14	36,8 %	35	21	↑ 60,0 %	174	39	↓ 22,4 %	133	76	↑ 57,1 %	22	17	↑ 77,3 %
Manganês Dissolvido	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Nitrato (como N)	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Nitrito (como N)	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Nitrogênio amoniacal	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Nitrogênio orgânico	32	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	173	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	21	0	— 0,0 %
Sólidos Totais	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Sulfeto de Hidrogênio	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Temperatura	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Traços															
Arsênio Total	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Bário Total	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Cádmio Total	38	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Chumbo Total	38	8	21,1 %	35	2	↓ 5,7 %	174	32	↑ 18,4 %	133	4	↓ 3,0 %	28	5	↑ 17,9 %
Cobalto Total	-	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Cobre Dissolvido	27	1	3,7 %	35	0	↓ 0,0 %	174	1	↑ 0,6 %	133	0	↓ 0,0 %	22	0	— 0,0 %
Cromo Total	25	0	0,0 %	35	1	↑ 2,9 %	174	0	↓ 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Mercúrio Total	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Níquel Total	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	174	0	— 0,0 %	133	0	— 0,0 %	28	0	— 0,0 %
Selênio Total	19	0	0,0 %	35	0	— 0,0 %	27	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %	-	0	— 0,0 %
Zinco Total	38	1	2,6 %	35	0	↓ 0,0 %	174	1	↑ 0,6 %	133	0	↓ 0,0 %	28	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, observou-se, em geral, condições da qualidade da água no período de chuva 2021/2022 próximas ao período de chuva 2020/2021, com menores teores dos parâmetros majoritários na fração total, bem como menores percentuais de violação, se comparados aos períodos de chuva mais próximos à ocorrência do rompimento. Especificamente para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio, os resultados apresentaram-se mais elevados no período de chuva 2021/2022, assim como ocorreram maiores percentuais de violação. Para os parâmetros traços e físico-químicos, as concentrações mantiveram-se majoritariamente baixas ao longo do período de chuva 2021/2022, com apenas algumas violações pontuais. Exceção se deu para Sólidos suspensos totais e Chumbo total, em que as violações foram mais recorrentes, mas ainda assim, inferiores aos percentuais registrados na chuva 2019/2020.

No trecho de captação do município de Pará de Minas, também foi possível observar menores teores dos parâmetros majoritários na fração total, bem como dos parâmetros traços nos dois últimos períodos de chuva avaliados, se comparados aos períodos de chuva/2019 e chuva 2019/2020. Por outro lado, para a fração dissolvida de Ferro e Alumínio houve 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. Contudo, neste último período, o número de resultados disponíveis foi menor para o ponto PT-43 referente a este trecho de captação, devido à dificuldade de acesso provocada pelas chuvas intensas que ocorreram no mês de janeiro/2022.

Já no último trecho analisado, no município de Paraopeba, os resultados foram próximos ou mais elevados no atual período de chuva em relação aos períodos anteriores. 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. Entretanto, não houve indícios de condições anômalas em termos da magnitude dos resultados reportados e das condições já observadas anteriormente.

Em termos dos parâmetros vinculados à origem sanitária, houve permanência de elevados percentuais de violação para *Escherichia coli* e Fósforo total nos três pontos avaliados referentes aos trechos de captação, superando as condições do *baseline* nos pontos PT-43 e PT-49, principalmente para Fósforo total.

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 chuva/2019 (janeiro a março), chuva/2019-2020 (outubro/2019 a março/2020), chuva/2020-2021 (outubro/2020 e março/2021) e chuva/2021-2022.

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 chuva, foram realizadas as seguintes avaliações:

- Análise das violações aos padrões legais de classe de enquadramento, conforme a DN COPAM-CERH 01/2008;
- 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 baixa (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 chuva 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 (DN COPAM-CERH 01/2008), 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 01/2008	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 chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 para o ponto TT-02 e para os pontos de montante (PT-05) e jusante (PT-03) localizados no rio Paraopeba.

No período de chuva/2019, verificaram-se violações mais expressivas no tributário em comparação aos resultados verificados nos pontos de montante e jusante do rio Paraopeba. Destacam-se percentuais de violações mais expressivos os parâmetros traçadores Manganês total (montante: 100%, tributário: 100%, jusante: 100%), Ferro Dissolvido (montante: 77%, tributário: 95%, jusante: 65%) e Alumínio dissolvido (montante: 80%, tributário: 30%, jusante: 63%). Nota-se, também, percentuais expressivos para Turbidez (montante: 100%, tributário: 11%, jusante: 97%) e para alguns parâmetros de cunho sanitário como Fósforo total (montante: 86%, tributário: 73%, jusante: 78%) e Oxigênio dissolvido (montante: 19%, tributário: 81%, jusante: 44%).

No período de chuva 2019/2020, para a maioria dos parâmetros, verifica-se ligeiro decréscimo dos percentuais de violação em relação aos períodos sazonais de chuva e estiagem anteriores. Percentuais de violações mais expressivos no tributário ribeirão Sarzedo em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os seguintes parâmetros: Fósforo Total (montante: 23%, tributário: 93%, jusante: 32%), Nitrogênio amoniacal (montante: 0%, tributário: 35%, jusante: 0%) e Oxigênio dissolvido (montante: 18%, tributário: 98%, jusante: 24%). Dentre esses parâmetros, para Oxigênio dissolvido e Fósforo Total, houve aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante.

Para o período chuvoso 2020/2021, em geral, verificam-se percentuais de violação próximos ao período chuvoso anterior (2019/2020). Para o período de chuva 2020/2021, violações mais expressivas no tributário em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas apenas para os parâmetros Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal e Oxigênio dissolvido. Dentre esses parâmetros, Oxigênio dissolvido apresentou aumento das violações no ponto de jusante (34%) quando comparado ao de montante (11%), indicando possível contribuição negativa do tributário para este parâmetro. Em relação aos parâmetros marcadores, notaram-se os seguintes percentuais de violação: Manganês total (montante:

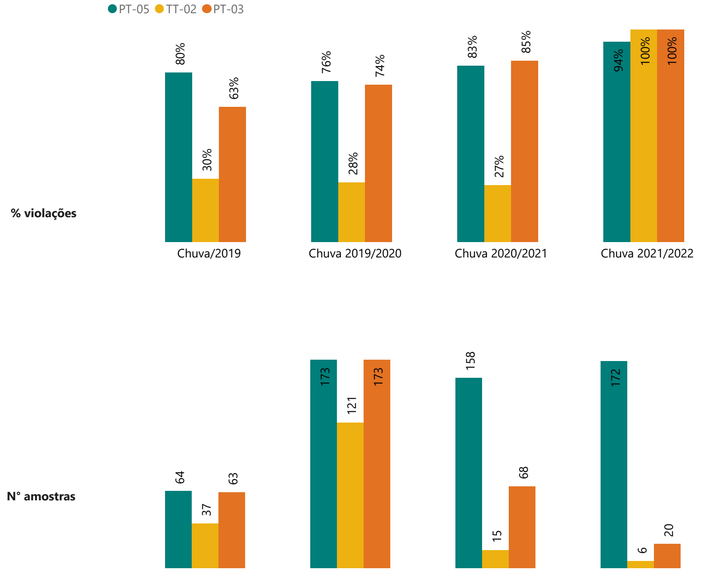
96%, tributário: 100%, jusante: 100%), Alumínio dissolvido (montante: 83%, tributário: 27%, jusante: 85%) e Ferro dissolvido (montante: 88%, tributário: 53%, jusante: 82%). Para turbidez, maiores percentuais no ponto de montante e jusante, (montante: 66%, tributário: 13%, jusante: 70%).

Para o período chuvoso 2021/2022, de modo geral, foram observados percentuais de violações superiores aos observados para os demais períodos. Os seguintes percentuais de violação para os parâmetros marcadores foram identificados: Ferro Dissolvido (montante: 99%, tributário: 100%, jusante: 100%), Manganês Total (montante: 100%, tributário: 100%, jusante: 100%), Alumínio dissolvido (montante: 94%, tributário: 100%, jusante: 100%) e Turbidez (72%, 33%, 90%). Em relação aos parâmetros de origem sanitária, foi mantido o percentual de violação de violações de *E. coli* no tributário, 100%. Para Fósforo total, houve redução de 93% (período chuva 2020/2021) para 67% (período 2021/2022). Os percentuais observados nos pontos de montante, tributário e jusante foram, respectivamente: OD (1%, 33%, 0%), *E. coli* (91%, 100%, 100%) e Fósforo total (62%, 67%, 90%).

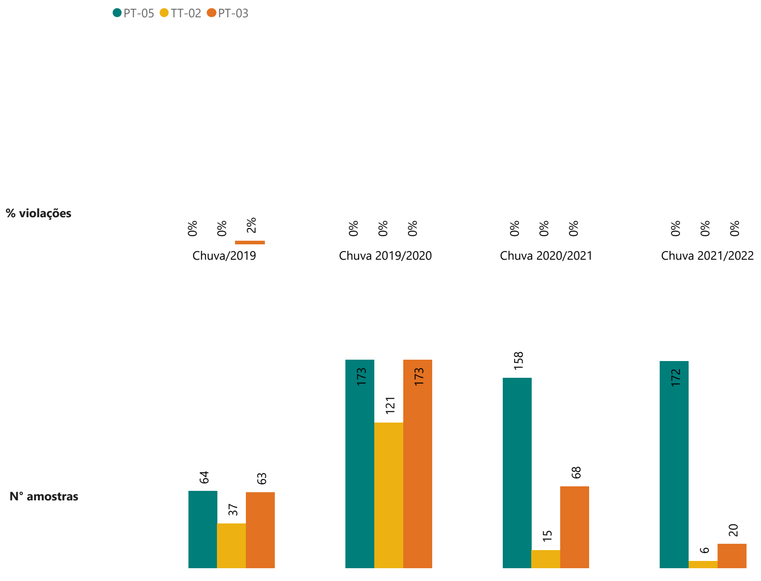
Gráfico 8.3.1-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no TT02 (ribeirão Sarzedo) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba.

P90 e % Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante

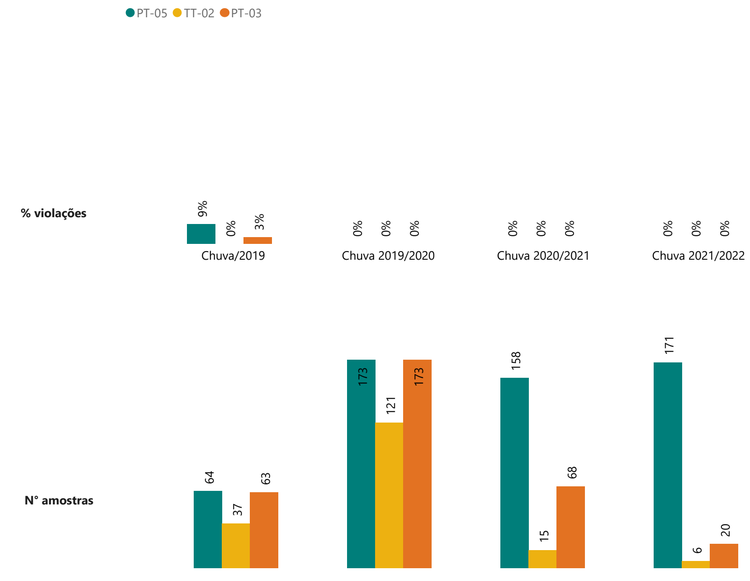
Parâmetro: Alumínio Dissolvido



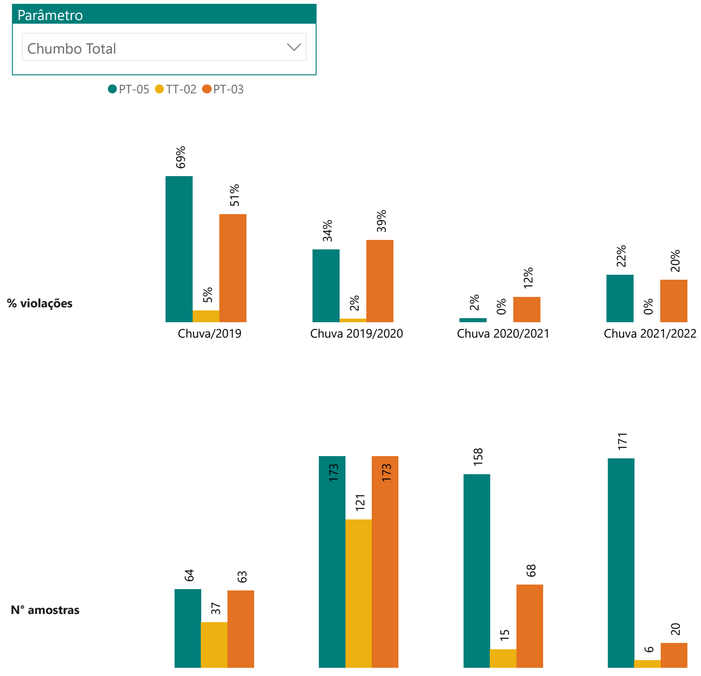
Parâmetro: Arsênio Total



Parâmetro: Cádmio Total



Parâmetro: Chumbo Total



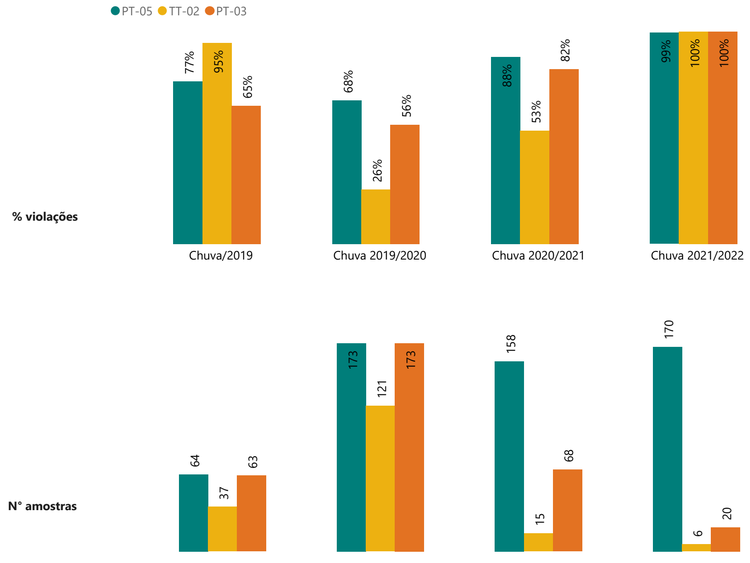
Parâmetro: Cobalto Total

Parâmetro: Cobre Dissolvido

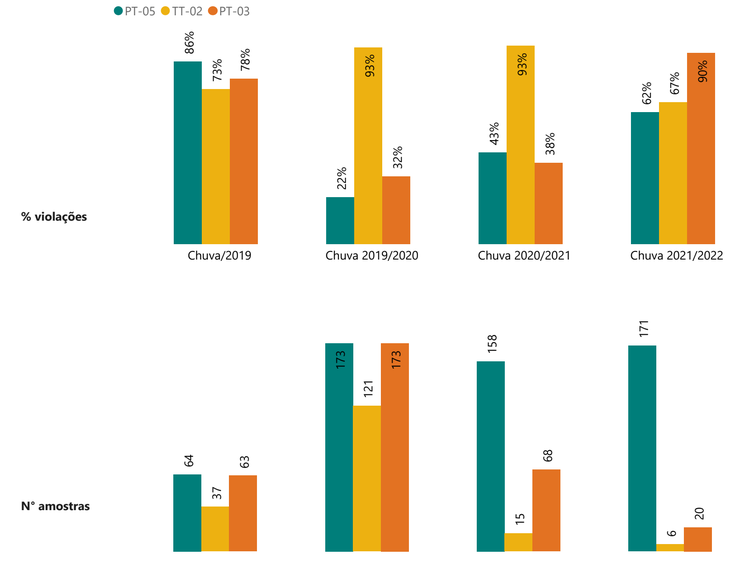
P90 e % Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante

Parâmetro: Cromo Total

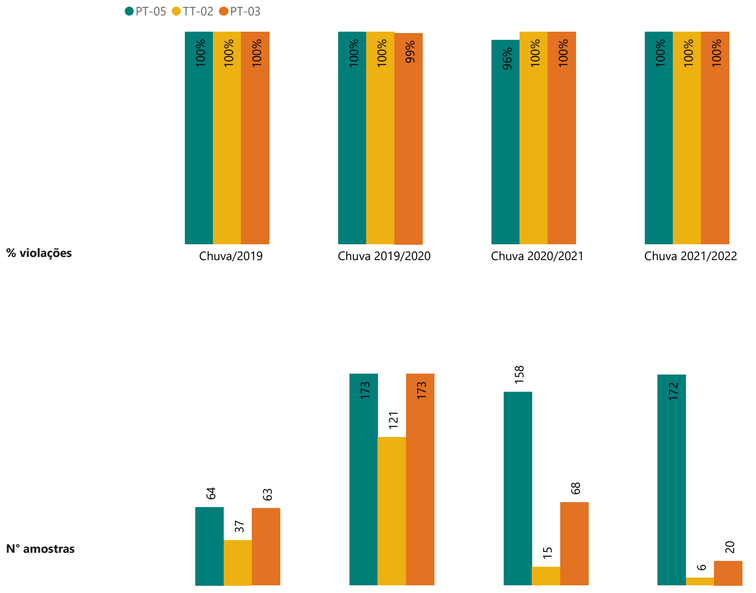
Parâmetro: Ferro Dissolvido



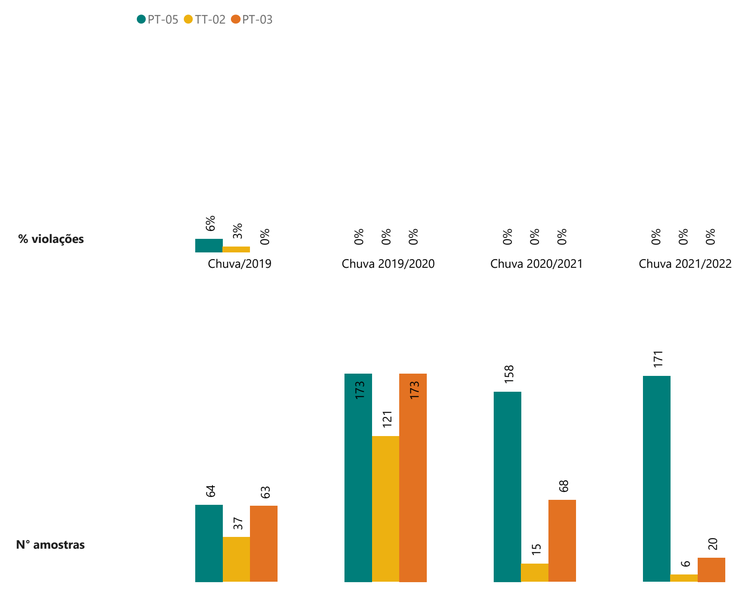
Parâmetro: Fósforo Total



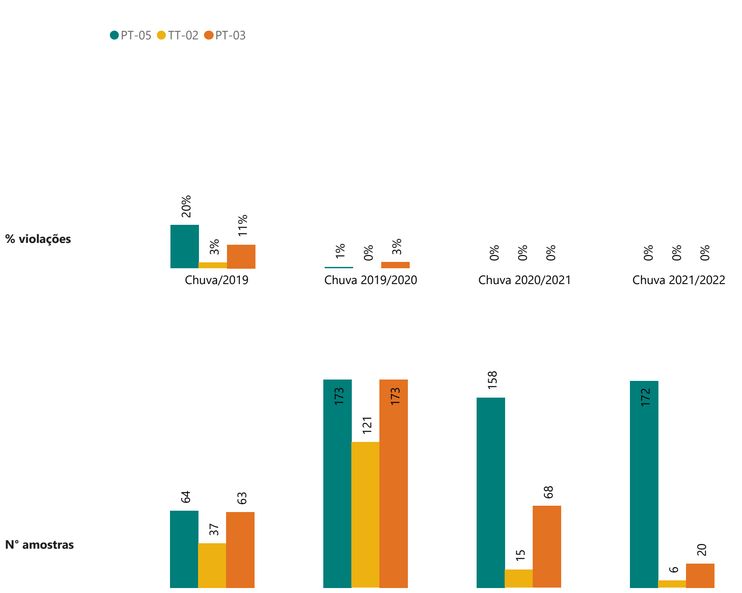
Parâmetro: Manganês Total



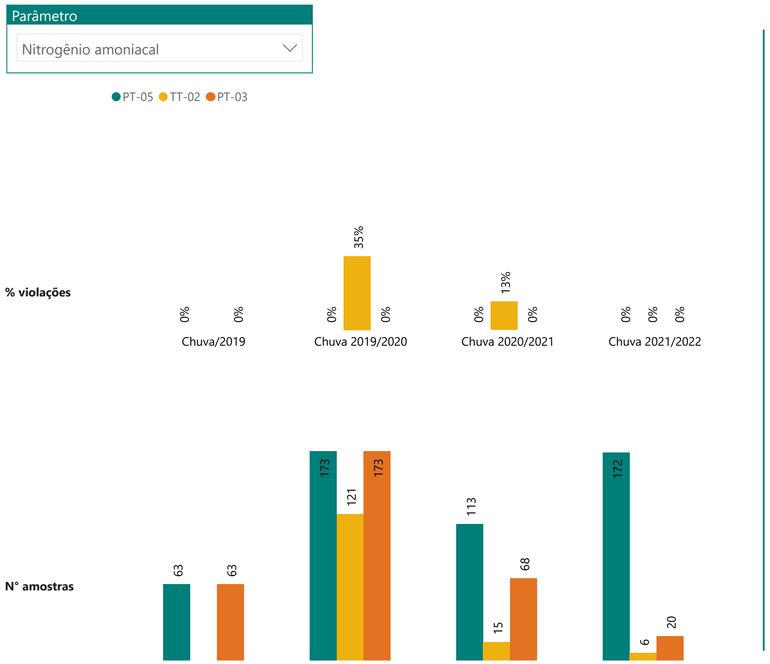
Parâmetro: Mercúrio Total

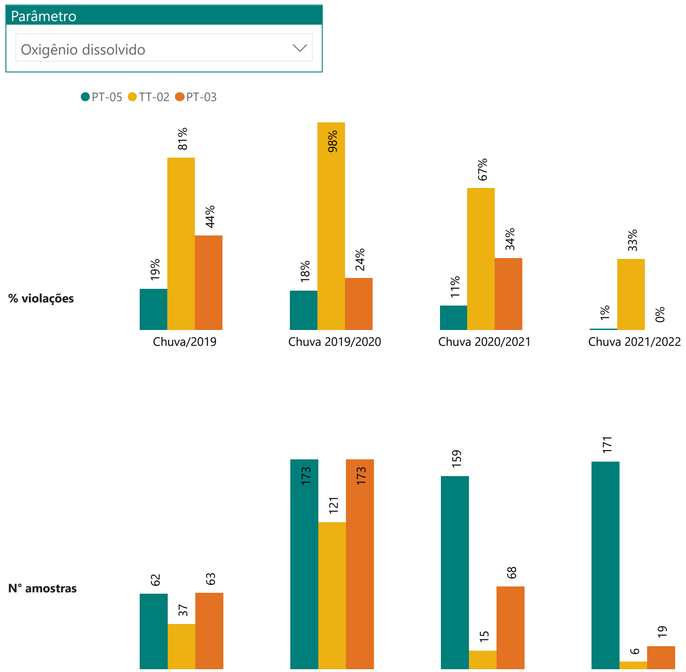


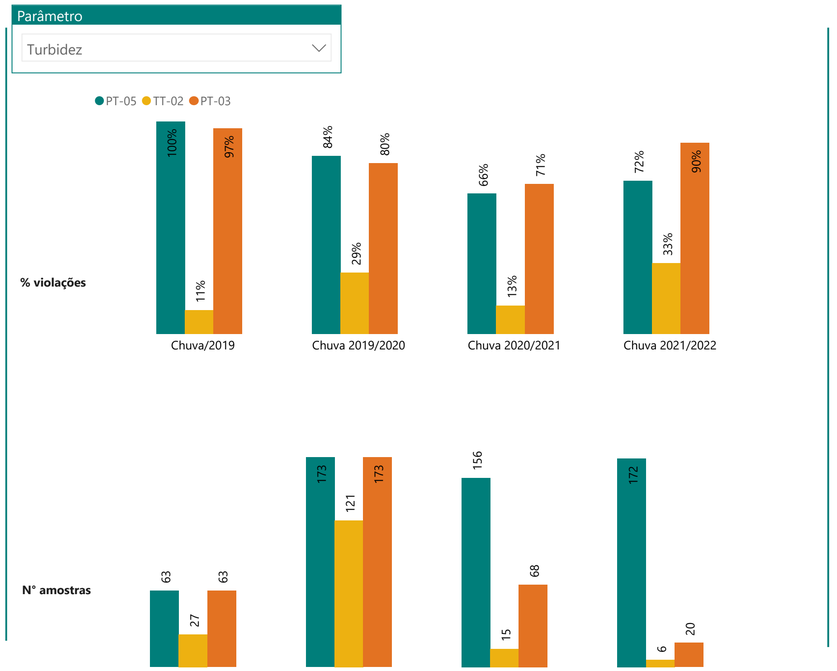
Parâmetro: Níquel Total

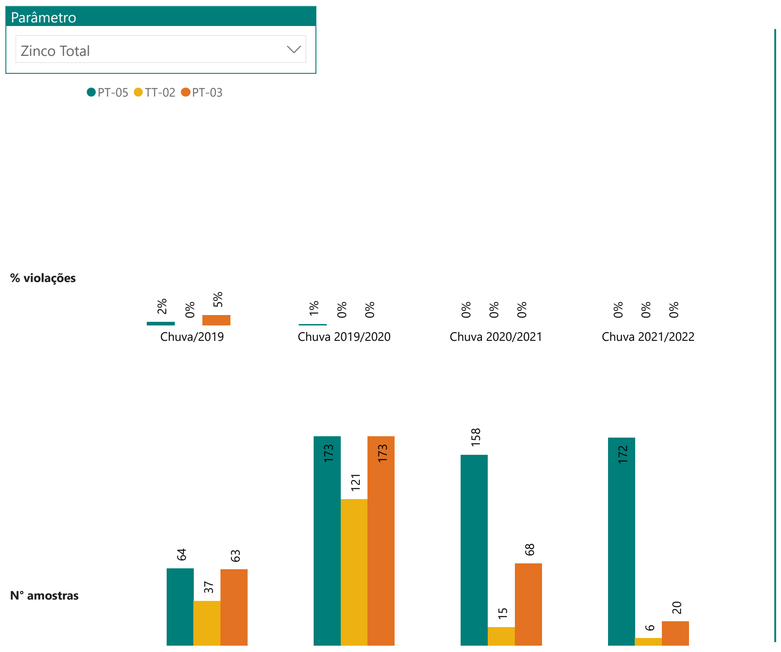


P90 e % Violações TT-02 (classe 2) - Montante e Jusante









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 e Oxigênio dissolvido ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 (janeiro/2019 a março/2019), chuva 2019/2020 (outubro/2019 a março/2020), chuva 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/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, é possível perceber significativa variabilidade, possivelmente em função das diferentes condições de precipitações. Cabe destacar 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.

Ao se observarem os resultados dos *baselines* sazonais, nota-se que o rio Paraopeba já é caracterizado por violações aos padrões legais (DN COPAM-CERH nº 01/2008) que podem estar associadas tanto a causas naturais quanto antrópicas.

Assim, observou-se que os teores medianos para os pontos de montante, tributário e jusante foram próximos ou superiores ao *baselines* do Igam (BP068). 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).

Os teores medianos para Alumínio dissolvido no tributário se mantiveram similares nos três períodos de chuva de 2019 a 2021. Já para o período de 2021/2022, a mediana foi superior ao VMP (0,1 mg/L) e ao *baseline,* conforme apontado pelos resultados do BP068 (0,1 mg/L).

Para Manganês total, notou-se que os teores medianos no tributário tiveram ligeiro incremento ao longo dos períodos de chuva de 2019 para 2022. Para todos os períodos, os teores medianos foram acima do VMP (0,1 mg/L) e do *baseline* (0,31 mg/L). Já para Ferro dissolvido, notou-se aumento na mediana dos teores, comparado ao período chuvoso anterior 2020/2021. Para Manganês total, notou-se que os teores medianos tiveram ligeiro incremento ao longo dos períodos de chuva. De modo que em todos os períodos os teores medianos foram acima do VMP (0,3 mg/L) e *baseline* (0,23 mg/L).

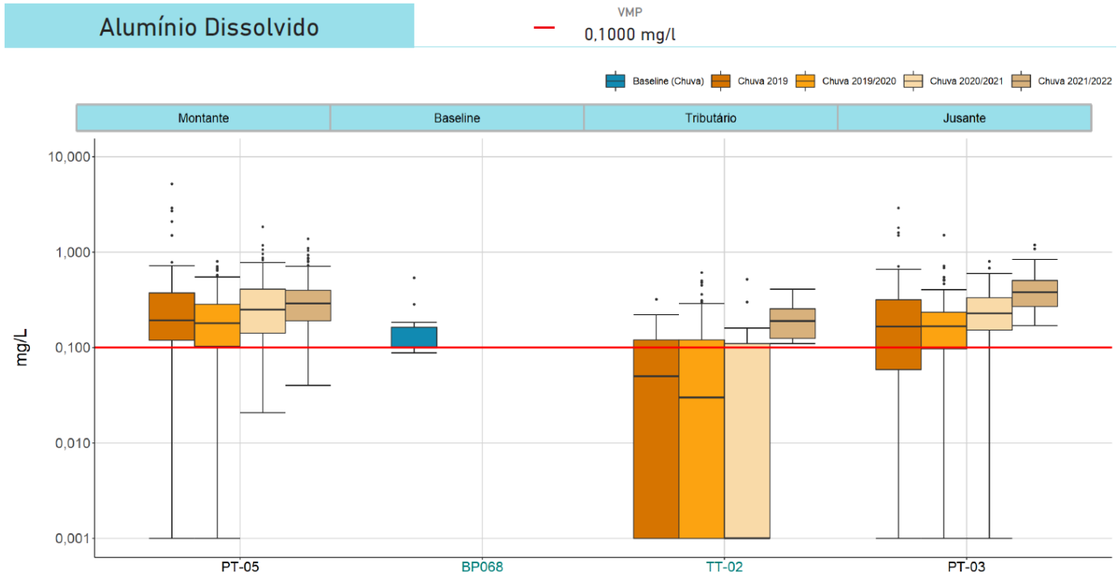
Para Turbidez, os resultados medianos no tributário se mantiveram abaixo do VMP (100 NTU) e inferiores aos observados para os pontos de montante e jusante ao longo dos períodos analisados. Verificou-se incremento dos valores no período de chuvoso 2021/2022 em relação ao período de chuva anterior. Para os pontos de montante e jusante, observou-se decréscimo nos valores do parâmetro ao longo dos períodos de chuvosos 2019, 2020, 2021 e 2022. Importante destacar que os resultados verificados estão associados aos fatores hidrológicos da bacia e sujeitos às oscilações de precipitação.

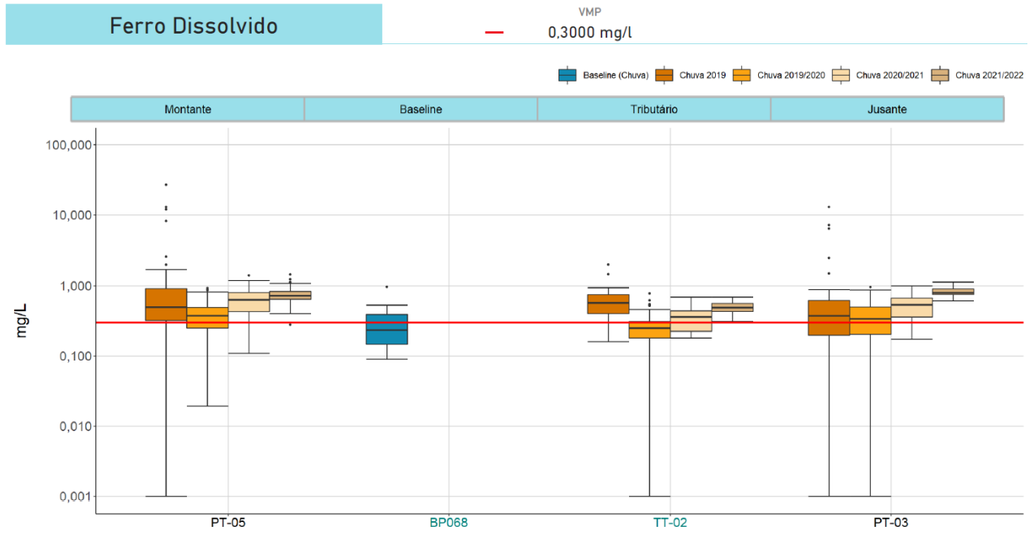
Observaram-se, para os períodos sazonais analisados, teores medianos mais elevados para *E. coli* e Fósforo total no tributário em relação aos pontos de montante e jusante, não implicando, contudo, em possível influência do ribeirão Sarzedo quanto a estes parâmetros na qualidade de água do rio Paraopeba. Destaca-se que os teores medianos observados para os períodos sazonais no ponto de jusante da confluência se mantiveram próximos aos mesmos observados para o ponto de montante. Da mesma maneira, os teores dos referidos parâmetros também foram superiores aos respectivos resultados para o período de *baseline* sazonais.

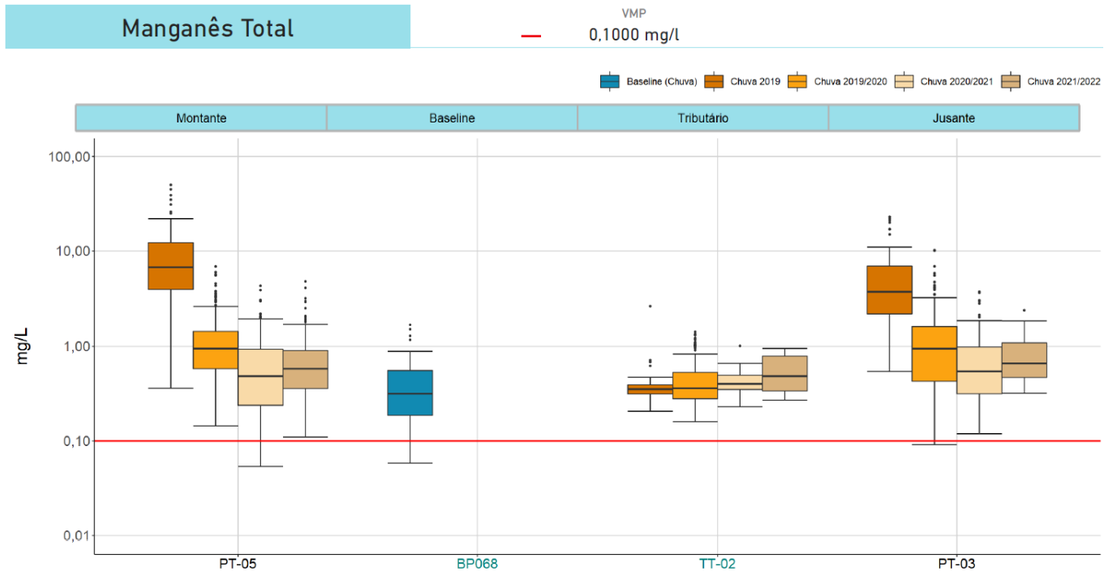
Em relação ao Oxigênio dissolvido, de modo geral, verificaram-se incremento nos teores medianos entre os períodos de chuva 2019 e 2021/2022. A mediana no tributário no período de chuva 2021/2022 foi superior ao valor mínimo requerido (5 mg/L) e inferior ao verificado para os pontos de montante e jusante.

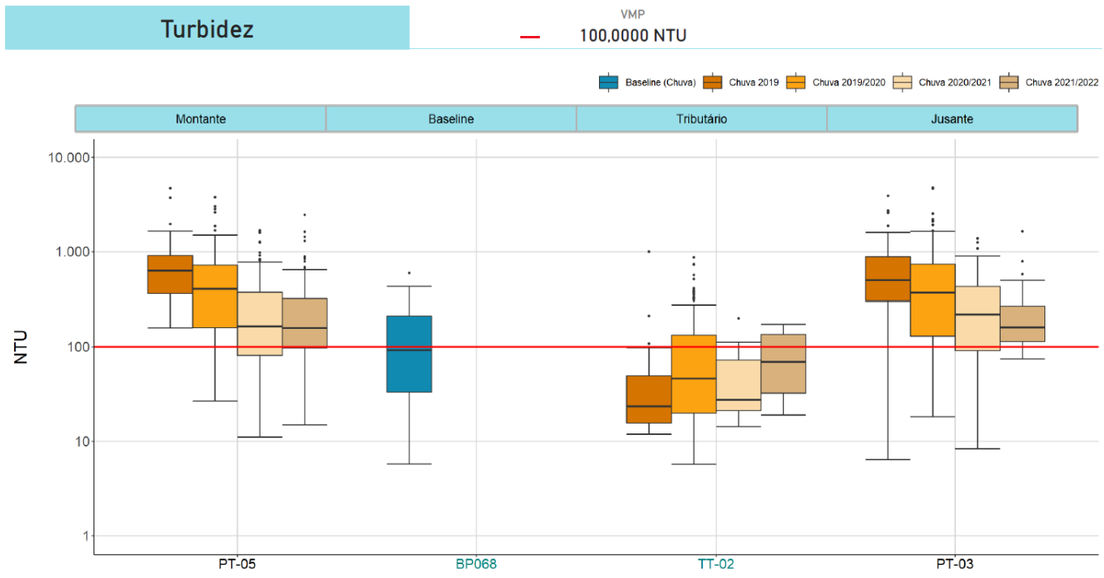
Por fim, é importante destacar que a variabilidade nas concentrações entre os pontos de montante, jusante e *baseline* pode estar associada, dentre outros aspectos, às diferentes frequências e abrangências temporais adotadas entre os monitoramentos Igam e VALE. O monitoramento pretérito oficial disponível 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 março/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.

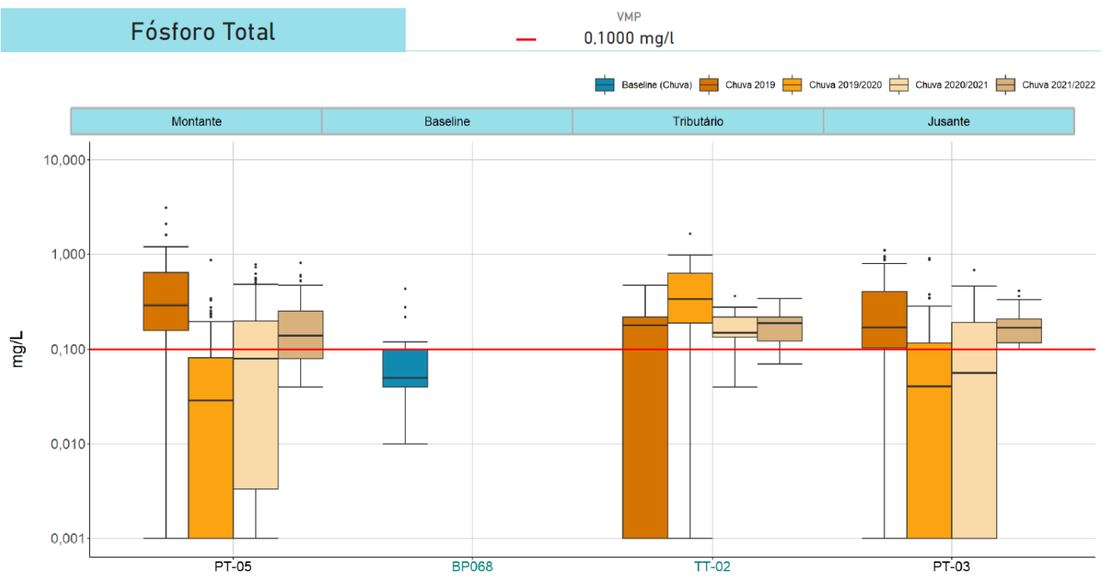




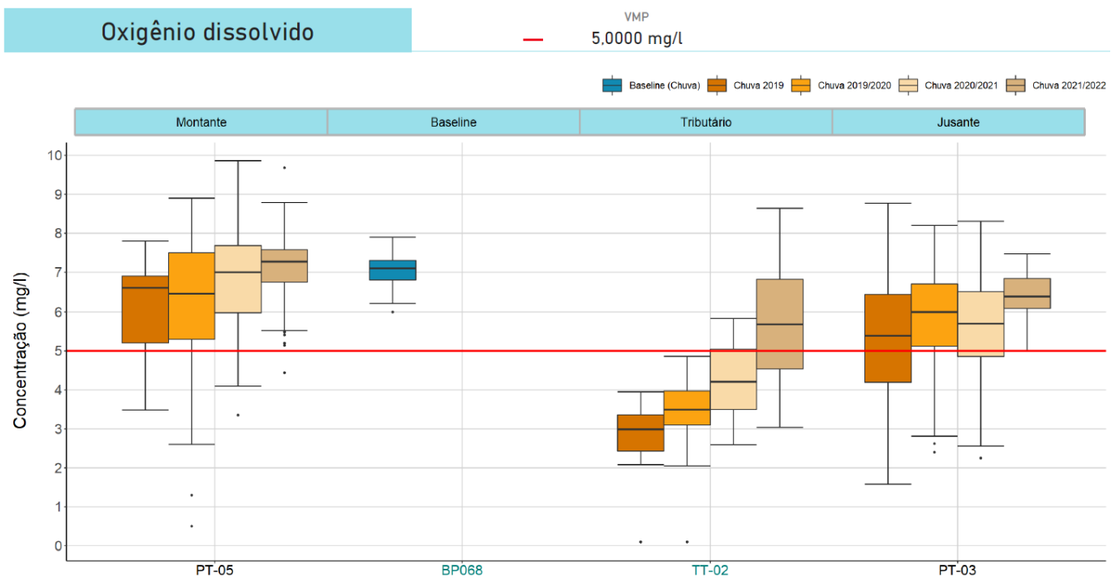




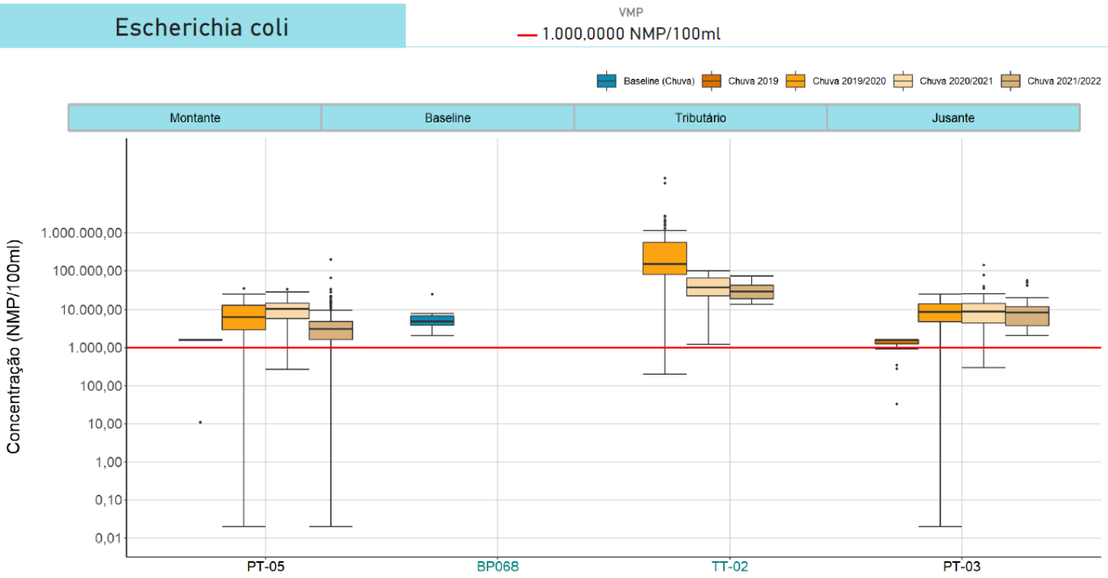
Fósforo Total



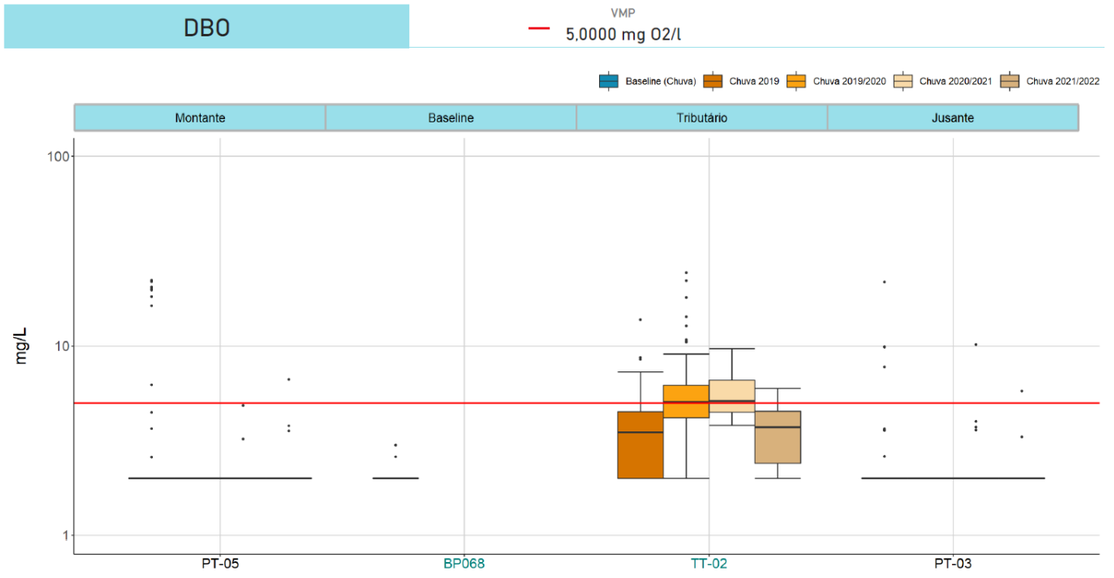
Oxigênio dissolvido



Escherichia coli



DBO



Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.1-1 podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para os parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, Chumbo total, DBO, *E. coli*/Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e Sólidos Suspensos totais (SST) nos períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 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.)	Chuva 2019	Chuva 2019/2020	Chuva 2020/2021	Chuva 2021/2022
Manganês Total	0,002	0,668	0,226	0,112
Ferro Dissolvido	0,012	0,182	0,008	0,004
Alumínio Dissolvido	0,143	0,142	0,410	0,019
Turbidez	0,329	0,372	0,365	0,562
Chumbo Total	0,008	0,693	0,000	0,476
DBO	0,512	1,000	0,129	0,030
EColi / ColiTermot.	0,204	0,010	0,383	0,000
Fósforo Total	0,008	0,113	0,229	0,215
Nitrogênio Amoniacal	0,013	0,000	0,816	0,000
Oxigênio Dissolvido	0,000	0,006	0,000	0,000
Sólidos Suspensos T.	0,001	0,802	0,330	0,164

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05) Elaboração: Arcadis, 2021.

De modo geral, notou-se que dentre os períodos de chuva analisados, em 2019 houve maior número de parâmetros (sete) com diferença estatística significativa entre os resultados do monitoramento do ponto de montante e de jusante. 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, Ferro dissolvido, Chumbo total, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, Oxigênio dissolvido e SST. Já nos períodos de chuva de 2019/2020 e 2020/2021, um menor número de parâmetros apresentou diferença significativa entre os pontos de montante e jusante, com destaque para Oxigênio dissolvido. Por fim, especificamente no período de chuva mais recente, chuva 2021/2022, para seis parâmetros houve indicativo de diferença significativa entre os pontos de montante e jusante, sendo eles Ferro e Alumínio dissolvidos, DBO, *E. coli,* Nitrogênio Amoniacal e OD. Logo, tais resultados possivelmente indicam que nos períodos chuvosos de 2019 e 2021/2022, o ribeirão Sarzedo se mostrou mais influente na qualidade do rio Paraopeba. Especificamente para o parâmetro Turbidez, 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. Nos períodos de estiagem, essa condição de ausência de diferença significativa entre montante e jusante foi identificada para os parâmetros DBO e *E. coli*/ Coliformes Termotolerantes (ARCADIS, 2021d).

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 chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 para o ponto TT-01 e para os pontos de montante (PT-14) e jusante (PT-48) localizados no rio Paraopeba.

No período de chuva/2019, para nenhum parâmetro foram observadas violações mais expressivas no tributário em comparação aos resultados verificados nos pontos de montante e jusante do rio Paraopeba. Destacam-se maiores violações registradas para os parâmetros traçadores (Manganês total – montante: 100%, tributário: 2%, jusante: 100%; Ferro Dissolvido montante: 43%, tributário: 0%, jusante: 61%; Alumínio dissolvido – montante: 13%, tributário: 17%, jusante: 69%; Turbidez - montante: 90%, tributário: 41%, jusante:100%) e para alguns parâmetros de cunho sanitário (Fósforo total - montante: 42%, tributário: 54%, jusante: 59%).

No período chuvoso 2019/2020, violações mais expressivas no tributário rio Betim em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os seguintes parâmetros: DBO, *E. coli*, Fósforo total, Nitrato, Nitrito e Nitrogênio Amoniacal. Dentre esses parâmetros, notou-se que para *E. coli* (montante: 89%, tributário: 99% e jusante: 94%), Fósforo total (montante: 26%, tributário: 93% e jusante: 48%) e Nitrito (montante: 0%; tributário: 8%; jusante: 1%) houve aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário quanto a estes parâmetros.

No período de chuva 2020/2021, violações mais expressivas no tributário rio Betim em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os parâmetros: Arsênio total (montante: 0%, tributário: 4% e jusante: 2%), Fósforo total (montante: 26%, tributário: 100%, jusante: 49%), Nitrogênio Amoniacal (montante: 0%, tributário: 38%, jusante: 1%) e Oxigênio dissolvido (montante: 6%, tributário: 38%, jusante: 31%) apresentaram aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário para estes parâmetros. Em relação aos parâmetros marcadores, notaram-se percentuais de violação elevados (próximos de 100%) e foram registrados os seguintes percentuais de violação para os referidos parâmetros: Manganês total (montante: 85%; tributário: 0%; jusante: 99%), Ferro dissolvido (montante: 93%; tributário: 0%; jusante: 93%), Alumínio dissolvido (montante: 82%; tributário: 42%; jusante: 84%). Em relação à Turbidez, foram registrados os seguintes resultados: montante: 57%, tributário: 39%, jusante: 63%.

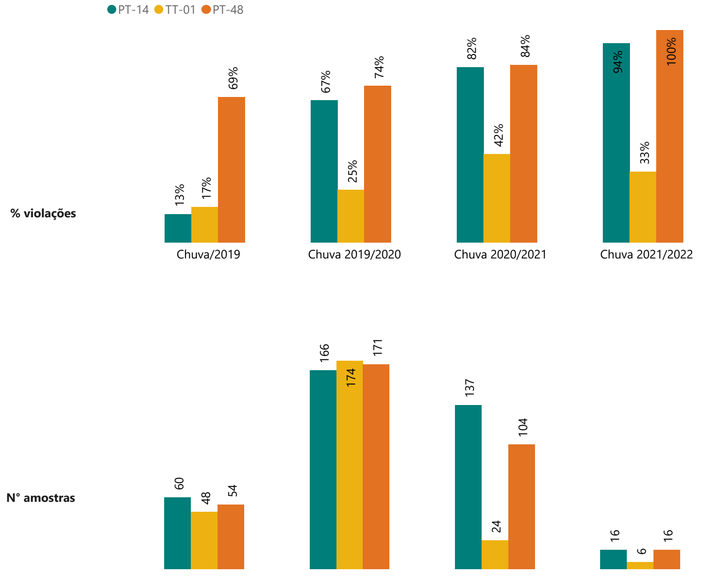
Para o período chuvoso 2021/2022, de modo geral, foram observados percentuais de violações inferiores aos observados para os demais períodos. Os seguintes percentuais de violação foram

apontados para os parâmetros marcadores: Ferro Dissolvido (montante: 100%, tributário: 0%, jusante: 100%), Manganês Total (montante: 94%, tributário: 0%, jusante: 100%), Alumínio dissolvido (montante: 94%, tributário: 33%, jusante: 100%) e Turbidez (38%, 50%, 69%). Em relação aos parâmetros de origem sanitária, notou-se constância de violações para *E. coli* no tributário, correspondente a 100%, mesmo comportamento verificado para Fósforo total. Os percentuais observados nos pontos de montante, tributário e jusante foram: OD (0%, 33%, 0%), *E. coli* (88%, 100%, 100%) e Fósforo total (44%, 100%, 75%). Não foram observadas violações aos limites de classe para os pontos de montante, tributário e jusante, para os parâmetros: Arsênio total, Cádmio total, Cobalto total, Cobre dissolvido, Cromo total, Mercúrio total, Níquel total, Nitrogênio amoniacal e Zinco total.

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

P90 e % Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante

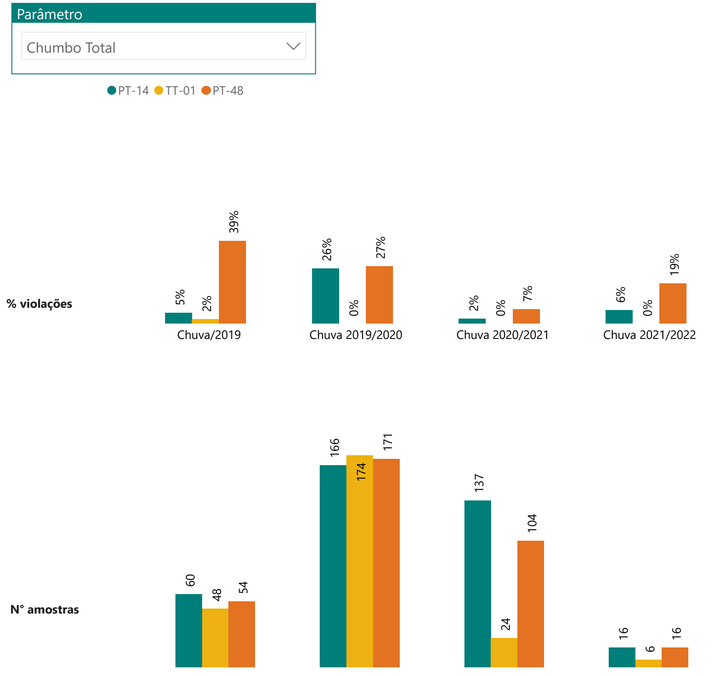
Parâmetro: Alumínio Dissolvido



Parâmetro: Arsênio Total

Parâmetro: Cádmio Total

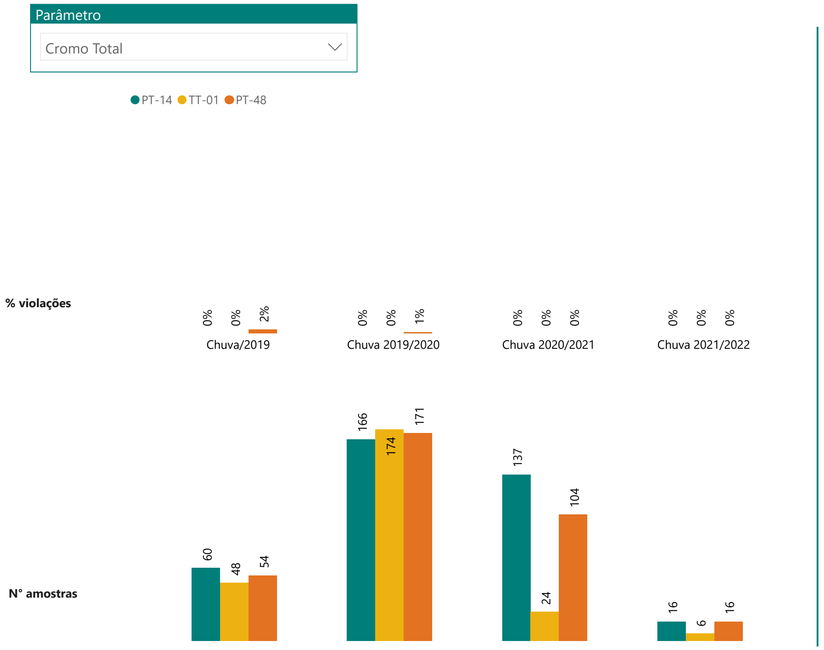
Parâmetro: Chumbo Total

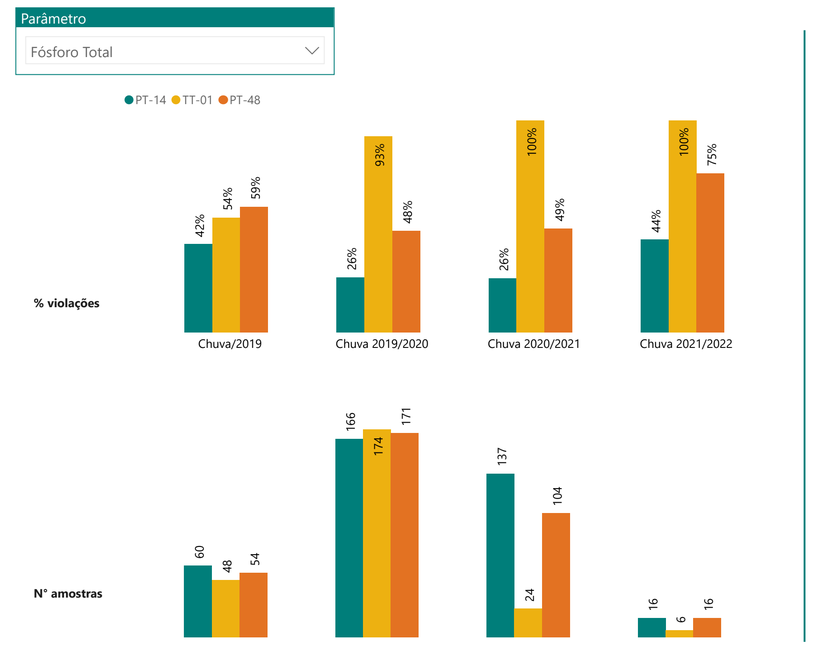


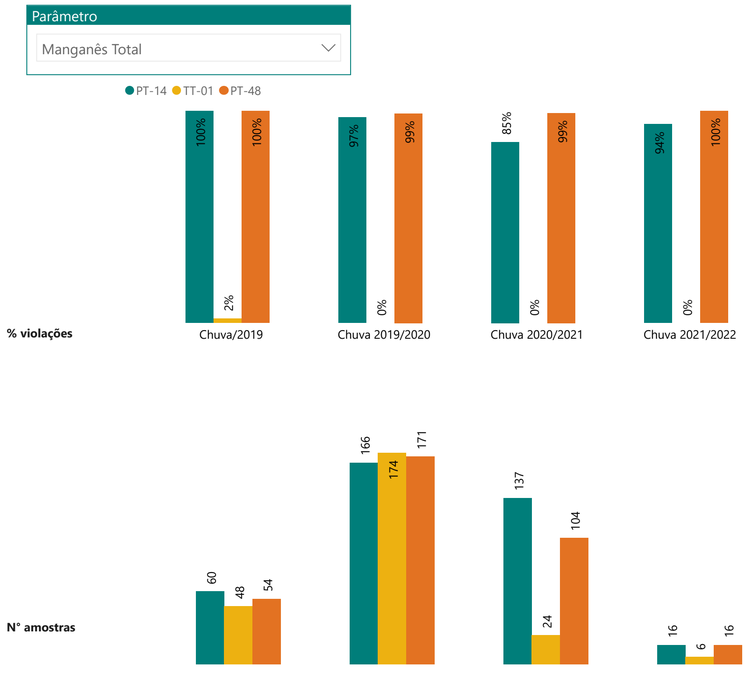
Parâmetro: Cobalto Total

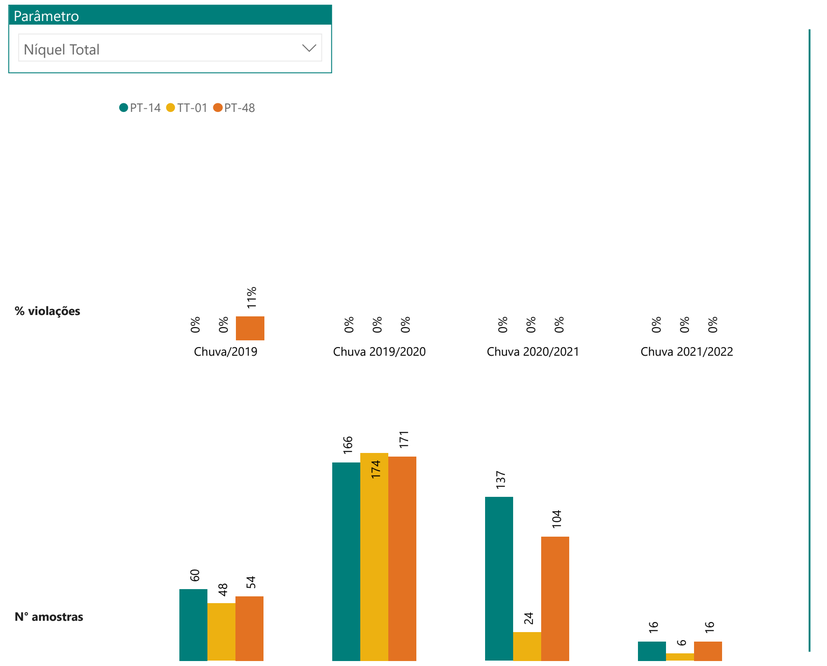
Parâmetro: Cobre Dissolvido

P90 e % Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante

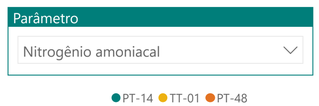


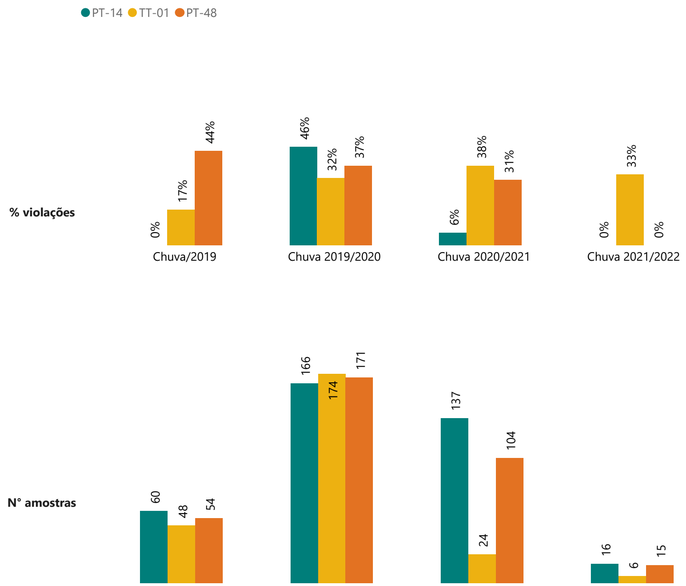


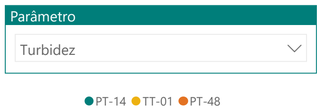


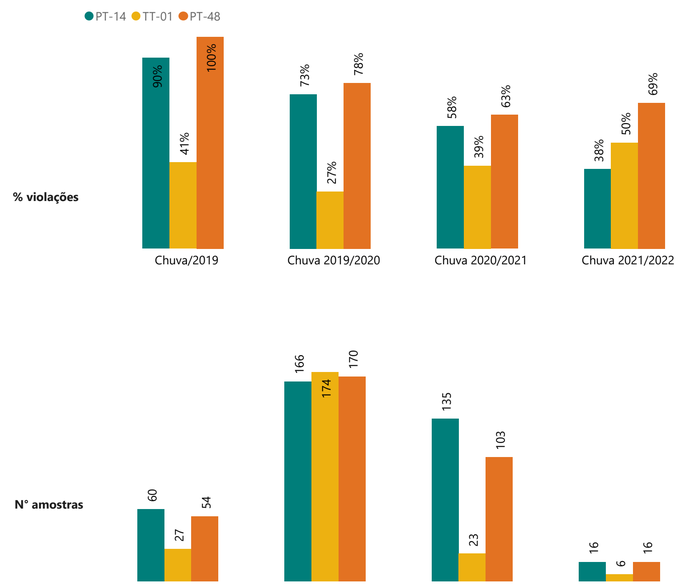


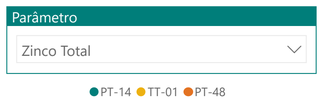
P90 e % Violações TT-01 (classe 3) - Montante e jusante











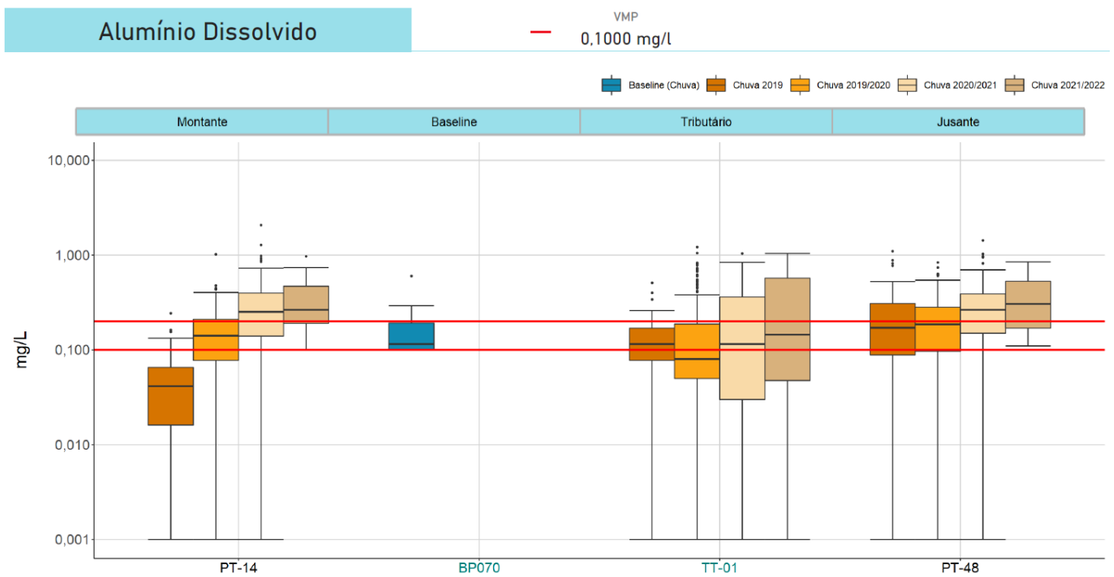
No Gráfico 8.3.2-2 são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*, Fósforo total e Oxigênio dissolvido ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 (janeiro/2019 a março/2019), chuva 2019/2020 (outubro/2019 a março/2020), chuva 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/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 pelas quais os *boxplots* são gerados.

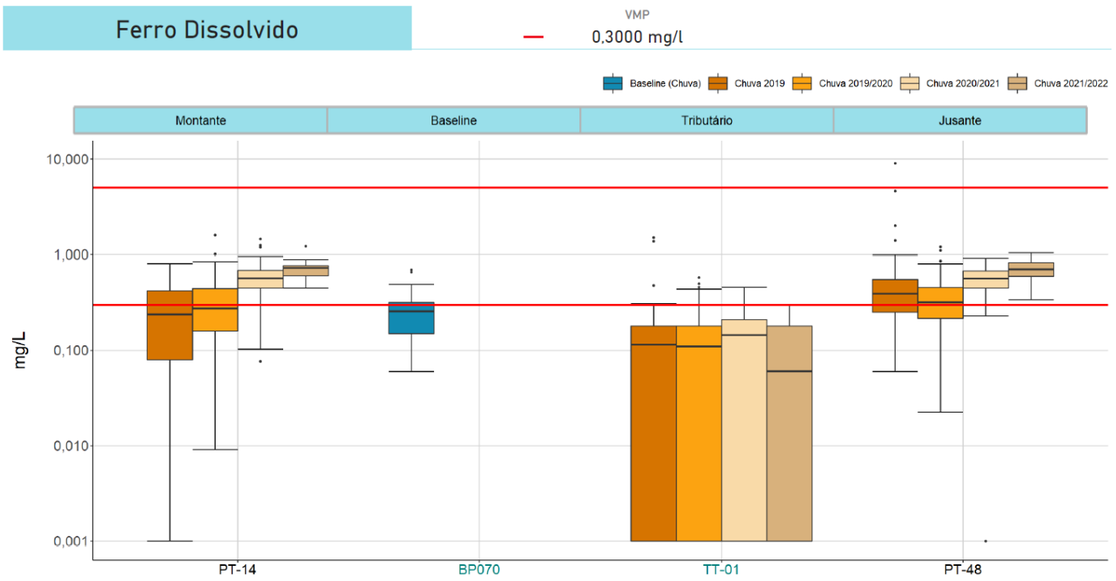
Assim como analisado para o tributário ribeirão Sarzedo, para o rio Betim as concentrações dos parâmetros também são influenciadas pela sazonalidade, quando se detectam concentrações mais elevadas nos períodos de chuva devido ao escoamento superficial da bacia e das vazões fluviais, principalmente dos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

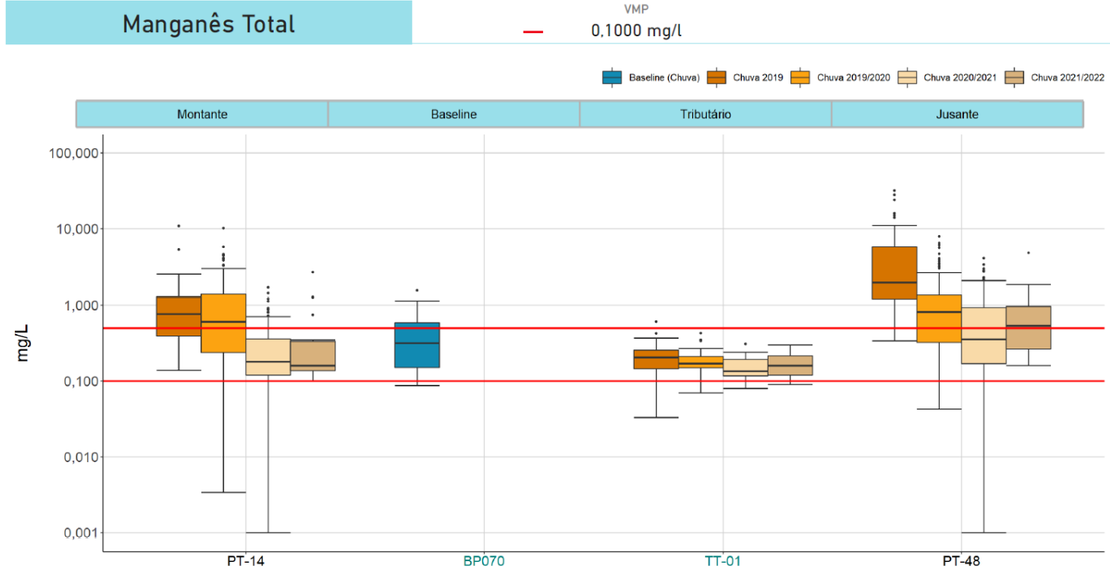
Em relação aos parâmetros marcadores no tributário, notou-se que os teores medianos foram, em geral, próximos ou inferiores ao *baseline.* Destaca-se que para todos os períodos de chuva analisados, os teores medianos dos parâmetros marcadores permaneceram próximos aos respectivos VMP's para Classe 3. Para Turbidez, de modo geral, os resultados medianos no tributário se mantiveram abaixo do VMP (100 NTU) e próximos aos observados para os pontos de montante e jusante.

Observaram-se, para os períodos analisados, teores medianos mais elevados para os parâmetros de cunho sanitário *E. coli* e Fósforo total no tributário em relação aos pontos de montante e jusante. Destaca-se que os teores medianos observados para o período de chuva no ponto do tributário foram superiores aos respectivos VMP's e ainda superiores aos respectivos resultados para o *baseline*. Notou-se, ademais, que os teores medianos para Oxigênio dissolvido, de modo geral, reduzem no ponto de jusante da confluência com o rio Betim. É importante considerar que a confluência do tributário com o rio Paraopeba (zona de mistura), associada ao aumento de vazão, favorecem diluição e depuração da matéria orgânica biodegradável, a qual é oxidada com consequente consumo/redução das concentrações de OD.

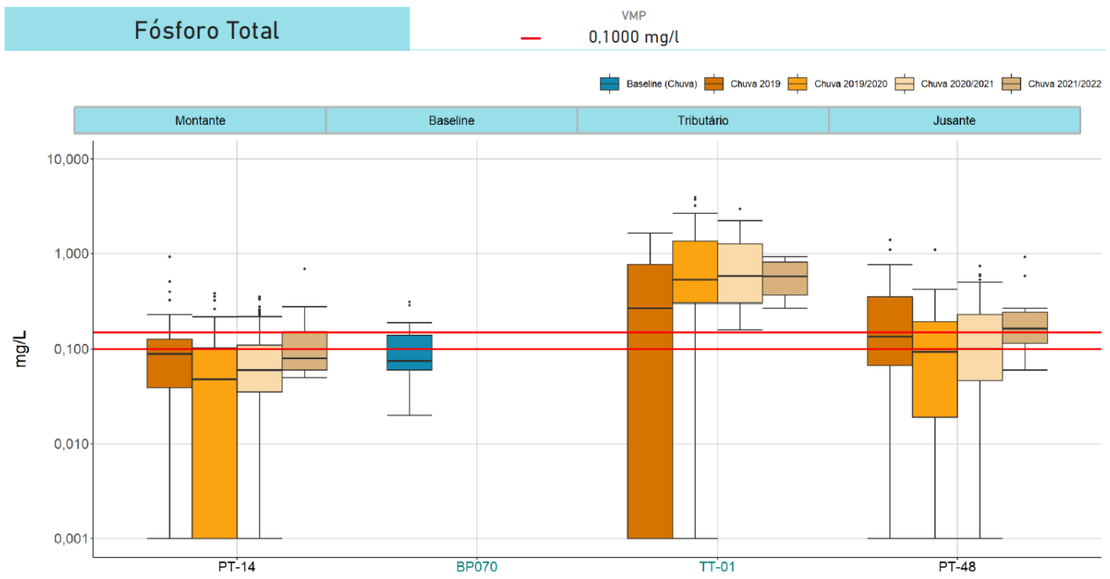
Gráfico 8.3.2-2: *Boxplots*- TT01.



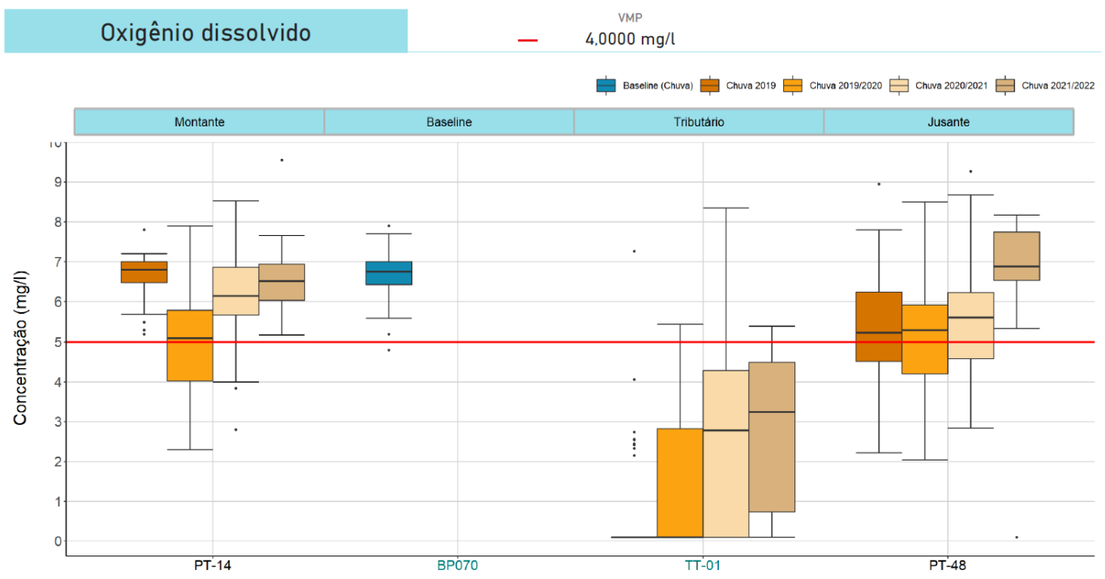




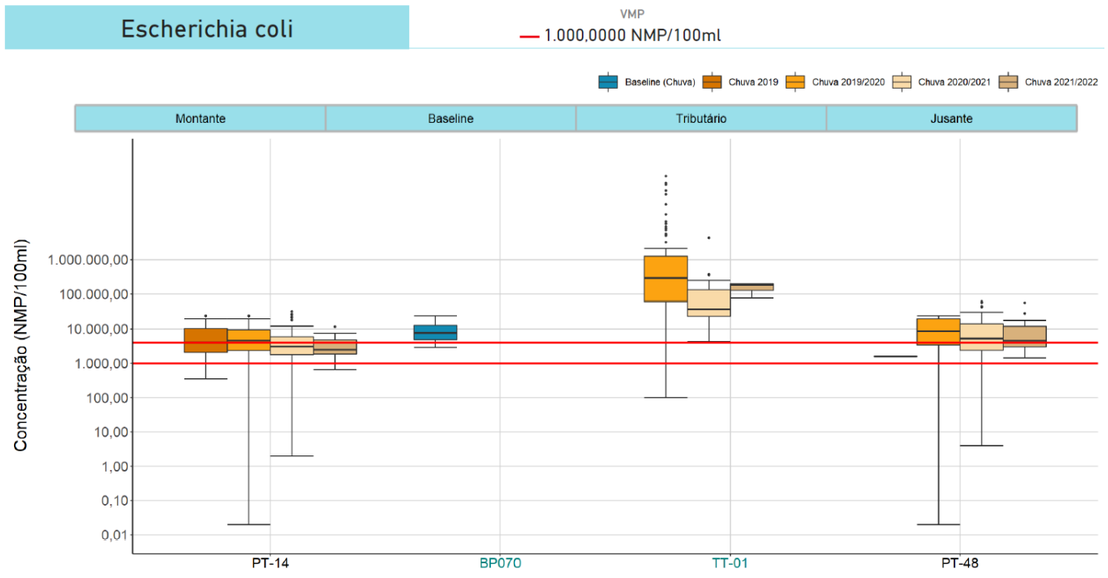
Fósforo Total



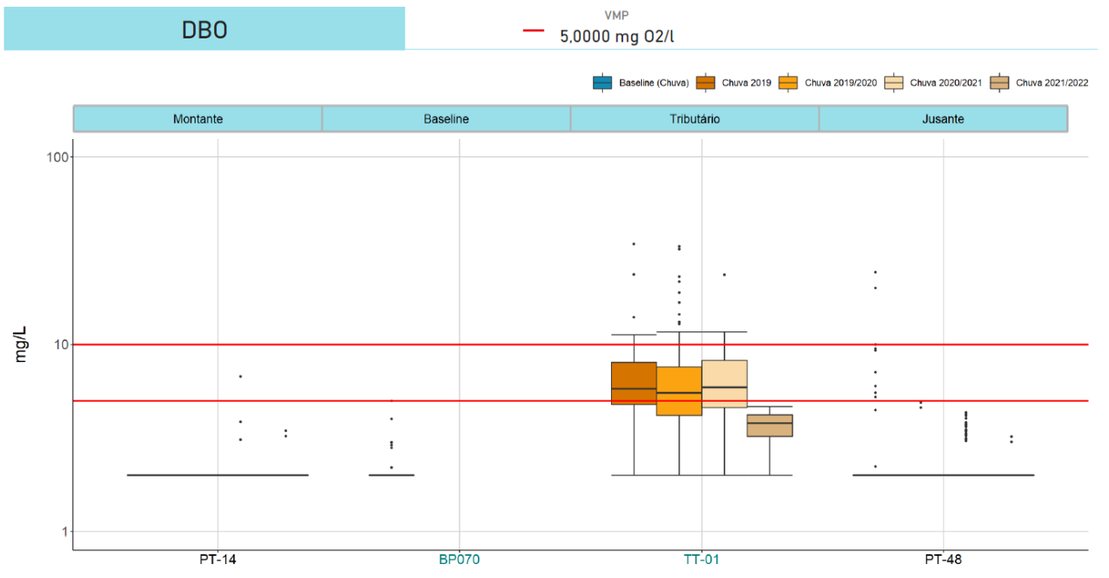
Oxigênio dissolvido



Escherichia coli



DBO



Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.2-1 podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para os parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, Chumbo total, DBO, *E. Coli*/ Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e Sólidos suspensos totais (SST) nos períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 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.)	Chuva 2019	Chuva 2019/2020	Chuva 2020/2021	Chuva 2021/2022
Manganês Total	0,000	0,062	0,000	0,006
Ferro Dissolvido	0,000	0,075	0,654	0,948
Alumínio Dissolvido	0,000	0,001	0,634	0,994
Turbidez	0,000	0,087	0,081	0,035
Chumbo Total	0,392	0,458	0,003	0,131
DBO	0,000	0,167	0,000	0,733
EColi / ColiTermot.	0,008	0,000	0,000	0,017
Fósforo Total	0,012	0,000	0,000	0,032
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,000	0,000	0,016
Oxigênio Dissolvido	0,000	0,350	0,000	0,116
Sólidos Suspensos T.	0,000	0,022	0,003	0,050

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05) Elaboração: Arcadis, 2021.

De modo geral, nos períodos de chuva 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 e os parâmetros relacionados a origem sanitária, condição também verificada nas comparações dos períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). Dentre esses, destaca-se *E. coli,* Fósforo total e Nitrogênio Amoniacal, com indicativo de maior possibilidade de influência do tributário rio Betim na qualidade da água do rio Paraopeba nos três períodos de chuva. 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. Para o parâmetro Ferro dissolvido, foi identificada diferença estatística significativa entre os pontos de montante e jusante da confluência com o rio Betim apenas no período de chuva/2019, enquanto nas comparações estabelecidas nos períodos e estiagem (ARCADIS, 2021d) não houve diferença significativa, sendo este parâmetro característico da bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Em termos dos períodos de chuva analisados, destaca-se o período de chuva/2019 com maior número de parâmetros com diferença significativa, seguido do período de chuva 2020/2021.

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 chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 para o ponto TT-05 e para os pontos de montante e jusante localizados no rio Paraopeba.

No período de chuva/2019, foi possível observar maiores percentuais de violação no tributário ribeirão das Abóboras em relação aos pontos de montante e jusante para os parâmetros Alumínio dissolvido (montante: 17%; tributário: 84%; jusante: 21%) e Oxigênio dissolvido (montante: 14%; tributário: 84%; jusante: 12%). No entanto, apenas para Alumínio dissolvido as violações no ponto de jusante superaram as registradas a montante, indicando, assim, possível contribuição do tributário em relação a esse parâmetro.

No período chuvoso 2019/2020, violações mais expressivas no tributário ribeirão das Abóboras em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os seguintes parâmetros: Alumínio dissolvido, DBO, Ferro dissolvido, Fósforo total e Oxigênio dissolvido. Dentre esses parâmetros, notou-se que para Ferro dissolvido (montante: 36%, tributário: 77% e jusante: 37%) e Fósforo total (montante: 45%, tributário: 64% e jusante: 48%) houve pequeno aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário quanto a estes parâmetros.

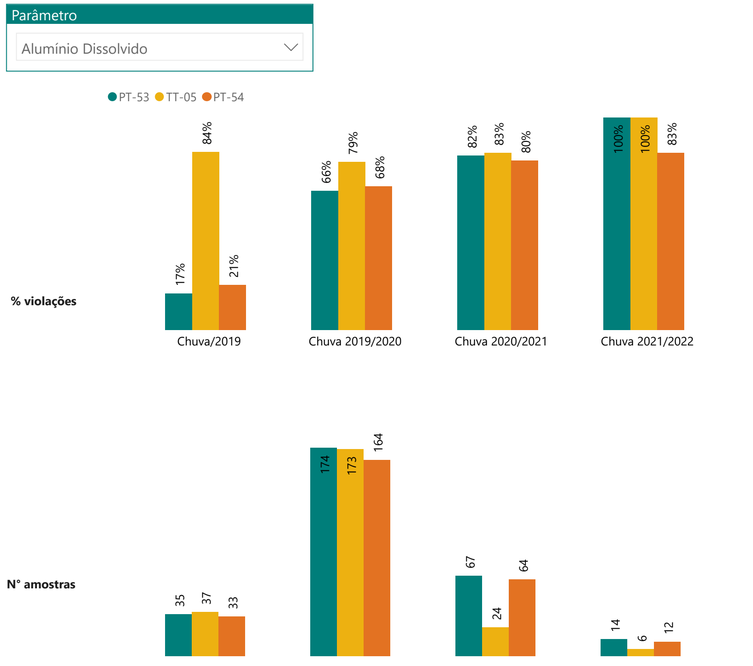
No período chuvoso 2020/2021, em geral, verificaram-se violações mais expressivas no tributário ribeirão das Abóboras em relação aos pontos de montante e jusante da confluência para Alumínio dissolvido, DBO, Ferro dissolvido, Oxigênio dissolvido, Sólidos suspensos totais e Turbidez. Dentre esses parâmetros, DBO (montante: 1%, tributário: 4% e jusante: 3%), Ferro dissolvido (montante: 85%, tributário: 92% e jusante: 88%), Sólidos suspensos totais (montante: 57%, tributário: 67% e jusante: 59%) e Turbidez (montante: 64%, tributário: 79% e jusante: 67%) apresentaram aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário.

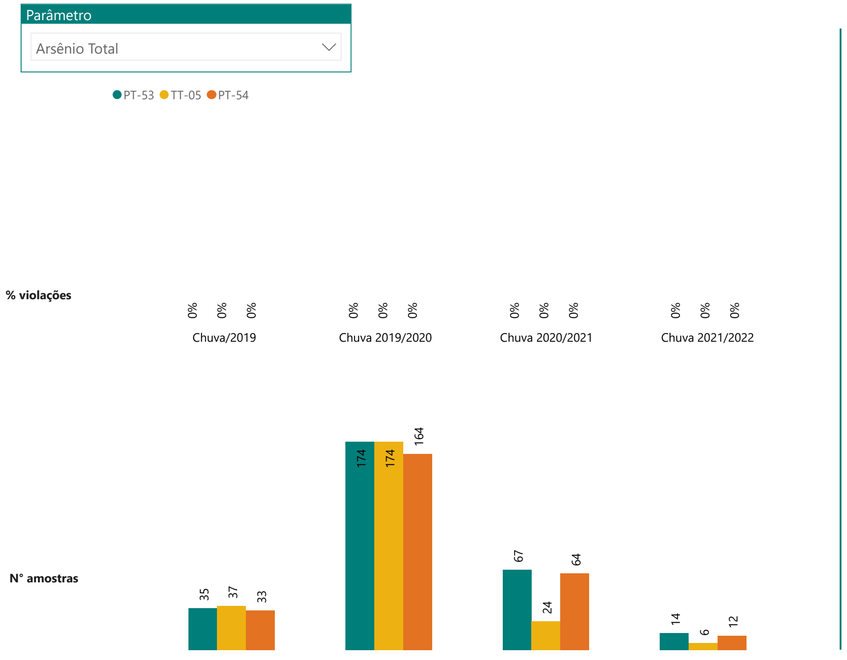
Para o período chuvoso 2021/2022, foram observados os seguintes percentuais de violação para os parâmetros marcadores: Ferro Dissolvido (montante: 100%, tributário: 83%, jusante: 100%), Manganês total (montante: 100%, tributário: 17%, jusante: 100%), Alumínio dissolvido (montante: 100%, tributário: 100%, jusante: 83%) e Turbidez (57%, 67%, 50%). Em relação aos parâmetros de origem sanitária, notou-se estabilidade de violações de *E. coli*, permanecendo percentual de 50% quando comparado ao período de 2020/2021. Os percentuais observados nos pontos de montante, tributário e jusante foram: OD (14%, 0%, 8%), *E. coli* (100%, 50%, 92%) e Fósforo total

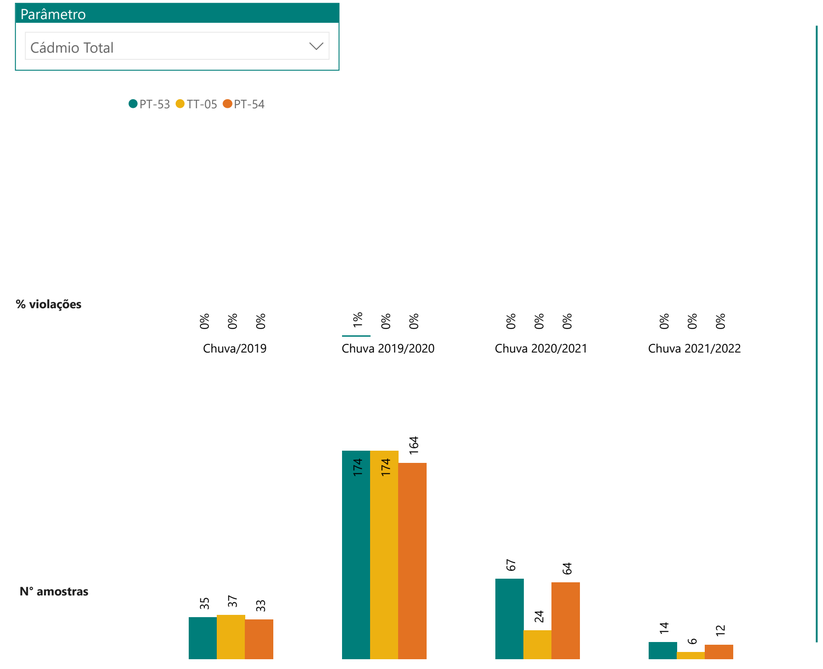
(64%, 50%, 75%). Não foram verificadas violações nos pontos de montante, tributário e jusante no período, para os parâmetros: Arsênio total, Cádmio total, Cobalto total, Cobre dissolvido, Cromo total, Mercúrio total, Níquel total, Nitrogênio amoniacal e Zinco total.

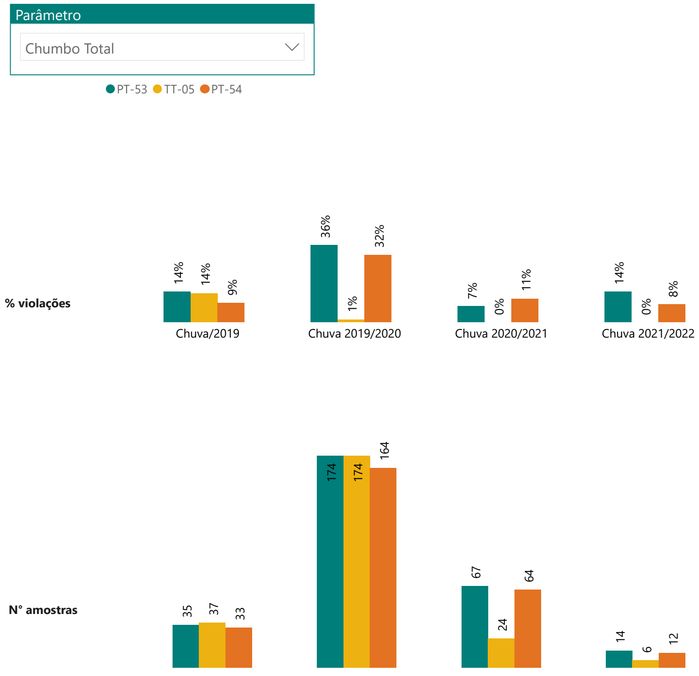
Gráfico 8.3.3-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no TT05 (ribeirão Grande) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba

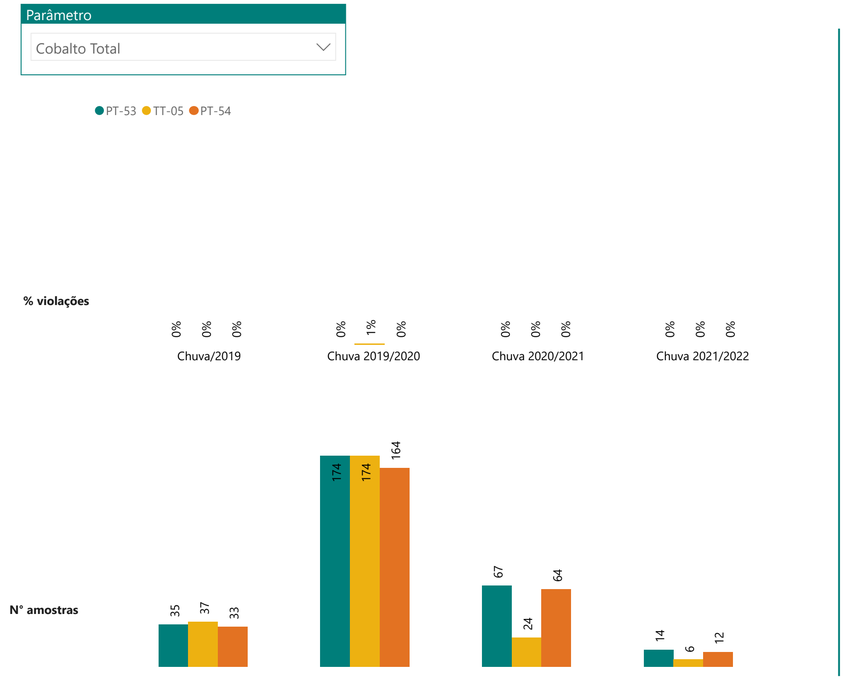
% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante





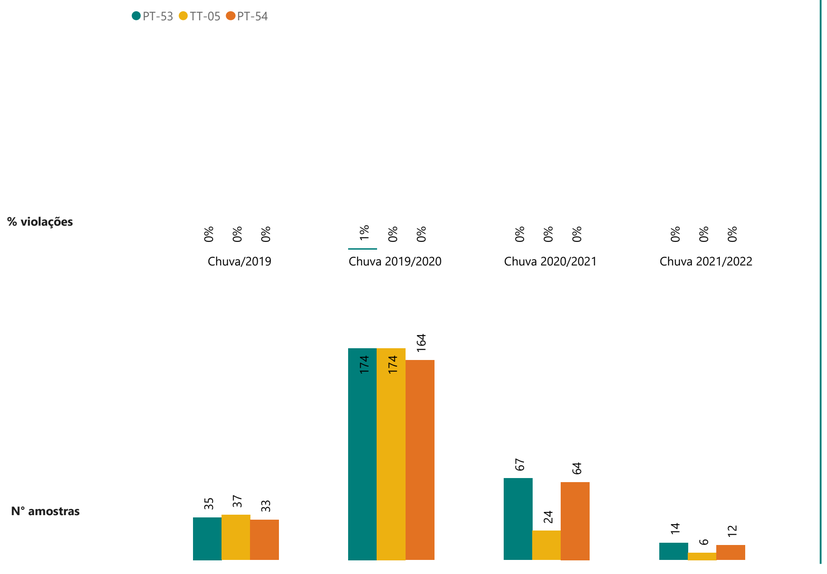




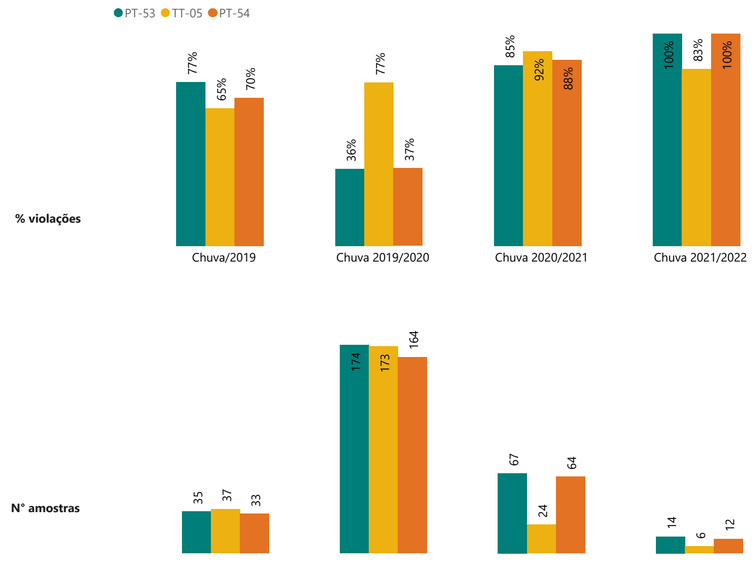


% Violações TT-05 (classe 2) - Montante e Jusante

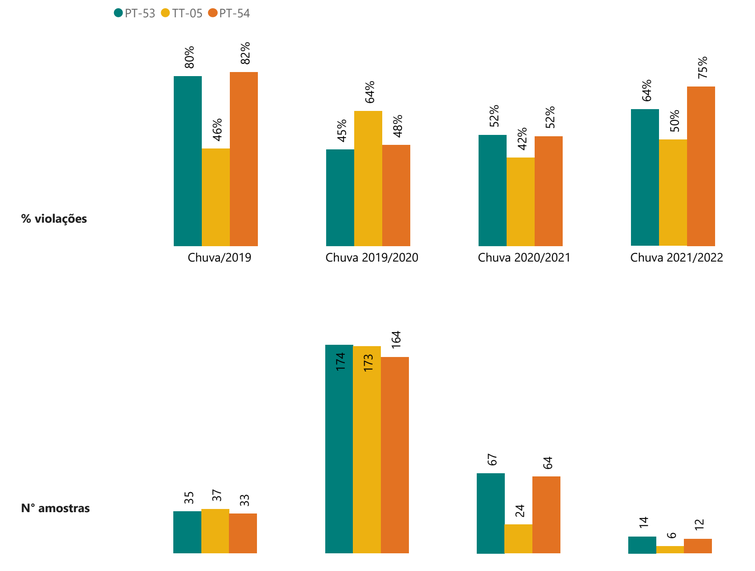
Parâmetro: Cromo Total



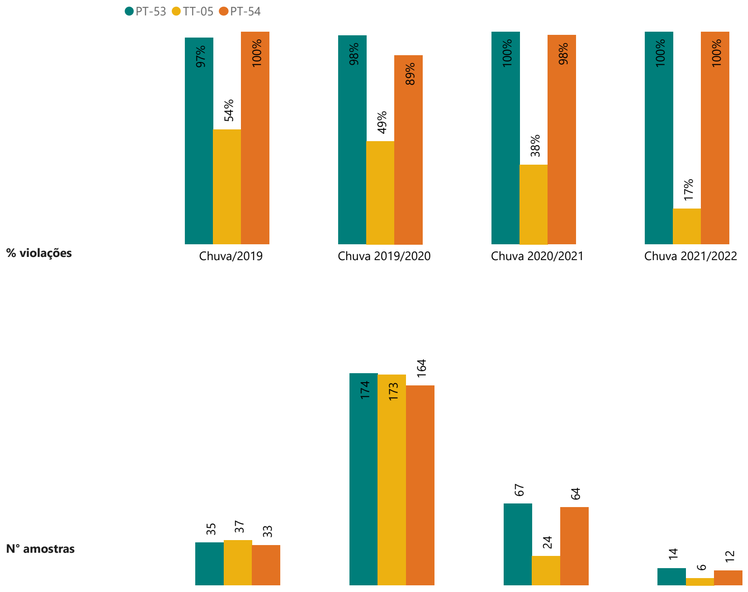
Parâmetro: Ferro Dissolvido



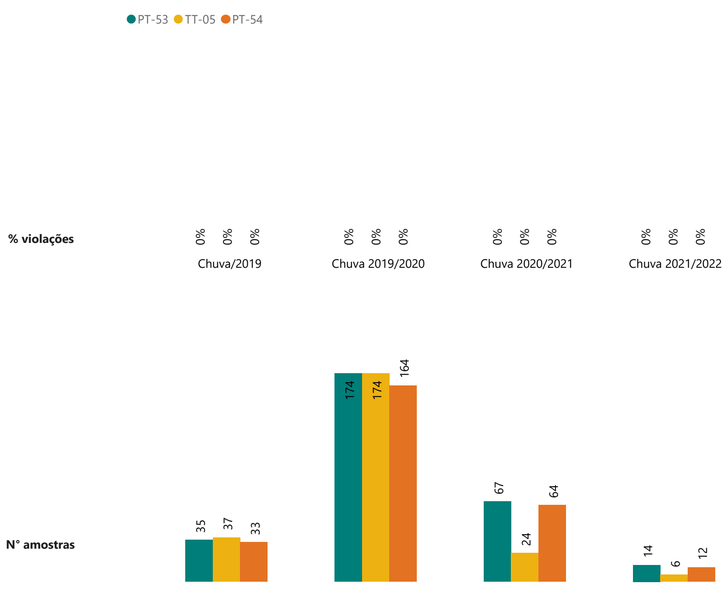
Parâmetro: Fósforo Total



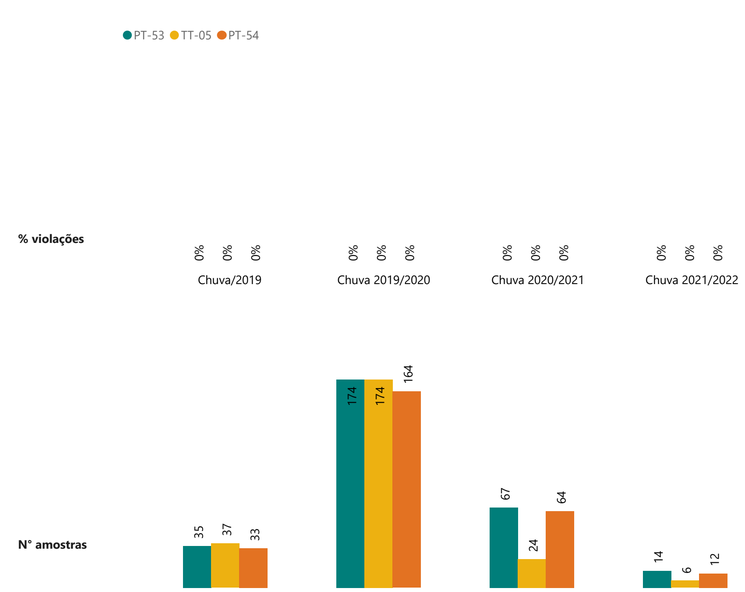
Parâmetro: Manganês Total



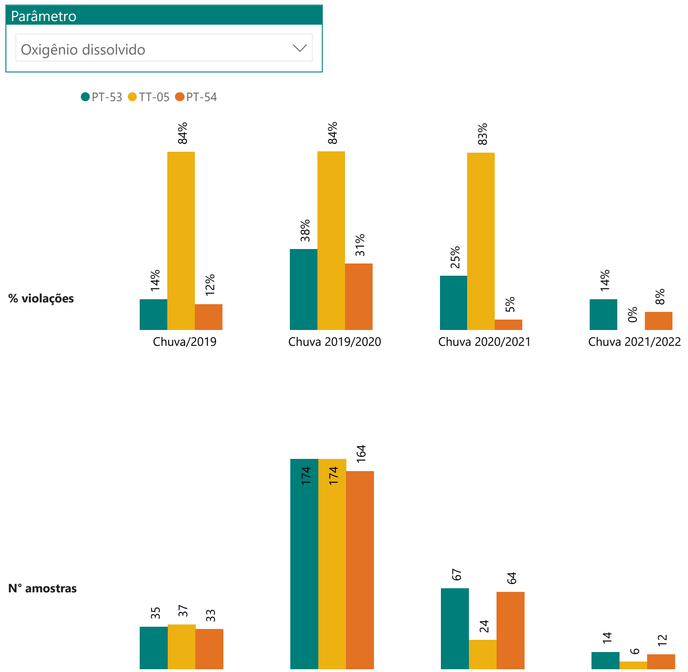
Parâmetro: Mercúrio Total

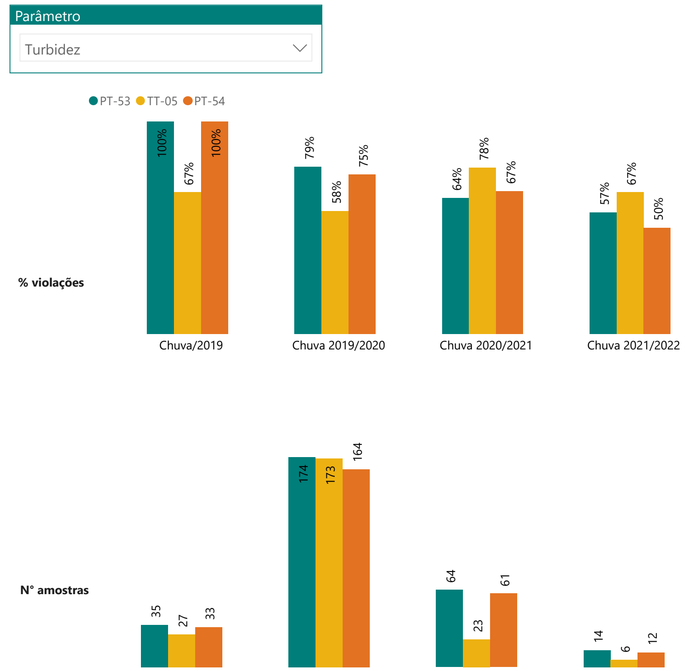


Parâmetro: Níquel Total



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





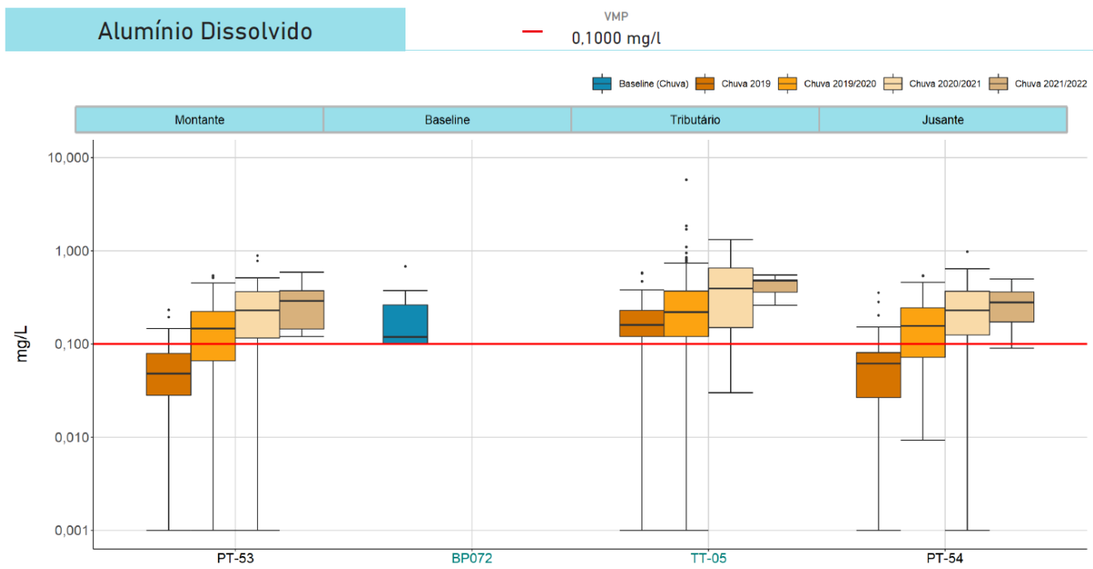
No Gráfico 8.3.3-2 são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*, Fósforo total e Oxigênio dissolvido ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 (janeiro/2019 a março/2019), chuva 2019/2020 (outubro/2019 a março/2020), chuva 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/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.

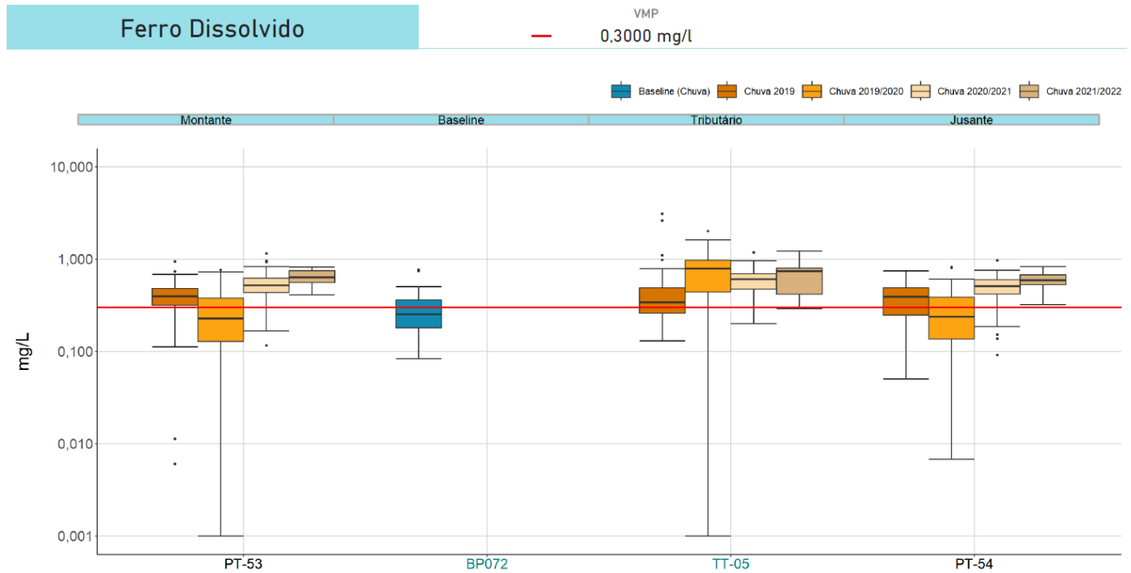
De modo geral, observam-se resultados medianos do *baseline* superiores aos valores máximos permitidos segundo a classe de enquadramento (DN COPAM-CERH nº 01/2008) para todos os parâmetros no período sazonal analisado. Para a maioria dos parâmetros, os teores medianos nos pontos do tributário e jusante foram próximos ou superiores ao *baseline* do Igam (BP072).

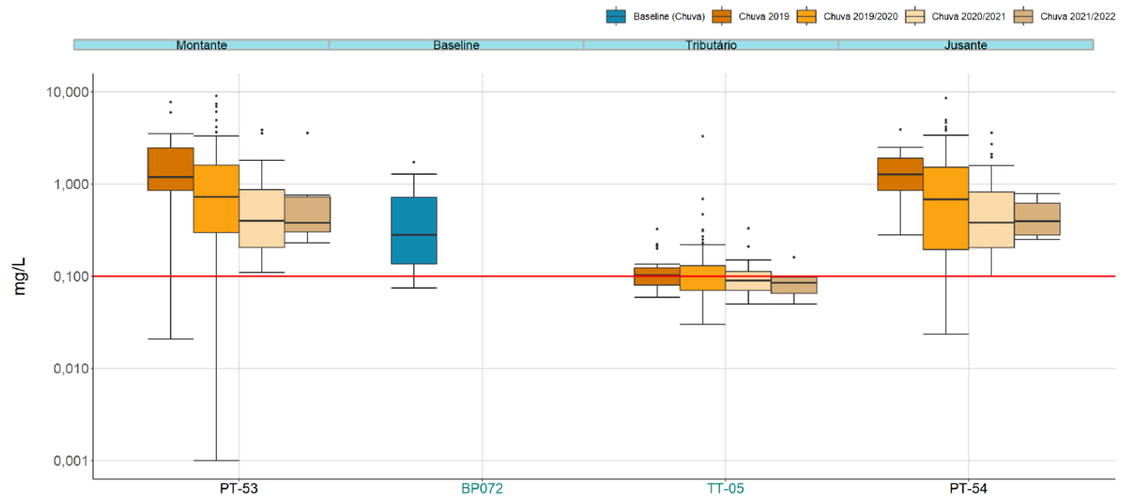
As concentrações medianas de Alumínio dissolvido no tributário aumentaram entre os períodos de chuva 2019 e 2022. Entretanto, no período de chuva 2021/2022, os resultados medianos permanecem superiores em relação ao VMP (0,1 mg/L). De modo similar ao verificado para Alumínio dissolvido, as concentrações medianas de Ferro dissolvido no tributário também aumentaram entre os períodos de 2021 e 2022. Em relação ao Manganês total, notaram-se teores medianos no tributário abaixo do VMP para o período analisado.

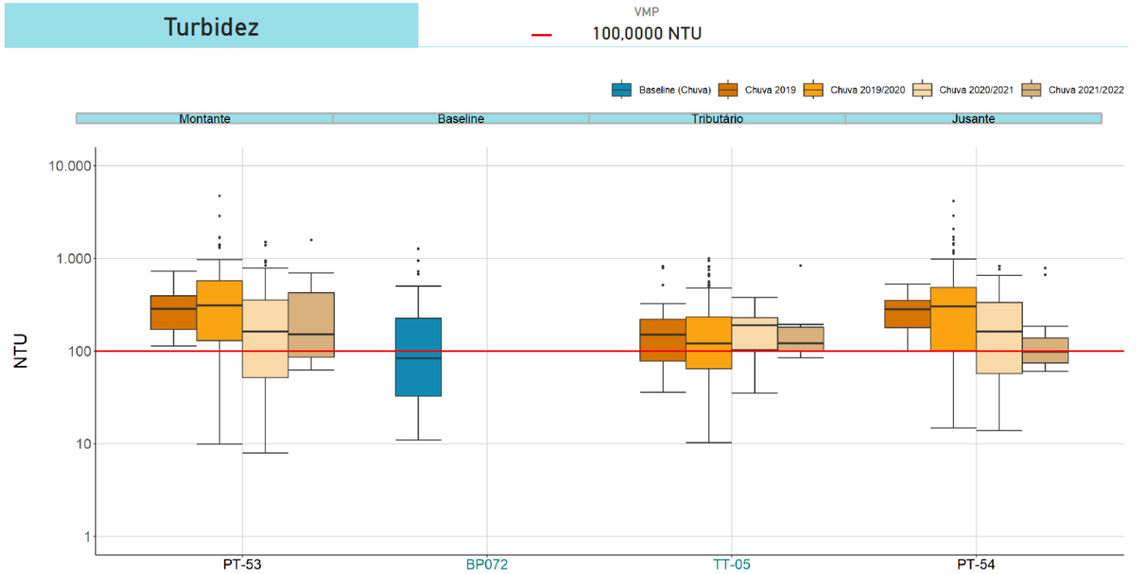
Foram observados teores medianos para *E. coli* no tributário inferiores aos identificados para os pontos de montante e jusante para todos os períodos sazonais analisados e, inclusive, inferiores ao *baseline* (3702,9 NMP/100 ml). De modo similar, para Fósforo total, verificaram-se teores medianos inferiores ou próximos aos registrados para os pontos de montante e jusante. Para Oxigênio dissolvido, notaram-se teores medianos no tributário inferiores ao mínimo requerido pelo padrão legal (5 mg/L), ao *baseline* (7,6 mg/L) e aos pontos de montante e jusante para todos os períodos sazonais, com exceção do período chuvoso 2021/2022 que apresentou valor em conformidade ao VPM e inferior ao *baseline*.

Gráfico 8.3.3-2: *Boxplots* - TT05.



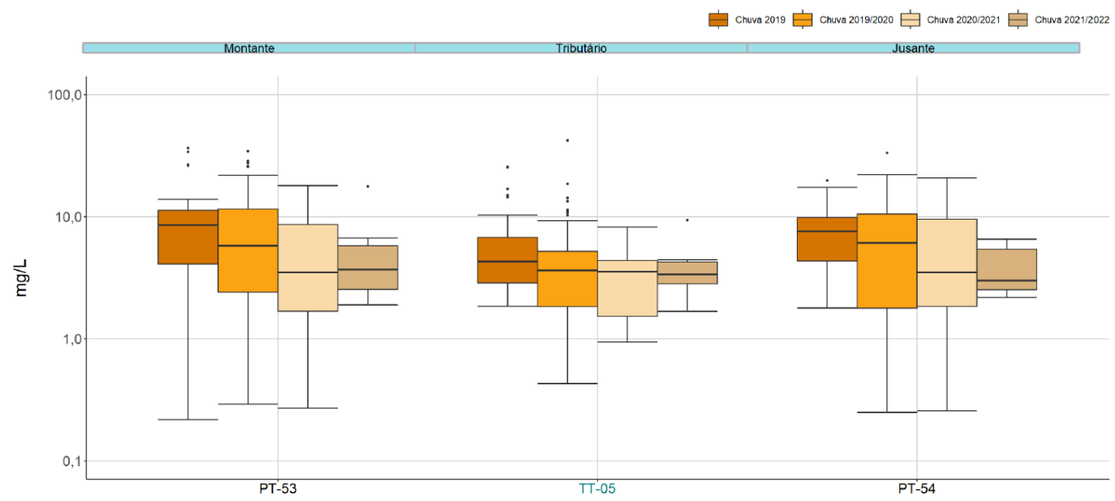






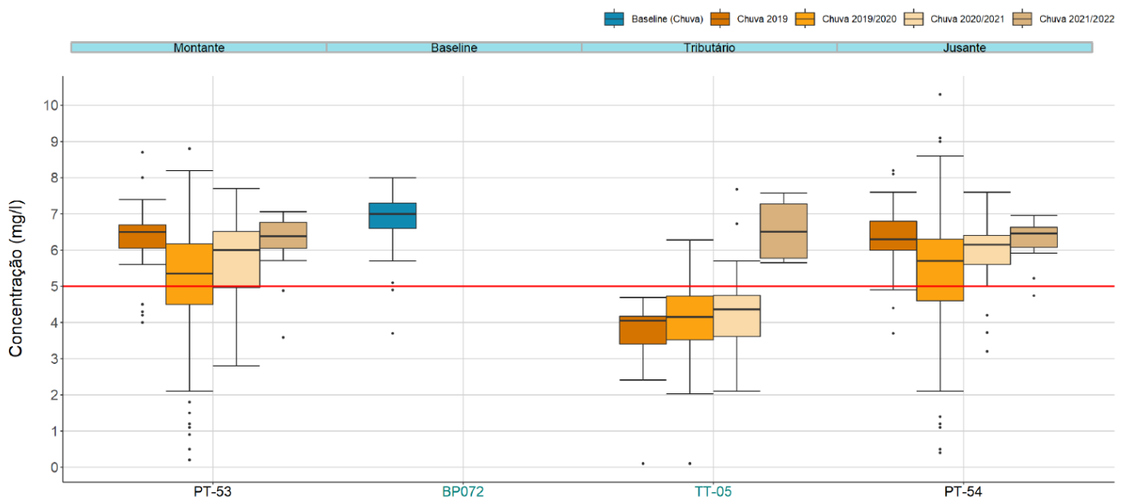
Ferro Total

VMP — Sem VMP



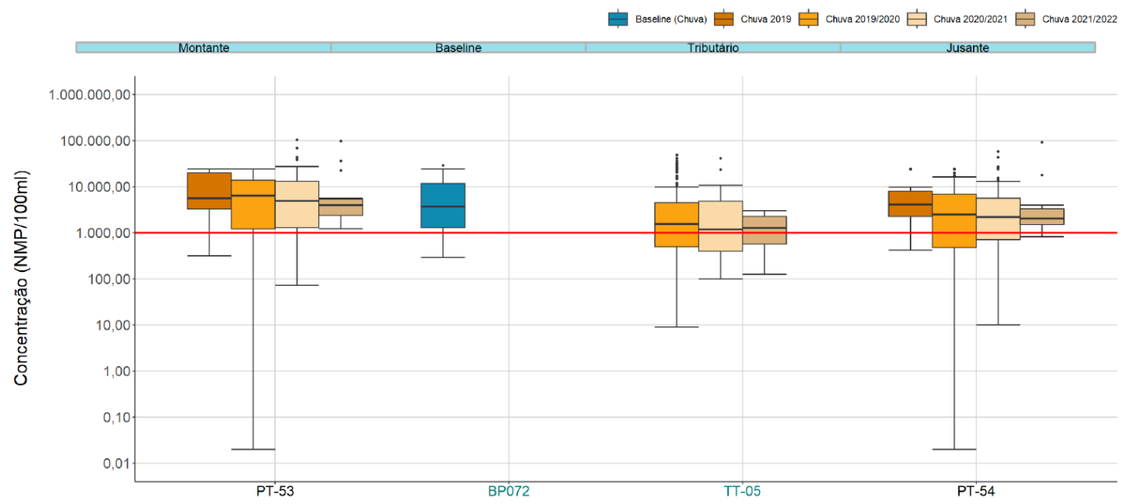
Oxigênio dissolvido

VMP — 5,0000 mg/l



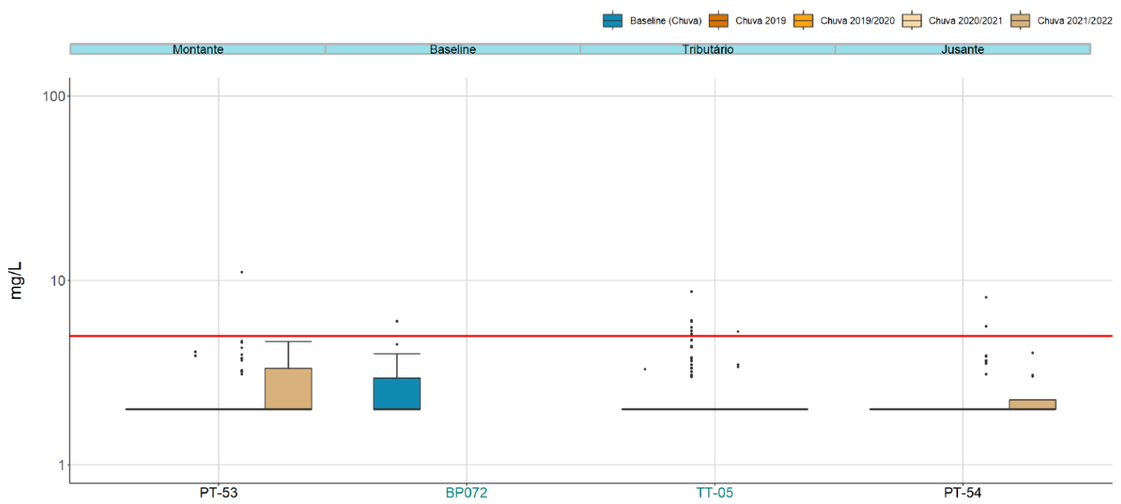
Escherichia coli

VMP — 1.000,0000 NMP/100ml



DBO

VMP — 5,0000 mg O2/l



Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.3-1 podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para os parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, Chumbo total, DBO, *E. coli* / Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD e Sólidos suspensos totais nos períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 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.)	Chuva 2019	Chuva 2019/2020	Chuva 2020/2021	Chuva 2021/2022
Manganês Total	0,727	0,156	0,845	0,855
Ferro Dissolvido	0,764	0,686	0,438	0,486
Alumínio Dissolvido	0,722	0,327	0,773	0,655
Turbidez	0,589	0,402	0,824	0,315
Chumbo Total	0,727	0,356	0,568	0,544
DBO	1,000	0,172	0,421	0,471
EColi / ColiTermot.	0,239	0,000	0,014	0,126
Fósforo Total	0,615	0,674	0,961	0,889
Nitrogênio Amoniacal	0,000	0,000	0,000	0,235
Oxigênio Dissolvido	0,708	0,111	0,335	0,870
Sólidos Suspensos T.	0,708	0,485	0,789	0,440

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05) Elaboração: Arcadis, 2021.

Nos períodos de chuva analisados, notou-se que os parâmetros que apresentaram diferença estatística significativa entre os resultados do monitoramento do ponto de montante e de jusante foram: *E.coli*/Coli.Termot. e Nitrogênio Amoniacal, com destaque ausência de resultados significativos no período mais recente, chuva 2021/2022. Nos períodos de estiagem, o parâmetro *E.coli*/Coli.Termot. também se destacou com indicativo de maior possibilidade de influência do tributário ribeirão das Abóboras na qualidade da água do rio Paraopeba (ARCADIS, 2021d). Entretanto, em todos os períodos as concentrações destes analitos foram próximas no tributário e no ponto de jusante se comparado ao ponto de montante. 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, conforme critérios previstos na DN COPAM-CERH nº 01/2008, 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.

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

No período de chuva/2019, notaram-se, em geral, percentuais de violação inferiores ao observado nos períodos de chuva posteriores (2019/2020 e 2020/2021). Nesse período, em relação ao ponto de jusante, foram observados maiores violações para os parâmetros: Chumbo total (tributário: 5%; jusante: 0%), *E. coli* (tributário: 68%; jusante: 3%), Ferro dissolvido (tributário: 76%; jusante: 27%), Fósforo total (tributário: 3%; jusante: 0%), Manganês total (tributário: 11%; jusante: 3%), Oxigênio dissolvido (tributário: 59%; jusante: 16%), Sólidos suspensos totais (tributário: 41%; jusante:0%), Turbidez (tributário: 92%; jusante: 0%) e Zinco total (tributário: 2,7%; jusante: 0%).

No período chuvoso 2019/2020, em geral, notou-se incremento dos percentuais de violação em relação aos períodos sazonais anteriores. Violações mais expressivas no tributário ribeirão dos Gomes em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os seguintes parâmetros: Chumbo total, Clorofila a, *E. coli*, Ferro dissolvido, Manganês, Níquel total, Oxigênio dissolvido, Sólidos dissolvidos totais, Sólidos suspensos totais e Turbidez. Dentre esses parâmetros, notou-se que para *E. coli* (montante: 1%, tributário: 57% e jusante: 3%), Manganês total (montante: 18%, tributário: 66% e jusante: 30%), Sólidos Suspensos totais (montante: 0%, tributário: 36% e jusante: 2%), e Turbidez (montante: 24%, tributário: 62% e jusante: 26%) houve aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário quanto a estes parâmetros.

Para o período chuvoso 2020/2021, de modo geral, as violações mais expressivas no tributário ribeirão dos Gomes em relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os parâmetros Alumínio dissolvido (montante: 73%, tributário: 79% e jusante: 65%), DBO (montante: 0%, tributário: 5% e jusante: 0%), *E. coli* (montante: 1%, tributário: 49% e jusante: 0%), Ferro dissolvido (montante: 50%, tributário: 96% e jusante: 53%), Fósforo total (montante: 0%, tributário: 7% e jusante: 0%), Manganês total (montante: 1%, tributário: 29% e jusante: 0%), Oxigênio dissolvido (montante: 21%, tributário: 54% e jusante: 11%) e Turbidez (montante: 82%, tributário: 70% e jusante: 83%). No entanto, dentre esses parâmetros, apenas Ferro dissolvido apresentou aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário.

No período chuvoso mais recente, 2021/2022, as violações que ocorreram no tributário, ribeirão dos Gomes, com relação aos pontos de montante e jusante da confluência foram identificadas para os parâmetros: Alumínio dissolvido (montante: 82%, tributário: 70% e jusante: 83%), Chumbo total (montante: 0%, tributário: 3% e jusante: 0%), Cobre dissolvido (montante: 0%, tributário: 1% e jusante: 0%), DBO (montante: 0%, tributário: 4% e jusante: 0%), *E. coli* (montante:

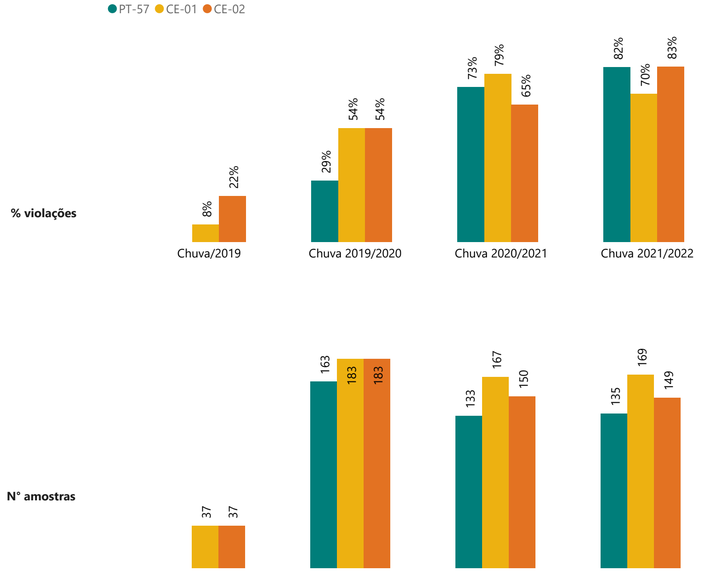
0%, tributário: 52% e jusante: 1%), Ferro dissolvido (montante: 75%, tributário: 98% e jusante: 77%), Fósforo total (montante: 0%, tributário: 14% e jusante: 1%), Manganês total (montante: 0%, tributário: 74% e jusante: 4%), Oxigênio dissolvido (montante: 2%, tributário: 46% e jusante: 5%), pH (montante: 7%, tributário: 11% e jusante: 7%), Sólidos dissolvidos totais (montante: 0%, tributário: 1% e jusante: 0%), Sólidos suspensos totais (montante: 1%, tributário: 57% e jusante: 2%) e Turbidez (montante: 10%, tributário: 69% e jusante: 13%). Dentre esses parâmetros, apenas Alumínio dissolvido, *E. coli,* Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total, Oxigênio dissolvido, Sólidos suspensos totais e Turbidez apresentaram aumento das violações no ponto de jusante quando comparado ao de montante, indicando possível contribuição do tributário.

Destaca-se, ainda, que as regras de operações realizadas na UHE Retiro Baixo podem influenciar nos resultados de qualidade obtidos para os pontos de monitoramento, principalmente para os pontos de jusante do reservatório. Nos períodos sazonais de chuva analisados, a UHE Retiro Baixo operou com turbinamentos e vertimentos. As mudanças de operação possibilitaram oscilações das vazões no rio Paraopeba a jusante do reservatório e consequente redução ou aumento das turbulências no mesmo, influenciando os processos de revolvimento e ressuspensão de material de fundo, bem como eventual aporte advindo de montante. No item 9 será apresentada uma análise detalhada específica para a qualidade da água no reservatório da UHE Retiro Baixo e do trecho fluvial de jusante.

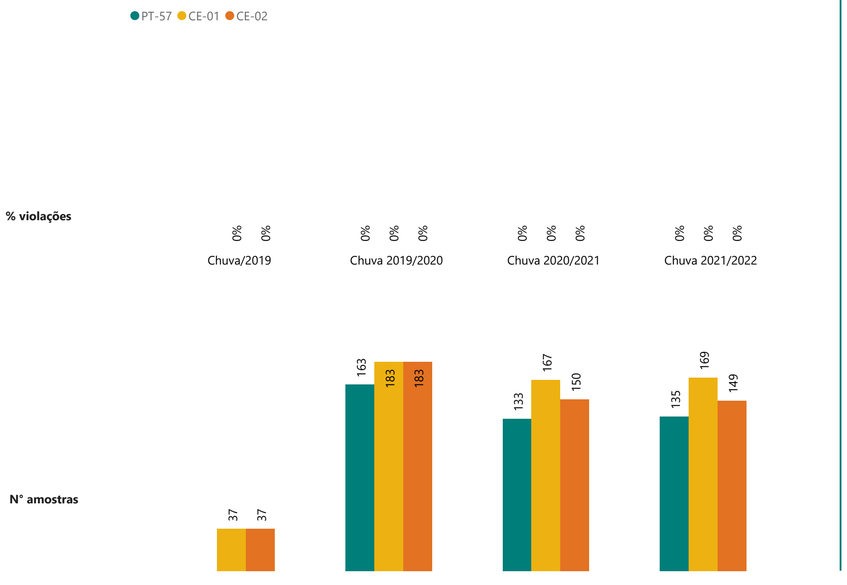
Gráfico 8.3.4-1: Percentuais de violações e teores dos parâmetros nos períodos de chuva/2019, chuva/2019-2020, chuva/2020-2021 e chuva/2021-2022 no CE01 (ribeirão do Gomes) e para pontos de montante e jusante no rio Paraopeba.

P90 e % Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante

Parâmetro: Alumínio Dissolvido



Parâmetro: Arsênio Total

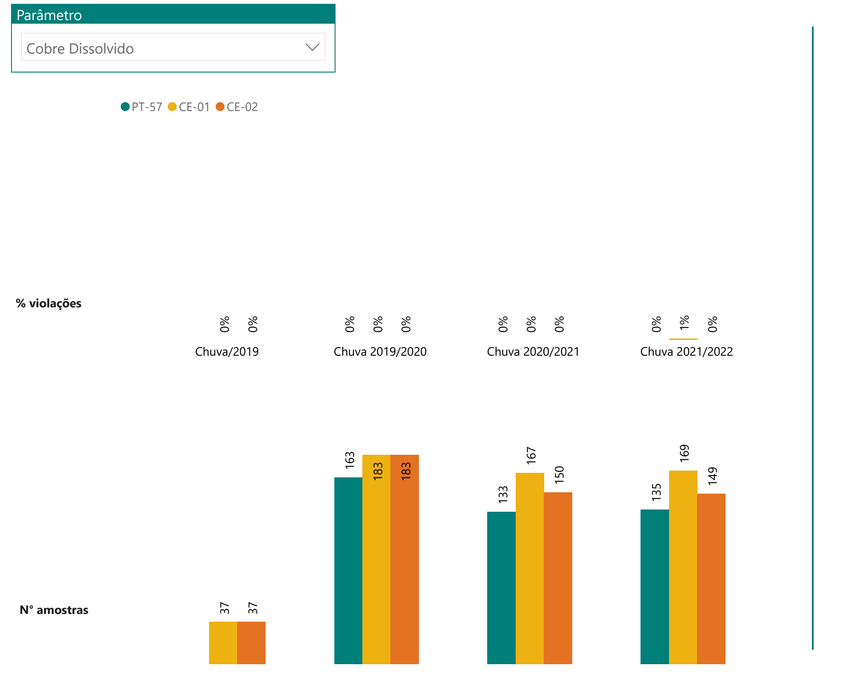


Parâmetro: Cádmio Total

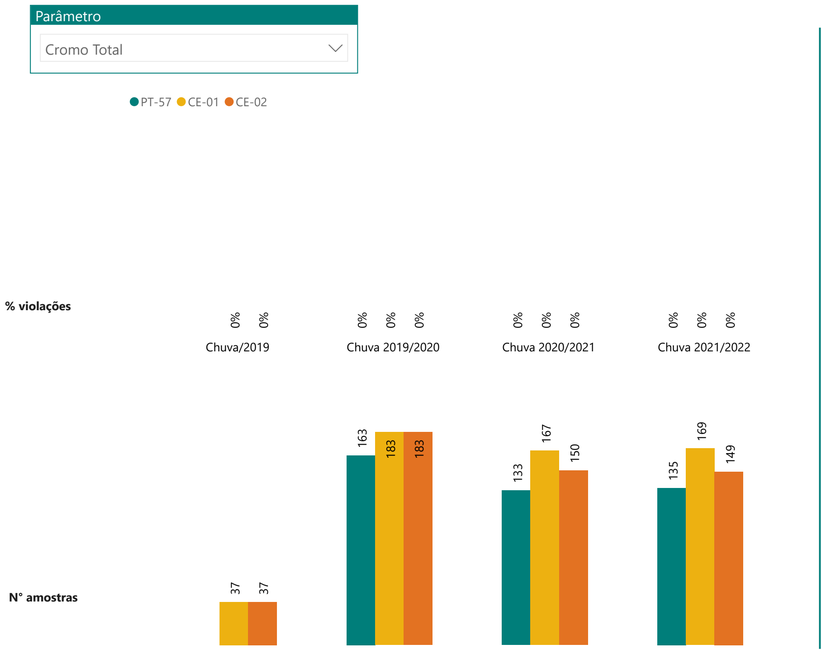
Parâmetro: Chumbo Total

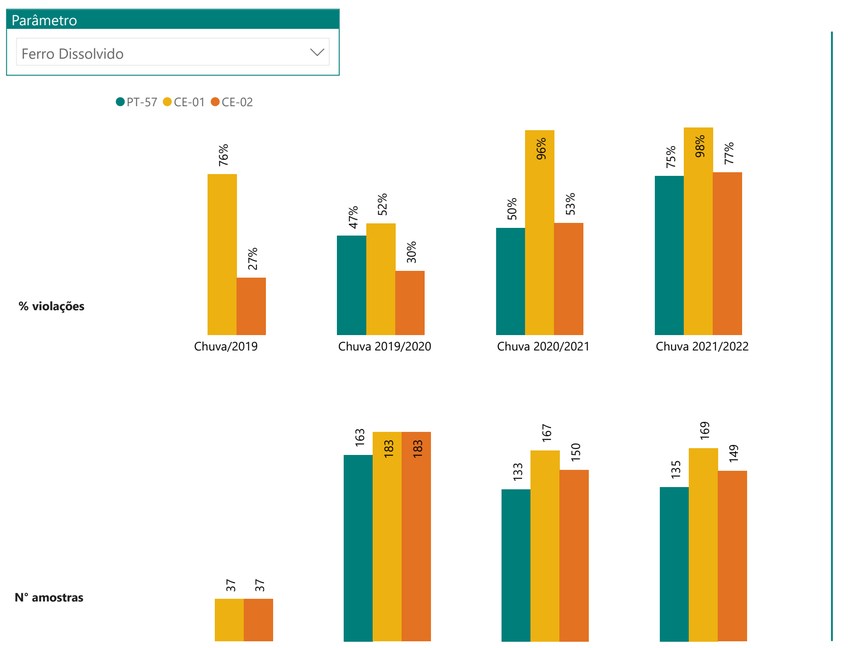
Parâmetro: Cobalto Total

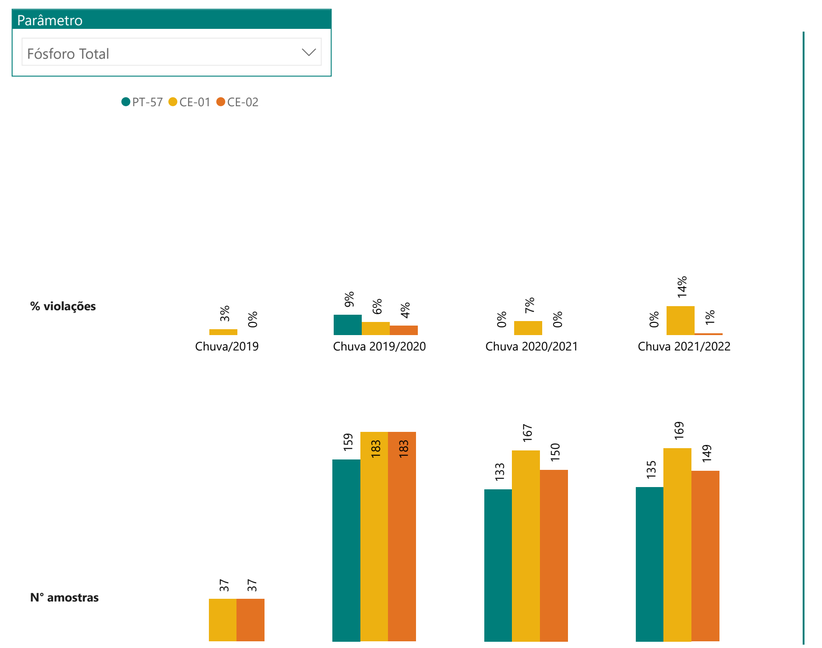
Parâmetro: Cobre Dissolvido

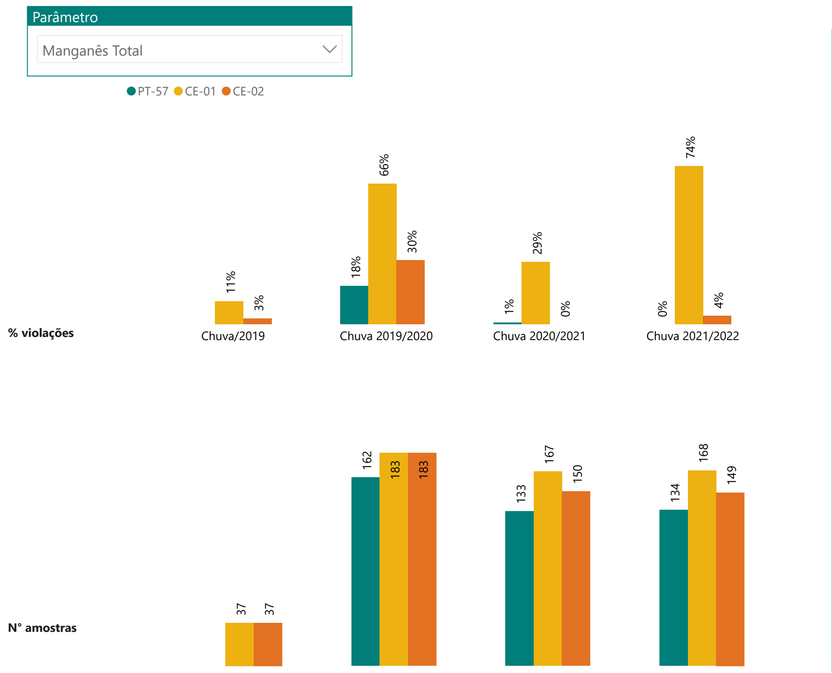


P90 e % Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante









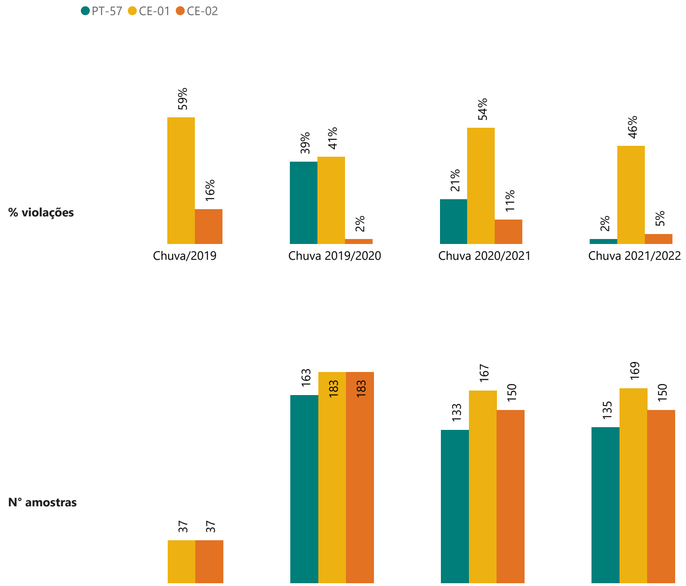
P90 e % Violações CE-01 (classe 1) - Montante e jusante

Parâmetro

Nitrogênio amoniacal

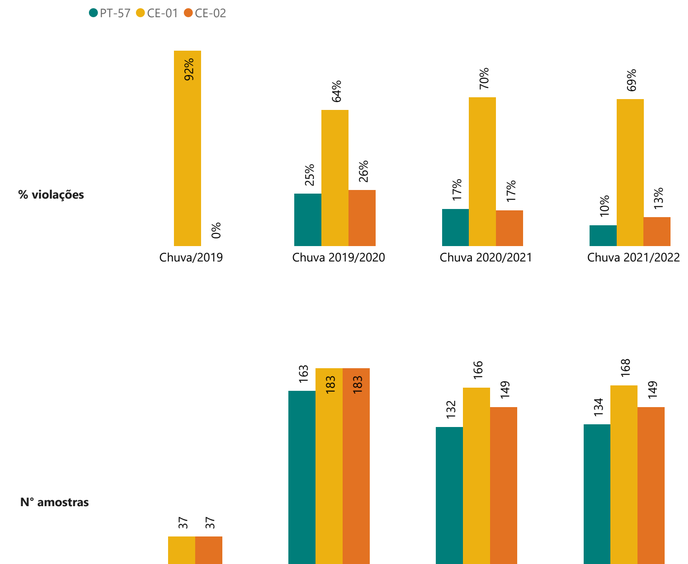
Parâmetro

Oxigênio dissolvido



Parâmetro

Turbidez



Parâmetro

Zinco Total

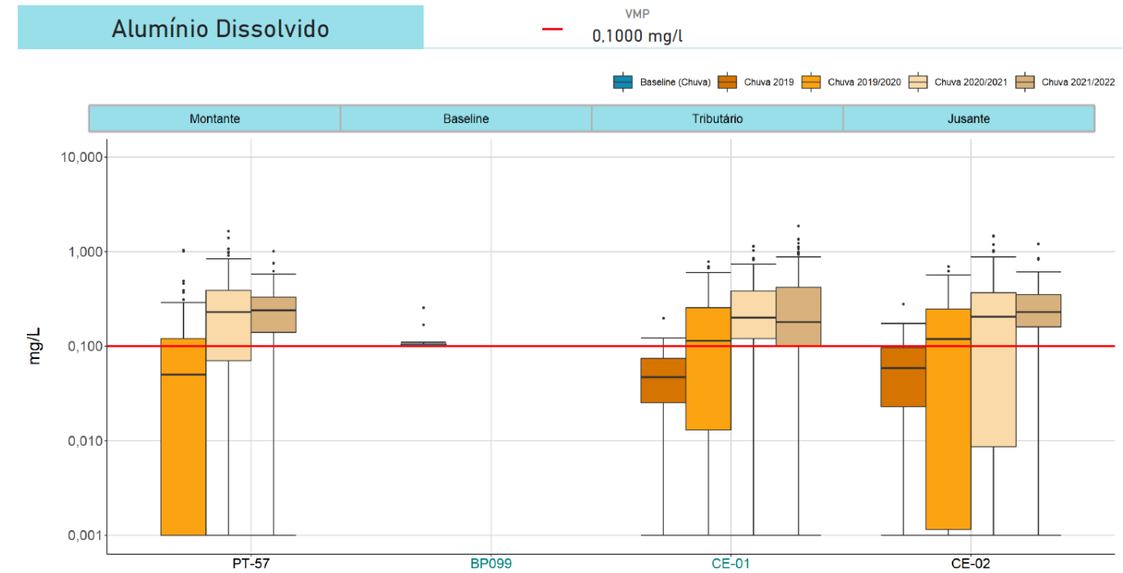
No Gráfico 8.3.4-2 são apresentados os *boxplots* para análise do comportamento dos parâmetros de qualidade das águas superficiais Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Manganês total, Turbidez, *E. coli*, Fósforo total e Oxigênio dissolvido ao longo dos períodos sazonais de chuva/2019 (janeiro/2019 a março/2019), chuva 2019/2020 (outubro/2019 a março/2020), chuva 2020/2021 (outubro/2020 a março/2021) e chuva (outubro/2021 a março/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.

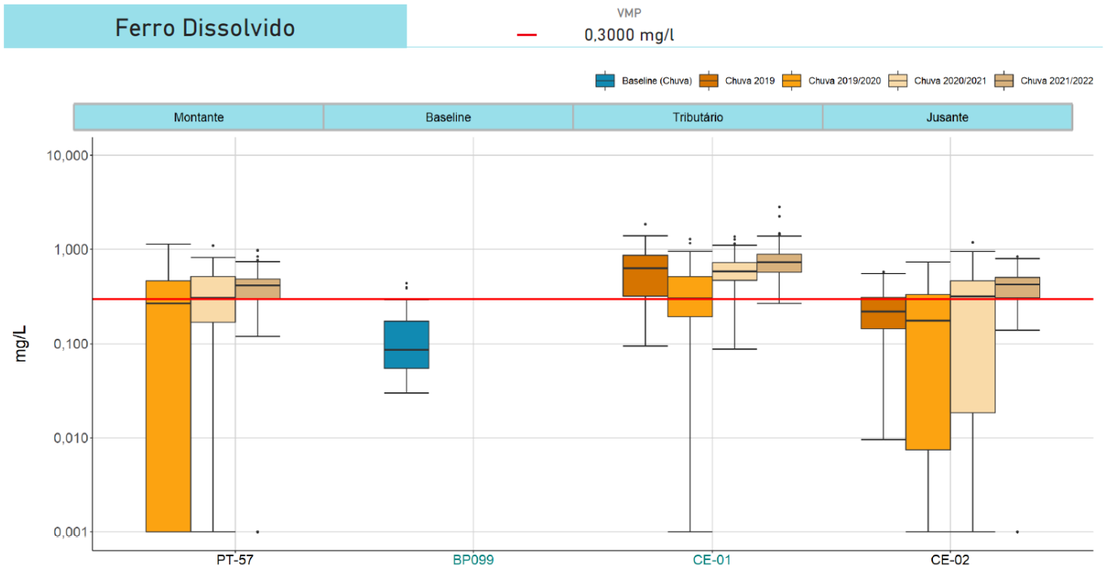
De modo geral, observam-se teores medianos inferiores aos valores máximos permitidos segundo a classe de enquadramento (DN COPAM-CERH nº 01/2008). Contudo, para a maior parte dos parâmetros, os teores medianos nos pontos monitorados foram próximos ou superiores ao *baseline* do Igam (BP099). Os parâmetros Manganês total, Alumínio dissolvido, *E. coli*, Oxigênio dissolvido e Turbidez apresentaram maiores valores medianos no tributário ribeirão dos Gomes em relação aos pontos de montante e jusante. No entanto, dentre esses parâmetros, apenas para Ferro dissolvido, Manganês total e Turbidez houve 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.

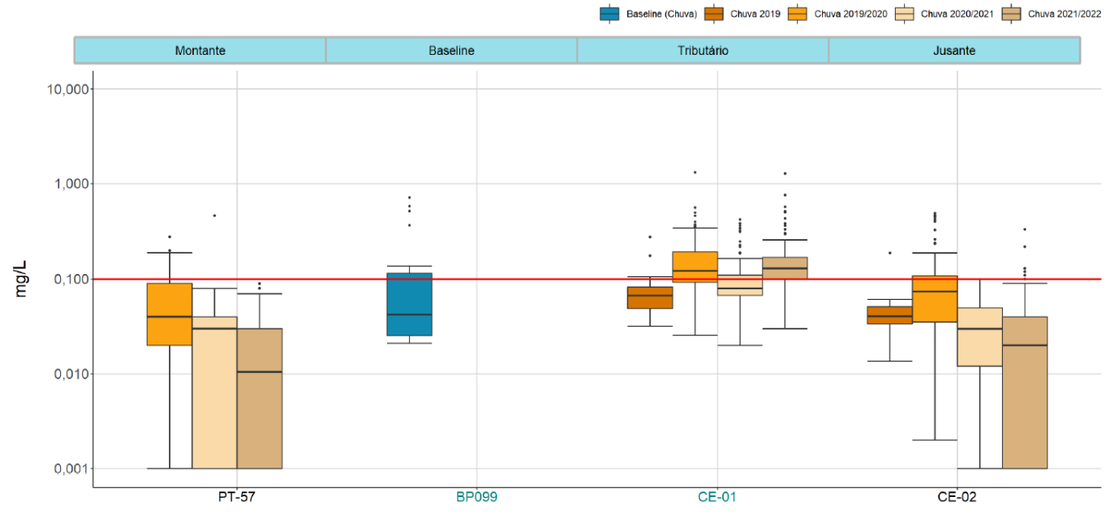
Nota-se que as concentrações medianas de Alumínio dissolvido no tributário aumentaram entre os períodos chuvosos de 2019 e de 2021, com redução em 2022. Já para Manganês total, houve incrementos das concentrações medianas entre 2019 e 2020, redução em 2021 e aumento em 2021/2022. Em relação ao parâmetro Turbidez, as medianas foram superiores ao VMP para a Classe 1 de enquadramento (40 NTU), mas ainda superiores ao valor mediano do *baseline* de chuva para o ponto CE-01. Destaca-se que no Gráfico 8.3.4-2 para o parâmetro Turbidez a linha de 100 NTU refere-se aos pontos (PT-57 e CE-02) classificados como Classe 2 enquanto a linha de 40 NTU refere-se ao ponto CE-01.

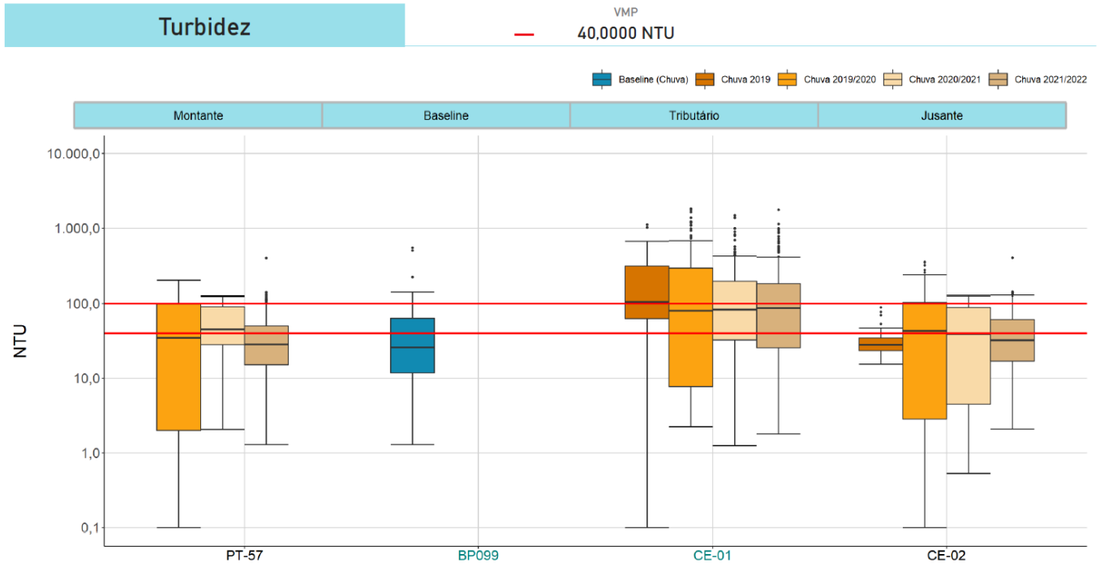
No que diz respeito aos parâmetros sanitários, observaram-se valores mais elevados de *E. coli* no tributário ribeirão dos Gomes em relação aos pontos de montante e de jusante em todos os períodos sazonais analisados, indicando possível influência do tributário quanto a este parâmetro. Os valores medianos foram superiores ou próximos ao VMP, mas ainda superiores ao *baseline* (30,60 NMP/100 mL). Quanto ao parâmetro Fósforo total, a maior parte dos resultados dos três pontos monitorados foram inferiores ao VMP da classe de enquadramento (0,1 mg/L) e ao *baseline*.

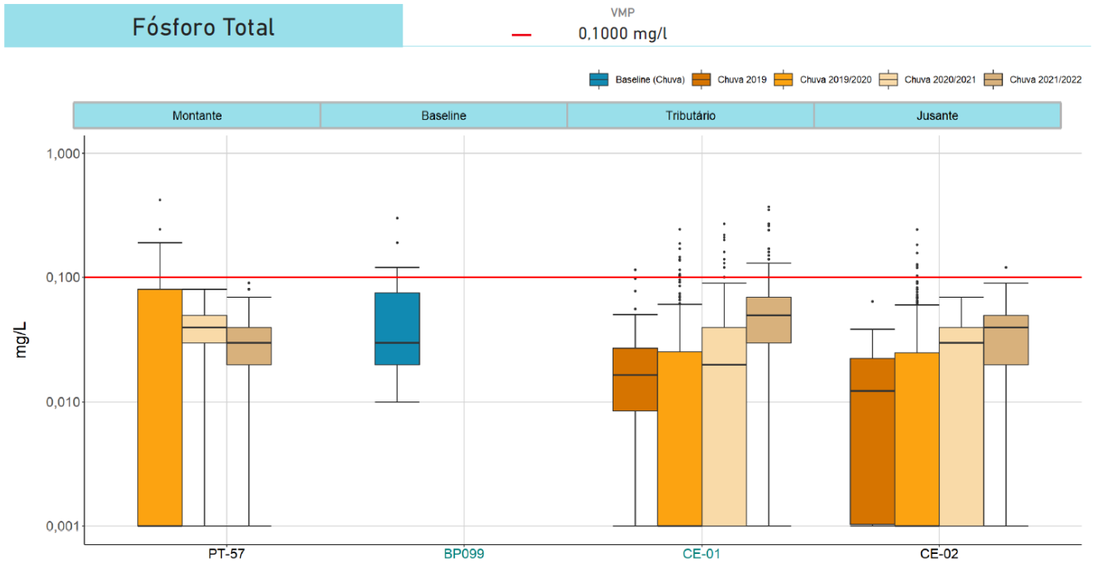
Gráfico 8.3.4-2: *Boxplots*- CE-01.

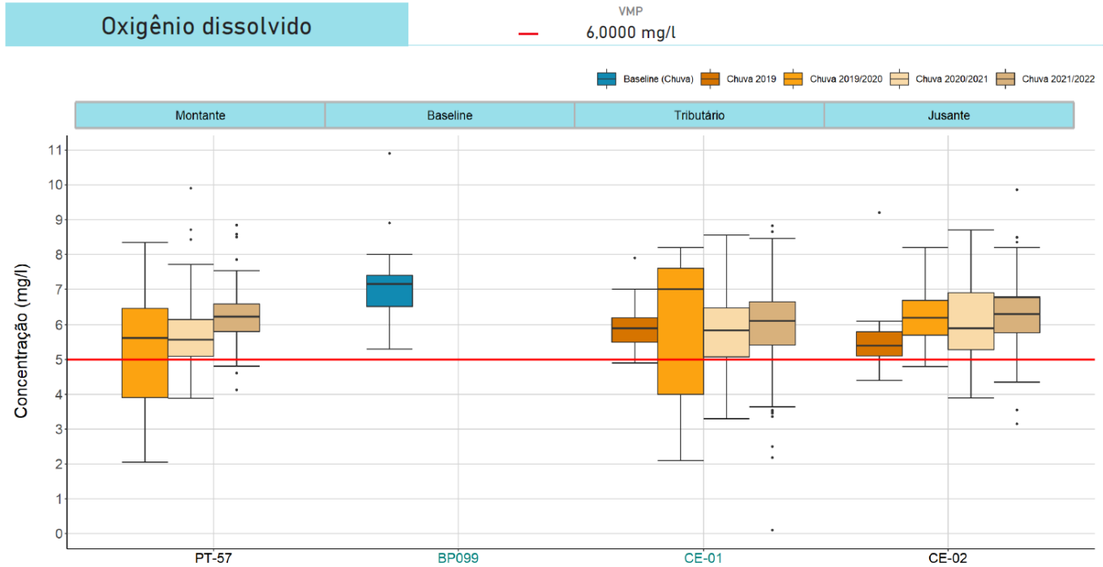


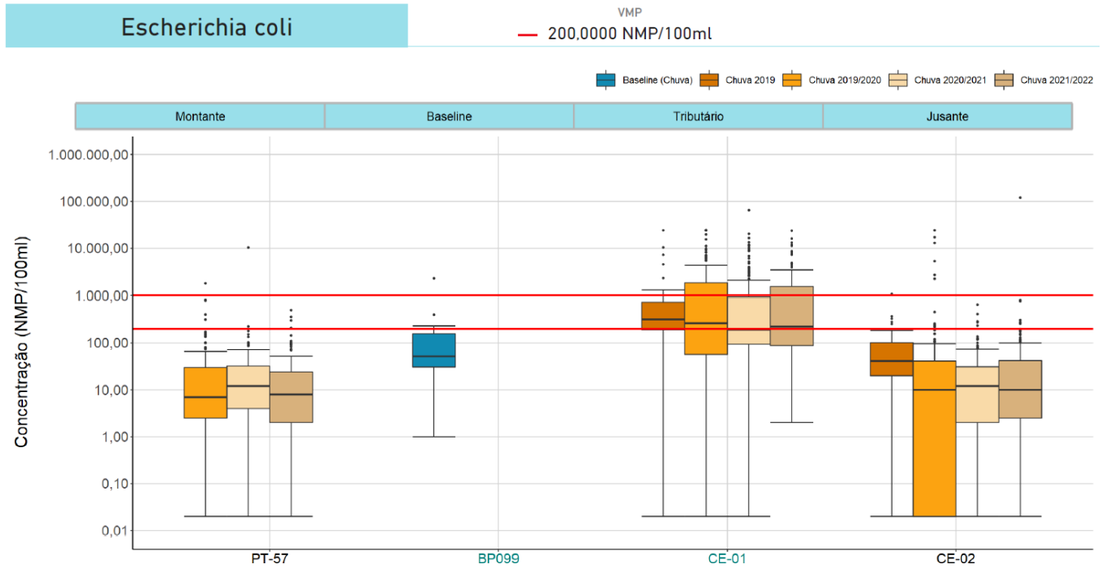












Elaboração: Arcadis, 2022.

Na Tabela 8.3.4-1 podem ser observados os resultados do teste de Mann-Whitney para os parâmetros Manganês total, Ferro dissolvido, Alumínio dissolvido, Turbidez, Chumbo total, DBO, *E coli* /Coliformes Termotolerantes, Fósforo total, Nitrogênio Amoniacal, OD, Sólidos suspensos totais nos períodos sazonais de chuva/2019, chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022. 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.)	Chuva 2019	Chuva 2019/2020	Chuva 2020/2021	Chuva 2021/2022
Manganês Total	-	0,000	0,022	0,104
Ferro Dissolvido	-	0,984	0,897	0,413
Alumínio Dissolvido	-	0,000	0,232	0,531
Turbidez	-	0,288	0,064	0,168
Chumbo Total	-	0,000	0,350	0,245
DBO	-	0,036	0,262	0,944
EColi / ColiTermot.	-	0,271	0,934	0,448
Fósforo Total	-	0,009	0,002	0,138
Nitrogênio Amoniacal	-	0,000	0,000	0,149
Oxigênio Dissolvido	-	0,000	0,001	0,409
Sólidos Suspensos T.	-	0,780	0,118	0,510

Nota: valores destacados em vermelho indicam diferença significativa entre o ponto de montante e jusante (valor-p ≤ 0,05). Elaboração: Arcadis, 2021.

De modo geral, nos períodos de chuva 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, Fósforo total e Nitrogênio amoniacal, condição também verificada nas comparações estabelecidas para os períodos de estiagem (ARCADIS, 2021d). Especificamente para o período mais recente, chuva 2021/2022, 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.

8.4. Considerações

Embora em alguns casos tenham ocorrido incremento ou redução dos teores e percentuais de violação dos parâmetros analisados, em geral, as alterações observadas nos tributários acompanharam aquelas notadas na bacia como um todo, e tiveram comportamentos próximos entre os períodos de chuva analisados. As concentrações e percentuais de violação para os parâmetros analisados são diretamente associados aos fatores hidrológicos da bacia e sujeitos às oscilações de precipitação.

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. Contudo, verificou-se que os parâmetros com maiores possibilidades de influência pelos tributários na qualidade da água do rio Paraopeba são o Manganês total, Fósforo total e Nitrogênio amoniacal.

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 da UHE Três Marias ao longo dos ciclos sazonais correspondentes aos períodos de chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuva 2021/2022.

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 chuvosos (2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022), 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 01/2008.

Nesse capítulo, além dos pontos PME (PT-21, PT-57, CE-01, CE-02, PT-22 e PT-23), serão 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);
- TM-06 (reservatório da UHE Três Marias, a jusante da confluência do rio São Francisco e a montante do PT-23);

- TM-09 (reservatório da UHE Três Marias a jusante do PT-23 e a montante do barramento).

Destaca-se que neste capítulo é feito um resumo das principais análise 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, 2022.

Conforme já descrito no presente documento (item 3.1), entre as datas de 07 e 13/01/2022, ocorreram chuvas intensas na bacia do rio Paraopeba e, em maior monta, nas regiões que cobrem o médio a alto curso de água. Assim sendo, notou-se, através dos resultados obtidos por meio das estações fluviométricas com telemetria disponíveis, ter havido um expressivo incremento de nível e vazão que transladou progressivamente a partir dos trechos fluviais de montante e seguiu no sentido do reservatório de Retiro Baixo.

Com a maior amplitude dos índices pluviométricos no início do mês de janeiro/2022, especialmente a partir do dia 07/01, as equipes de amostradores se depararam com alguns bloqueios para realização das coletas de água superficial e sedimentos nos pontos contemplados no PMQS-TM. Considerando essas limitações, à exemplo: condição de chuva forte, aumento do nível e vazão do curso d'água, acesso por terra ou embarcação inseguro e presença de lama nas adjacências do pontoa ser amostrado, alguns pontos de coleta tiveram que ser temporariamente realocados, quando possível, à saber: PT-21, CE-02, JRB-01, JRB-02 e CE-01. As coordenadas alternativas foram avaliadas e validadas pelas equipes técnicas da Arcadis e Vale, equipe de monitoramento de campo e QA/QC.

Dessa maneira, é importante considerar com ressalva os resultados obtidos nos pontos que apresentaram deslocamentos, analisando-os em termos de série histórica e quanto às possíveis interferências associadas à mudança de local de coleta.

Apesar da lacuna de resultados por conta dos motivos supracitados, o laboratório respondeu à situação com seus esforços máximos para realizar as tentativas de coleta. Especificamente para os pontos não amostrados para alguma data ou período específicos de coletas previstas, têm-se os seguintes pontos: MRB-01/PT-19, PT-55, RB-01/PT-20, PT-28, RB-02, PT-21, PT-57, CE-02, JRB-01, JRB-02, TM-06 e TM-08/PT-23. De maneira emergencial, os pontos JRB-01, JRB-02, PT-22/TM-01, TM-03 e TM-11 foram amostrados diariamente entre 12 e 27/01/2021, com análises laboratoriais para os metais, a fim de acompanhar a qualidade da água superficial do rio Paraopeba e reservatório de Três Marias na ausência de resultados para o ponto CE-02

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

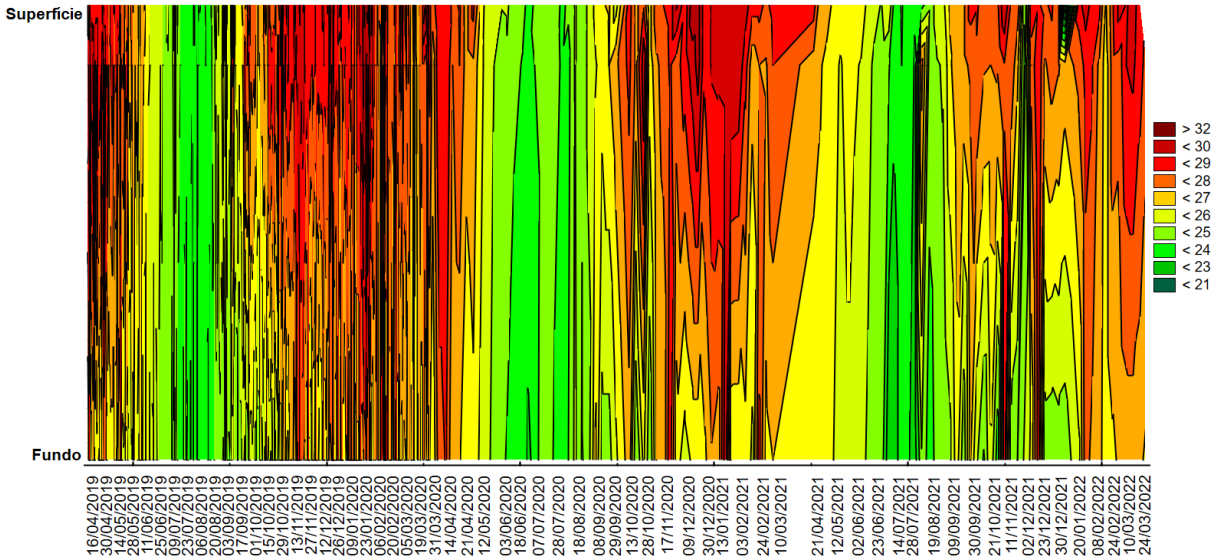
reservatório permitem ao mesmo a capacidade de estratificação térmica e, da mesma maneira, a ocorrência de desestratificação, com consequente circulação vertical da massa d'água.

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

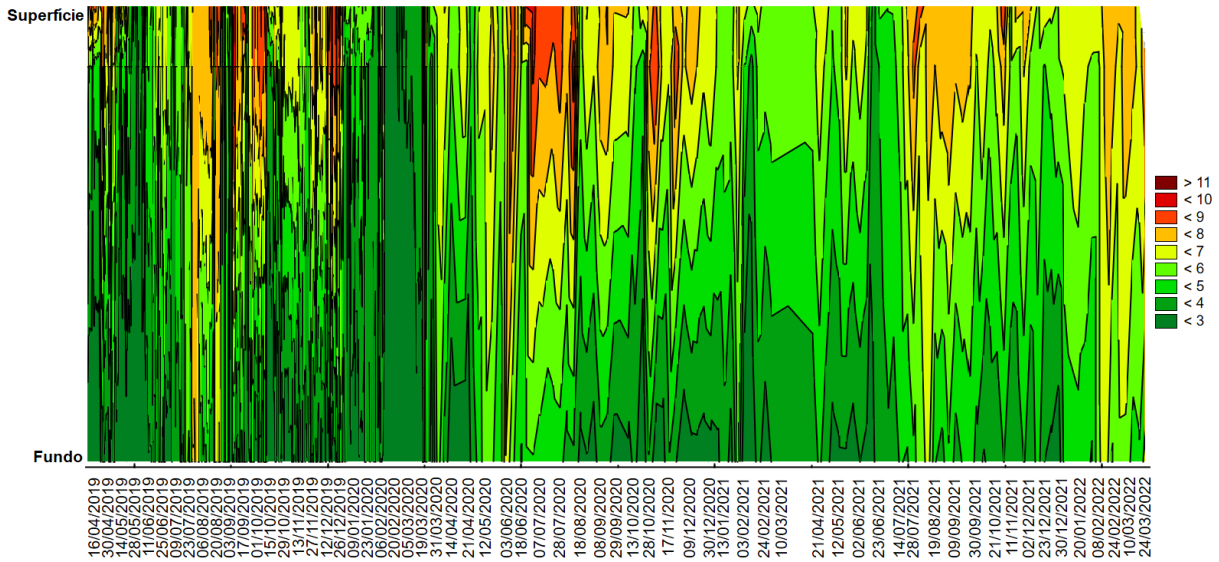
A dinâmica comportamental do reservatório de Retiro Baixo pode ser verificada pelos diagramas mostrados a seguir (Gráfico 9.3.1.1 e Gráfico 9.3.1.5) especificamente para o ponto de monitoramento RB-02. Este ponto foi considerado para a presente análise por ser efetivamente representativo de trecho de escoamento mais lêntico e, assim, 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.



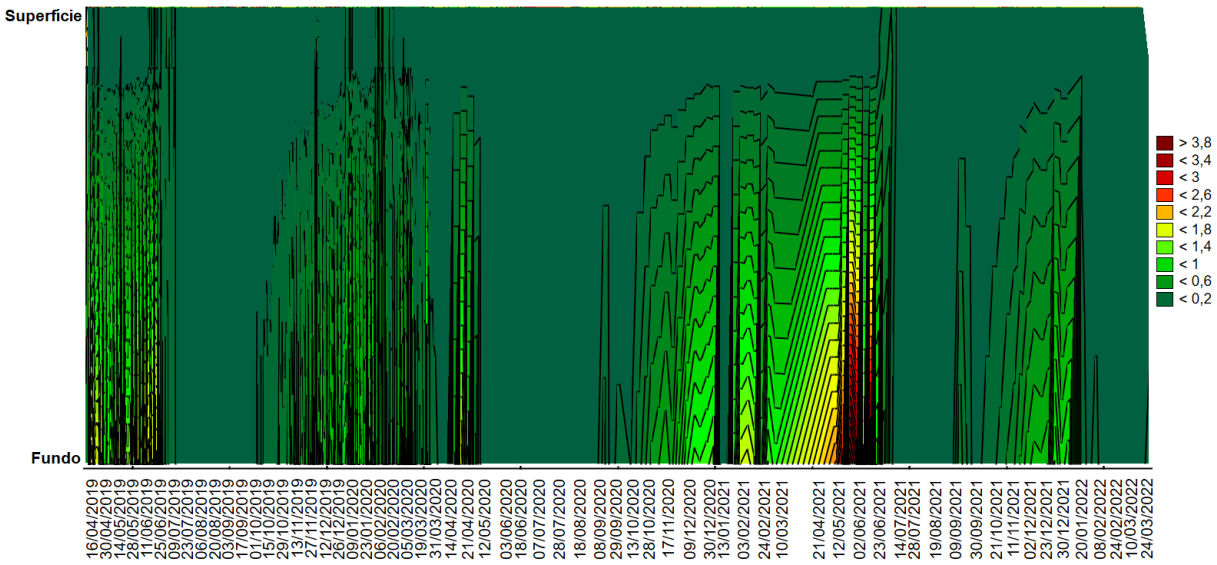
Elaboração: Arcadis, 2022.

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.



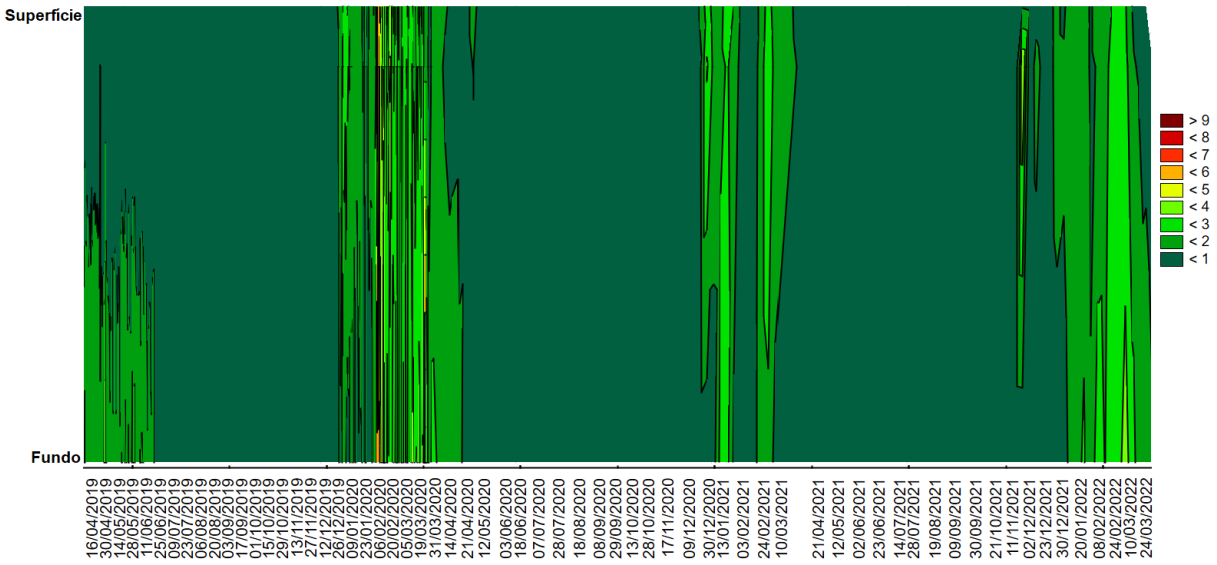
Elaboração: Arcadis, 2022.

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.



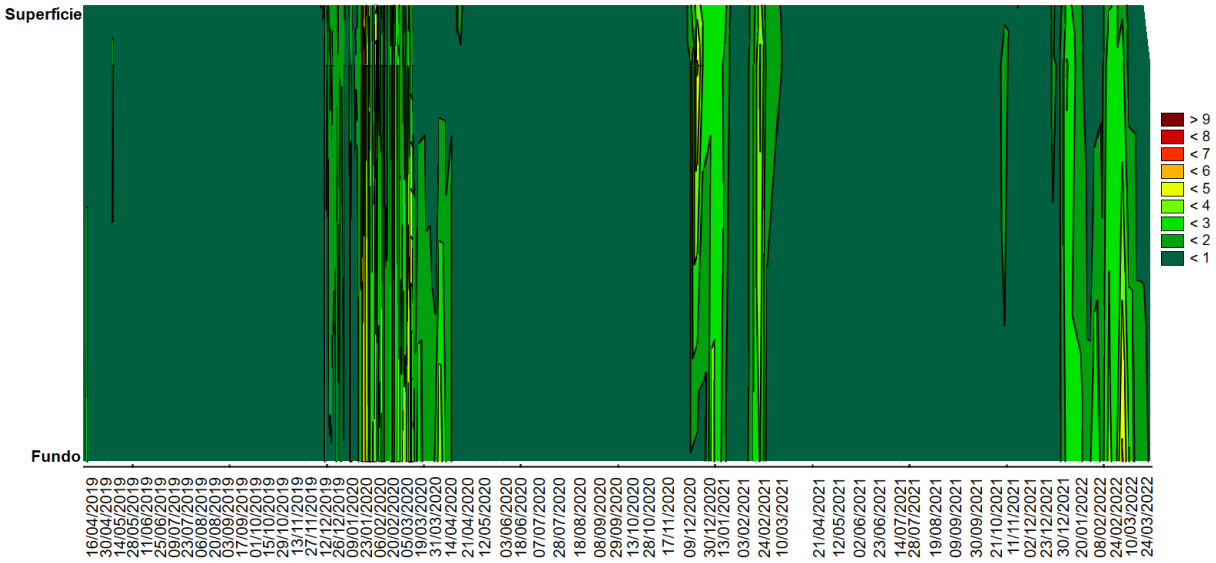
Elaboração: Arcadis, 2022.

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.

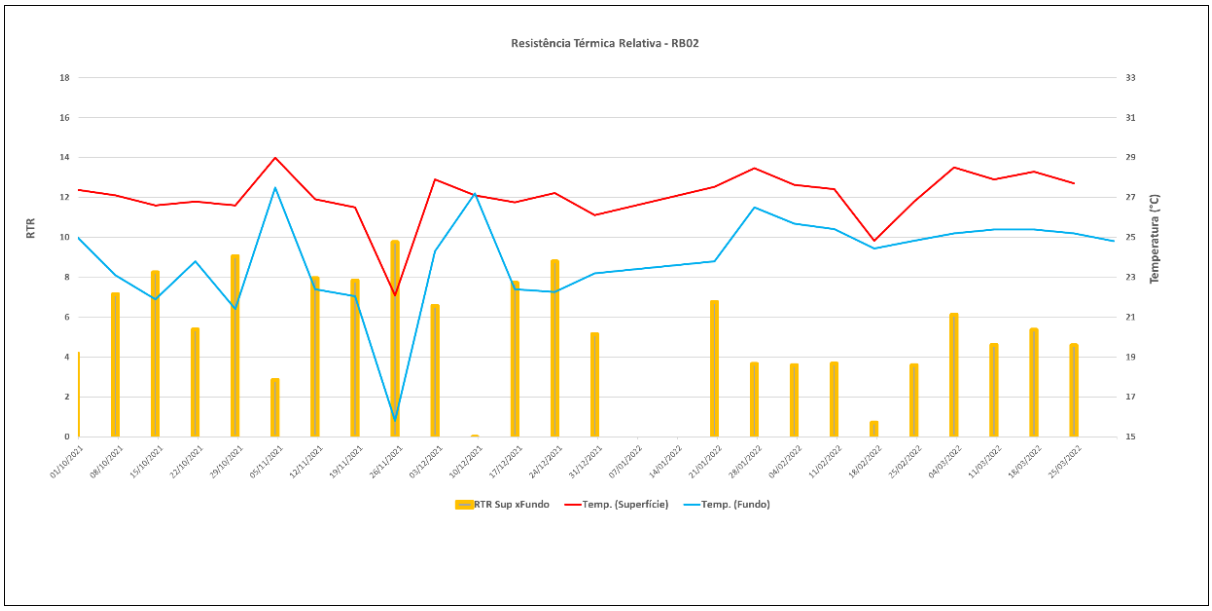
Ao longo do período de monitoramento são observadas, periodicamente, alterações na qualidade da água no ponto RB-02 em decorrência de fenômenos inerentes a localização deste ponto. Os fenômenos observados em períodos anteriores ao atual são descritos de forma detalhada em ARCADIS, 2022.

Com foco no período de chuva mais recente, 2021/2022, percebe-se que não há episódios claros de desestratificação térmica ao longo do período monitorado, o que se mostra coerente, tendo em vista que se espera nos períodos mais quentes uma gradação da temperatura (e assim da densidade) ao longo do perfil de profundidade. Para OD, assim como nos períodos chuvosos anteriores, verificou-se que a diferença das concentrações nesse período aumenta, sendo que as maiores são reportadas na superfície e as menores concentrações nas regiões mais profundas. Quando se comparam os metais, verifica-se comportamento similar entre Fe e Al totais, com concentrações elevadas e similares no perfil vertical nos períodos chuvosos, sendo que esta condição, no período atual, iniciou-se a partir do fim de dezembro/2021 e estendeu-se até meados de março/2022. Para Mn total, que apresenta comportamento diferente dos metais supracitados, apontou concentrações mais elevadas no fundo no fim da estiagem/2021 e início do período chuvoso subsequente até o fim de dezembro/2021, quando as concentrações se estratificaram com valores abaixo de 0,6 mg/L.

Para um entendimento mais específico sobre o comportamento térmico no reservatório da UHE Retiro Baixo, elaborou-se o Gráfico 5.5.5 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. No verão, reporta-se, em alguns momentos, valores baixos de RTR, mas estes não permanecem no tempo o suficiente para alterar a hidrodinâmica nesse ponto do reservatório.

Gráfico 9.3.1-6: Variação da resistência térmica relativa no ponto RB-02, na UHE Retiro Baixo, no período de chuva/2021-2022.

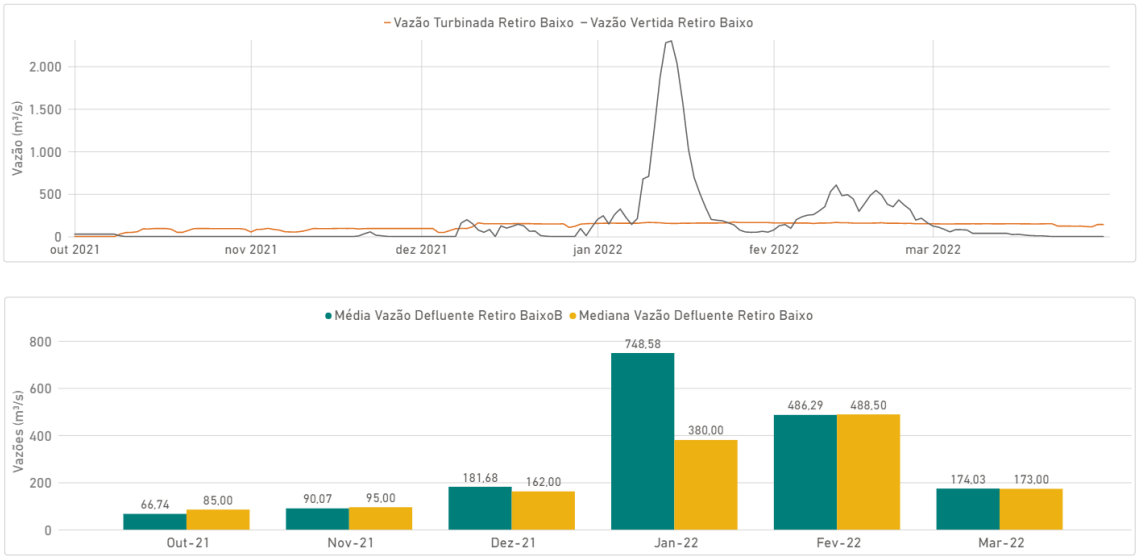


Fonte: Arcadis,2022.

No que diz respeito às regras de operações do período chuvoso 2021/2022, Gráfico 9.3.1-7, percebe que, salvo a primeira quinzena de outubro/2021, em todo período chuvoso houve turbinamento, esta operação apresentou valores entre 100 e 170 m³/s na maior parte do tempo. Sobre a operação de vertimento, é importante destacar o valor histórico de 2.300 m³/s no dia 14/01/2022 decorrentes dos elevados volumes pluviométricos que ocorreram ao longo de toda bacia do rio Paraopeba, principalmente no alto Paraopeba (**item 4**).

Durante os meses de janeiro e fevereiro/2022, os valores médios e medianos defluentes foram os maiores desde o início do monitoramento do PME. No período chuvoso 2021/2022, os vertimentos da usina foram contínuos a partir de meados de dezembro/2021, permanecendo assim até o fim de março/2022. Destaca-se, ademais, que o vertimento foi a descarga preponderante entre os meses de janeiro e fevereiro/2022, o que evidencia as expressivas chuvas e vazões que ocorreram ao longo da bacia do rio Paraopeba no último período chuvoso. As análises completas dos períodos anteriores podem ser consultadas em ARCADIS, 2022.

Gráfico 9.3.1-7: Hidrograma de vazões vertidas e turbinadas da barragem da UHE Retiro Baixo, no período de chuva/2021-2022.



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 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 de sua localização, que na porção leste da bacia e nas áreas próximas ao seu baixo curso e ao exutório, apresentam grau de vulnerabilidade mais elevado e, assim, áreas mais sujeitas a contribuir com material carreado pelo escoamento superficial advindo das chuvas. Além desses, 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) e TM-06, PT-23 e TM-09 (localizados no reservatório da UHE Três Marias entre a confluência com o rio São Francisco e o barramento da UHE Três Marias).

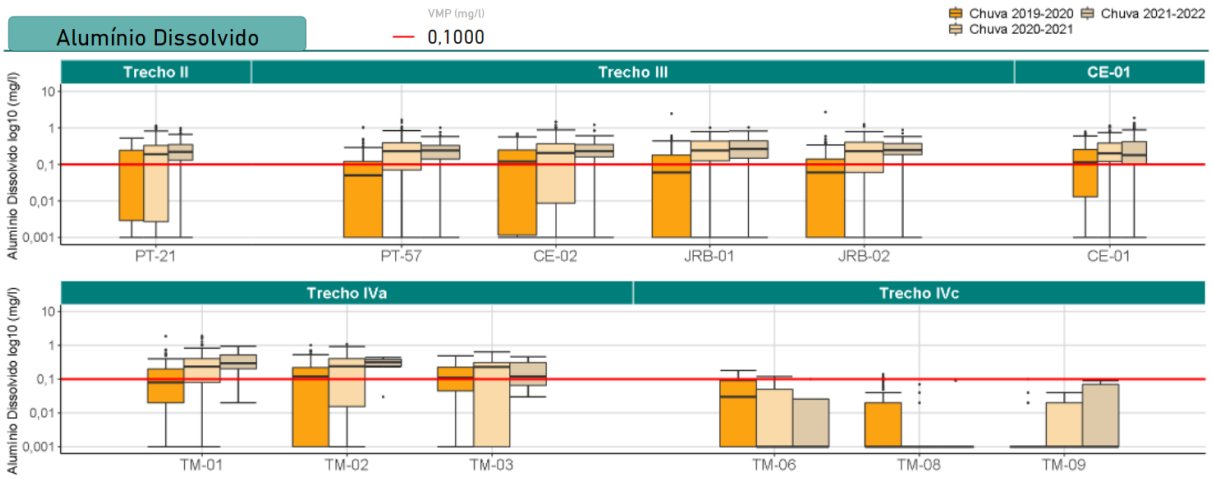
Destaca-se, como já premissado no presente documento, que as análises consideram os limites legais conforme as classes de enquadramento definidas pela DN COPAM-CERH nº 01/2008, sendo, especificamente, o ponto CE-01 enquadrado como Classe 1, e os demais pontos, como Classe 2. Os resultados agregados para os diferentes períodos de chuva nos citados pontos estão apresentados em gráficos do tipo *boxplot,* tais gráficos evidenciam a distribuição dos resultados (máximos, mínimos, medianas, percentis 25% e 75% e *outliers).* Ressalta-se que, em ARCADIS (2022), 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 chuva. Em uma análise temporal do parâmetro apresentado, observa-se que, de forma geral, os resultados de máxima e mediana mais expressivos aconteceram nos períodos de chuva 2020/2021 e 2021/2022, com resultados similares entre tais períodos. Além disso, percebem-se concentrações ao longo do tempo aproximadas entre os pontos PT-21 e JRB-02. As menores concentrações são observadas, de forma geral, nos pontos inseridos mais ao interior do reservatório da UHE Três Marias, TM-06, PT-23/TM-08 e TM-09.

No atual período de chuva (2022/2022), é possível verificar que os resultados de medianas e máximas apresentaram concentrações aproximadas entre os pontos PT-21 e TM-02, incluindo o CE-01 (localizado no ribeirão dos Gomes/Almas), salvo alguns *outliers* observados neste ponto que extrapolaram o valor de 1,0 mg/L. No que diz respeito às violações, considerando os valores máximos obtidos pelo *boxplot* de cada ponto como referência, pode-se considerar que as máximas foram superiores ao VMP (0,1 mg/L) ao longo de todos os períodos chuvosos para os pontos PT-21 e TM-03, sendo que inconformidades são recorrentes nos períodos chuvosos.

Gráfico 9.3.2-1: Boxplot dos resultados de Al dissolvido dos períodos chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, 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), Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba) e Trecho IVc (Reservatório da UHE Três Marias, após confluência do rio Paraopeba com rio São Francisco).

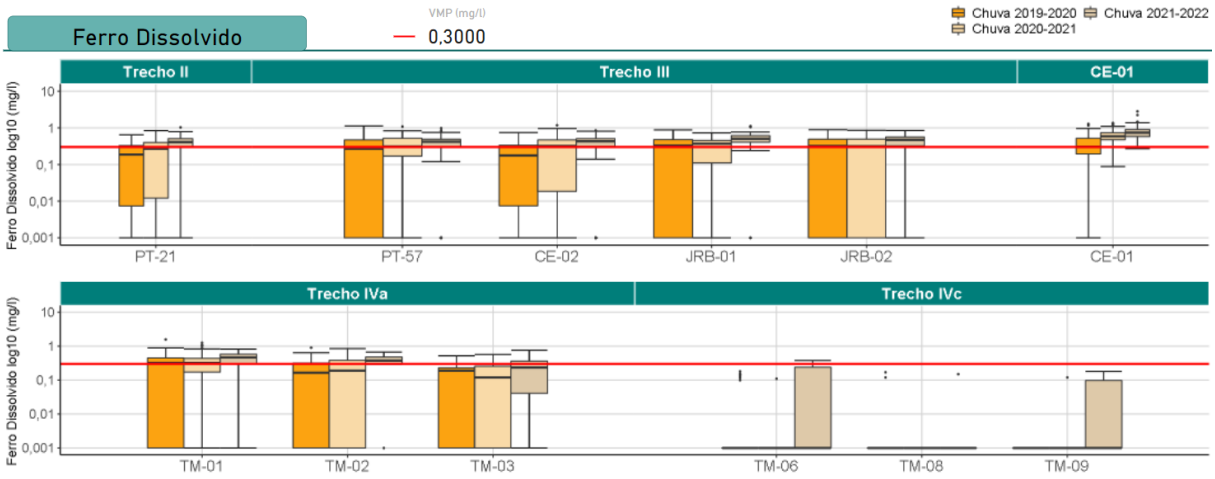
- **Ferro Dissolvido**

O Gráfico 9.3.2.2 apresenta os resultados para o Ferro dissolvido nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos de chuva. Considerando uma análise temporal para o parâmetro Ferro dissolvido, percebe-se que os valores máximos do comportamento ao longo dos períodos foram próximos, embora oscilantes entre os anos, exceto no ponto CE-01, para o qual se percebe incremento ao longo do tempo. De uma maneira geral, verifica-se que as máximas se aproximam longitudinalmente do PT-21 ao TM-03, com exceção novamente do CE-01, com maiores valores ao longo de todos os períodos, excepcionalmente no último período chuvoso.

Para Ferro dissolvido, no período chuvoso 2021/2022, os maiores valores foram observados mais uma vez no ponto CE-01, sendo que nos demais pontos, do PT-21 ao TM-03, as concentrações se mantiveram próximas, exceto por *outliers* no ponto JRB-01. Destaca-se, por fim, que houve aumento das máximas observadas nos pontos TM-06 e TM-09.

Sobre as violações, considerando os valores máximos de cada ponto como referência, pode-se considerar que estes foram superiores ao VMP (0,3 mg/L) em todos pontos e períodos entre o PT-21 e TM-03 e, no TM-06, no período de chuva 2021/2022.

Gráfico 9.3.2-2: *Boxplot* dos resultados de Fe dissolvido dos períodos chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, 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), Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba) e Trecho IVc (Reservatório da UHE Três Marias, após confluência do rio Paraopeba com rio São Francisco).

- **Manganês Total**

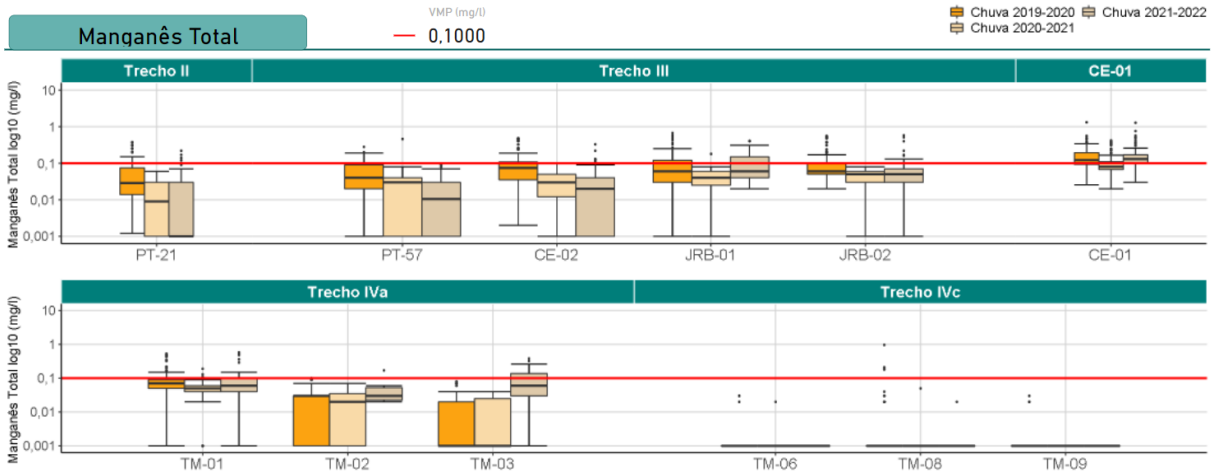
O Gráfico 9.3.2.3 apresenta os resultados para o Manganês total nos pontos de monitoramento ao longo dos períodos chuvosos. Em relação à evolução temporal do parâmetro, no trecho analisado, é observado que nos pontos PT-21, JRB-01, JRB-02, CE-01 e TM-01 as máximas apresentam comportamento similar entre os períodos chuvosos de 2019/2020 e 2021/2022, sendo que as menores concentrações para o parâmetro em análise foram observadas no período 2020/2021. Nos pontos TM-06, TM-08 e TM-09, os resultados ao longo de todos os períodos foram próximos ao limite de quantitativo (0,01 mg/L).

No período chuvoso 2021/2022, os maiores valores máximos foram observados no JRB-01, CE-01 e TM-03, de uma maneira geral, os pontos entre o PT-21 e TM-03 apresentaram diversos *outliers* ao longo do período chuvoso e tal comportamento pode ser atribuído a chuvas que ocorreram, e com o consequente aumento das vazões, estas podem favorecer com que resultados momentâneos sejam observados nos pontos, diferindo do comportamento ao longo dos seis meses de análise.

Sobre às violações para Manganês total, comparando apenas as máximas, observam-se violações entre o PT-21 e PT-22/TM-01 no período chuvoso 2019/2020, no período chuvoso 2020/2021 pontualmente no CE-01, e no período chuvoso 2021/2022 nos pontos JRB-01, JRB-02, PT-22/TM-01 e TM-03. Destaca-se que ao longo dos períodos e dos pontos mencionados, foram observados *outliers* acima do VMP. Por fim, nos pontos TM-06, TM-08 e

TM-09, não foram verificadas violações ao longo do período de monitoramento, exceto alguns *outliers* no período chuvoso 2019/2020.

Gráfico 9.3.2-3: *Boxplot* dos resultados de Mn total dos períodos de chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, 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), Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba) e Trecho IVc (Reservatório da UHE Três Marias, após confluência do rio Paraopeba com rio São Francisco).

- **Turbidez**

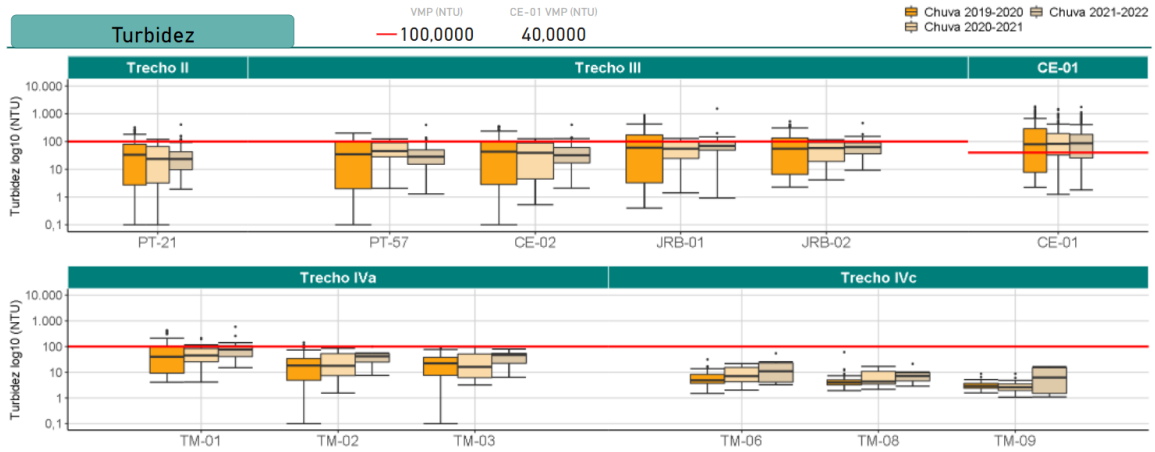
Ao longo dos períodos chuvosos monitorados, os maiores valores máximos foram reportados, de forma geral, no período chuvoso 2019/2020, com concentrações mais expressivas no ponto CE-01, localizado no ribeirão dos Gomes. Ressalta-se que tal fato relaciona-se, possivelmente, com a característica da área de entorno deste tributário. Como já destacado, a área tem solo exposto nessa região (Arcadis, 2021), favorecendo, portanto, o carreamento de sedimentos para o canal do ribeirão, consequentemente, aumentando o valor da turbidez.

No período chuvoso 2021/2022, percebe-se que, de forma geral, os resultados máximos observados foram menores que o do período anterior (2020/2021), exceto nos pontos JRB-01, JRB-02, PT-22/TM-01, TM-06 e TM-09. A máxima observada ocorreu mais uma vez no ponto CE-01.

Quanto às violações, as máximas foram superiores ao VMP (40 NTU, para o CE-01 e 100 NTU para os demais pontos) nos períodos chuvosos 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 nos pontos entre o PT-21 e o PT-22/TM-01. Nos demais pontos não foram verificadas violações em nenhum momento do monitoramento.

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 chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, dos pontos da região dos reservatórios de retiro baixo e três marias, em unifilar.



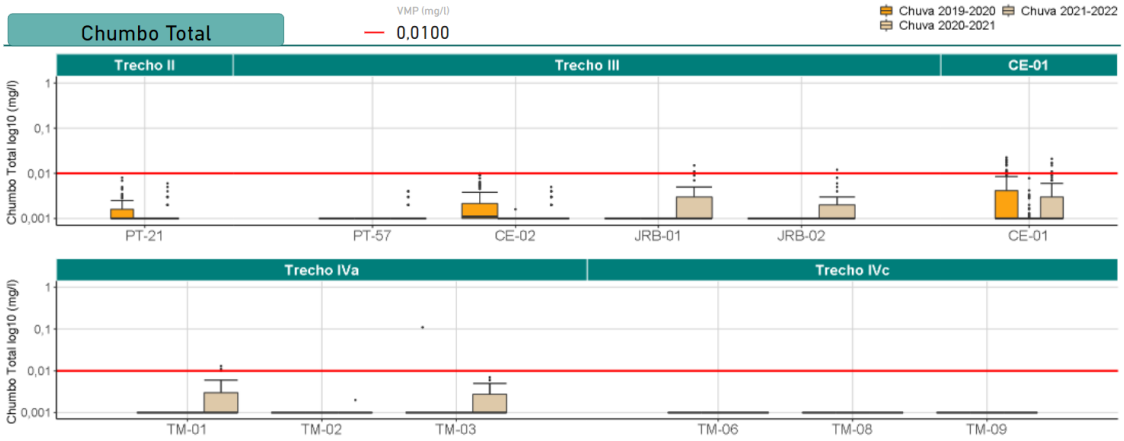
Elaboração: Arcadis, 2022. Nota: Os trechos apresentados acima dos pontos são referentes ao PMQS-TM, a saber: Trecho II (Reservatório da UHE Retiro Baixo), Trecho III (Jusante UHE Retiro Baixo), CE-01 (ribeirão dos Gomes/das Almas), Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com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

- **Chumbo Total**

O parâmetro Chumbo total, no período chuvoso 2021/2022, apresentou maiores valores quantificáveis nos pontos JRB-01, JRB-02, CE-01, PT-22/TM-01 e TM-03 quando comparado com o período de chuva 2020/2021. De forma geral, os valores ao longo do tempo para todos os pontos de monitoramento analisados apresentaram quase sempre valores abaixo do limite de quantificação (LQ = 0,001 mg/L para o laboratório Bioagri, 0,01 mg/L até março/2021 e 0,002 mg/L após março/2021 para o laboratório SGS) e, consequentemente, abaixo do respectivo VMP (0,01 mg/L). Destaca-se, no entanto, que foram reportados alguns *outliers* ao longo do período de monitoramento que foram acima do VMP: no ponto CE-01 (chuva 2019/2020) e nos pontos JRB-01, JRB-02, CE-01, PT-22/TM-01 (chuva 2021/2022).

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 chuva 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, 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), Trecho IVa (Reservatório da UHE Três Marias, região da confluência com rio Paraopeba) e Trecho IVc (Reservatório da UHE Três Marias, após confluência do rio Paraopeba com rio São Francisco).

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 do rio Paraopeba nessa região), são observados outros cursos d'água a jusante do ponto CE-02 que podem contribuir para alteração da qualidade da água superficial do rio Paraopeba. Ademais, vale ressaltar as eventuais contribuições do próprio tributário ribeirão dos Gomes, 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 chuvas de 2021/2022, os valores de vertimento apresentaram valores máximos históricos, atingindo a marca de 2.454 m³/s de vazão.

Como já apontado no presente documento, não há, contudo, clareza das contribuições relativas a cada um dos fatores supracitados, uma vez que se verificam comportamentos de violação em toda a bacia, inclusive em ponto de monitoramento de montante do rio Paraopeba em trecho não impactado (especialmente nos períodos chuvosos), e que as oscilações nas concentrações apresentam uma relação direta associada às variações significativas de chuvas e vazão no rio Paraopeba.

De toda forma, em linhas gerais, as concentrações dos principais marcadores, nesse trecho, apresentam-se mais atenuados que os trechos de montante, possivelmente em função do efeito de decantação do reservatório, dentre outros processos de decaimento.

Especificamente sobre o período de chuva de 2021/2022, verifica-se que os volumes pluviométricos da região do baixo Paraopeba foram menores do que a região do médio e alto Paraopeba, apesar de ambos apresentarem resultados relativamente maiores que os períodos anteriores, principalmente no mês de janeiro. A qualidade da água nessa região apresentou de forma geral, comportamento aproximado aos períodos anteriores.

Particularmente sobre o mês de janeiro/2022, durante alguns momentos, principalmente entre os dias 12 e 27/01, as amostragens de alguns pontos foram paralisadas e não foi possível avaliar a qualidade da água superficial. Percebe-se, no entanto, que mesmo que os valores de alguns parâmetros tenham apresentado comportamento atípico, esta condição não permaneceu ao longo do tempo. Vale destacar que, especificamente para os parâmetros Manganês total e Chumbo total, estes não atingiram o gatilho de acionamento de plano de contingência de 0,72 mg/L e 0,012 mg/L, respectivamente, para o último período sazonal (chuva 2021/2022).

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 abril/2022 (ARCADIS,2022) 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. Comportamento da qualidade hídrica do rio Paraopeba de acordo com os dados telemétricos

10.1. 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.

10.2. 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, 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 10.2.1, são

considerados inconsistentes. Essas faixas estão relacionadas à limitação de registro do dispositivo.

Tabela 10.2-1: 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 10.2.2.

Tabela 10.2-2: Área, estações telemétricas e pontos analisados para o desenvolvimento dos modelos de regressão.

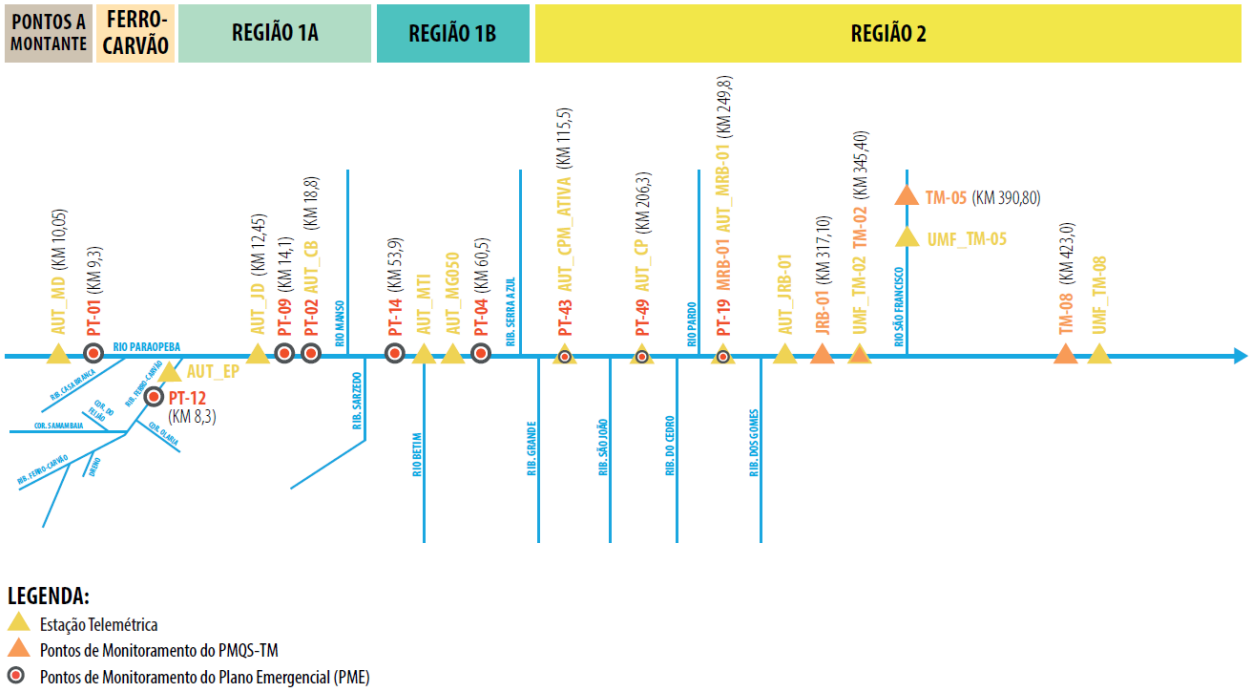
Área	Estação telemétrica	Ponto de monitoramento
TLM- 1	AUT-MD	PT-01
	AUT-EP	PT-12
	AUT-JD	PT-09
	AUT-CB	PT-02
TLM- 2	AUT-MTI	PT-14
	AUT-Betim	TT-01
	AUT-MG 050	PT-48
	AUT-CPM_Ativa	PT-43
	AUT-CP	PT-49
TLM- 3	AUT-MRB-01	MRB-01/PT-19
	AUT-JRB-01	JRB-01
TLM- 4	UMF-TM-02	TM-02
	UMF-TM 05	TM-05
	UMF-TM 08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

Elaboração: Arcadis, 2022.

Tendo em vista que as telemétricas reportam dados em frequência horária 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 10.2.1, 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 10.2.1: 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 31/03/2022 (final do período de chuva/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 chuva 2021/2022, foram comparados com os resultados previstos pelos modelos de regressão linear para o mesmo período.

10.3. 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 10.3.1. 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, mas, ainda assim, 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 10.3-1: Resultados de R^2 para as relações de turbidez com a fração dissolvida dos metais.

Área	Estação x ponto	R^2 Mn dissolvido	R^2 Fe dissolvido	R^2 Al dissolvido
TLM- 1	AUT-MD x PT-01	0,073	0,15	0,12
	AUT-EP x PT-12	0,023	0,02	0,041
	AUT-JD x PT-09	0,081	0,14	0,14
	AUT-CB (PT-02) x PT-02	0,083	0,17	0,17
TLM- 2	AUT-MTI (PT-14) x PT-14	0,098	0,02	0,094
	AUT-MG 050 x PT-48	0,033	0,0012	0,041
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,12	0,041	0,11
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,19	0,16	0,12
	AUT-Betim x TT-01	0,16	0,2	0,33
TLM- 3	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,18	0,42	0,024
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,14	0,17	0,17
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,17	0,41	0,26
	UMF-TM 05 x TM-05	0,0023	0,44	0,49
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00000038	0,005	0,25

Elaboração: Arcadis, 2022.

Já para as frações totais, conforme mostra a Tabela 10.3.2, os ajustes mostraram-se mais adequados (R^2 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 10.3-2: 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	0,7
	AUT-EP x PT-12	0,032	0,092	0,028
	AUT-JD x PT-09	0,64	0,71	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	0,66
	AUT-MG 050 x PT-04	0,46	0,48	0,39
	AUT-CPM_Ativa x PT-43	0,7	0,74	0,71
	AUT-CP (PT-49) x PT-49	0,72	0,76	0,69
	AUT-Betim x TT-01	0,0043	0,4	0,4
TLM- 3	AUT-MRB-01 (PT-19) x MRB-01/PT-19	0,8	0,87	0,79
	AUT-JRB-01 x JRB-01	0,44	0,66	0,72
TLM- 4	UMF-TM-02 x TM-02	0,2	0,54	0,51
	UMF-TM 05 x TM-05	0,018	0,66	0,74
	UMF-TM 08 x TM-08	0,00089	0,0005	0,0087

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

Nos Gráficos 10.3.1 a 10.3.4, 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 10.3-1: 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 10.3.1 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Manganês total no PT-01.

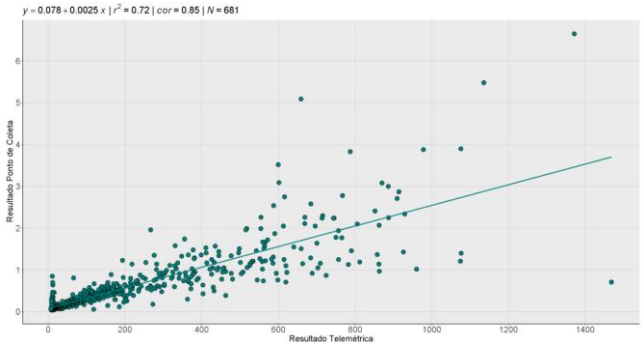


Gráfico 10.3.1 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Ferro total no PT-01.

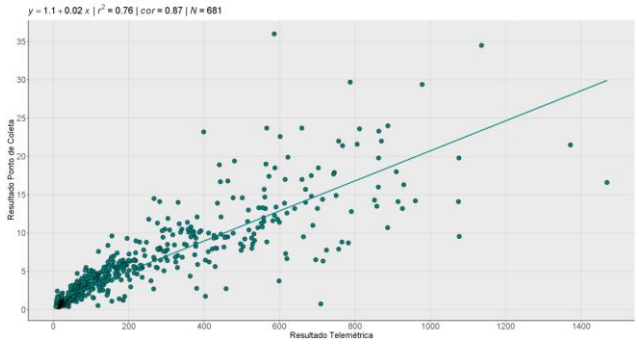


Gráfico 10.3.1 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MD e os resultados de Alumínio total no PT-01.

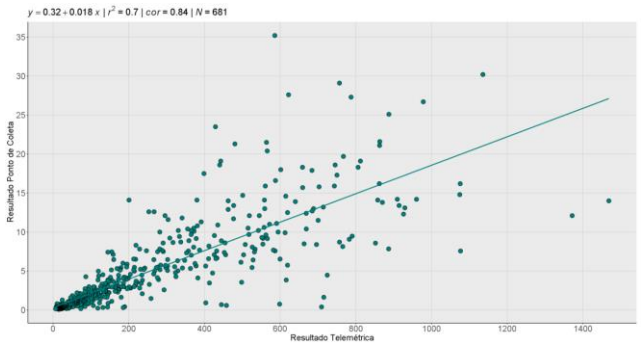


Gráfico 10.3.1 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Manganês total no PT-09.

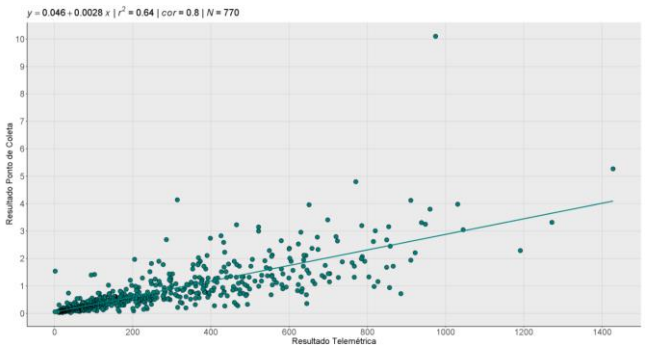


Gráfico 10.3.1 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Ferro total no PT-09.

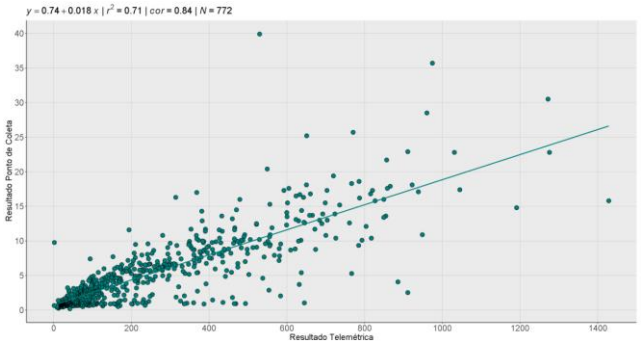
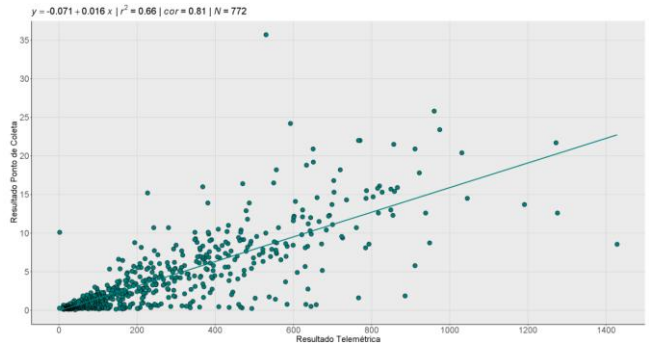


Gráfico 10.3.1 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JD e os resultados de Alumínio total no PT-09.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 10.3-2: 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 10.3.2 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Manganês total no PT-02.

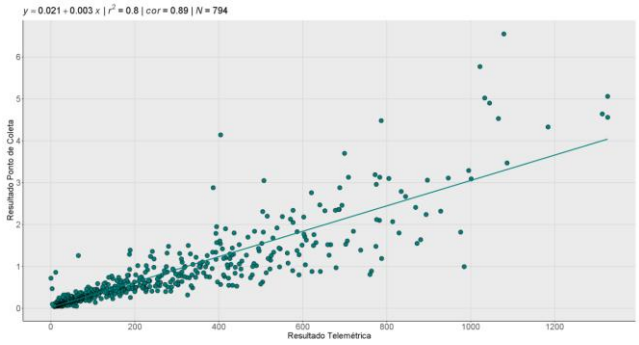


Gráfico 10.3.2 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Ferro total no PT-02.

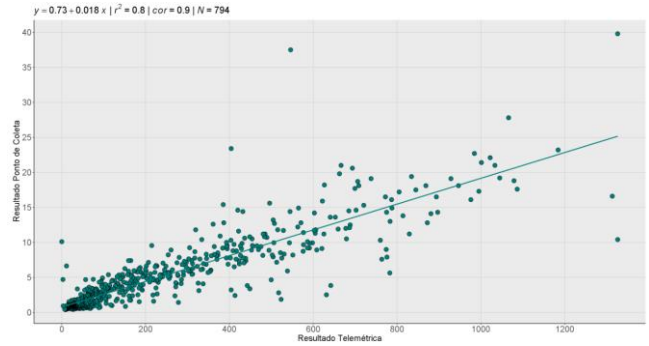


Gráfico 10.3.2 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CB (PT-02) e os resultados de Alumínio total no PT-02.

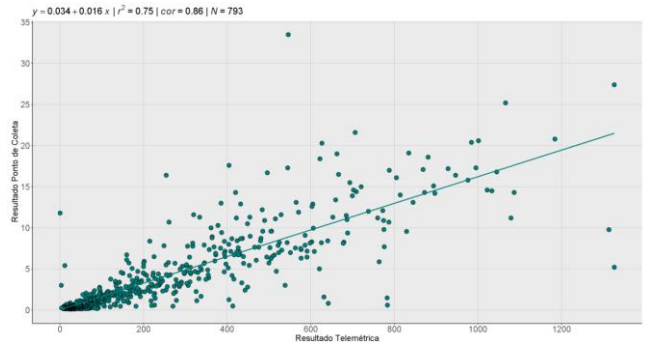


Gráfico 10.3.2 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Ferro total no PT-14.

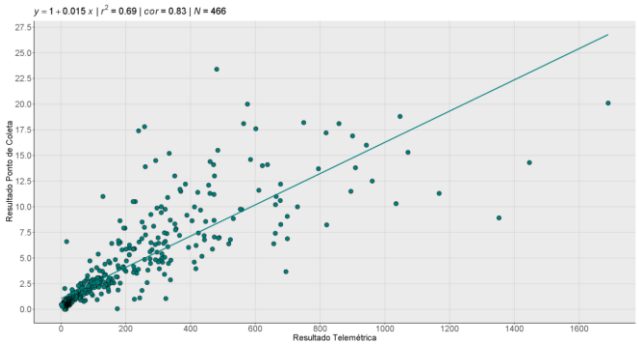


Gráfico 10.3.2 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MTI e os resultados de Alumínio total no PT-14.

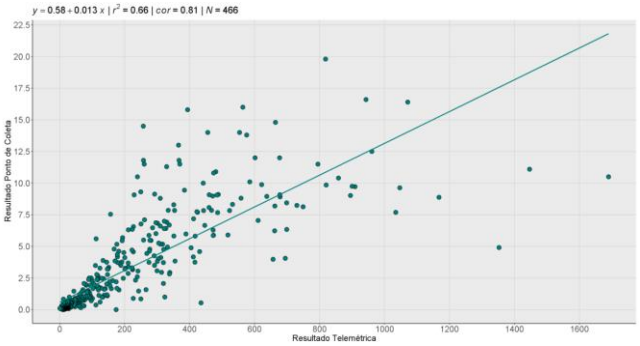
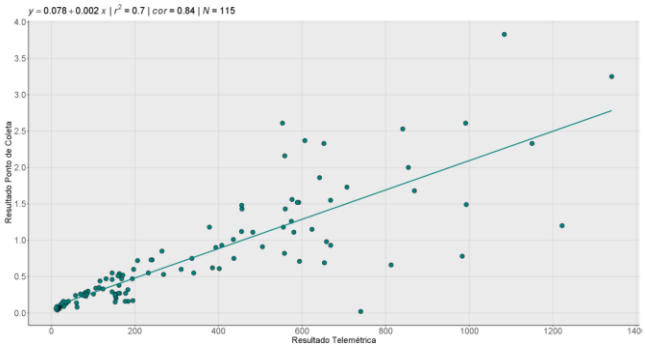


Gráfico 10.3.2 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Manganês total no PT-43.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 10.3-3: Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de turbidez medidos nas telemétricas (AUT-CPM_Ativa, AUT-CP e AUT-MRB) 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 10.3.3 (A) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Ferro total no PT-43.

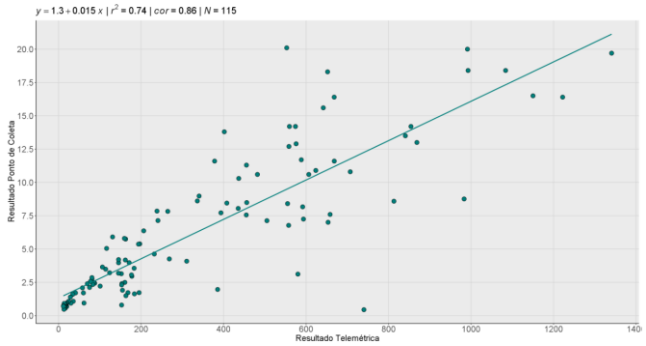


Gráfico 10.3.3 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CPM_Ativa e os resultados de Alumínio total no PT-43.

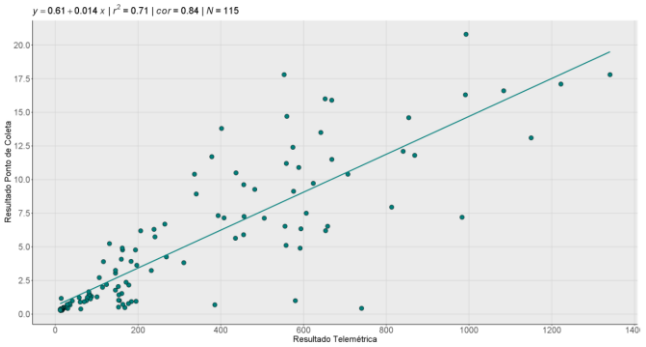


Gráfico 10.3.3 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Manganês total no PT-49.

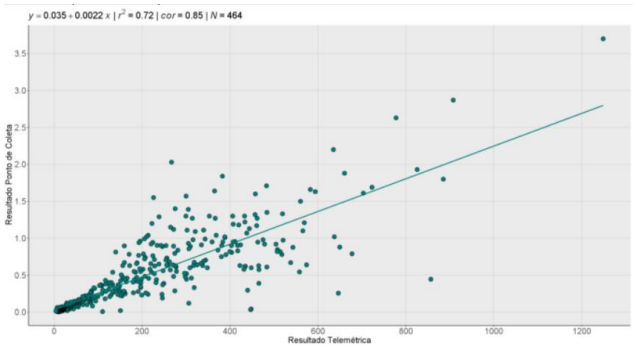


Gráfico 10.3.3 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Ferro total no PT-49.

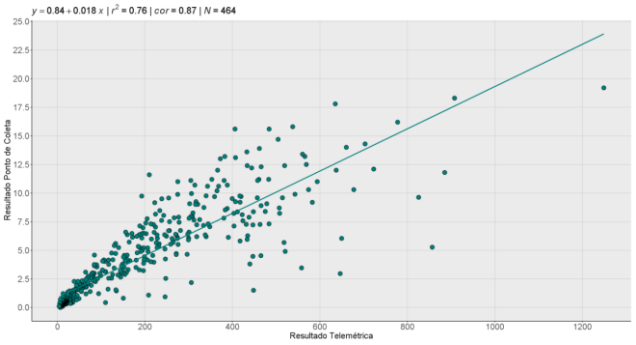


Gráfico 10.3.3 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-CP (PT-49) e os resultados de Alumínio total no PT-49.

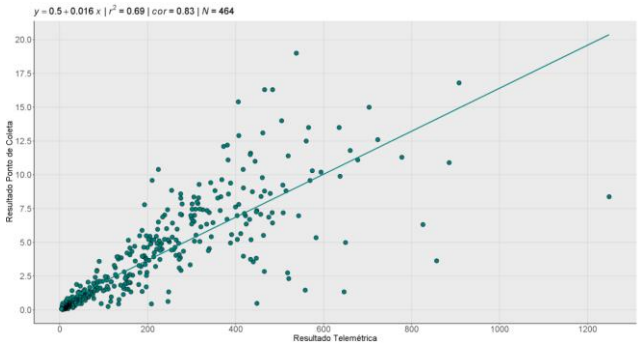
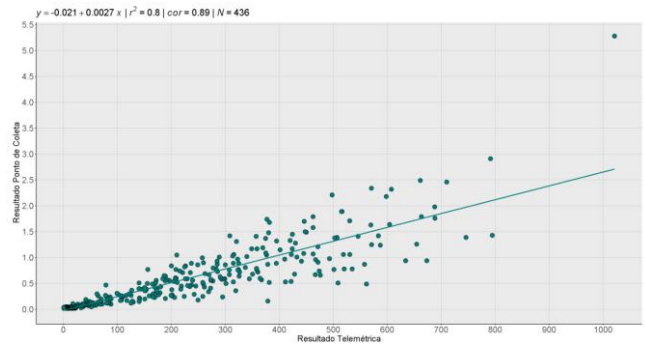


Gráfico 10.3.3 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Manganês total no PT-19.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 10.3-4: Modelos de regressão linear para a relação entre os dados de turbidez medidos nas telemétricas (AUT-MRB, AUT-JRB 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 10.3.4 (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.

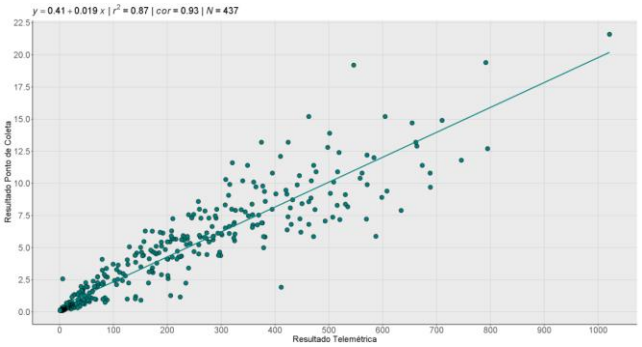


Gráfico 10.3.4 (B) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-MRB-01 (PT-19) e os resultados de Alumínio total no PT-19.

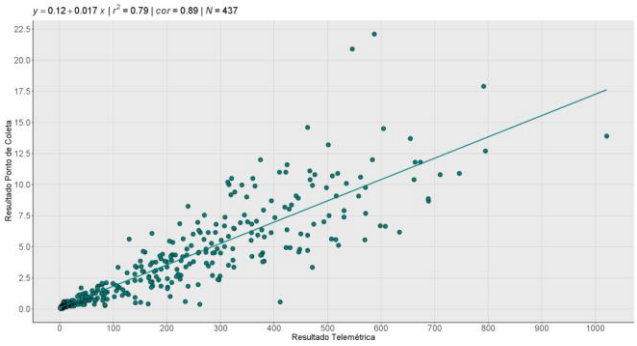


Gráfico 10.3.4 (C) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 (PT-49) e os resultados de Ferro total no JRB-01.

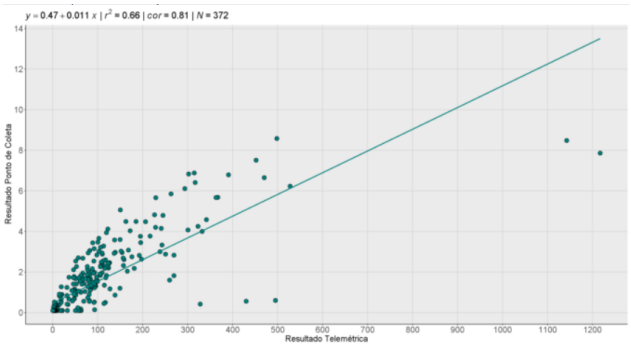


Gráfico 10.3.4 (D) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação AUT-JRB-01 (PT-49) e os resultados de Alumínio total no JRB-01.

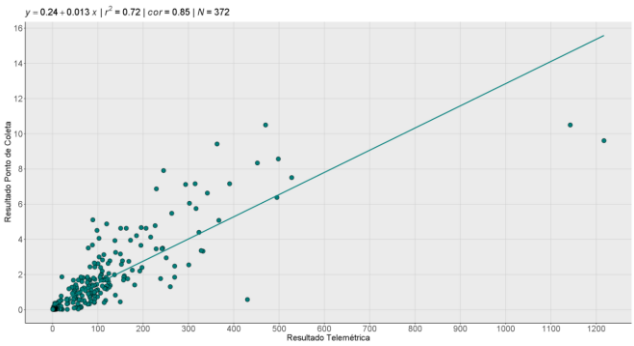


Gráfico 10.3.4 (E) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Ferro total no TM-05.

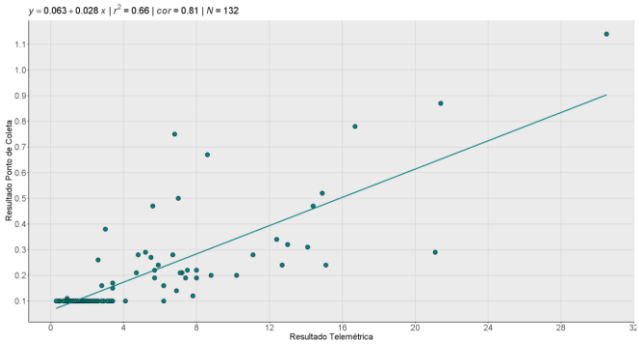
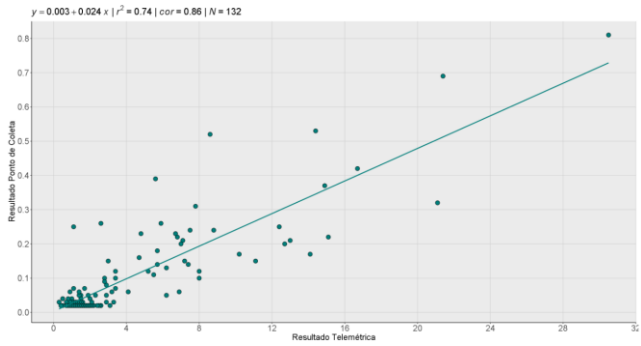


Gráfico 10.3.4 (F) – Regressão linear entre os resultados de Turbidez registrados na estação UMF-TM-05 e os resultados de Alumínio total no TM-05.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nos Gráficos 10.3.1 (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 10.3.1 (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= 0,71).

Nos Gráficos 10.3.2 (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 10.3.2 (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 superior a 0,8. O coeficiente de determinação (R^2) foi próximo a 0,7 para ambas as relações, sendo capaz de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais.

Nos Gráficos 10.3.2 (F) a 10.3.3 (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 iguais ou superiores a 0,7 nos três casos, indicando bom ajuste, com capacidade de explicar cerca de 70% da variabilidade das concentrações dos metais no ponto de monitoramento.

Nos Gráficos 10.3.3 (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 76% da variabilidade das concentrações deste metal em função da Turbidez.

Nos Gráficos 10.3.3 (F) e 10.3.4 (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 10.3.4 (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 10.3.4 (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 10.3.5 a 10.3.8 apresentam os resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear apresentados anteriormente.

Gráfico 10.3-5: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-01 e PT-09) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 10.3.5 (A) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MD.

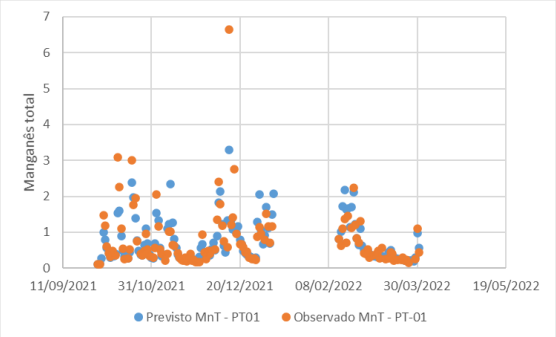


Gráfico 10.3.5 (D) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-JD.

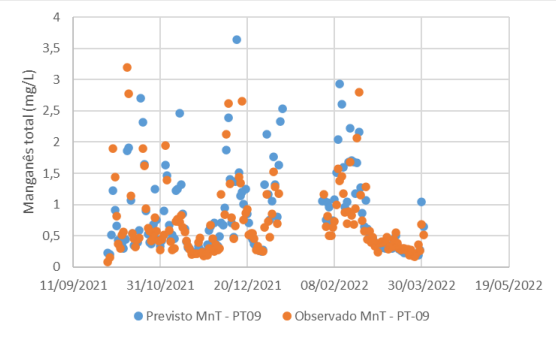


Gráfico 10.3.5 (B) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MD.

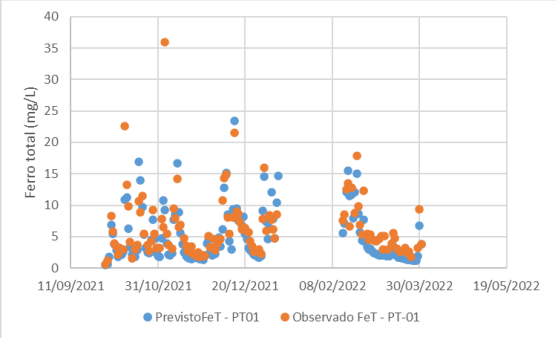


Gráfico 10.3.5 (E) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JD.

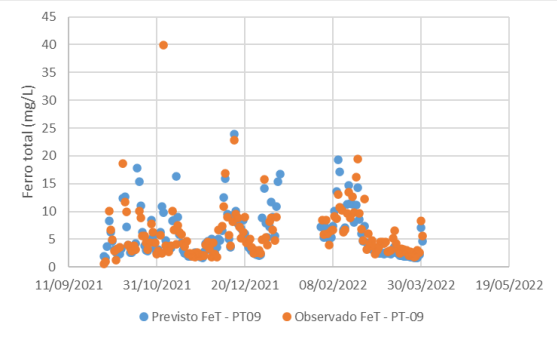


Gráfico 10.3.5 (C) – Resultados observados no ponto PT-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MD.

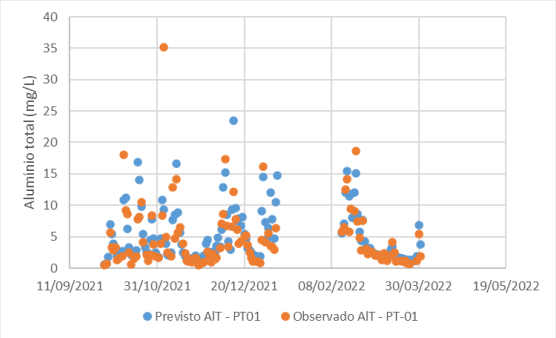
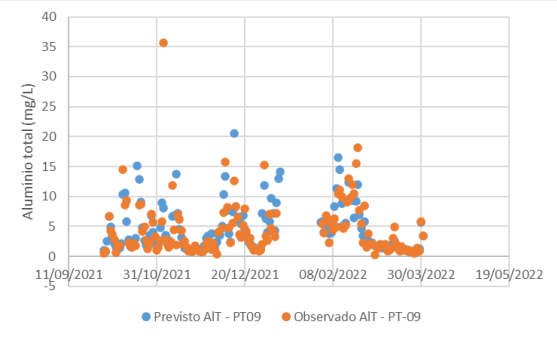


Gráfico 10.3.5 (F) – Resultados observados no ponto PT-09 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JD.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 10.3-6: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-02, PT-14 e PT-43) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 10.3.6 (A) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CB (PT-02).

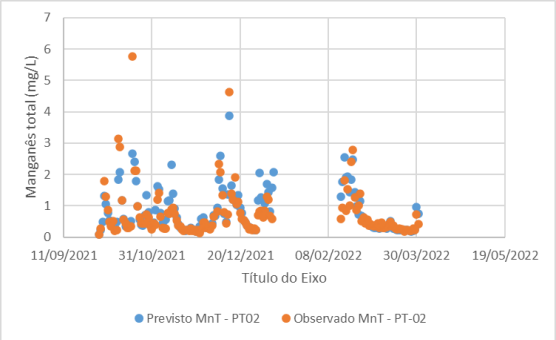


Gráfico 10.3.6 (B) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CB (PT-02).

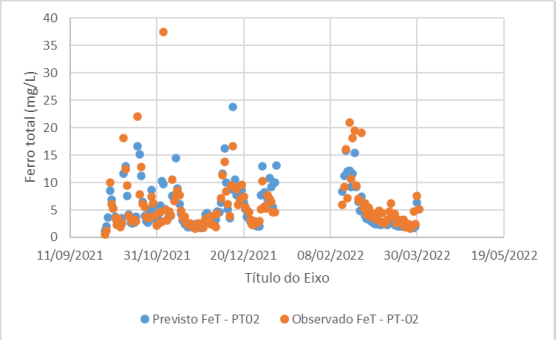


Gráfico 10.3.6 (C) – Resultados observados no ponto PT-02 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CB (PT-02).

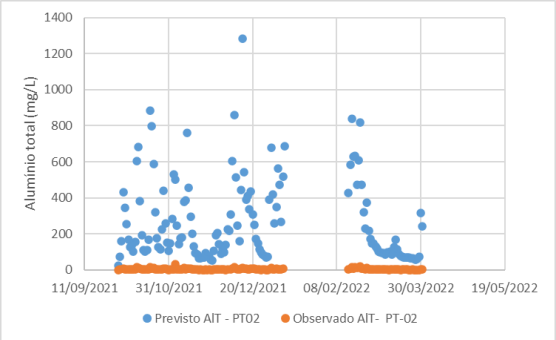


Gráfico 10.3.6 (D) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-MTI (PT-14).

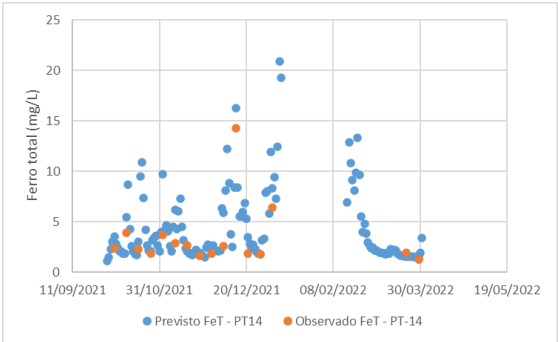


Gráfico 10.3.6 (E) – Resultados observados no ponto PT-14 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MTI (PT-14).

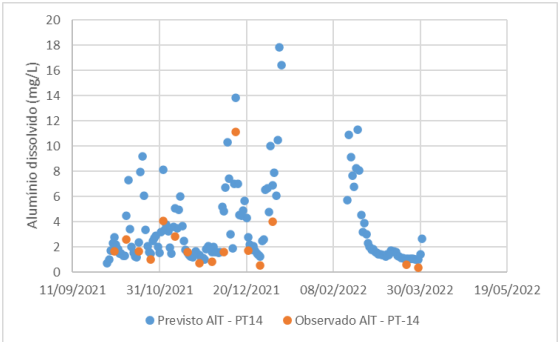
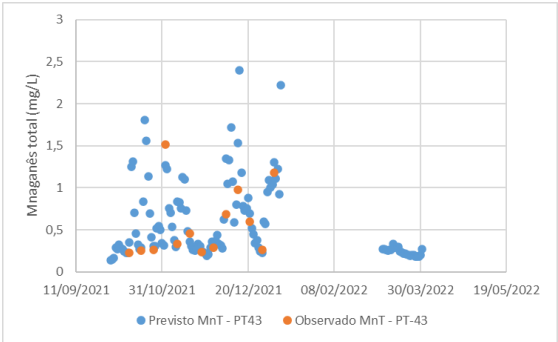


Gráfico 10.3.6 (F) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CPM_Ativa.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 10.3-7: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-43, PT-49 e PT-19/MRB-01) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 10.3.7 (A) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CPM_Ativa.

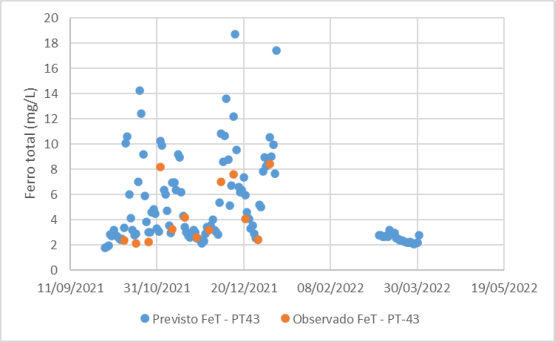


Gráfico 10.3.7 (D) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-CP (PT-49).

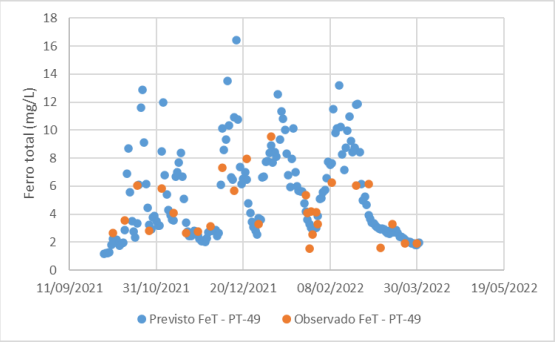


Gráfico 10.3.7 (B) – Resultados observados no ponto PT-43 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CPM_Ativa.

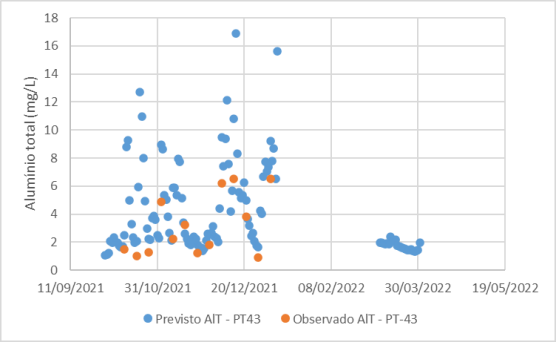


Gráfico 10.3.7 (E) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-CP (PT-49).

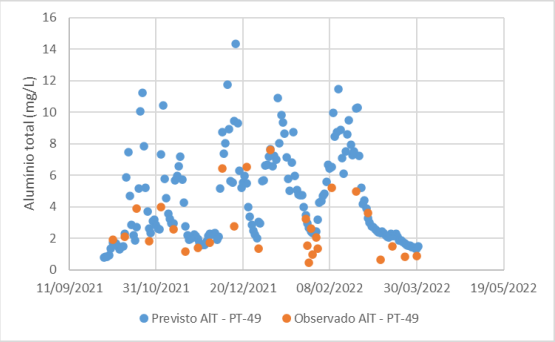


Gráfico 10.3.7 (C) – Resultados observados no ponto PT-49 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-CP (PT-49).

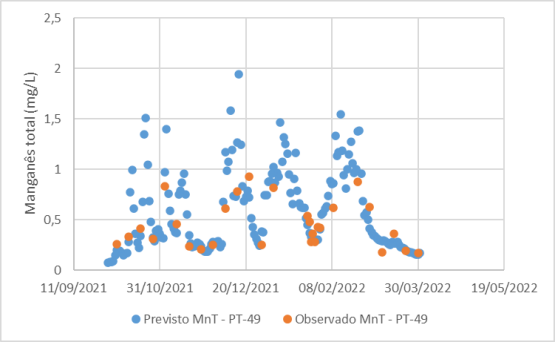
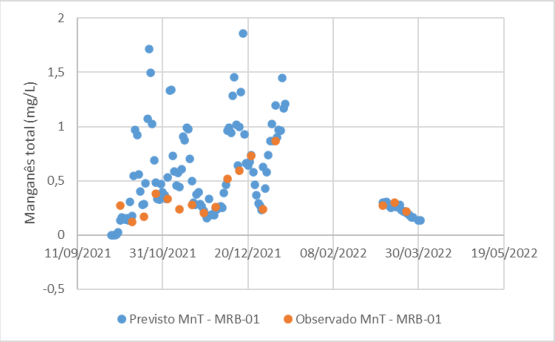


Gráfico 10.3.7 (F) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Manganês total na estação AUT-MRB-01 (PT-19).



Elaboração: Arcadis, 2022.

Gráfico 10.3-8: Resultados observados nos pontos de monitoramento da Vale (PT-19/MRB-01, JRB-01 e TM-05) para a fração total dos metais traçadores no período de chuva/2022 e os resultados previstos pelos modelos de regressão linear.

Gráfico 10.3.8 (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).

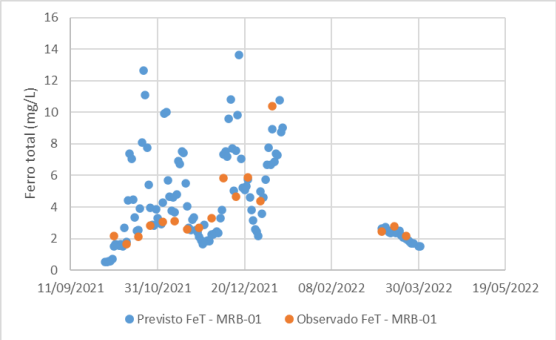


Gráfico 10.3.8 (B) – Resultados observados no ponto PT-19/MRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-MRB-01 (PT-19).

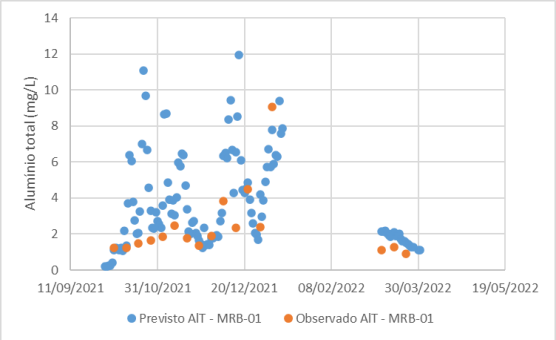


Gráfico 10.3.8 (C) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação AUT-JRB-01.

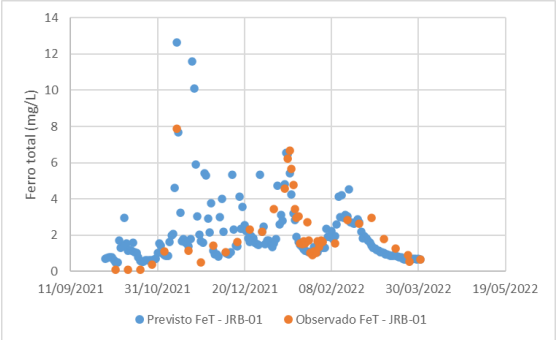


Gráfico 10.3.8 (D) – Resultados observados no ponto JRB-01 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação AUT-JRB-01.

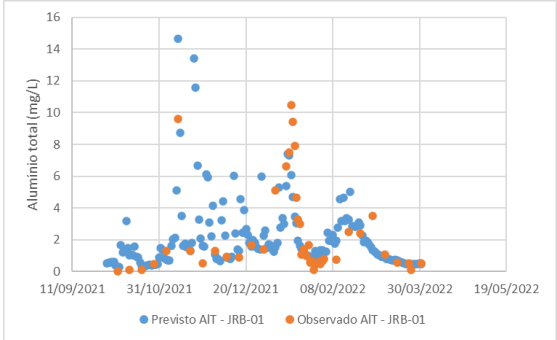


Gráfico 10.3.8 (E) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Ferro total na estação UMF-TM-05.

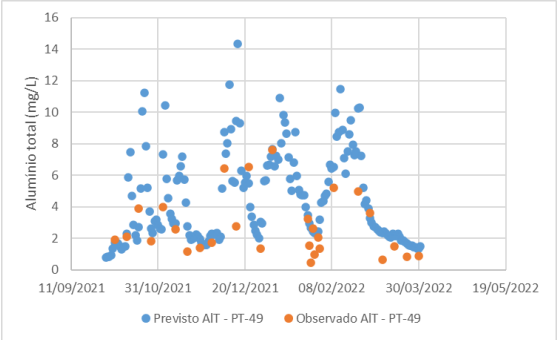
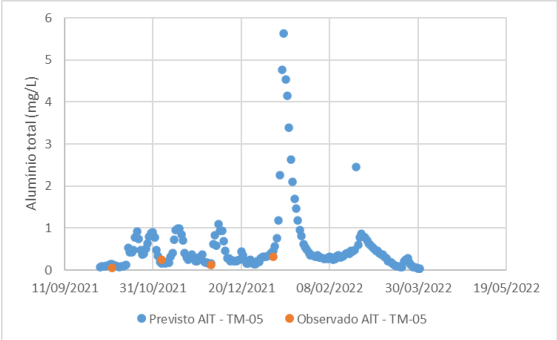


Gráfico 10.3.8 (F) – Resultados observados no ponto TM-05 e resultados previstos pelo modelo de regressão linear para Alumínio total na estação UMF-TM-05.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Para a estação AUT-MD, através dos Gráficos 10.3.5 (A, B e C), é possível observar comportamento aproximado entre os valores previstos e observados no ponto PT-01 para os parâmetros Mn, Fe e Al total no período de chuva/2022, indicando um bom ajuste dos dados em função dos valores de turbidez. O parâmetro Ferro total foi o que apresentou a maior semelhança entre o previsto e observado. É importante ressaltar que a estação AUT-MD interrompeu o reporte de dados em 09/01/2022 devido às fortes chuvas na região e elevações significativas de nível e vazão na bacia e no próprio rio Paraopeba. A referida estação retornou à operação em 14/02/2022.

É possível observar que, para a estação AUT-JD, cujos resultados dos modelos podem ser verificados pelos Gráficos 10.3.5 (D, E e F), os parâmetros Alumínio e Ferro total apresentaram maior proximidade entre os valores previstos e observados. Para o Manganês total, os resultados observados também foram próximos aos previstos, porém com comportamento mais distribuído se comparados aos metais referidos anteriormente. Ressalta-se que a estação AUT-JD interrompeu o reporte de dados em 09/01/2022 devido às fortes chuvas na região e elevações significativas de nível e vazão na bacia e no próprio rio Paraopeba, sendo que os resultados voltaram a ser reportados somente a partir de 01/02/2022. Outrossim, observou-se um bom ajuste dos dados nas correlações estabelecidas.

É possível observar que, para a estação AUT-CB, cujos resultados dos modelos podem ser verificados pelos Gráficos 10.3.6 (A, B e C), o parâmetro Ferro 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 Manganês total, os valores previstos apresentaram comportamento com distribuição semelhante aos observados. A estação AUT-CB também não reportou dados a partir de 09/01/2022, voltando a operar em 15/02/2022.

Nos Gráficos 10.3.6 (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, no geral, semelhante em relação as concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento PT-14. Ressalta-se que a estação AUT-MTI não apresentou dados a partir de 10/01/2022 devido às fortes chuvas na região e elevações significativas de nível e vazão na bacia e no próprio rio Paraopeba. Dessa maneira, não foi possível indicar resultados telemétricos durante o período de 10/01 a 15/02. Destaca-se, ainda, que o PT-14 não foi coletado de 11/01 a 15/03, pois estava com acesso inseguro/inacessível.

Os resultados dos gráficos 10.3.6 (F) e 10.3.7 (A e B) indicam que o comportamento previsto para os parâmetros Fe, Al e Mn total foi próximo ao encontrado nos resultados do monitoramento do ponto PT-43. Devido às fortes precipitações registradas na região, a estação AUT-CPM (Ativa) teve o reporte de dados interrompidos e voltou a funcionar em 08/03/2022. Salienta-se que o PT-43 não foi coletado de 06/01/2022 a 29/03/2022, pois também estava com acesso inseguro/inacessível.

Com os Gráficos 10.3.7 (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,

semelhante e possui comportamento aproximado das concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento PT-49. Dentre os parâmetros analisados, o Ferro total apresentou comportamento mais próximo entre os valores previstos e observados para o período de chuva/2022. Ressalta-se que o PT-49, com frequência semanal em todo o período de chuva analisado, não foi coletado no período de 02 a 22/01/2022, e nos dias 02 e 16/02/2022, devido ao ponto estar inacessível.

Os resultados apresentados pelos Gráficos 10.3.7 (F) e 10.3.8 (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. Destaca-se que após dois meses sem funcionamento, devido aos danos causados em função das elevadas precipitações e vazões, a estação AUT-MRB-01(PT-19) voltou a operar em 09/03/2022.

A partir dos gráficos 10.3.8 (C e D), é possível observar que o comportamento previsto para os parâmetros Al e Fe total é no geral, próximo em relação as concentrações de metais observadas no ponto de monitoramento JRB-01.

Por fim, os resultados dos gráficos 10.3.8 (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 fevereiro e março de 2022, pois o acesso do ponto encontra-se inseguro. Ademais, observou-se um bom ajuste dos dados nas correlações estabelecidas.

10.4. 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 são semelhantes em relação aos observados e, dentre as estações analisadas, as que obtiveram uma previsão mais aproximada dos resultados observados foram as estações AUT-CB (PT-02) e AUT-MRB-01/PT-19 para Ferro 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.

11. Variação estatística espacial e temporal das concentrações dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba nos períodos chuvosos até 2022

11.1. Objetivo

O objetivo das avaliações estatísticas espaciais e temporais aplicadas aos metais foi verificar o processo de evolução deles em suas respectivas regiões e entre elas ao longo do tempo e do espaço nos períodos chuvosos até 2022.

11.2. Metodologia

A Tabela 11.2-1 apresenta o quantitativo total de amostragem de sedimentos de fundo, por região, ao longo dos períodos de chuva. É importante ressaltar que o quantitativo de amostras varia de acordo o plano de monitoramento, relacionado a redução na malha de pontos monitorados ao longo do tempo e a alterações nas frequências de coleta e dificuldades no momento da amostragem, tais quais dificuldade no acesso, risco de acidente, fundo rochoso do córrego (ausência de sedimentos para coleta), elevada vazão no trecho que impedia acesso ao local de amostragem, entre outros. Especificamente, no período de chuva 2021/2022, o N amostral das regiões quando comparado com o N amostral da chuva 2020/2021, com exceção da região 2A, apresentou uma alteração maior de frequência de todos os pontos de semanal (2020/2021) para quinzenal ou mensal (2021/2022).

Detalhes sobre a alteração da frequência de monitoramento encontram-se no relatório Avaliações Rede de Monitoramento PME/PMQS – Revisão da frequência (versão 15A para o PME e versão 6 para o PMQS-Três Marias), malha amostral e escopo analítico, de agosto/2021 elaborado pela Arcadis e considerações do Ofício FEAM/GERAI nº. 171/2021 de 27/09/2021 Nota Técnica nº 24/IGAM/GEMOQ/2021(35575790) e a Nota Técnica Nº 60622935-ACM-DM-ZZ-TN-PM-0004-2021, de 27/09/2021, da Consultoria AECOM, representante do Ministério Público de Minas Gerais. Neste documento estão listadas as frequências de monitoramento para os períodos sazonais de estiagem e chuva.

Tabela 11.2-1 Quantitativo do N Amostral de sedimentos nos diferentes períodos de chuva.

Período climático	Montante	Ferro Carvão	Região 1A	Região 1B	Região 2A	Região 2B	Região 2C
Chuva-19	5	10	81	64	78	10	20
Chuva-19/20	6	49	105	107	201	77	20
Chuva-20/21	7	32	69	28	116	67	20
Chuva-21/22	8	45	72	22	44	51	20

11.2.1. Método da Estatística descritiva e inferencial

Neste item serão analisados os resultados dos metais majoritários (Mn, Fe, Al) e traços (Pb, Cu, Ni, Cr, Cd, As, Hg e Zn) ao longo do tempo e do espaço nos períodos de chuva.

Previamente à análise descritiva e inferencial dos resultados do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água nos períodos de chuva, visando identificar a similaridade entre os pontos de monitoramento contidos nas diferentes regiões monitoradas, foi empregada a Análise de Agrupamentos (AA), em específico a Análise de Cluster (AC) (HAIR et al., 2005). Essa análise agrupa objetos (casos) em classes (clusters) com base nas similaridades dentro da classe e dissimilaridades entre as diferentes classes. Para efetuar esta análise, foram consideradas as medianas mensais dos resultados dos parâmetros majoritários mencionados, desde o início do monitoramento até o final do período de chuvas 2021/2022. 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 da água na estiagem entre as regiões (comparação espacial) e entre os períodos sazonais de chuva em cada região (comparação temporal) foi aplicado o teste de hipóteses não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparações múltiplas de Dunn (quando identificada diferença significativa no teste de Kruskal-Wallis), ao nível de significância de 5% (KRUSKAL; WALLIS, 1952; DUNN, 1964). A comparação temporal também foi realizada para cada ponto, individualmente, e os resultados constam no **ANEXO IV-D**. Neste mesmo anexo, consta a comparação espacial para cada período de estiagem separadamente (comparação espacial chuva/2019, comparação espacial chuva 2019/2020, chuva 2020/2021 e chuvas 2021/2022).

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.

11.2.3. Análise de tendência temporal

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

O teste de Mann-Kendall (MK) define se os valores de um determinado parâmetro Y tendem a diminuir ou aumentar à medida que o tempo T aumenta. A estatística de S de Kendall é computada pela comparação de todos os pares Y e T (concentração do parâmetro e tempo) e mede a dependência monotônica de Y em T. 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.

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 três 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 da 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 chuvas de 2021/2022, 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 chuva separadamente, de forma a identificar o comportamento dos parâmetros ao longo do tempo especificamente para o período sazonal de interesse. Neste caso, o teste de Mann-Kendall foi empregado sem necessidade de avaliação prévia da influência da sazonalidade nos dados.

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

11.3. Resultados e discussão

No período de chuvas 2021/202, alguns pontos de monitoramento não foram amostrados de forma contínua pelo fato de não haver possibilidade de coleta embarcada e ou por segurança no trabalho. Os pontos não amostrados pelo menos uma vez e localizados ao longo do rio Paraopeba foram o CE-02, PT-01, PT-02, PT-05, PT-07, PT-09, PT-10, PT-11, PT-13, PT-14, PT-15, PT-16, PT-18, PT-19, PT-20, PT-21, PT-23, PT-43, PT-48, PT-49, PT-52, PT-53, PT-54, PT-55. O ponto CE-02, presentou poucos resultados em 2019 porque o leito do rio é rochoso. O PT-57 não tem sedimentos porque está no canal de fuga da barragem da UHE Retiro Baixo e a calha do rio está concretada e com rochas.

11.3.1. Análise de cluster

A avaliação dos clusters de sedimentos considerou os pontos de monitoramento no rio Paraopeba como um todo (Figura 11.3.1-1), que identificou 3 subgrupos com similaridades.

De acordo com o dendograma 11.3.1-1 evidenciou-se maior distribuição dos pontos de monitoramento no espaço, ou seja, os pontos da região 1A se distribuíram nos agrupamentos de PT-02, PT-09, PT-05 que estatisticamente tiveram similaridades. O PT-13, que espacialmente estaria no mesmo grupo, não apresentou similaridade com os demais da região 1A, mas foi agrupado com os pontos da região 2A, não se identificando aproximação dele com esses pontos, haja vista sua posição (PT-13) em área muito afetada pelo rejeito.

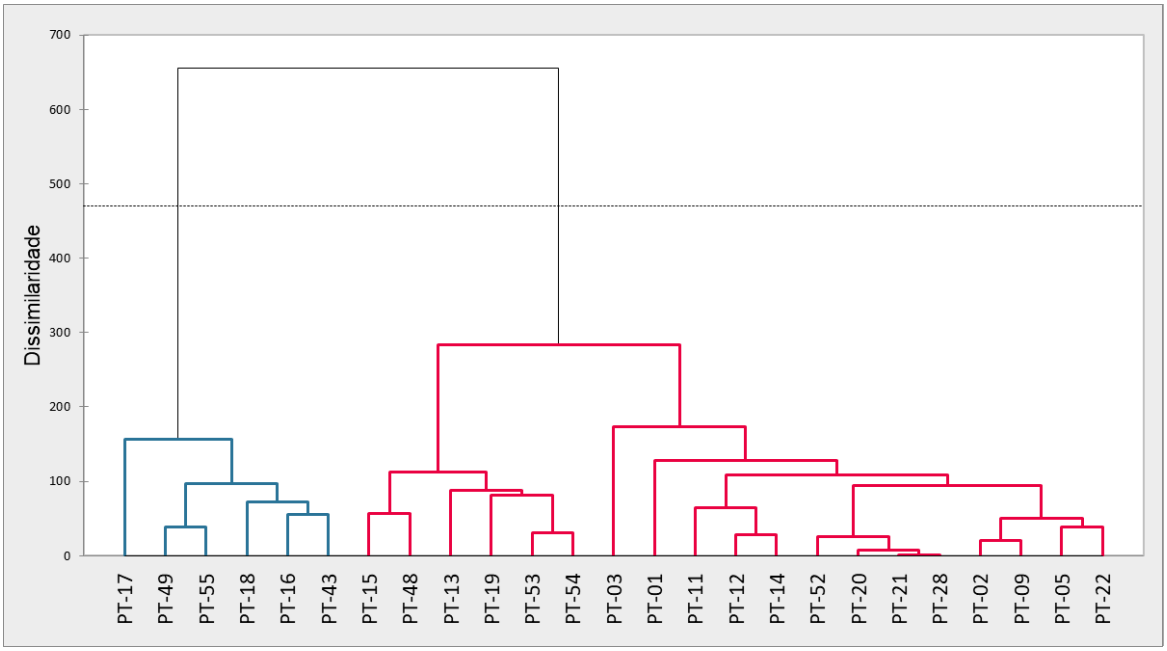
No grupo dos pontos da região 1B, os pontos PT-15 e PT-48 apresentaram similaridade estatística, enquanto os pontos PT-03 e PT-14 tiveram maior similaridade com os pontos da

região Ferro-Carvão e PT-01. Esta similaridade pode ter relação com os sedimentos com característica química de rejeitos. Já o PT-52, está a montante da área afetada e sua relação com o grupo foi com os pontos da UHE Retiro Baixo (PT-20, PT-28 e PT-21), todos com características químicas de sedimentos naturais ao longo de todos os monitoramentos. Ainda, por esta área de reservatório estar espacialmente distante da região montante, sua similaridade com o PT-52 pode estar relacionada com o fato de não terem sido influenciados com os sedimentos misturados com rejeitos. O grupo dos pontos PT-53, PT-54 e PT-19, localizados na região 2A, foi o que mais se distanciou estatisticamente dos pontos de monitoramento desta região, provavelmente por estarem em região de transição de unidades litológicas. Outros pontos do grupo (PT-16, PT-43, PT-18, PT-49, PT-55 e PT-17) apresentaram similaridade estatística e estão em distâncias aproximadas e todos estão localizados na mesma região 2A.

Desta avaliação, tem-se que os sedimentos que foram mais afetados pelo rejeito da barragem tendenciaram a se misturarem entre si (Ferro-Carvão, 1A, 1B), o que pode indicar evolução na característica para uma tendência mais transicional entre sedimentos naturais e com característica de rejeitos, enquanto a maioria dos pontos da região 2A apresentou-se agrupado, mantendo-se com característica recorrente e sem evidência de transições ou misturas de materiais no período.

Na avaliação do ciclo anterior, o comportamento dos pontos no espaço separava os sedimentos com característica química de rejeitos dos naturais, também diferenciando-se entre posição montante ou jusante da UHE Retiro Baixo e a organização no cluster era mais parecida com o agrupamento unifilar. O PT-52, à semelhança da campanha atual, ficou agrupado com os pontos de outras áreas.

Figura 11.3.1.1: 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.



11.3.2. Análises estatísticas descritiva e inferencial

A análise estatística descritiva dos resultados de sedimentos dos períodos de estiagem de 2019, 2020 e 2021 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 agrupadas 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 traços (Pb, Cu, Ni, As, Cr, Cd, Hg e Zn).

Nos Gráfico11.3-1 A e B até o Gráfico 11.3-11 A e B**,** 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 os *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 majoritários 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 chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-1 e 2 e tabelas 11-3-2-1 (estatística sazonal espacial) e 11-3-2-2 (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. Na Região Montante, o Manganês (Mn) apresentou variação nas medianas sendo próximo a 1.900 mg/kg na chuva de 2019; 2.070 mg/kg na chuva de 2019/2020 e próximo a 1300 e 1450 mg/kg, respectivamente na chuva de 2020/2021 e 2021/2022. 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 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 11-3-1). As medianas em cada um dos períodos foram de: 5.033 mg/kg na chuva de 2019; 12.600 mg/kg na chuva de 2019/2020; 13.087 mg/kg na chuva de 2020/2021; e 11.986 mg/kg na chuva de 2021/2022 (gráfico 11.3-1B). Essas variações são consideradas temporalmente significativas com base em análises estatísticas temporais dispostas na tabela 11.3-2. As oscilações nas concentrações foram resultantes de 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 e é captada e vertida para tratamento na Estação de Tratamento de Água (ETAF 1) instalada pela VALE em meados de 2019. O represamento da água modificou as condições locais para mais lênticas e, entende-se que isso possibilitou deposição de sedimentos finos favorecendo acúmulo de materiais na localidade e aumento nas concentrações de metais ao longo dos períodos sazonais, indicando sedimentação de rejeito *in loco* e contribuições da bacia.

Na Região 1A, que inclui os pontos PT-01 até o PT-05, percebeu-se que as concentrações medianas para Mn foram significativamente maiores espacialmente que da região Montante e menores que no Ferro-Carvão (tabela 11.3.2-1). Pelos *boxplots* (gráfico 11.3.2-2), verifica-se que, temporalmente, as concentrações medianas foram de: 3.177 mg/kg, 3.046 mg/kg, 1.957 mg/kg e 1.378 mg/kg, respectivamente na chuva de 2019, chuva de 2019/2020, chuva de 2020/2021 e chuva de 2021/2022. De modo que, entre os períodos chuvosos, ocorreu um decréscimo nas concentrações nessa região.

Na Região 1B, ao se comparar com a Região 1A, percebeu-se que, espacialmente, as concentrações de Mn foram significativamente maiores (tabela 11.3.2-1), 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 11.3.2-2) houve uma maior variação nas concentrações de Mn no primeiro período de chuva/2019, cuja mediana foi de 3.177 mg/kg, e subsequentes reduções nas medianas ao longo dos períodos chuvosos, com valores de 3.046 mg/kg (chuva 2019/2020), 1.957 mg/kg (chuva 2020/2021), 1.378 mg/kg (chuva 2021/2022). Tais reduções nas concentrações se confirmam estatisticamente, indicando a redução significativa entre os períodos sazonais (tabela 11.3.2-2).

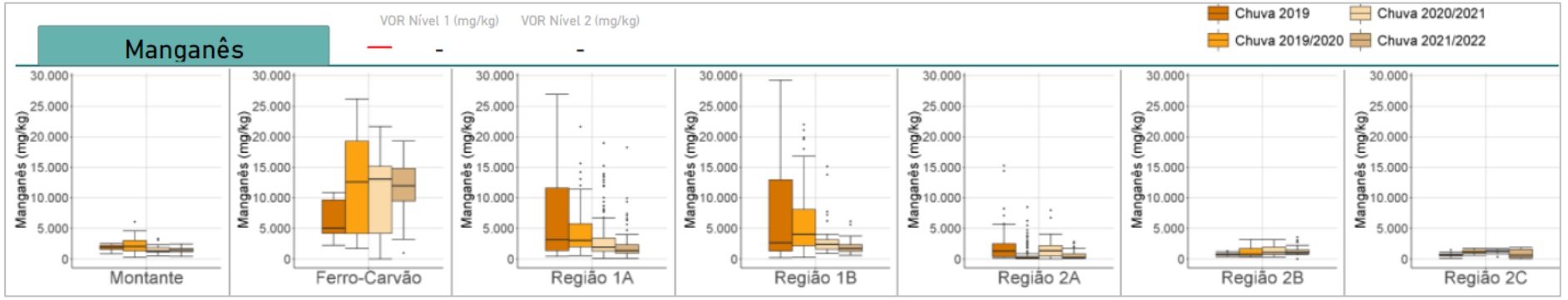
Na Região 2A, a concentração mediana no período de chuva/2019 foi de 1.300 mg/kg. No período chuvoso de 2019/2020, mesmo com os aumentos históricos das vazões no rio Paraopeba, a concentração mediana de manganês nessa região reduziu (215 mg/kg), ao passo que as concentrações nas chuvas de 2020/2021 (1.374 mg/kg) aumentaram. A estas alterações atribuiu-se, provavelmente, a mudança na posição de coleta da porção central para a margem do rio e mudança na granulometria das amostras que ficaram mais finas, isso quando comparados 2019, 2019/2020 com 2020/2021. 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. Nas chuvas de 2021/2022, as concentrações medianas reduziram para 256 mg/kg e são bem inferiores às monitoradas do período de chuva anterior mesmo com coleta em posição marginal.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, entre os períodos chuvosos, apresentou aumento nas concentrações medianas, cujos valores para região foram de 826 mg/kg (chuvas 2019); 784 mg/kg (chuvas 2019/2020); 1.075 mg/kg (chuvas 2020/2021); 1.096 mg/kg (chuva 2021/2022). Diferente das demais regiões, as concentrações de Mn tiveram leve aumento, sugerindo maior deposição ao longo das chuvas e contribuições e aportes acumulados localmente, haja vista que em outras localidades a montante não foi identificado. Tal acúmulo é favorecido pelas condições de menor energia propiciadas pelo reservatório.

Na Região 2C, os resultados de Mn tiveram medianas em torno de 655 mg/kg nas chuvas de 2019 e foram menores que na região 2B. Na chuva 2019/2020, o aumento das vazões nos rios e tributários da bacia do rio Paraopeba, associado a escoamentos superficiais maiores,

elevou as concentrações medianas para 1.119 mg/kg sendo mantidas na ordem de grandeza aproximada nas chuvas 2020/2021 (1.278 mg/kg), com queda dos valores nas chuvas de 2021/2022, (621 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.

Gráfico 11.3.2-1: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.



Elaboração: Arcadis, 2021

Gráfico 11.3.2-2: Variação do manganês ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.

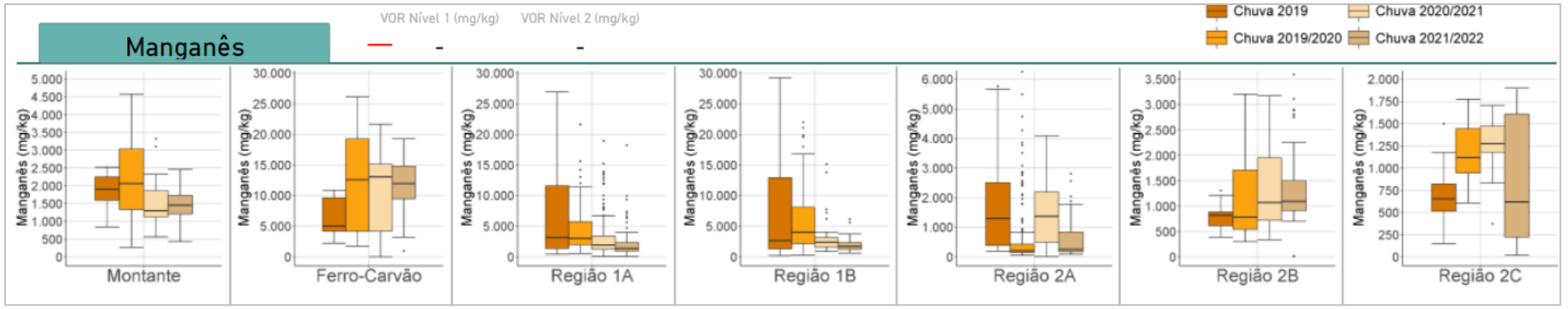


Tabela 11.3.2-1: Avaliação inferencial espacial do Manganês.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			>	>	<	<	<
Reg1A				>	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						>	~
Reg2B							~
Reg2C							

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 11.3.2-2: Avaliação inferencial temporal do Manganês ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	<	~	<	~	<
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	~	<	<	~	>	<
Ch.21/22 X Ch.19	~	~	<	<	<	>	~
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	<	<	>	>	~
Ch.20/21 X Ch.19	~	~	<	~	~	>	>
Ch.19/20 X Ch.19	~	~	~	>	<	~	>

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Ferro**

A distribuição estatística espacial e temporal do ferro nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-3 e 4 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-3 e 11.3.2-4. O gráfico 11.3.2-3 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 chuvosos foram de 107.000 mg/kg na chuva 2019; 82.400 mg/kg na chuva 2019/2020; 46.156 mg/kg na chuva 2020/2021 e 57.709 mg/kg na chuva 2021/2022. Dessa forma, nas chuvas de 2020/2021 e 2021/2022, as concentrações medianas foram menores, sugerindo o cenário mais natural da bacia, ou seja, sem a condição premente do rompimento da barragem B1 e sem a condição das chuvas centenárias de 2019/2020, que elevou as vazões dos rios e aumentou a energia de transporte, além de maior possibilidade 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 entre os períodos de chuva de 2019 (mediana 151.480 mg/kg), chuvas 2019/2020 (mediana 249.000 mg/kg) e chuvas 2020/2021(mediana 264.026 mg/kg). Já no atual período chuvoso (2021/2022), verificou-se concentrações menores (mediana 197.434 mg/kg) do que nos dois períodos pretéritos, sugerindo melhoria na presença de ferro no período.

Na Região 1A, constatou-se que as concentrações medianas de ferro foram maiores e durante as chuvas 2019/2020 (116.325 mg/kg), quando comparada às chuvas de 2019 (76.960 mg/kg), chuvas 2020/2021 (66.677,5 mg/kg) e chuvas 2021/2022 (91.891 mg/kg). Dessa forma, no atual período chuvoso as concentrações apresentaram incremento em relação aos dois períodos de chuva anteriores. Especificamente para o período chuvoso de 2020/2021, período este de menor intensidade de chuvas quando comparados a 2019/2020 houve uma menor variabilidade entre os valores obtidos, o que sugeriu um período de menor ressuspensão de sedimentos na calha do rio e/ou aporte de materiais para esta região. As chuvas contínuas de 2021/2022, pode ter contribuído para o escoamento superficial e acúmulo de materiais nas margens do rio Paraopeba, porém não alterou significativamente as concentrações em relação ao período anterior.

Na Região 1B, as concentrações medianas nas chuvas 2019 foram de 86.029 mg/kg. Nas chuvas de 2019/2020, as concentrações medianas aumentaram para 160.000 mg/kg e a esse comportamento associaram-se as chuvas mais intensas que possibilitou revolvimento, transporte, possíveis erosões marginais e sedimentação de materiais. No período chuvoso de 2020/2021, a concentração mediana foi de 135.000 mg/kg. Nas chuvas 2021/2022, a mediana para esse período foi de 73.051 mg/kg. Em termos temporais, as concentrações tenderam a queda significativa como se observou na tabela 11.3.2-4.

Na Região 2A, a concentração mediana de ferro nas chuvas 2019 foi equivalente a 73.550 mg/kg, reduziu para 6.350 mg/kg nas chuvas 2019/2020, seguido de incremento nas chuvas 2020/2021 (45.705 mg/kg). No atual período chuvoso, chuvas 2021/2022, a mediana da região novamente reduziu (9.413 mg/kg). Houve um melhor equilíbrio ao se avaliar as concentrações

medianas de Fe entre os pontos PT-54 e o PT-55, que foram se atenuando ao longo dos períodos sazonais, sendo o mais tênue o das chuvas 2020/2021, em que as coletas das amostras de sedimentos ocorreram na porção central do rio, enquanto, entre setembro e outubro/2020, as amostras passaram a ser coletadas nas margens do rio, onde há predomínio de sedimentos finos com maior área específica e, por consequência, adsorvem maior quantidade de metais. Por isso, as concentrações mostraram aumento nos valores medianos quando comparados com os períodos anteriores. Avaliando-se a tendência das concentrações percebeu-se que espacial e temporalmente elas diminuíram significativamente.

Na Região 2B, as concentrações medianas foram de 69.450 mg/kg e 64.196 mg/kg nos períodos de chuva de 2019 e de 2019/2020, respectivamente, e indicaram redução nas concentrações medianas nas chuvas de 2020/2021 (56.304 mg/kg). Porém, nas chuvas de 2021/2022, as concentrações permanecerem em intervalos semelhantes aos dois primeiros períodos chuvosos (64.544 mg/kg), sugerindo transporte, dissipação e acúmulo de sedimentos nesse intervalo 2021/2022. Além disso, neste período percebeu-se que o aumento do ferro foi significativo quando comparado aos períodos anteriores que se mostrava em equilíbrio ou em redução.

Na Região 2C, as concentrações foram menores, na faixa de 34.063 mg/kg a 38.700 mg/kg nos períodos de chuva pretéritos. No atual período chuvoso (2021/2022), a concentração mediana foi menor, com valor de 35.575 mg/kg. Nesta região, percebeu-se uma que espacialmente há redução significativa nas concentrações quando comparada as demais regiões, ao passo que ao longo do tempo, as concentrações mostram-se em equilíbrio, sem variação nas concentrações de ferro.

Gráfico 11.3.2-3: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

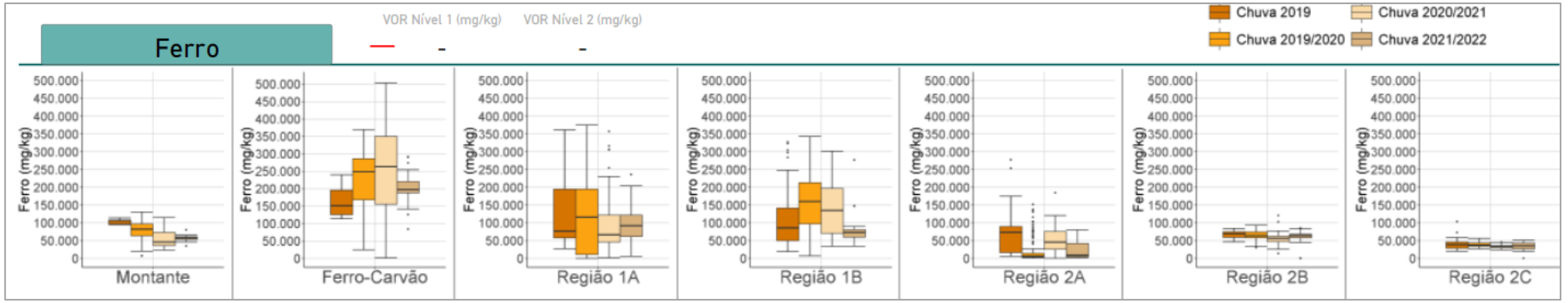
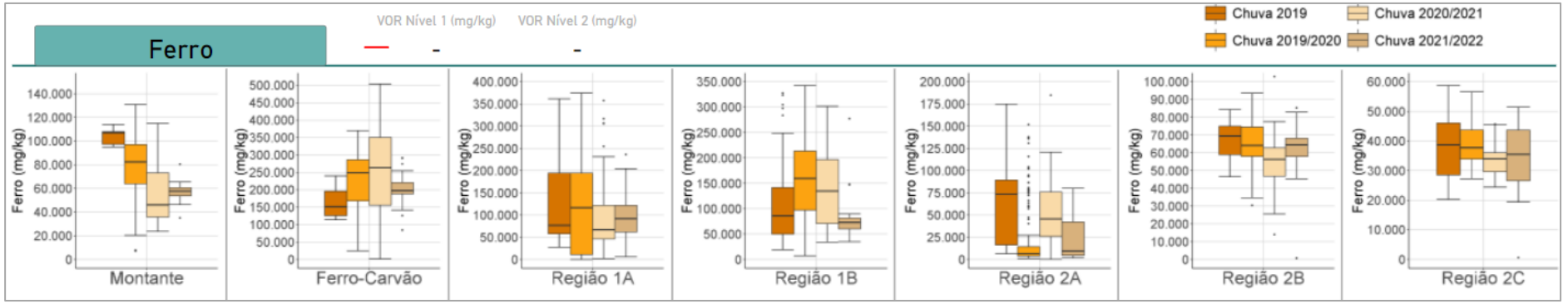


Gráfico 11.3.2-4: Variação do Ferro ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2022

Tabela 11.3.2-3: Avaliação inferencial espacial do Ferro.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			>	>	<	~	<
Reg1A				>	<	<	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						>	~
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-4: Avaliação inferencial temporal do Ferro ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	>	~	~	<	<	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	<	<	~	<	~	~	~
Ch.21/22 X Ch.19	~	<	~	~	<	~	~
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	~	<	>	<	~
Ch.20/21 X Ch.19	>	<	~	~	<	<	~
Ch.19/20 X Ch.19	>	<	~	>	<	~	~

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Alumínio**

A distribuição estatística espacial e temporal do ferro nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-5 e 6 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-5 e 11.3.2-6. O gráfico 11.3.2-5 e 6 mostra a evolução do ferro ao longo dos períodos de chuva, contemplando todos os resultados analíticos, incluindo os *outliers*.

Na Região Montante, o alumínio teve concentrações medianas decrescentes entre os períodos sazonais, variando entre aproximadamente, 45.500 mg/kg (chuva/2019), 20.900 mg/kg (chuva 2019/2020) e no período chuvoso 2020/2021, as medianas ficaram próximas a 13.570 mg/kg e, mesmo assim, foram menores que os períodos de chuva anteriores. Entretanto, verifica-se um incremento para o atual período chuvoso (2021/2022) no qual a mediana é de 17.951 mg/kg. De todo modo, na avaliação estatística inferencial este incremento não foi significativo ao longo dos períodos monitorados.

Na Região do Ferro-Carvão, as concentrações medianas foram de 6.982 mg/kg (chuva 2019), 13.484 mg/kg (chuva 2019/2020), 22.272 mg/kg (chuva 2020/2021) e 22.625 mg/kg (chuva 2021/2022). 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, justificando assim o aumento das medianas ao longo dos períodos sazonais. Na análise inferencial percebeu-se o aumento significativo do Al até as chuvas de 2020/2021, porém no período atual não se percebeu variação significativa das concentrações, indicando condição de equilíbrio.

Na Região 1A, as concentrações medianas de Al de todos os períodos sazonais foram majoritariamente menores que as concentrações medianas identificadas na porção de montante. De forma detalhada, na região 1A, tem-se que as medianas foram de 11.137 mg/kg (chuvas/2019); 8.143 mg/kg (chuvas 2019/2020); 6.849 mg/kg (chuvas 2020/2021); 7.312 mg/kg (Chuvas 2021/2022) e tal variação pode ser decorrente de predomínio de granulometria mais fina em alguns pontos e, em maiores proporções, nos primeiros períodos chuvosos. De todo modo a análise inferencial mostrou que as concentrações na região 1A reduziram significativamente neste período chuvoso ao se comparar com as regiões à montante dela. Temporalmente houve redução do Al nos primeiros ciclos chuvosos até que nos ciclos de 2020/2021 e 2021/2022 não tiveram variação significativa nas concentrações de Al.

Na Região 1B, as concentrações medianas de Al foram maiores que na Região 1A, em todos os períodos, sendo de aproximadamente 17.522 mg/kg no primeiro período chuvoso de 2019; 16.184 mg/kg no segundo período chuvoso/2019-2020, e houve pouca variabilidade nas concentrações quando comparadas com a Região 1A. Já no período de chuvas 2020/2021 (20.055 mg/kg), percebeu-se um aumento nas medianas em relação à região anterior. Já nas chuvas de 2021/2022, a mediana foi de 16.482 mg/kg, menor que no ciclo anterior.

De todo modo, ao se efetuar a avaliação estatística inferencial espacial percebeu-se que, espacialmente, as concentrações de Al na região 1B foram significativamente maiores que na região 1A, enquanto nas demais à montante de 1B não se percebeu tal variação. Na avaliação

temporal dos ciclos chuvosos percebeu-se uma gradação de redução significativa desde 2019 até o ciclo de chuvas 2021/2022, sugerindo redução de Al nesta área. A presença do alumínio poderia ser associada 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 Região 2A, as concentrações apresentaram oscilações ao longo dos períodos chuvosos quando se observam os boxplots. No primeiro período chuvoso (2019), a mediana de alumínio (28.800 mg/kg) foi maior que na região 1B. No segundo período chuvoso (2019/2020), as concentrações foram bem menores, com valor mediano de 1.030 mg/kg. Entretanto, no período chuvoso de 2020/2021, a mediana aumentou para 13.648 mg/kg. Novamente, a alteração na posição de coleta do centro para a margem do rio Paraopeba, que retem maior quantidade de sedimentos de granulação fina, pode ter promovido o aumento nas concentrações de alumínio neste período. Já os resultados do período chuvoso de 2021/2022 mostram mediana de 1.619 mg/kg, com valores inferiores ao período chuvoso pretérito mesmo com coletas em posições marginais, indicando redução de alumínio na localidade. Na análise inferencial espacial, o que se observou foi que as variações nas concentrações foram significativa e espacialmente menores quando comparadas com as regiões a montante dela e que, temporalmente, a tendência é predominante de queda entre os períodos sazonais.

Na Região 2B, identificada como a região do reservatório da UHE Retiro Baixo, constatou-se variabilidade de Al entre os resultados de todos os períodos sazonais. Na chuva 2019, a mediana foi de 83.150 mg/kg; reduziu para aproximadamente 45.600 mg/kg no segundo período chuvoso (2019/2020) e voltou a reduzir para 29.049 mg/kg no período de chuvas 2020/2021. No período das chuvas de 2021/2022, a concentração mediana aumentou para 42.692 mg/kg.

Na análise inferencial estatística houve aumento do Al neste ciclo chuvoso quando comparado com as regiões a montante desta. Temporalmente, as concentrações foram diminuindo significativamente até que nos ciclos de 2020/2021 e 2021/2022 mantiveram as concentrações em equilíbrio, ou seja, sem qualquer variação significativa.

Nesta avaliação de dois ciclos sazonais, percebeu-se que, nas chuvas 2019, foram os períodos de maior deposição de alumínio no reservatório da UHE Retiro Baixo, seguido do atual período chuvoso. O 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. As medianas da Região 2B são as maiores de todo o rio Paraopeba e as contribuições das lixiviações locais da bacia contribuem para esse aumento. O Ferro-Carvão, apesar de apresentar Al nos sedimentos, mostrou-se mais reduzido para a contribuição na bacia.

Na Região 2C, as concentrações de Al apresentaram medianas de 33.000 mg/kg (chuvas 2019), 21.645 mg/kg (chuvas 2019/2020), 12.930 (chuvas 2020/2021), e 10.183 mg/kg

(Chuvas 2021/2022), indicando que as contribuições nos períodos sazonais chuvosos tiveram redução na avaliação com o boxplot. Na análise inferencial percebeu-se que espacialmente houve variações em relação as concentrações de áreas a montante, predominando valores semelhantes com Ferro-Carvão, Montante e região 1B neste ciclo. Já na avaliação temporal percebeu-se redução significativa do ciclo 2021/2022 em relação aos períodos mais antigos e se percebeu equilíbrio nas concentrações entre os ciclos de 2021/2020 e 2021/2022.

Gráfico 11.3.2-5: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos outliers do período.

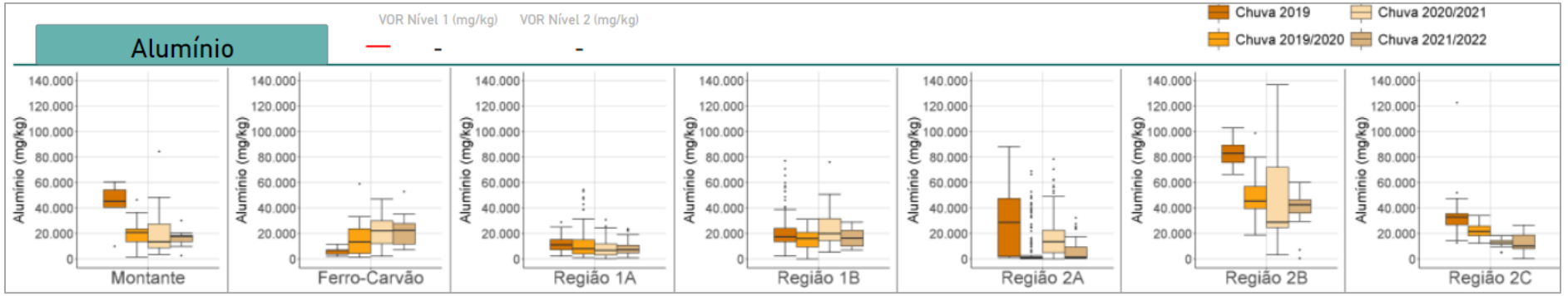
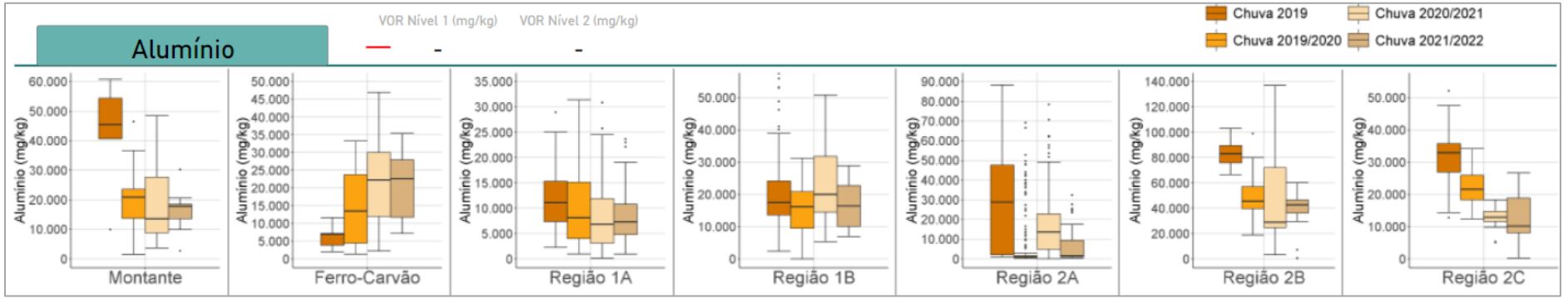


Gráfico 11.3.2-6: Variação do Alumínio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-5: Avaliação inferencial espacial do Alumínio.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		~	<	~	<	>	~
Mont.			<	~	<	>	~
Reg1A				>	~	>	>
Reg1B					<	>	~
Reg2A						>	>
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-6: Avaliação inferencial temporal do Alumínio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	~	<	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	>	~	~	~	>	~	<
Ch.21/22 X Ch.19	>	~	<	~	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19/20	>	~	<	>	>	<	<
Ch.20/21 X Ch.19	>	~	<	>	<	<	<
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	<	<	<	<	<

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

Elementos minoritários

- **Chumbo**

A distribuição estatística espacial e temporal do Chumbo nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-7 e 8 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-7 e 11.3.2-8.

De distribuição estatística espacial e sazonal do chumbo encontra-se na Região Montante, as concentrações apresentaram uma variação baixa entre os períodos sazonais, estando com medianas de 17 mg/kg no primeiro período chuvoso de 2019; 19,20 mg/kg na chuva de 2019/2020, além de redução para 14,4 mg/kg no período chuvoso 2020/2021, e 14,30 mg/kg na chuva 2021/2022, indicando baixa variação de chumbo nesta parte da bacia do rio Paraopeba. Na análise inferencial, as concentrações de Pb na região montante são menores que no Ferro-Carvão neste ciclo de chuvas de 2021/2022. Temporalmente, ao se comparar este ciclo com os anteriores percebeu redução significativa predominante até que ao se comparar com este último ciclo não se percebeu variação significativa de chumbo nesta região.

Na Região Ferro-Carvão, as concentrações medianas foram de 16 mg/kg para o período de chuva/2019; de 31,8 mg/kg para a chuva 2019/2020; de 33,45 mg/kg no período de chuva 2020/2021 e de 27,8 mg/kg na chuva 2021/2022. Os períodos de maiores concentrações foram entre as chuvas 2019/2020 e as chuvas 2020/2021. No PT-12, é onde houve os maiores acréscimos na concentração de Pb, tendo como argumento dessa alteração, as obras de engenharia e contenção já mencionados, o que permitiu o represamento da água do ribeirão Ferro-Carvão e a deposição de sedimentos finos na localidade, sendo esta fração fina a que adsorve mais metais. Na análise inferencial teve-se que, espacialmente, as concentrações de chumbo neste ciclo foram maiores que as regiões montante até 2ª e 2C, somente ficou com concentração semelhante com a região 2B. Entretanto, temporalmente, as concentrações deste ciclo chuvoso foram estatisticamente equilibradas quando comparadas a 2021/2020.

Na Região 1A, avaliando-se os boxplots, teve-se que a concentração mediana de chumbo foi menor no primeiro período sazonal (14,50 mg/kg). Na chuva 2019/2020, as concentrações foram mais elevadas, com mediana de 68,8 mg/kg. As concentrações voltaram a se reduzir nas chuvas de 2020/2021 que mostraram mediana de 13,7 mg/kg e nas chuvas 2021/2022, cuja mediana foi de 10 mg/kg. Apesar da constatação de chumbo no rejeito da barragem B1, as concentrações nas chuvas 2019/2020 foram consideradas como anômalas, maiores, inclusive, que as concentrações detectadas no rejeito original e que foi de até 50 mg/kg (Geoenviron, 2019), além de qualitativamente mais elevadas que as maiores concentrações da bacia observada nos dados da CPRM 2008 a 2009 (32,8 mg/kg). Estas foram compiladas em mapa de distribuição geoquímica da bacia do rio Paraopeba (Arcadis, 2020) e não se observou concentração maior. No entanto, percebeu-se que, em não se considerando os valores anômalos encontrados, as concentrações foram semelhantes às identificadas no Ferro-Carvão, sugerindo contribuição de chumbo com a passagem do rejeito da barragem B1.

Na avaliação estatística inferencial, percebeu-se a concentração de chumbo neste ciclo chuvoso foi maior que na região Montante dela e menor que no Ferro-Carvão, sugerindo aporte de chumbo na localidade. Temporalmente, entretanto, essas concentrações foram

significativamente sendo reduzidas ao longo do tempo sendo que 2021/2022 continuou mostrando esta tendência em relação aos períodos de 2019 até as chuvas 2020/2021.

Na Região 1B, as variações das concentrações do Pb tiveram algumas variações nas medianas, sendo na chuva de 2019 de 21 mg/kg; chuva de 2019/2020 de 23,65 mg/kg; nas chuvas de 2020/2021 de 20,6 mg/kg; e nas chuvas 2021/2022 de 17,1 mg/kg. Na análise inferencial percebeu-se que, espacialmente, as concentrações de chumbo foram um pouco maiores que nas regiões montante e 1A neste ciclo chuvoso, indicando acúmulo de chumbo nesta localidade, mais próximo dos locais de acúmulo de finos como no PT-14. Já no ponto de vista temporal, a tendência das concentrações foi de queda significativa na localidade. Percebeu-se uma redução significativa ao longo dos períodos sazonais e maior equilíbrio da deposição dessa substância na localidade.

Na Região 2A, o Pb teve mediana de 16,3 mg/kg na chuva de 2019. Nas chuvas de 2019/2020, a mediana foi de 3,44 mg/kg; ambos mostrando períodos de queda nas concentrações. Nas chuvas de 2020/2021, as concentrações foram tiveram mediana 15,25 mg/kg, pouco maiores que no período chuvoso anterior. Já nas chuvas de 2021/2022, as concentrações tiveram mediana 4,48 mg/kg, inferiores ao período chuvoso precedente. A presença de chumbo em sedimento foi associada à mudança de posição de coleta no final de 2020, a redução da granulometria do grão e, com isso, o aumento da superfície específica e capacidade de adsorção de metais, incluindo o chumbo.

Na avaliação estatística inferencial espacial, o que se percebeu foi que neste ciclo chuvoso, as concentrações se reduziram significativamente, o mesmo se percebeu na avaliação temporal, indicando redução no chumbo na localidade.

Na Região 2B, avaliando-se os boxplots, as concentrações de Pb, para os períodos de chuva pretéritos, apontaram medianas com: 27,35 mg/kg (chuvas 2019); foram maiores nas chuvas 2019/2020 (32,60 mg/kg) e reduziram nas chuvas de 2020/2021 (26,60 mg/kg), com posterior incremento no atual período chuvoso (29,90 mg/kg).

Na avaliação estatística inferencial temporal tem-se aumento significativo nas concentrações de Pb no reservatório da UHE Retiro baixo neste ciclo chuvoso. Temporalmente, houve também um aumento significativo nas concentrações de chumbo ao se comparar os períodos mais recentes de 2020/2021 com o ciclo chuvoso de 2021/2022. A variação pode ser resultante do transporte e acúmulo de sedimentos em suspensão ao longo do rio Paraopeba neste último período de chuvas mais intensas quando comparadas ao ciclo anterior e que se depositaram, além de contribuições difusas locais, haja vista que os arredores dessa região compreendem áreas desmatadas e com solo exposto, passíveis a erosão.

Para a Região 2C, na análise do boxplot teve-se que no atual período chuvoso (chuvas de 2021/2022), a mediana foi de 11,2 mg/kg. Percebeu-se que as concentrações medianas de Pb foram um pouco menores que no reservatório da UHE Retiro Baixo, sugerindo contribuição local baixa de Pb proveniente de escoamento superficial de materiais das áreas desnudas.

Na avaliação estatística inferencial espacial percebeu-se redução nas concentrações de chumbo neste ciclo chuvoso em relação as regiões Ferro-Carvão, 1B e 2B, enquanto não se percebeu qualquer variação em relação a região montante. Os aumentos significativos neste ciclo foram somente com relação a região 1A e 2B. Temporalmente, a tendência das concentrações de chumbo nesta região tem sido de redução significativa.

Gráfico 11.3.2-7: Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

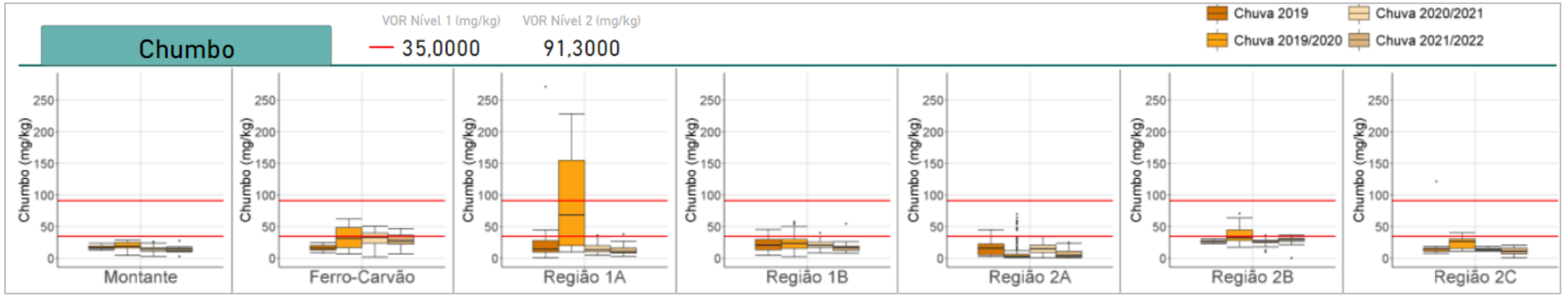
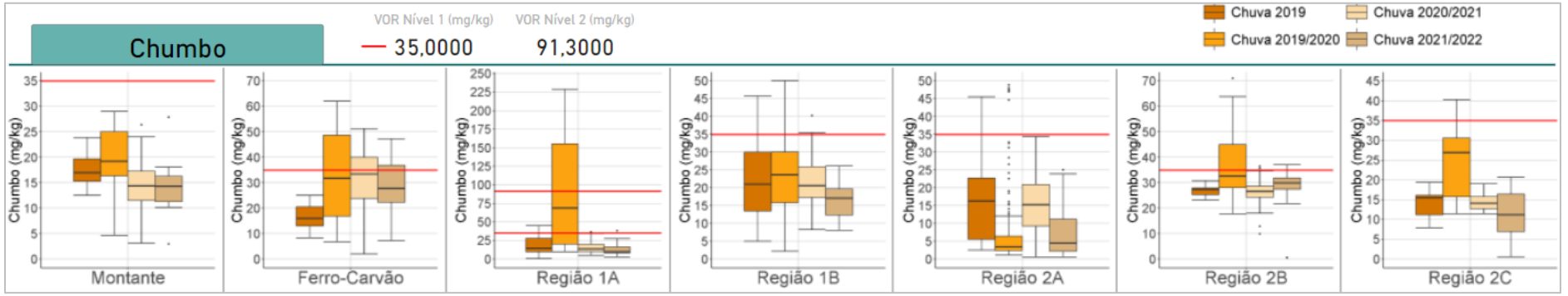


Gráfico 11.3.2-8: Variação do Chumbo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-7: Avaliação inferencial espacial do Chumbo.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	~	<
Mont.			>	>	<	>	~
Reg1A				>	<	>	>
Reg1B					<	>	<
Reg2A						>	>
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-8: Avaliação inferencial temporal do Chumbo ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	<	<	<	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	<	<	<	~	<	<
Ch.21/22 X Ch.19	>	~	<	<	<	~	~
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	<	~	>	<	<
Ch.20/21 X Ch.19	>	~	~	~	~	~	~
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	>	~	<	>	>

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Cobre**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cobre nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-9 e 10 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-9 e 11.3.2-10.

Pela distribuição espacial e temporal do cobre nos boxplots, tem-se que na Região Montante, o elemento apresentou variação para todos os períodos sazonais, estando próxima de 57 mg/kg na chuva de 2019, reduzindo para 32 mg/kg no período chuvoso 2019/2020 e para 17 mg/kg nas chuvas de 2020/2021; e aumento da mediana no período chuvoso de 2021/2022 para 22,6 mg/kg. Na avaliação inferencial temporal, não se percebeu variação estatística significativa ao

As concentrações do cobre são relativamente baixas e sua presença pode ser decorrente de contribuições alóctones, possivelmente provenientes de lixiviação de rochas metavulcânicas associadas aos Grupos Nova Lima presentes na porção sudeste da bacia do rio Paraopeba. Ademais, em relação ao uso e ocupação do solo, não se observou, do ponto de vista regional, áreas de exploração ou uso de cobre.

Na região do Ferro-Carvão, observou-se pelo boxplot que a concentração mediana do cobre no período de chuva de 2019 foi de 39,00 mg/kg. A partir das chuvas de 2019/2020 tiveram valores mais elevados ao longo dos demais períodos sazonais, entre 77,10 e 111,00 mg/kg. Aponta-se para o PT-12, aumentos relacionados às obras de contenção de avanço de rejeitos no ribeirão homônimo, alterando a condição hidrodinâmica local para um ambiente mais lêntico e, assim, permitindo a deposição dos sedimentos de granulação mais fina e consequente aumento dos metais adsorvidos, bem como ao fato do cobre também estar presente no rejeito de mineração.

Na avaliação estatística inferencial espacial do ciclo de 2021/2022 notou-se que as concentrações de cobre no ferro-Carvão são significativamente maiores que nas demais regiões, enquanto temporalmente, as concentrações se mantiveram equilibradas desde o ciclo de chuvas 2019/2020 quando comparados ao ciclo 2021/2022.

Na Região 1A, constatou-se que as concentrações medianas variaram ao longo dos períodos sazonais: chuvas de 2019 (30 mg/kg); chuvas 2019/2020 (21,65 mg/kg); chuvas de 2020/2021 (14,10 mg/kg); e no período das chuvas de 2021/2022 (15,95 mg/kg). Ao longo dos períodos sazonais, houve reduções contínuas entre o período de chuva de 2019 e de 2020/2021, possivelmente em decorrência de operações de dragagem de rejeitos (PT-01 e PT-13), ou deposição de sedimentos naturais da bacia, estes mais empobrecidos em cobre nesta região (concentrações entre 6 e 12 mg/kg, com base nos dados da CPRM (2018)). Considerando que a região 1A foi a mais afetada pelo rompimento da barragem B1 e que os sedimentos ali depositados têm característica química de rejeitos, a ocorrência do cobre pode estar relacionada com acúmulo de sedimentos contendo rejeito da barragem B1. 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 e que na localidade foram na ordem de 6 a 12 mg/kg. Os resultados dos últimos ciclos têm mostrado que, para a maioria dos pontos amostrados, houve uma tendência de redução significativa das concentrações.

Na Região 1B, na avaliação com o boxplot percebeu-se que a mediana foi de 59,80 mg/kg na estação de chuva de 2019. Após esse período, houve redução nas concentrações medianas, sendo de 39,70 mg/kg na chuva de 2019/2020 e 24,70 mg/kg no período de chuvas de 2020/2021. No do período de chuva de 2021/2022, foi equivalente a 26,8 mg/kg, com valores próximos às medianas mensuradas nos períodos anteriores. Essa região recebeu contribuições dos rejeitos da barragem B1 e, além das potenciais contribuições de solos erodidos, materiais lixiviados de rochas máficas/ultramáficas do Grupo Nova Lima na porção oeste do rio Paraopeba, dragagens de areia na calha do rio, e outras contribuições difusas potenciais como.

Em relação a estatística inferencial, na região 1B percebeu-se que espacialmente suas concentrações foram maiores que na região montante e 1A e menores que no Ferro-Carvão.neste ciclo chuvoso de 2021/2022. Em relação a estatística inferencial temporal, as concentrações de cobre sempre tiveram redução significativa até que na comparação entre as chuvas de 2021/2020 e 2021/2022 não houve variação nessas concentrações.

Na região 2A, pelos boxplots percebeu-se que as concentrações medianas de cobre foram mais elevadas no primeiro período chuvoso de 2019, 42,75 mg/kg. Esses aumentos podem ter sido decorrentes de transporte de materiais em suspensão na bacia contendo partículas com característica de rejeitos e ou sedimentos da própria bacia. Nos períodos sazonais seguintes, houve queda nas concentrações, com mediana na chuva de 2019/2020 equivalente a 5,00 mg/kg e percebeu-se melhor estabilização de concentrações medianas na bacia, sendo que os valores se assemelharam as variações identificadas com os dados da CPRM 2008 a 2009 (12 mg/kg a 40 mg/kg). Na chuva de 2020/2021, as concentrações ficaram maiores, 19,40 mg/kg, mas, neste caso, a atribuição foi dada à mudança na posição de coleta de centro para a margem do rio e a variação granulométrica. No período das chuvas de 2021/2022 as concentrações reduziram para 4,29 mg/kg.

Na avaliação estatística inferencial espacial, as reduções das concentrações de cobre foram significativamente menores quando comparadas as regiões a montante dela neste ciclo de 2021/2022. Na avaliação temporal também se percebeu redução significativa, inclusive entre os ciclos chuvosos de 2021/2020 e 2021/2022.

Na Região 2B, o Cu dentre os períodos chuvosos, o primeiro ciclo foi o que reteve as maiores concentrações de cobre. As variações foram de 58,25 mg/kg (chuva/2019); 39,8 mg/kg (chuva 2019/2020), 31,4 mg/kg (chuva 2020/2021) e entre 42,30 mg/kg nas chuvas de 2021/2022. Em relação a estatística inferencial espacial, as concentrações de cobre acumularam-se significativamente mais em relação as regiões Montante, 1A, e 2A neste período chuvoso. Na avaliação temporal, este período chuvoso mostrou uma tendência de aumento em relação a 2020/2021, provavelmente por conta de incidência maior e mais contínua de chuvas em relação ao período passado.

Na Região 2C, as concentrações observadas na análise com o boxplot também foram maiores no primeiro período sazonal (41,50 mg/kg) quando comparada ao segundo período chuvoso (16,00 mg/kg) e às chuvas de 2020/2021 (13,90 mg/kg) e de 2021/2022 (14,00 mg/kg). Ao longo de todos os períodos houve uma redução e com concentrações menores que as medianas identificadas na UHE Retiro Baixo. Já em relação a estatística inferencial, as concentrações foram predominantemente reduzidas temporalmente e espacialmente.

Gráfico 11.3.2-9: Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

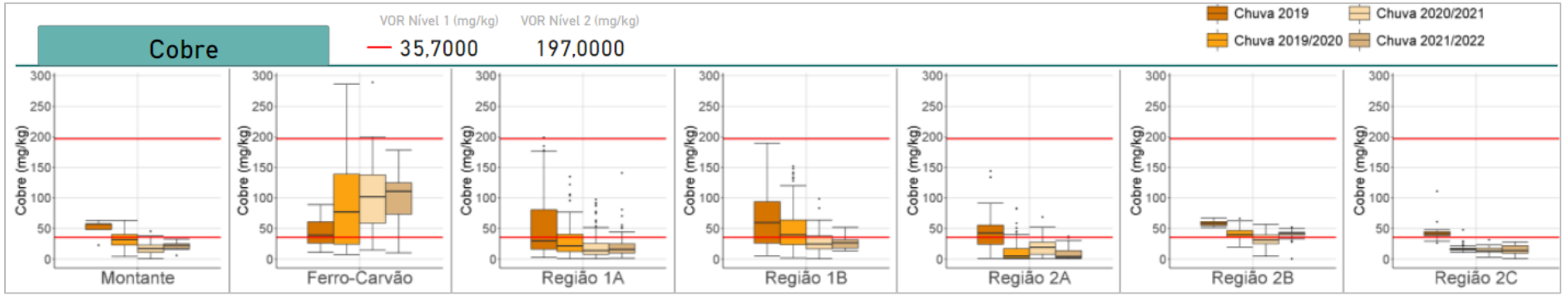
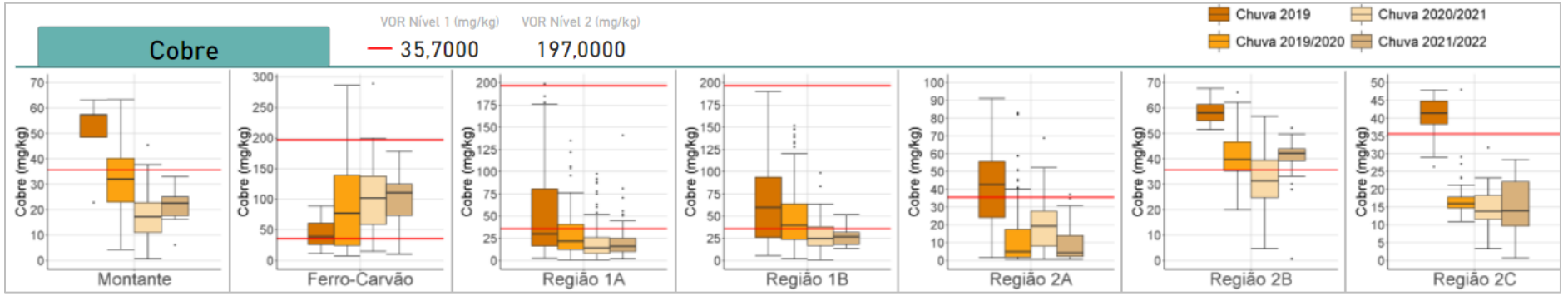


Gráfico 11.3.2-10: Variação do Cobre ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-9: Avaliação inferencial espacial do Cobre.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			~	>	<	>	~
Reg1A				>	<	>	~
Reg1B					<	~	<
Reg2A						>	>
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-10: Avaliação inferencial temporal do Cobre ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	~	~	<	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	~	<	<	~	~	~
Ch.21/22 X Ch.19	>	<	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	<	<	>	<	~
Ch.20/21 X Ch.19	>	<	<	<	<	<	<
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	<	~	<	<	<

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Níquel**

A distribuição estatística espacial e temporal do Níquel nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-11 e 12 A e B e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-11 e 11.3.2-12.

Na Região Montante, o níquel teve uma variação baixa para todos os períodos sazonais, estando com as concentrações medianas de 30,90 mg/kg no primeiro período chuvoso/2019 e cerca de 23,00 mg/kg nas chuvas de 2019/2020. Já no período chuvoso de 2020/2021 e de 2021/2022, as medianas se mantiveram, respectivamente, próximas a 16 mg/kg e 17,7 mg/kg. Esses valores são 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, 2020). Temporalmente, as concentrações estavam reduzindo significativamente e neste período 2021/22 ficou estável em relação a 2020/2021.

Na Região Ferro-Carvão, as concentrações medianas foram de 15,50 mg/kg no primeiro período chuvoso; e aumentaram para 33,80 mg/kg e 41,00 mg/kg nos respectivos períodos chuvoso de 2019/2020 e 2020/2021 e se manteve com valor de 35,9 mg/kg no nas chuvas de 2021/2022, com destaque as concentrações no PT-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 avaliação inferencial, os resultados na região Ferro-Carvão foram espacialmente maiores que em todas as outras regiões neste ciclo 2021/2022, mas temporalmente, as concentrações não tiveram variação significativa quando comparados a 2020/2021.

Na Região 1A, a concentração mediana de níquel, no primeiro período sazonal, foi de 16,50 mg/kg. Na chuva de 2019/2020, a concentração foi maior, 21,20 mg/kg; reduziu no período das chuvas 2020/2021 para o intervalo entre 17,20 mg/kg e nas chuvas de 2021/2022 para 11,8 mg/kg, ou seja, foram as menores concentrações entre os períodos chuvosos. Pela estatística inferencial espacial, neste ciclo, a região 1A teve redução significativa nas concentrações ao se comparar com região Montante e Ferro-Carvão, o que mostra que não houve contribuição nem local e nem de montante para esta substância nos sedimentos. Em relação à escala temporal, as concentrações foram significativamente menores ao longo do tempo e ainda se reduzem nos últimos ciclos de chuvas.

Na Região 1B, as concentrações do Ni avaliadas no boxplot mostraram medianas de 26,00 mg/kg (chuva 2019); 25,40 mg/kg (chuva 2019/2020); 18,70 mg/kg (chuva 2020/2021); 16,6 mg/kg (chuva 2021/2022).

Avaliando-se a estatística inferencial percebeu-se que houve aumento significativo de Ni neste ciclo de 2021/2022 quando comparados espacialmente com as regiões montante e 1A, e

signtivativamente menores quando comparados com o Ferro-Carvão. Já temporalmente, houve redução nas concentrações entre os períodos chuvosos até o ciclo mais recente..

A ocorrência desse metal pode estar associada com a lixiviação de rejeitos nos primeiros períodos sazonais, porém do ponto de vista litológico, a região possui rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima que contém níquel em sua constituição (Vicq *et al*, 2018) e com concentrações entre 18,9 mg/kg a maiores que 38,4 mg/kg, em acordo com os dados da CPRM (2018), o que indica que a localidade tem propensão a disponibilização desse metal para o rio seja através do intemperismo físico, químico das rochas, seja através de erosões do solo local.

Na Região 2A, as concentrações medianas verificadas no boxplot foram maiores no primeiro período chuvoso (24,70 mg/kg) e menores, no segundo período chuvoso (9,30 mg/kg). Já no período chuvoso de 2020/2021, percebeu-se aumento na concentração mediana em relação ao período de chuva anterior (15,70 mg/kg), sendo este decorrente da mudança na posição de coleta do centro para a margem do rio, que normalmente retém a maior quantidade de sedimentos de textura fina. Nas chuvas de 2021/2022 a concentração mediana foi de 0,5 mg/kg, com valores inferiores ao período de chuva precedente, mostrando queda.

Verificando a estatística inferencial, na Região 2A, temporalmente, as concentrações reduziram ao longo dos períodos sazonais e tiveram reduções significativas nas concentrações em relação às regiões anteriores

Na Região 2B, as concentrações medianas de Ni variaram entre 20,00 e 35,35 mg/kg nos quatro períodos, sendo predomínio das maiores concentrações medianas nas chuvas de 2019 (35,35 mg/kg), que nas chuvas 2019/2020 (23,80 mg/kg), chuva 2020/2021 (20,00 mg/kg) e que no período atual das chuvas de 2021/2022 (23,6 mg/kg). O que se percebeu também foi uma redução na variabilidade das concentrações ao longo do tempo. Quando se avalia essas concentrações sob a estatística inferencial percebeu-se que houve redução significativa nas concentrações de Ni neste período chuvoso de forma espacial e ainda, ao se verificar a tendência temporal também notou-se que ela tiveram redução significativa.

Para a Região 2C, as variações nas concentrações observadas no boxplot foram de baixa variabilidade nos períodos sazonais sendo 16,40 mg/kg para a chuva 2019; 10,90 mg/kg para a chuva 2019/2020, 0,5 mg/kg para chuvas 2020/2021 e 5,3 mg/kg nas chuvas de 2021/2022. Na análise da estatística inferencial, percebeu-se redução espacial significativa neste período sazonal e que nos últimos anos 2020/2021 e 2021/2022 não houve variação significativa das concentrações, mostrando equilíbrio.

Gráfico 11.3.2-11: Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

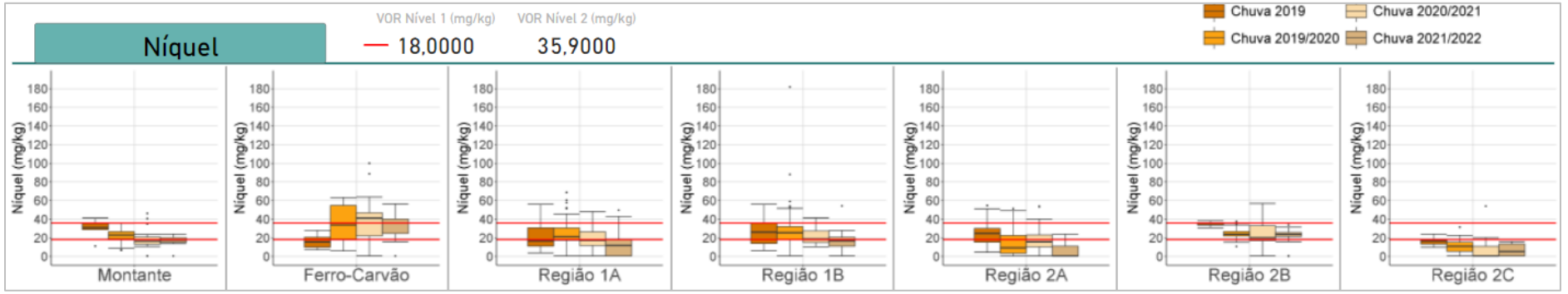
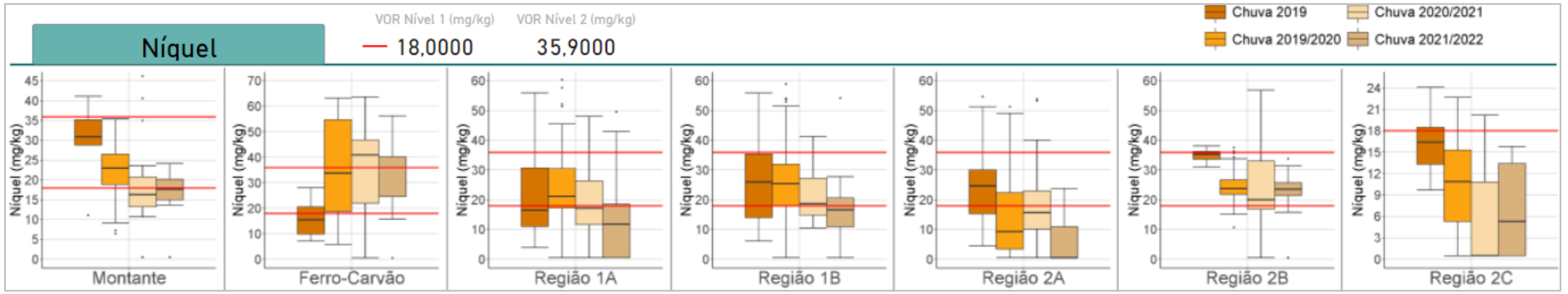


Gráfico 11.3.2-12: Variação do Níquel ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-11: Avaliação inferencial espacial do Níquel.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			~	>	<	>	<
Reg1A				>	<	>	<
Reg1B					<	~	<
Reg2A						>	<
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-12: Avaliação inferencial temporal do Níquel ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	<	<	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	<	<	<	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19	>	<	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	<	<	>	~	<
Ch.20/21 X Ch.19	>	>	~	~	<	<	<
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	>	>	<	<	<

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Mercúrio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Mercúrio nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-13 e 14 A e B e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-13 e 11.3.2-14.

O Mercúrio foi identificado na Região de Montante em concentrações baixas e medianas menores que 0,1 mg/kg nos períodos de chuva. No ribeirão Ferro-Carvão, as concentrações foram maiores, com variações medianas entre 0,001 mg/kg e 0,19 mg/kg ao longo dos períodos sazonais. No período de chuva vigente (2021/2022), na região do Ferro-Carvão, as concentrações apresentaram redução em relação aos dois últimos períodos chuvosos, com máximo de 0,07 mg/kg.

Nas regiões 1A, na chuva 2019, as medianas foram de 0,001 mg/kg, assim como na 1B. No entanto, na região 1B ocorreu maior variabilidade de com concentrações, sendo mais elevadas neste primeiro período chuvoso e com valores até 0,31 mg/kg. Na Região 1A as concentrações reduziram no decorrer dos períodos chuvosos, com menores valores apresentados em 2019 e no período vigente (chuvas 2021/2022), no qual a mediana em todos os pontos foi equivalente a 0,0001 mg/kg, e máxima de 0,16 mg/kg.

Nas regiões 1A e 1B é verificada uma tendência de queda entre os períodos chuvoso, a partir de 2019/2020. A ocorrência do Mercúrio mais elevada no período de chuva 2019/2020 foi relacionado com as contribuições de rejeito da barragem B1, que chegaram a medianas de 0,10 mg/kg nas avaliações da Geoenviron (2019), porém, há de se pontuar que na região da bacia do ribeirão Ferro-Carvão há levantamentos de antigas atividades de garimpo, assim como em outros ribeirões como Veloso na região 1B.

Pode-se inferir uma correlação entre o Fe e Mn com o Hg devido ao processo de deposição do produto do intemperismo das litologias da Formação Cauê, que aumentou com a extração de ferro na região. As atividades de garimpo de ouro eram realizadas em cursos d'águas com abundância de sedimentos oriundos das escarpas dos itabiritos, ricos em Fe e Mn.

Na Região 2A, o Hg sempre esteve abaixo do nível 1 do CONAMA 454/12, sendo que, no primeiro período chuvoso, houve maior variação de Hg e, nos demais, praticamente foram bem baixas ou não detectadas. No período de chuva de 2020/2021, as variações do mercúrio foram maiores, porém deveu-se também às variações nas alterações nos limites de quantificação das amostras. O mesmo ocorreu nas regiões 2B e 2C. Já no período das chuvas 2021/2022 (out.-jan.) os valores permaneceram baixos.

Em relação à análise estatística inferencial espacial observou-se queda significativa das concentrações de mercúrio no ciclo chuvoso de 2021/2022 na maioria das localidades, enquanto que, temporalmente, nas regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A, 2b houve queda significativa das concentrações e nas regiões Montante e 2C, não houve variação significativa, mostrando que o mercúrio teve baixa ocorrência nos períodos avaliados.

Gráfico 11.3.2-13: Variação do Mercúrio ao longo dos períodos sazonais de chuvade 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

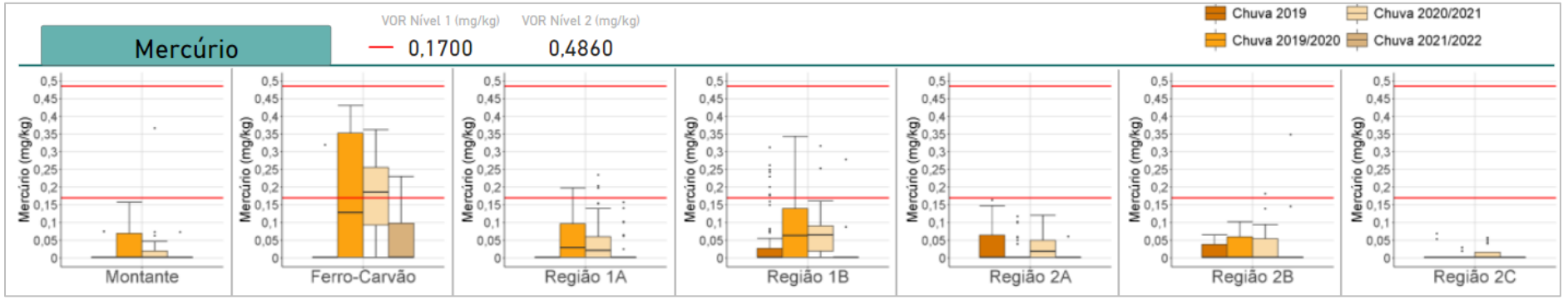
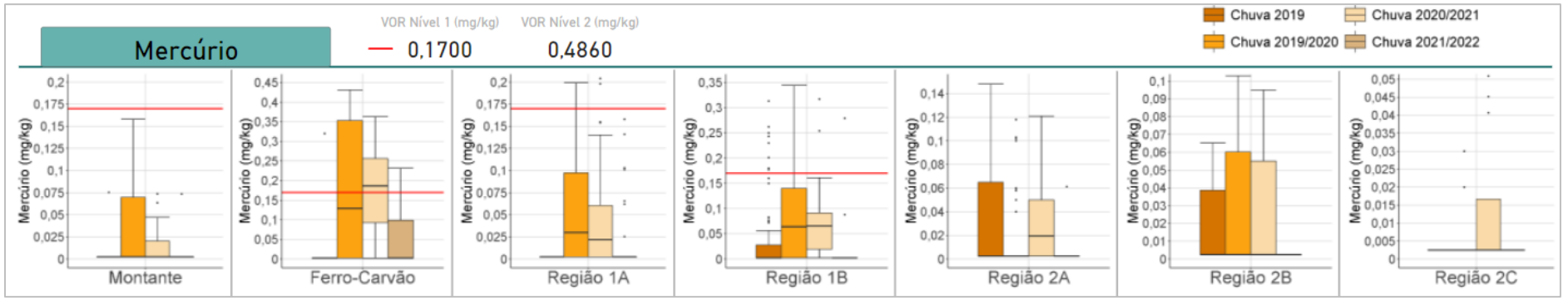


Gráfico 11.3.2-14: Variação do Mercúrio ao longo dos períodos sazonais de estiagem de 2019 até 2021 com escala variável e sem outliers.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-13: Avaliação inferencial espacial do Mercúrio.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	<	<	<	<
Mont.			~	>	~	~	<
Reg1A				>	<	~	<
Reg1B					<	<	<
Reg2A						>	~
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-14: Avaliação inferencial temporal do Mercúrio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	<	~	<	<	<	<	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	<	~	<	<	~	<	~
Ch.21/22 X Ch.19	~	~	~	~	<	~	~
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	~	~	>	~	~
Ch.20/21 X Ch.19	>	~	>	>	~	~	~
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	>	>	<	~	~

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Cádmio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cádmio nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-15 e 16 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-15 e 16.

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 sazonais. Algumas ocorrências identificadas nas chuvas de 2019/2020 foram anômalas nas regiões 1A e 2C. No período de 2020/2021, as concentrações mais elevadas foram pontuais em algumas regiões, sendo predominantes os valores abaixo do nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. No atual período de chuva (2021/2022), verifica-se valores pontuais de cádmio superiores ao VOR (0,06 mg/kg) Região Ferro-Carvão, a mediana das concentrações foi de 0,69 mg/kg. Na região 1A a mediana foi de 0,16 mg/kg, na região 1B foi de 0,10 mg/kg e na região 2A de 0,10 mg/Kg. Na região 2B, as concentrações (mediana 0,19 mg/kg) foram maiores do que na 2A e na região 2C que foi de 0,12 mg/kg.

Os dados da CPRM (2018), também, concentram pouca ocorrência de cádmio no rio Paraopeba, predominando com concentração de 0,1 mg/kg. No período chuvoso de 2020/2021, concentrações anômalas de cádmio foram identificadas entre dezembro/2020 e março/2021, na bacia como um todo, em concentrações atípicas se intercalando em semanas com valores elevados e outras semanas com resultados baixos a até menores do limite de quantificação.

A avaliação estatística inferencial mostrou que neste ciclo 2021/2022, as concentrações de Cd foram significativamente maiores na região Fe-Carvão em relação às demais, enquanto nas regiões 1ª teve aumento em relação a região montante; 2B e 2C ficaram com concentrações maiores em relação a montante, 1B e 2A, porém os valores são baixos e menores que a referência praticada. Em relação a estatística inferencial temporal, apesar dos resultados mostrarem aumentos significativos ao longo dos últimos ciclos de chuvas, eles são menores que o valor de referência da CONAMA 454/12 (exceto Ferro-Carvão), o que corrobora com a literatura.

Gráfico 11.3.2-15: Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

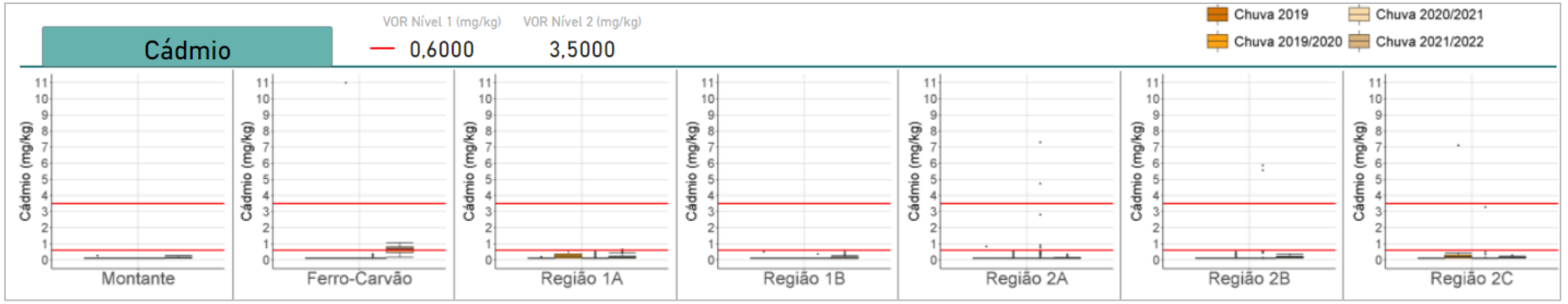
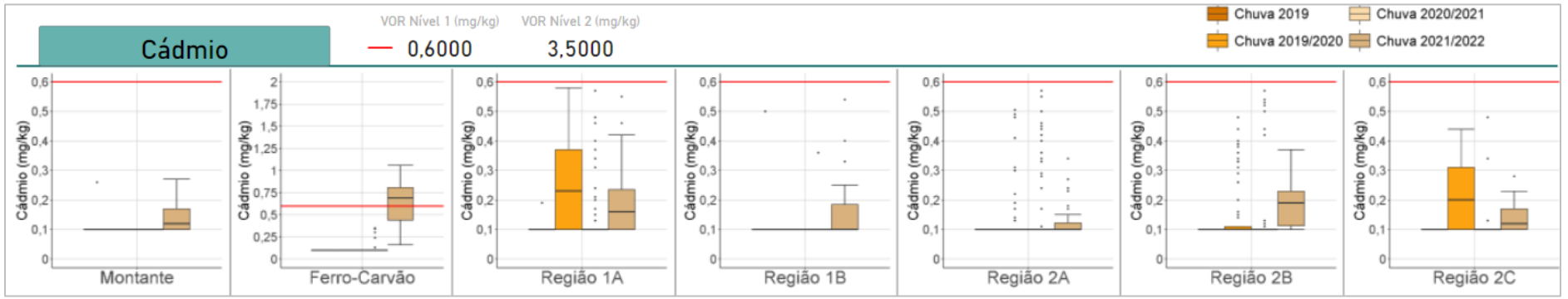


Gráfico 11.3.2-16: Variação do Cádmio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-15: Avaliação inferencial espacial do Cádmio.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	~	<	<	<	~
Mont.			>	~	~	>	>
Reg1A				<	<	~	~
Reg1B					~	>	>
Reg2A						>	>
Reg2B							~
Reg2C							

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 11.3.2-16: Avaliação inferencial temporal do Cádmio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	>	>	>	>	>	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	>	>	~	>	>	>	~
Ch.21/22 X Ch.19	>	~	>	>	>	>	>
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	<	>	>	~	<
Ch.20/21 X Ch.19	~	~	>	~	>	~	~
Ch.19/20 X Ch.19	~	~	>	~	~	~	>

Legenda:

~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Arsênio**

A distribuição estatística espacial e temporal do Arsênio nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-17 e 18 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-17 e 11.3.2-18.

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, tendo uma variação entre 14,70 mg/kg (chuvas/2019); 12,60 mg/kg (chuvas 2019/2020); 10 mg/kg (chuva 2020/2021) e de 12,20 (chuva2021/2022), indicando declínio ao longo do tempo, mas este não foi significativo como se observa nas tabelas de avaliação inferencial.

Na Região do Ferro Carvão, as concentrações medianas dos períodos de chuva foram de 2,95 mg/kg (chuva 2019), 8,70 mg/kg (chuva 2019/2020), 13,45 mg/kg (chuva 2020/2021) e 13,30 mg/kg (chuva 2021/2022). O incremento das concentrações medianas foi principalmente verificado no PT-12, inserido em contexto de condições mais lênticas propiciadas pelo barramento da estaca prancha nesse local, e que favorece o acúmulo de sedimentos, e que mostram que temporalmente, esse incremento não foi significativo como se observou nas tabelas de avaliação inferencial temporal.

Na Região 1A, na avaliação dos boxplots percebeu-se que as concentrações medianas de arsênio nas chuvas de 2019 e chuvas 2020/2021 (5,95 mg/kg a 7,91 mg/kg) foram próximas, mostrando condição mais equilibrada de aporte de arsênio, e menores quando comparadas com a chuva centenária de 2019/2020 (8,79 mg/kg) e no atual período chuvoso (9,21 mg/kg). A avaliação inferencial espacial indicou que as concentrações tiveram redução significativa neste período, apesar de uma mediana maior. Já avaliando-se a escala temporal constatou-se que as variações nas concentrações que ocorreram nos ciclos de 2019/2020 e 2020/2021 com o ciclo de 2021/2022 não foram significativas indicando um equilíbrio para este elemento na região 1A.

Na Região 1B, as concentrações medianas se mantiveram relativamente próximas ao longo dos períodos sazonais, e apresentaram incremento de um período para o outro, sendo 7,30 mg/kg (chuvas 2019); 9,3 mg/kg (chuvas 2019/2020), 10,5 mg/kg (chuvas de 2020/2021) e 10,20 mg/kg (chuva 2021/2022).

Na avaliação estatística inferencial temporal percebeu-se que este incremento não foi significativo quando se avaliou os resultados que ocorreram nos ciclos de 2019/2020 e 2020/2021 com o ciclo de 2021/2022, indicando condição de equilíbrio.

Na Região 2A, na avaliação do boxplot, verificou-se que nos períodos de maiores precipitações as concentrações medianas foram menores, bem como a variabilidade das concentrações totais. O valor mediano foi de 7,85 na chuva/2019; reduz para o intervalo 2,40 mg/kg na chuva 2019/2020, volta a aumentar entre 9,13 mg/kg nas chuvas de 2020/2021 e reduziu para 3,99 mg/kg no atual período de chuvas de 2021/2022.

A análise inferencial temporal confirmou a redução significativa das concentrações entre os períodos de 2020/2021 e 2021/2022. Espacialmente, as concentrações do ciclo de 2021/2022 foram significativamente menores que as concentrações das regiões localizadas a montante. O aumento de vazão do rio com as maiores precipitações de 2021/2022 em relação a 2020/2021, provavelmente favoreceu a predominância de sedimentos mais arenosos na calha do rio, e consequente redução na proporção de finos e de metais.

No reservatório da UHE Retiro Baixo, a avaliação dos *boxplots* mostrou que as concentrações medianas variaram pouco, sendo 14,85 mg/kg na chuva/2019; 13,70 mg/kg na chuva 2019/2020; 13,50 mg/kg na chuva 2020/2021 e 12,10 mg/kg na chuva 2021/2022. Ou seja, o aporte de arsênio no reservatório se manteve muito semelhante em todos os períodos sazonais, desde o rompimento da barragem B1.

Na estatística inferencial, o que se percebeu foi que espacialmente, as concentrações na região 2B aumentaram significativamente em relação às regiões de montante. Essa variação pode ser decorrente das chuvas terem sido mais intensas e contínuas neste ciclo chuvoso de 2021/2022, porém, temporariamente, as concentrações não tiveram variação significativa no tempo e nesta região, indicando equilíbrio nas concentrações.

Em relação à região 2C, os gráficos *boxplot* mostraram baixa variação nas concentrações de As (entre 4,60 e 6,63 mg/kg ao longo dos períodos sazonais), o que também corroborou com a avaliação estatística inferencial que indicou que temporalmente, as concentrações não variaram significativamente. Já avaliando-se espacialmente, as concentrações deste ciclo foram significativamente menores que nas regiões anteriores, o que também demonstrou melhora nas concentrações.

Gráfico 11.3.2-17: Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

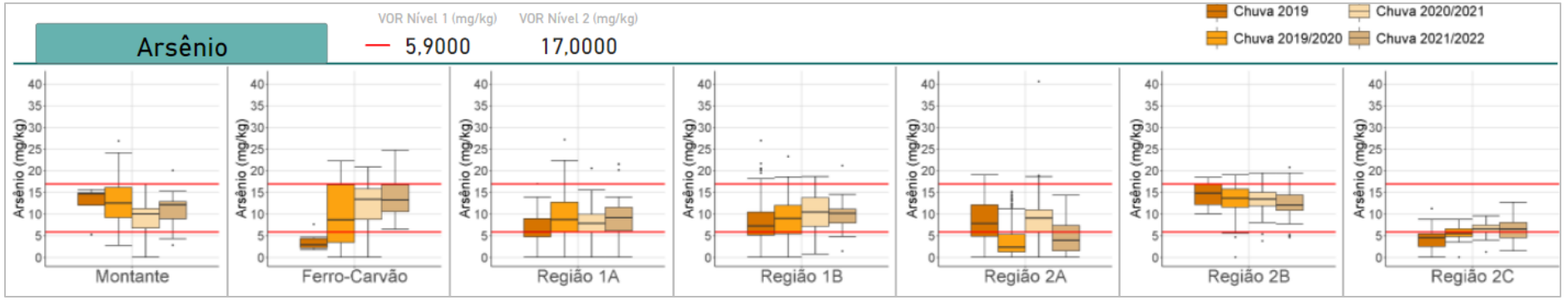
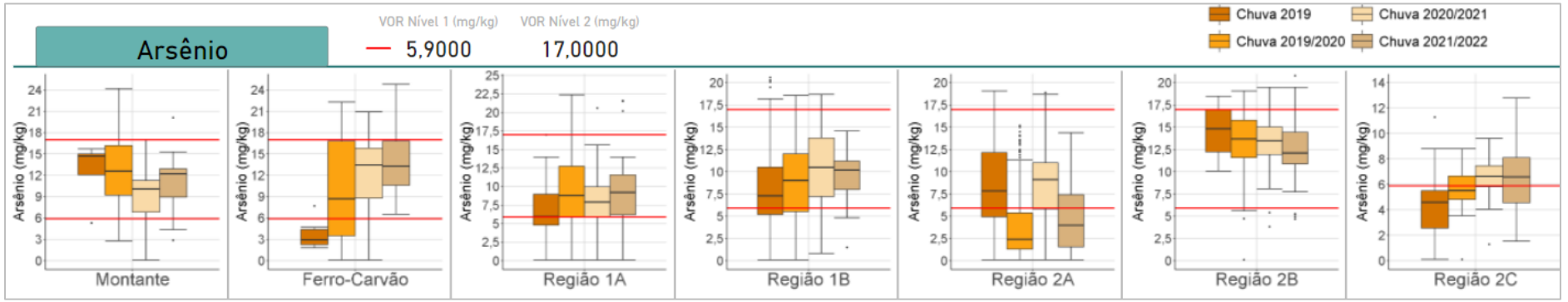


Gráfico 11.3.2-18: Variação do Arsênio ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-17: Avaliação inferencial espacial do Arsênio.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		~	<	<	<	>	<
Mont.			<	<	<	>	<
Reg1A				>	<	>	<
Reg1B					<	>	<
Reg2A						>	~
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-18: Avaliação inferencial temporal do Arsênio ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	~	~	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	>	~	~	~	~	~	~
Ch.21/22 X Ch.19	>	~	>	~	<	~	>
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	~	~	>	~	~
Ch.20/21 X Ch.19	>	~	>	>	~	~	>
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	>	>	<	~	~

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Cromo**

A distribuição estatística espacial e temporal do Cromo nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-19 e 20 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-19 e 11.3.2-20.

Em relação ao cromo constataram-se medianas entre 40 e 80mg/kg nas regiões montante e 2A, enquanto Ferro-Carvão e 1A tiveram as menores ocorrências ao longo de todos os períodos sazonais. Os aumentos de cromo foram identificados a partir da região 1B, ficando com medianas semelhantes à Região Montante até o final da Região 2A. Nestas regiões entre PT-03 até PT-18 também há evidência de concentrações de cromo nos levantamentos da CPRM (2018) e com faixa de valores qualitativamente próximas, o que indica que sua presença nesse intervalo tem origem geogênica e que, apesar da ocorrência de baixa concentração de cromo no rejeito (medianas de 10 mg/kg, Geoenviron, 2019), os valores encontrados não indicaram modificação na distribuição de cromo na bacia do rio Paraopeba nem na região 1A, mais próxima do evento e nem nas regiões a jusante.

Na Região 2B, as concentrações medianas tiveram pequeno incremento, porém, ficaram próximas a 60 e 80mg/kg ao longo dos períodos sazonais.

A análise estatística inferencial mostrou que, espacialmente, houve acúmulo de cromo na região 2B significativamente maior que as regiões a montante, o que pode sugerir que as chuvas de 2021/2022 foram maiores em comparação ao período anterior e que, potencialmente, transportaram mais sedimentos para o reservatório, quando comparados ao período anterior. Temporalmente, também se observou um aumento significativo nas concentrações do cromo nesta localidade, diferente dos ciclos anteriores que não variou ou teve redução significativa (tabela 11.3.2-20).

Na Região 2C, as variações de cromo também se mantiveram equilibradas e predominantemente menores (29 a 41 mg/kg ao longo dos períodos sazonais) que na Região 2B, 2A, Montante e 1B. As variações de cromo foram atribuídas ao aporte proveniente contribuições da bacia, não se evidenciando contribuições provenientes do rompimento da barragem B1, visto que no próprio rejeito as concentrações detectadas foram menores. A avaliação inferencial também mostrou que as variações que ocorreram na bacia não variaram ao longo dos últimos períodos sazonais. A avaliação inferencial temporal corroborou indicando que as concentrações não variaram significativamente ao longo dos últimos ciclos chuvosos.

Gráfico 11.3.2-19: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

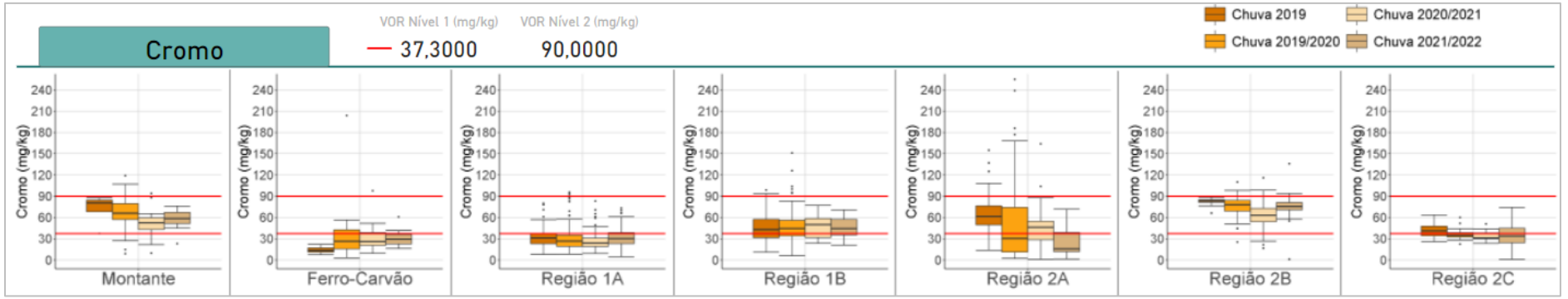
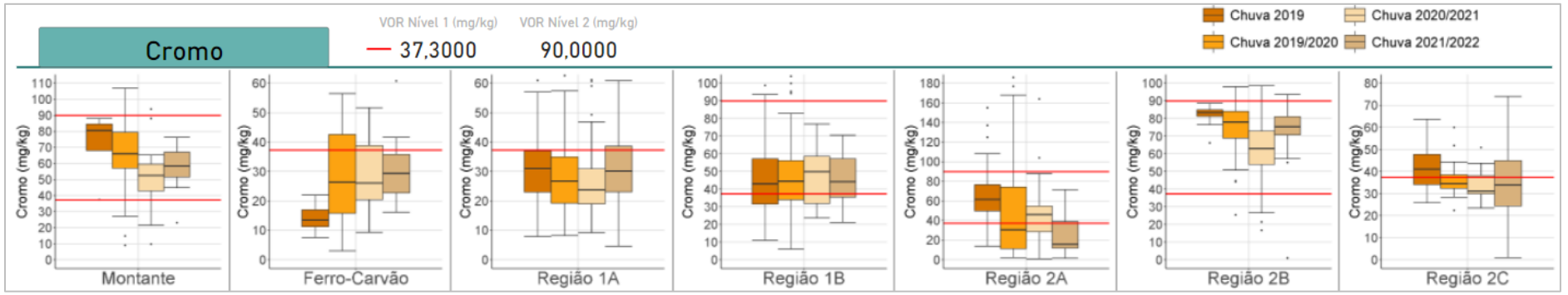


Gráfico 11.3.2-20: Variação do Cromo ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-19: Avaliação inferencial espacial do Cromo.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		>	~	>	>	>	>
Mont.			<	<	<	>	<
Reg1A				>	>	>	>
Reg1B					<	>	<
Reg2A						>	<
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-20: Avaliação inferencial temporal do Cromo ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	>	~	<	>	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	~	~	~	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19	>	~	~	~	<	~	<
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	<	~	~	~	<	~
Ch.20/21 X Ch.19	>	>	<	~	<	<	<
Ch.19/20 X Ch.19	>	~	~	~	<	~	~

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

- **Zinco**

A distribuição estatística espacial e temporal do Zinco nos períodos de chuva encontra-se nos Gráficos *boxplots* 11.3.2-21 e 22 e nas tabelas de Avaliação Inferencial 11.3.2-21 e 11.3.2-22.

As concentrações de zinco ao longo de todo o perfil foram predominantemente baixas quando se avalia o boxplot sendo que ficaram entre 38,40 e 56,20 mg/kg na região Montante, o valor mais baixo está associado ao período de chuva de 2021/2022. Na região Ferro-Carvão a concentração mediana variou de 44,5 a 69,3 mg/kg, sendo que no período de chuva de 2021/2022 a concentração mediana foi de 58,50 mg/kg. A concentração mediana na região 1A variou entre 22,90 mg/kg (chuva 2021/2022) e 42,00 mg/kg (chuva 2019) mg/kg. Na região 1B, no período de chuva de 2021/2022 a mediana foi de 48,10 mg/kg. Já na região 2A, a mediana foi de 7,20 mg/kg na chuva 2021/2022.

A concentração mediana variou entre 50,60 mg/kg (chuva 2020/2021) e 63,15 mg/kg (chuva 2019) mg/kg na região 2B, período de chuva (2021/2022) a mediana foi de 53,30 mg/kg. Na região 2C a concentração mediana mais elevada foi de 32 mg/kg no período de chuva de 2019 e equivalente a 20,3 mg/kg no atual período de chuva, 2021/2022. Considerando o atual período chuvoso (2021/2022) observa-se que as concentrações medianas reduziram de um período sazonal ao outro, nas regiões Montante, até a 2A e na 2C.

As concentrações das regiões 1A e 1B, onde houve a deposição de rejeitos da barragem B1, os sedimentos tiveram uma concentração levemente maior na chuva de 2019, porém, esses resultados foram atribuídos às contribuições na bacia e rejeito, haja vista que não houve, inclusive, muita variação na concentração desse elemento nessas áreas e nem na região do Ferro-Carvão.

A avaliação estatística inferencial também mostrou que as concentrações de zinco se reduziram espacialmente neste ciclo chuvoso e não teve variação quando comparado o último ciclo de 2021/2022 com o período de 2020/2021.

Gráfico 11.3.2-21: Variação do Zinco ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala fixa e com a identificação dos *outliers* do período.

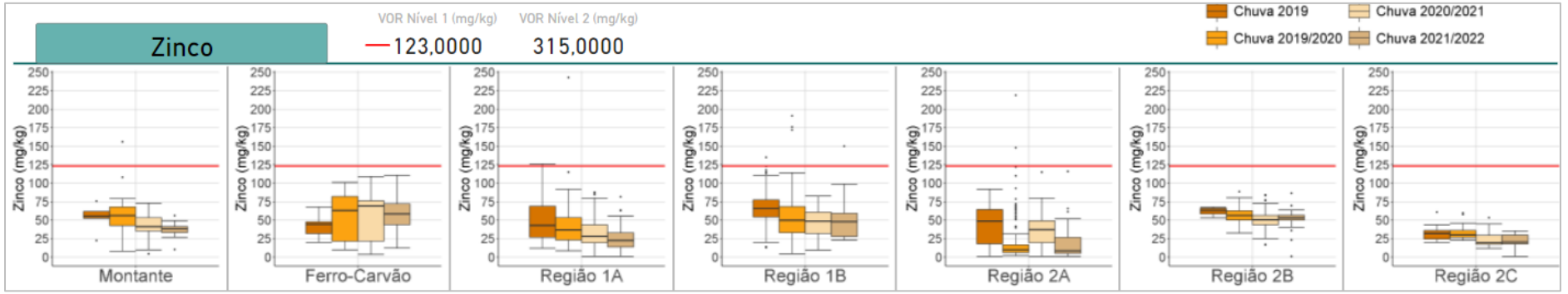
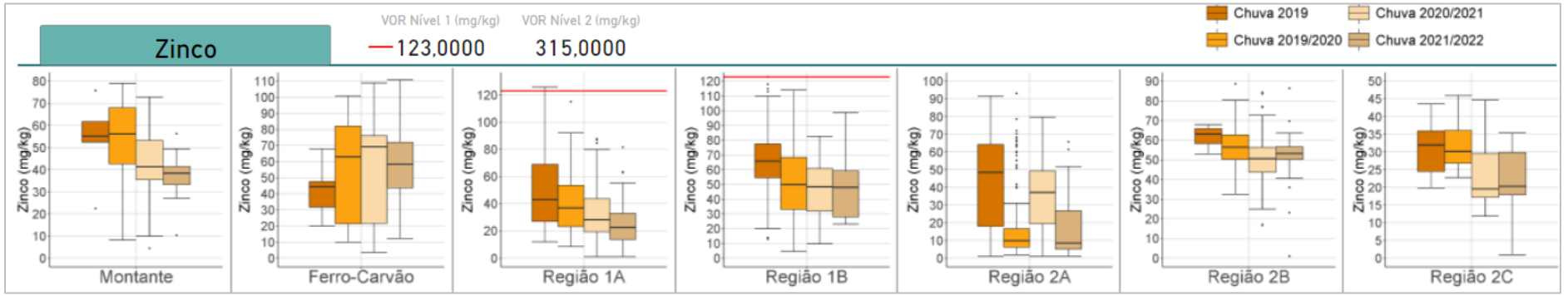


Gráfico 11.3.2-22: Variação do Zinco ao longo dos períodos sazonais de chuva de 2019 até 2021/2022 com escala variável e sem *outliers*.



Elaboração: Arcadis, 2021

Tabela 11.3.2-21: Avaliação inferencial espacial do Zinco.

Região	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
F.C		<	<	~	<	~	<
Mont.			<	>	<	>	<
Reg1A				>	<	>	<
Reg1B					<	~	<
Reg2A						>	~
Reg2B							<
Reg2C							

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 11.3.2-22: Avaliação inferencial temporal do Zinco ao longo das chuvas de 2019 até 2021/2022.

Períodos comparados	F.C	Mont.	Reg1A	Reg1B	Reg2A	Reg2B	Reg2C
Ch.21/22 X Ch.20/21	~	~	<	~	<	~	~
Ch.21/22 X Ch.19/20	~	<	<	~	~	~	<
Ch.21/22 X Ch.19	~	~	<	<	<	<	<
Ch.20/21 X Ch.19/20	~	~	<	~	>	<	<
Ch.20/21 X Ch.19	~	~	<	<	<	<	<
Ch.19/20 X Ch.19	~	~	~	<	<	~	~

Legenda:	
~	Não há diferença significativa entre os valores do período climático mais recente e do período climático anterior (valor-p do teste de comparações múltiplas > 0,05). Ex: Chuva 2021/2022 ~ Chuva 2020/2021
<	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: Chuva 2021/2022 < Chuva 2020/2021
>	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: Chuva 2021/2022 > Chuva 2020/2021

11.3.3. Análise de tendência temporal com o Método Mann Kendall

O primeiro passo para aplicação do teste de tendência temporal foi avaliar a frequência amostral dos dados. Considerando que desde dezembro/2021, a frequência do monitoramento dos sedimentos tem sido mensais 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 segundo passo para avaliar a aplicação do teste foi verificar se os dados apresentam influência da sazonalidade. Assim, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis- KW (KRUSKAL & WALLIS, 1952) ao nível de significância α = 5%, para identificar diferenças significativas entre os períodos climáticos de cada ponto e parâmetro.

O teste de Mann-Kendall foi empregado de forma complementar a análise dos *boxplots* e do teste de Mann Whitney, apresentados anteriormente e 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 ao longo do tempo e do 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 alumínio, níquel, cobre, chumbo, mercúrio, cadmio, zinco, arsênio e cromo. Os resultados do teste de tendência temporal para os referidos parâmetros estão apresentados nas **tabelas 11.3.3-1 e 11.3.3-2**, que consideram a avaliação da série completa, ou seja, todos os períodos sazonais entre 2019 e 2022 (até março) e somente os períodos de chuva, respectivamente. A avaliação de kruskal Wallis (p-valor) e os valores da estatística de teste do Mann Kendall, bem como da curva *Sen's Slope* podem ser consultados no **ANEXO IV-D.**

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 11.3.3-1: Resultados da análise temporal para a série completa considerando as medianas mensais de cada ponto.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			UHE TM
	Mont.	Ferro		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	PT-22
MAJORITÁRIOS																									
Manganês	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↑	T↑	T↑	T↑
Ferro	T↓	T↑	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST
Alumínio	T↓	T↑	T↑	T↓	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓
TRAÇOS																									
Arsênio	ST	T↑	T↑	T↓	T↓	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑
Cádmio	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST
Chumbo	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↑	T↓
Cobre	T↓	T↑	T↑	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST
Cromo	ST	T↑	T↑	T↓	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST
Mercúrio	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↓	ST	ST
Níquel	T↓	T↑	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓
Zinco	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST

Tabela 11.3.3-2: Resultados da análise temporal para os períodos de chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 considerando as medianas mensais de cada ponto.

Parâmetro	Rio Paraopeba																					UHE Retiro Baixo			UHE TM
	Mont.	Ferro		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	PT-22
MAJORITÁRIOS																									
Manganês	ST	T↑	ST	T↓	T↓	T↓	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↑	T↑	ST
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	T↓	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	T↓	ST	ST	T↓
TRAÇOS																									
Arsênio	T↓	T↑	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↑
Cádmio	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	ST	T↑	ST	T↑	ST	T↑	T↑	ST	ST	ST	ST	T↑	T↑	ST
Chumbo	T↓	T↑	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST
Cobre	T↓	T↑	ST	T↓	ST	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	T↓
Cromo	T↓	T↑	ST	ST	ST	T↑	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST
Mercúrio	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST
Níquel	T↓	T↑	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	T↓	ST	ST	T↓
Zinco	T↓	ST	ST	T↓	T↓	ST	ST	T↓	T↓	T↓	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	ST	T↓	ST	ST	ST	ST	T↓

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

- **Manganês**

A avaliação da tendência temporal ponto a ponto completa (todos os períodos sazonais) e dos períodos de chuva para o manganês evidenciou tendência de aumento nas concentrações nas regiões do Ferro-Carvão e 2B, enquanto na 2C houve tendência de aumento somente nos períodos de chuva, todos corroborando com o período de estiagem avaliados no ciclo anterior (relatório de Fechamento de Ciclo, outubro/2021- Arcadis).

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.

Na região 2B, constatou-se que a tendência de aumento das concentrações de manganês, ao contrário do período anterior, mostrou que a tendência de aumento ocorreu quando se compara a série completa e menos para a série sazonal, visto que na série completa todos os pontos avaliados no reservatório da UHE Retiro Baixo demonstraram tendência de aumento. Nos períodos de chuva, o acúmulo dos sedimentos recebe a contribuição do transporte por arraste de partículas que se depositam no reservatório. Por outro lado, a série completa, inclui o período de menor vazão e menor energia de transporte de materiais, o que permite a dissipação das partículas transportadas em suspensão ou por arraste e acúmulo de metais no reservatório. 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.

Já nas regiões 1A e1B, houve coincidência entre os pontos que apresentaram tendência de redução nas concentrações de manganês (PT-01, PT-13, PT-05, PT-48), tanto na análise da série completa, quanto exclusivo para o período de chuvas, 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-19 que indicou tendência de redução no ciclo anterior, manteve a tendência tanto na análise da série completa quanto na análise dos ciclos de chuva. Nos demais locais não se observou tendência, 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, que corroborou com os ciclos de estiagem da avaliação anterior, enquanto neste intervalo de análises sazonal de chuvas não se percebeu tendência.

Os resultados desta análise tiveram menor corroboração com os resultados da análise inferencial temporal por região quando comparados com o Fechamento de ciclo de estiagem/2021, visto que as regiões Ferro-Carvão, 1B e 2B não apresentaram tendência significativa de aumento na concentração de manganês como sugerido na análise de Mann-

Kendall e a 2C indicou redução significativa entre as chuvas de 2021/2022 em relação a 2020/2021 nas concentrações em escala regional e no Mann-Kendall não mostrou tendência. Já ambos os testes corroboraram para a região 1A que continuou a apresentar tendência significativa de redução e, pontualmente, para a região 2A que teve tendência de queda, mas na maioria dos pontos não se verificou tendência para a série sazonal de chuvas.

- **Ferro**

A aplicação da análise temporal ponto a ponto completa Mann Kendall mostrou tendência de de redução na região Montante (PT-52), parte de 1A (PT-01 e PT-13), pontualmente em 1B (PT-14) e 2A (PT-19), enquanto houve aumento no Ferro-Carvão e não se observou tendência nas demais regiões independentemente da sazonalidade e isso corroborou com a avaliação dos ciclos de estiagem até 2021.

Ao se aplicar o teste ponto a ponto para avaliar os períodos sazonais de chuvas 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, sugerindo baixa variação do ferro entre os períodos de chuva, que também foi pontual nos períodos de estiagem.

O ferro está distribuído nos sedimentos da bacia do rio Paraopeba e é um elemento majoritário. Sua ocorrência principal é na área do Quadrilátero Ferrífero, mas ainda se distribui ao longo dos metassedimentos do Grupo Bambuí, granitóides e rochas do Complexo Belo Horizonte, aluviões presentes nesta bacia. A maior ocorrência do ferro nas regiões do Ferro-Carvão é explicada de forma similar ao que ocorre para o manganês. A região acumula sedimento de granulação mais fina (silte e argilas), que por sua vez adsorvem mais metais, visto que quanto menor o tamanho do grão maior é a área superficial; há maior capacidade de troca catiônica e as partículas são mais porosas (USEPA Ohio, 2001- *Sediments sampling guide e methodologies).*

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 chuvas e tal comportamento mostrou uma tendência de redução nas regiões 1B e 2A, aumento no Ferro-Carvão e sem alteração significativa das concentrações de Ferro nas demais regiões.

- **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 dos PT-11 no ribeirão Ferro-Carvão e no PT-53 na região 2A. Já na região Montante e pontos isolados das regiões 1A (PT-01 e PT-05), 2A (PT-19), 2B (PT-20) e 2C (PT-22) constataram-se tendência de redução. Os demais pontos de todas as regiões não mostraram tendência.

Ao se aplicar a estatística ponto a ponto com o método Mann Kendall considerando a sazonalidade das chuvas constatou-se tendência de aumento somente para os pontos PT-11 e PT-12 no ribeirão Ferro-Carvão e no PT-15 na região 1B e redução nos PT-52 (montante), PT-14 (região 1B), PT-19 (região 2A), além de PT-20 e PT-21 (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 chuvas que no geral não indicaram tendência entre 2020/2021 para as chuvas de 2021/2022. Entretanto, neste teste e período as regiões 1B e 2A tiveram redução significativa nas concentrações e no teste Mann-Kendall, essas quedas foram pontuais.

- **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 que a região 1A, pontualmente na 1B (PT-14 e PT-48); região 2A (PT-49, PT-19, PT-55) e região 2C houve uma tendência de queda nas concentrações de chumbo, que abrangeu mais pontos e regiões que no ciclo de estiagem anterior. Já as tendências de aumento foram pontuais no PT-11 (Ferro-Carvão) e no PT-20 (região 2B). De forma geral, as regiões não apresentaram tendência temporal para o chumbo.

A persistência de aumento das concentrações na região do Ferro-Carvão ocorreu no ponto de amostragem PT-11 que está posicionado em uma área do ribeirão Ferro-Carvão que foi modificada para a contenção da água. Em razão desta alteração na condição do rio, os sedimentos que eram transportados deste ribeirão se acumulam e se decantam na lagoa de contenção. O acúmulo de sedimentos finos (silte e argila) nesta localidade favoreceu o aumento do chumbo. Já o PT-20 fica em região de remanso entre o ambiente lótico e a entrada para o ambiente intermediário, o que pode favorecer deposição e acúmulo de sedimentos.

Ao se avaliar a tendência sazonal das chuvas 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 Montante (PT-52), 1B (PT-14), 2A (PT-49). Nos demais locais permaneceu a condição de sem tendência.

Estes resultados corroboraram com os resultados de *boxplot* que identificou redução nas concentrações do chumbo na região 1A, sem tendência na região 2C além de redução ainda que pontual nas regiões 1B e 2A e com a estatística inferencial temporal por região. No Fe-Carvão e região Montante que se diferenciaram por não terem apresentado tendência no último período sazonal, mas que corroboraram nos períodos anteriores.

- **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 aumento somente no PT-11 no Ferro-Carvão. A tendência de queda foi observada para o PT-52 (região Montante); na Região 1A onde há atividades de remoção do rejeito na calha do rio Paraopeba; na Região 1B, Região 2A, Região 2C e no PT-20 (região 2B) corroborando com os resultados avaliados no ciclo anterior.

Na avaliação de tendência sazonal ponto a ponto, constatou-se que nos períodos de chuva, as concentrações de níquel tiveram tendência de queda e aumento nas mesmas regiões quando comparado à série completa, porém com número menor de locais por região.

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.

Os resultados dessa análise corroboraram com a estatística inferencial espacial dos períodos de chuvas que mostram queda nas concentrações de níquel. Para a estatística temporal sazonal, para as regiões 1A, 1B, 2A, apresentaram tendência temporal de queda para todos os períodos e não teve tendência muito clara para a região 2B corroborando com Mann-Kendall. Já nas regiões Fe-Carvão, Montante e 2C no último período comparado com o anterior de chuvas, não houve tendência significativa e o teste Mann Kendall mostrou 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, sem distinção de sazonalidade, constatou-se tendência de aumento para o PT-11 (região Ferro-Carvão) que devido a obras e contenções locais tende a acumular mais sedimentos finos e no caso, contendo presença de cobre também. Nas regiões Montante, 1A, 1B, 2A, o predomínio foi de tendência de queda nas concentrações dos sedimentos, enquanto nas regiões 2B e 2C não se observou tendência. 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 grande parte dos pontos não apresentaram tendência nos períodos de chuvas. Os locais em que as concentrações de cobre tiveram tendência de aumento foram no PT-12 (região Ferro-Carvão) representado por área represada, que pode acumular os sedimentos finos em seu leito.

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 2B que neste último período sazonal apresentou resultado significativo de aumento e na análise com Mann Kendall, não se observou tendência.

- **Zinco**

O zinco é um elemento distribuído ao longo da bacia do rio Paraopeba, majoritariamente em concentrações abaixo de valor orientador de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. À semelhança das análises pontuais com os gráficos de *boxplots*, os resultados da análise estatística de Mann Kendall identificaram tendência pontual de redução para o zinco na análise da série completa (principalmente) e de chuvas, como no PT-52 (região Montante) PT-01 e PT-13 (região 1A), PT-48 e PT-03 e PT-14 (região 1B); PT-19 e PT-55 (região 2A), enquanto nas demais localidades não se constatou tendência.

Esses resultados corroboram com a avaliação inferencial temporal por região, sendo que somente a região Montante se diferenciou visto que não apresentou tendência na avaliação do zinco e a avaliação com Mann Kendall mostrou redução no período avaliado.

- **Mercúrio**

A aplicação da estatística de Mann Kendall para a avaliação da tendência do mercúrio tanto para a série completa como para a série do período climático de chuvas não mostrou

tendência para a maioria dos locais avaliados, possivelmente por causa das baixas concentrações desse elemento identificadas nos sedimentos de corrente dessa bacia.

Pontualmente, nas análises de tendência pode-se verificar tendência de redução do mercúrio nas amostras do PT-13 na região 1A, PT-03 na região 1B, todos esses locais tiveram interferência do rejeito da barragem B1 (Geoenviron, 2019), além de redução para PT-19 (região 2A) e PT-28 (região 2B). Há de se pontuar que a atividade de garimpo em tributários do rio Paraopeba também é uma fonte potencial de contribuição desse elemento para os sedimentos.

Ao se comparar esta tendência sazonal de Mann Kendall com os resultados da estatística inferencial temporal, os resultados deste mostram tendência de redução para a maioria das regiões, ao passo que no Mann Kendall em análise ponto a ponto, ela foi pontual.

- **Cádmio**

O cádmio tem baixa presença nos sedimentos da bacia do rio Paraopeba e, portanto, não houve variabilidade de resultados ao se avaliar a série temporal completa, assim como o período sazonal de chuvas, em que todos os pontos que tiveram aumento no período sazonal estão incluídos na série completa. Ao se avaliar o período de chuvas percebeu-se que houve uma tendência de aumento no PT-11 dada a ocorrência pontual e anômala de cádmio neste local, como já discutido na avaliação estatística e detalhado na avaliação dos mapas temáticos. Na análise de inferência de tendência temporal percebeu-se que houve tendência significativa de aumento nas regiões monitoradas e tal condição mostra que devido a baixa ocorrência na bacia, qualquer pequena variação no resultado denotou tendência de aumento do parâmetro, corroborando com a análise ponto a ponto feita com o método Mann Kendall.

- **Arsênio**

A avaliação de tendências ponto a ponto com a aplicação da estatística de Mann Kendall da série completa mostrou tendência pontual de aumento em locais das regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2C e alguns pontos nas regiões 1A e 2A apresentaram tendência de redução das concentrações de arsênio. Ao se avaliar os dados pontuais de cada região no período de chuvas percebeu-se que houve redução nas concentrações das somente nos PT-52 e PT-19 e aumento pontual nos PT-11, PT-05, PT-14, PT-53, PT-17, PT-18, PT-28 e PT-21, enquanto para os demais locais não houve 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 a estatística inferencial temporal para cada região percebeu-se que com exceção da região 2A que apresentou redução significativo nos períodos de chuva, 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. No caso da avaliação completa percebeu-se que o PT-11 e PT-12 (Ferro Carvão) e PT-09 (região 1A); apresentaram tendência geral de aumento. Já para o PT-01 (região 1A) e maior parte da região 2A, as concentrações foram de queda. Os demais pontos não apresentaram tendência.

Já 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 os PT-11 e PT-09 com tendência de aumento e nos PT-52 e PT-19 houve a tendência de redução. Os outros pontos não mostraram tendência. Estes resultados corroboram com a estatística inferencial sazonal de predomínio de não haver tendência na maioria das regiões e aumento na região 1A e 2A. A diferença foi na região 2B visto que o método inferencial sazonal indicou tendência significativa de aumento e o 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.

11.4. 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 área em que houve maior influência do rejeito. Destaca-se que as maiores concentrações de manganês, ferro e cobre, estão na área citada.

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, 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 ao longo das chuvas acompanhadas.

Na Região 2B, no reservatório de Retiro Baixo, apesar do ambiente ser lêntico, a área de reservatório é maior que a área represada no Ferro-Carvão, com isso as concentrações nesta região são mais atenuadas, assim o 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 lêntico, essa alteração é uma sugestão de explicação para o comportamento das concentrações observadas de manganês, ferro, cobre, arsênio e o níquel terem apresentado maiores concentrações na Região Ferro-Carvão que nas demais regiões comparadas.

Observadas as concentrações dos metais ao longo das chuvas comparadas, tem-se que na Região Ferro-Carvão o alumínio, cobre e arsênio apresentaram elevações sequenciais. Já a Região 1B, é a região que apresentou maior quantidade de metais com reduções sequenciais entre as três chuvas comparadas, sendo eles o manganês, chumbo, cobre, níquel e zinco. Do todo, o que se percebe é que as concentrações dos sedimentos ao longo dos períodos chuvosos tem mantido a tendência significativa de queda nas concentrações dos metais avaliados.

12. Análise granulométrica nos diferentes períodos sazonais ao longo da bacia do rio Paraopeba

12.1. Objetivo

O objetivo da avaliação granulométrica foi avaliar a sua distribuição ao longo dos períodos sazonais de chuva e no espaço, além de servir como referência para verificação das variações das concentrações dos metais em razão do tamanho do grão.

12.2. 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.

12.3. 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 depositaram no rio e se dissiparam. Com a chegada das chuvas de 2019 e 2020, um novo período hidrológico recomeçou na bacia do rio Paraopeba promovendo suspensão de partículas, erosão de margens, transporte de materiais em suspensão que, com o retorno da estiagem, diminuição da vazão dos rios e do nível de água, tendem a se depositar no leito e margens do rio Paraopeba e seus afluentes.

Os resultados das análises granulométricas dos sedimentos totais coletados no rio Paraopeba, foram divididos por períodos sazonais de chuva, incluindo os meses de 25/01/2019 a 31/03/2019 (Gráfico 12.3-1); 01/10/2019 a 31/03/2020 (Gráfico 12.3-2); 01/10/2020 a 31/03/2021 (Gráfico 12.3-3) e 01/10/2021 a 31/03/2022 (Gráfico 12.3-4), 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. Os pontos de monitoramento PT-50, PT-51 foram descontinuados em março/21; os pontos de monitoramento PT-04, PT-56 foram descontinuados em novembro/2021 e o ponto CE-02, apesar de mantido, apresentou pouquíssimas ocorrências de sedimentos quando coletados na porção central do rio. Em outubro/21, quando a coleta passou a ser realizada na margem esquerda do rio Paraopeba, a incidência de sedimentos aumentou, porém, não de forma contínua, onde para os meses de janeiro a março de 2022, não houve acesso para coleta de sedimentos nesta margem.

Constatou-se que no período chuvoso de 2019 (janeiro a março/2019) houve predominância de sedimentos siltosos e argilosos ao longo do rio Paraopeba. Entre PT-01 e PT-15, a granulometria fina pode ser resultante de coletas em margem de rio, onde, devido a menor velocidade de transporte do rio, se depositam os sedimentos mais finos. Apesar do PT-53 e do PT-43 ao PT-17 estarem posicionados em porções mais sinuosas do rio, os sedimentos tiveram predominância de frações arenosas, possivelmente por conta de a posição da coleta ter sido na porção central do rio ou até mesmo de potencialmente ter uma maior declividade nesta região. No restante do perfil prevaleceu sedimentos de granulometria silte, incluindo as deposições dentro do reservatório da UHE Retiro Baixo que, por sua característica mais lêntica, permitiu a deposição de materiais mais finos.

Entre outubro/2019 e março/2020, as frações siltosas continuaram predominantes entre o PT-01 e PT-15, que, neste período, concentrou as coletas na porção central do rio, enquanto entre PT-53 e PT-49 e entre PT-51 e PT-55 houve um aumento das frações arenosas, principalmente de areias grossas e médias. Isso se deu, provavelmente, em função das chuvas intensas do verão de 2019/2020, dos processos naturais de deposição do rio, mas também pode ter sido influenciado pela 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. Ao adentrar no ambiente mais lêntico do reservatório da UHE de Retiro Baixo, há decantação e sedimentação de partículas finas como silte e argila, o que explica o comportamento dos pontos inseridos no contexto da Região 2B. Destaca-se que para o período analisado não houve material disponível para coleta no ponto CE-02.

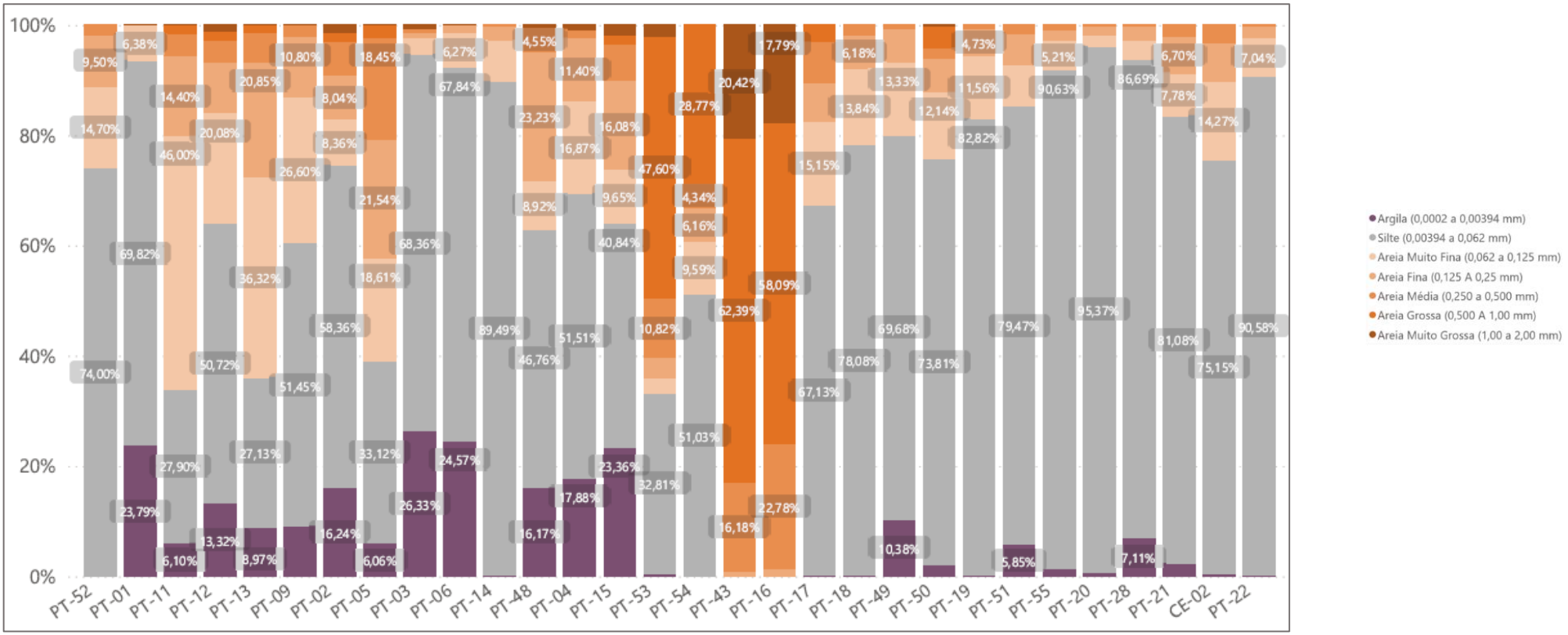
De acordo com as avaliações realizadas nas amostras compostas de sedimentos de fundo coletados por CPRM (2020), entre 2019 e 2020, nas estações de Alberto Flores (próximo ao PT-01), Mário Campos (entre PT-03 e PT-05), Ponte Nova do Paraopeba (próximo ao PT-15) e São Joaquim de Bicas (próximo ao PT-48) 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).

Entre outubro/2020 e março/2021 constatou-se que nos pontos de monitoramento PT-53 e PT-16, independente da época do ano e posição de amostragem, a fração granulométrica principal é a arenosa e o restante do perfil mantém a granulometria siltosa. Esta variação é diferente de novembro/2019 em que o intervalo entre o PT-53 e PT-55, ou seja, toda a região 2A, teve granulometria predominante arenosa. Um dos fatores é relacionado com a posição da coleta ter ocorrido na porção central do rio em 2019, enquanto neste período, as coletas foram feitas em margem, local de menor turbulência de água e mais propício a deposição de materiais finos. Adicionalmente, percebe-se neste período o aumento das frações argilosas entre PT-13 e PT-48 e entre PT-18 e PT-21, no reservatório da UHE Retiro Baixo. Notadamente, nos pontos PT-03, PT-48 e PT-17 não houve resultado granulométrico para todo o período em razão de não haver possibilidade de coleta embarcado e nem de acesso seguro, bem como o CE-02 em que não houve material disponível para análise nas coletas.

O ciclo de chuva 2021/2022 apresentou incidência de chuvas intensas e mais contínuas, entre dezembro/2021 e fevereiro/2022, quando comparadas ao ciclo de chuvas anterior (2020/2021) e a estação de estiagem/2021, de padrão constante de baixa pluviosidade. Entre outubro/2021 e março/2022 foi possível observar, do PT-52 ao PT-11, um aumento das frações finas em comparação ao período de chuvas anterior. Os pontos PT-12, PT-13 e PT-05 apresentaram padrões de distribuição granulométrico similares ao período de chuvas/2020-2021, enquanto o PT-09 apresentou aumento nas frações finas e o PT-02 apresentou diminuição. O PT-14 apresentou domínio absoluto de silte, bem como no período de chuva anterior. O ponto PT-04 apresentou aumento nas frações finas enquanto o PT-15 apresentou aumento das frações tamanho areia. O PT-53 indicou aumento dos sedimentos nas frações argila e silte, enquanto os demais pontos da Região 2A (do PT-53 ao PT-55) indicaram aumento nas frações arenosas, com aumentos no PT-54, PT-18, PT-19 e PT-55, o que pode ser em função das chuvas durante o período analisado. Os pontos inseridos nas Regiões 2B e 2C não apresentaram diferenças em seus padrões de distribuição granulométrica entre o atual período sazonal de chuva e o anterior, com domínio de sedimentos nas frações finas. Isso ocorre em função de características hidráulicas desse trecho, bem como, na Região 2C, da condição do solo desnudo nas margens e da facilidade de erosão e acúmulo de sedimentos na localidade. Destaca-se que os pontos PT-06, PT-43, PT-50 e PT-51 não apresentam dados no período em função de não haver possibilidade de acesso ao ponto de coleta embarcado e nem de acesso seguro.

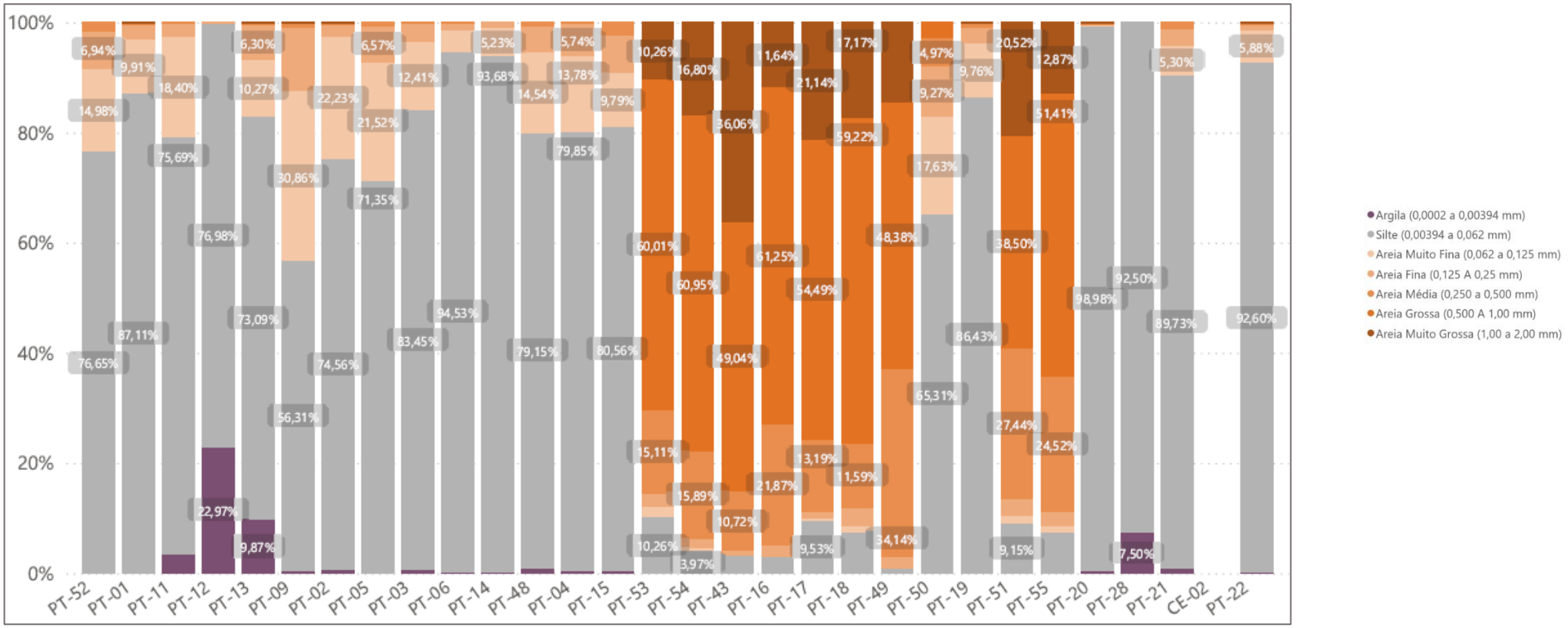
A diferença granulométrica pode ser relacionada com a energia de transporte e vazões do rio, porém há de se considerar que, em 2019, os pontos de monitoramento até o PT-15 (Região 1B) eram amostrados predominantemente na margem do rio, enquanto em 2020, as amostragens ocorreram preferencialmente na porção central do rio. Entretanto, mesmo com esta mudança de posição, as frações siltosas foram predominantes nessa região. Entre os pontos PT-20 e CE-02, as amostragens foram mais coletadas predominantemente em porções mais centrais para os dois períodos, indicando que entre PT-28 e PT-21 (ambiente intermediário/lêntico- reservatório de Retiro Baixo) e CE-02 (ambiente lótico), os sedimentos foram predominantemente mais finos. Para o período de chuvas 2021-2022, é possível observar uma mudança no padrão de distribuição granulométrica do ponto CE-02, onde havia predominantemente sedimentos finos (janeiro/2019 a março/2019), para domínio de sedimentos na fração areia, o que acontece em função do deslocamento do ponto de coletas.

Gráfico 12.3-1: Variação granulométrica no período de janeiro/2019 a março/2019.



Elaboração: Arcadis, 2022.

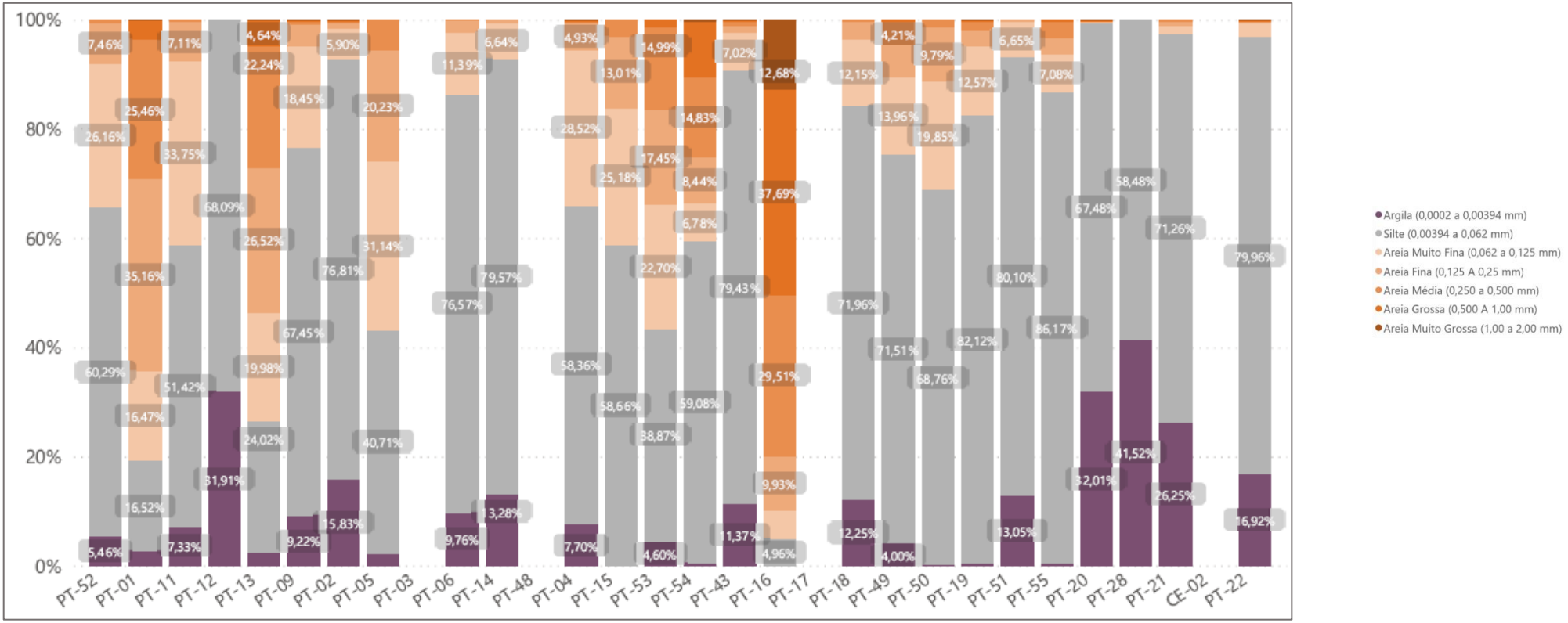
Gráfico 12.3-2: Variação granulométrica no período de outubro/2019 a março/2020.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nota: O ponto CE-02 não apresentou dados por não ter retornado sedimento nas tentativas de coletas no período.

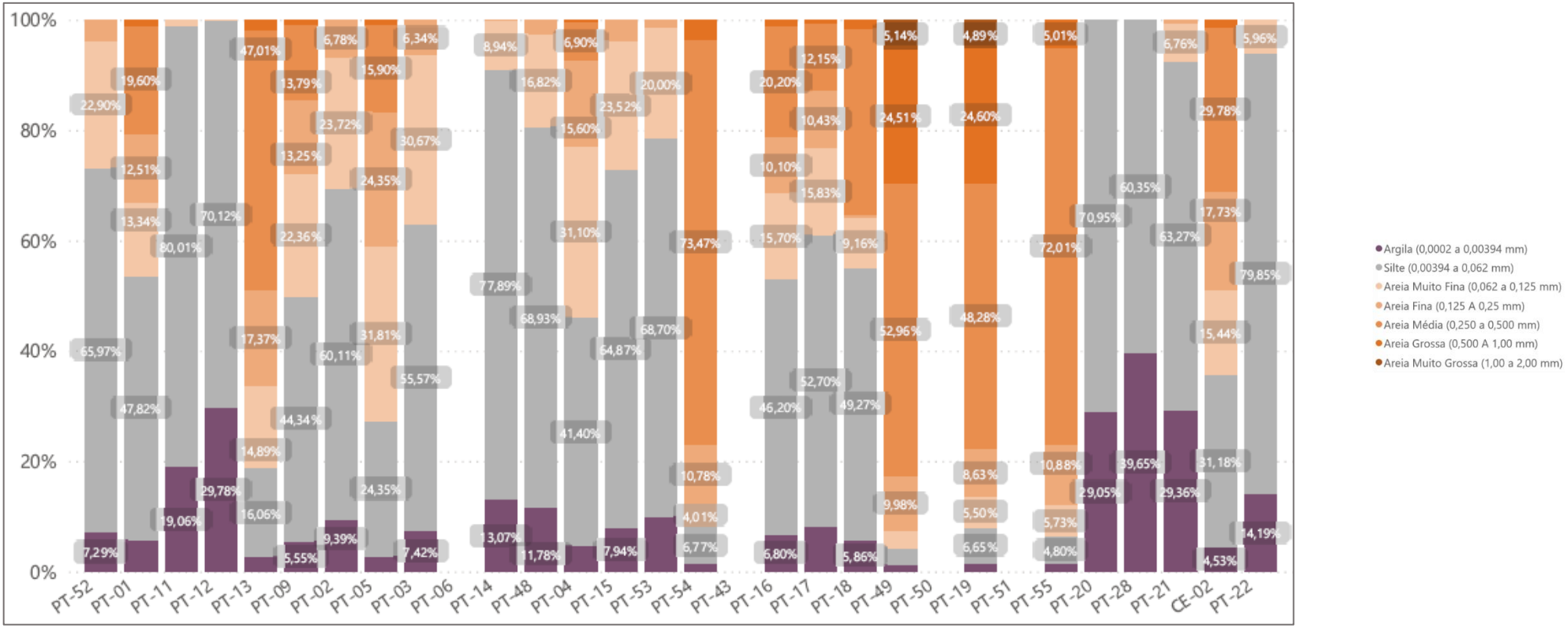
Gráfico 12.3-3: Variação granulométrica no período de outubro/2020 a março/2021.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nota: Os pontos PT-48, PT-17 não apresentam dados por não haver coletas no período por acesso inseguro, enquanto os pontos PT-03 e CE-02 não apresentaram dados por não ter retornado sedimento nas tentativas de coletas no período.

Gráfico 12.3-4: Variação granulométrica no período de outubro/2021 a março/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Nota: O ponto PT-43 não apresentou coletas no período. As amostras dos pontos PT-06, PT-50 e PT-51 foram descontinuadas do monitoramento, conforme aceite da Nota Técnica n.3, do IGAM (abril/2021) e o PT-56 e PT-04 conforme nota técnica **24/IGAM/GEMOQ/2021** foram excluídos do monitoramento desde outubro/2021.

12.4. Considerações

Avaliando-se o perfil dos sedimentos de fundo coletados com draga ao longo do rio Paraopeba, nos diferentes períodos sazonais, observou-se variação granulométrica ao longo de tempo e espaço, sendo que o período chuvoso de 2019 foi o que mais concentrou sedimentos de textura fina ao longo do perfil do rio Paraopeba, desde a região montante até a entrada do reservatório da UHE Três Marias. Constatou-se que os sedimentos mais finos estão predominantes entre PT-01 até o PT-15, em resposta ao evento de rompimento das barragens B1, B-4, B-4A.

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 os metassedimentos do Grupo Bambuí, e entre o PT-18 ao PT-55. Esse comportamento é uma resposta a mudanças nas condições de declividade, velocidade e sinuosidade do corpo fluvial neste trecho, enquanto o escoamento superficial, erosão das margens e aumento do aporte sedimentar oriundo dos tributários, são fatores que contribuem para o aumento das frações finas.

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

Nos períodos subsequentes a chuva/2019-2020, percebeu-se uma maior distribuição das frações arenosas ao longo do perfil, mesmo tendo sido constatada ainda uma larga distribuição de sedimentos siltosos. Essas alterações foram associadas às mudanças da posição da coleta de amostras da porção marginal para a central, principalmente nas regiões mais afetadas e, à possível contribuição de sedimentos finos do rompimento das barragens B1, B-4, B-4A, principalmente nas regiões 1A e 1B.

Ao se relacionar as frações granulométricas com os resultados analíticos dos metais majoritários (*i.e.* Fe, Al, Mn e traços Ni, Cu, As, Pb), percebeu-se que as frações finas adsorveram mais metais e contribuíram para o aumento da concentração destes parâmetros. Nas regiões 1A e 1B esta condição é mais evidente, uma vez que a granulometria local é predominante fina, majoritariamente na fração silte, ao longo de todo o período monitorado. Na região 2A, onde as amostragens ocorreram predominantemente na calha do rio, ao se deslocar a posição de coleta do centro para a margem percebeu-se redução na granulometria e aumento nas concentrações dos metais, principalmente no trecho entre PT-53 e PT-55. Nos pontos de monitoramento PT-09, PT-05 e PT-55, que tiveram predominância de sedimentos arenosos, as concentrações foram baixas.

13. Evolução das concentrações dos metais em relação aos valores orientadores do CONAMA 454/12 e Vicq (2015) nos sedimentos nos períodos sazonais de chuva de 2019 a 2022 ao longo do rio Paraopeba

13.1 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 chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 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).

13.2 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 chuva de 2021/2022 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 chuva, sendo: janeiro a março/2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. Em ambas as situações, a avaliação foi para verificar a evolução do percentual de ultrapassagem dos valores orientadores e evolução no tempo.

13.3 Resultados e discussão

Nas **Tabelas 13-1 e 13-2** estão apresentados os percentis de superação aos valores orientadores por ponto no período de chuva de 2021/2022, enquanto nas **Tabelas 13-3 e 13-4** encontram-se os percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2, para todos os períodos de chuva avaliados. As discussões são apresentadas por Regiões.

Tabela 1313.3-1: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 1 da CONAMA 454/12, ou dos valores propostos por Vicq (2015), para a Chuva 2021/ 2022.

Parâmetro	CONAMA 454/12	Rio Paraopeba																						Reserv. Retiro Baixo			R.P.	UHE TM	
		Mont.	F.C.		Região 1A					Região 1B					Região 2A									Região 2B			R.2C		
	VOR 1 (mg/kg)	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-04	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	CE-02	PT-22		
MAJORITÁRIOS																														
Manganês	● 3.300	-	100	92	6	8	14	56	-	25	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-		
Ferro	● 281.000	-	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Alumínio	● 45.300	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	50	36	-	-		
TRAÇOS																														
Arsênio	5,9	81	100	100	76	71	79	89	73	100	80	75	100	100	100	33	67	100	60	40	-	-	10	92	100	88	67	58		
Cádmio	0,6	-	35	72	-	-	-	11	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Chumbo	35	-	10	48	-	-	-	6	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	8	-	-		
Cobre	35,7	-	100	96	-	-	7	50	-	25	40	-	-	20	33	-	-	-	-	-	-	-	-	83	79	92	-	-		
Cromo	37,3	94	-	36	59	23	36	11	-	38	100	75	-	100	100	33	67	100	40	60	-	-	10	92	93	96	17	50		
Mercúrio	0,17	-	5	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-		
Níquel	18	50	85	96	35	14	36	39	-	25	60	25	-	80	33	-	-	-	20	40	-	-	-	92	79	88	-	-		
Zinco	123	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
N amostral		16	20	25	17	14	14	18	11	8	5	4	1	5	3	3	3	1	10	5	6	6	10	12	14	25	6	12		

*NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência; *Vicq (2015) utilizado para comparações com ferro, alumínio e manganês. Elaboração: Arcadis (2022).*

Tabela 1313.3-2: Percentual de concentrações de elementos acima do nível 2 da CONAMA 454/12 para a chuva 2021/2022.

Parâmetro	CONAMA 454/12	Rio Paraopeba																						Reserv. Retiro Baixo			R.P.	UHE TM
		Mont.	F.C.		Região 1A					Região 1B					Região 2A									Região 2B			R.2C	
	VOR 2 (mg/kg)	PT-52	PT-11	PT-12	PT-01	PT-13	PT-09	PT-02	PT-05	PT-03	PT-14	PT-48	PT-04	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	CE-02	PT-22
TRAÇOS																												
Arsênio	17	6	10	36	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	21	4	-	-
Cromo	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	14	-	-	-
Níquel	35,9	-	10	72	-	7	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
N amostral		16	20	25	17	14	14	18	11	8	5	4	1	5	3	3	3	1	10	5	6	6	10	12	14	25	6	12

NA= não analisado; (-) = resultados não ultrapassaram os valores de referência.
Elaboração: Arcadis (2022)

De acordo com a **Tabela 13-1**, constatou-se que, para o período de chuva de 2021/2022 o manganês, ferro e alumínio superaram os valores orientadores Vicq (2015). Arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco superaram os valores orientadores de nível 1 (VOR 1) em pelo menos um ponto de monitoramento. Destes, o arsênio e o cromo 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).

Em relação aos locais que apresentaram maior ocorrência de metais que ultrapassaram esses valores das referências estão o PT-52, PT-11, PT-12, PT-15, PT-53, PT-20, PT-20, PT-28 e PT-21, para os parâmetros Arsênio, Cobre, Cromo e Níquel, além do PT-01, PT-13, PT-09, PT-02, PT-05, PT-03, PT-14, PT-54, PT-16, PT-17, PT-18, PT-55 e CE-02 que ultrapassaram o nível 1 em menor percentual de amostragem.

Os pontos localizados entre o PT-11 e PT-02 (no Ferro-Carvão e região 1A) estão na região mais afetada pelos rejeitos provenientes da barragem B1, sendo que é neste intervalo que ocorreram as maiores proporções de desacordo em relação ao valor orientador de manganês e ferro, particularmente nos pontos PT-11 e PT-12. Destaca-se que, esses pontos, coincidentemente, são os que possuem maiores proporções de sedimentos finos (silte e argila), quando comparados aos demais dispostos até a região 2A.

Ainda de acordo com a **Tabela 13-1**, observou-se que para o período de chuva atual, houve concentrações de Al acima do valor proposto por Vicq (2015), no PT-12 e na região do reservatório de 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 rochas da Formação Serra de Santa Helena e de granitóides do Complexo Belo Horizonte, que possui minerais e argilominerais que contém Al e estes podem sob condições de pH, Eh e em fases oxi-hidróxidos, serem disponibilizados para a água superficial (vide Referencial Teórico, relatório de fechamento de ciclo, outubro/2021). O acúmulo de sedimentos transportados de diversas fontes (difusas, geogênicas) no reservatório 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) e PT-20, PT-28 e PT-21 (Região 2B) predominam os maiores percentuais de concentrações acima do preconizado pela CONAMA 454/12 para metais traços (As, Cu, Cr e Ni). Em relação a desacordos com o valor orientador do nível 2 (**Tabela 13-2**) da CONAMA 454/12, no período de chuva 2021/2022, houve desvios para As e Ni no PT-11, PT-12 e PT-14, As e Cr no PT-20 e PT-28 (região de Retiro Baixo), As no PT-52 e Ni no PT-13, o que pode ser explicado por alguns desses pontos se localizarem em regiões que apresentam comportamento mais lêntico, o que favorece o acúmulo contínuo de sedimentos, maiores proporções de finos e, por consequência, de metais.

As **Tabelas 13-3 e 13-4** consolidam a evolução das concentrações dos metais ao longo dos ciclos de chuvas ocorridos entre 2019 e 2022. Estas tabelas contemplam cada região de interesse (montante até 2C), e apresenta os percentuais de concentração de metais e suas comparações com o ciclo de chuvas 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 1313.3-3: Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para as chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.

		-			Chuva - Janeiro a Março/2019					Chuva - Outubro/2019 a Março/2020					Chuva - Outubro/2020 a Março/2021					Chuva - Outubro/2021 a Março/2022				
Região	Parâmetro	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
Ferro-Carvão	Arsênio	5,9	17	mg/kg	10	1	10,0 %	0	0,0 %	49	28	57,1 %	11	22,4 %	32	31	96,9 %	6	18,8 %	45	45	100,0 %	11	24,4 %
Ferro-Carvão	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	49	1	2,0 %	1	2,0 %	32	0	0,0 %	0	0,0 %	45	25	55,6 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Chumbo	35	91,3	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	49	21	42,9 %	0	0,0 %	32	14	43,8 %	0	0,0 %	45	14	31,1 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Cobre	35,7	197	mg/kg	10	5	50,0 %	0	0,0 %	49	29	59,2 %	1	2,0 %	32	25	78,1 %	2	6,3 %	45	44	97,8 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Cromo	37,3	90	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	49	19	38,8 %	1	2,0 %	32	10	31,3 %	1	3,1 %	45	9	20,0 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	10	1	10,0 %	0	0,0 %	49	20	40,8 %	0	0,0 %	32	17	53,1 %	0	0,0 %	45	2	4,4 %	0	0,0 %
Ferro-Carvão	Níquel	18	35,9	mg/kg	10	3	30,0 %	0	0,0 %	49	37	75,5 %	22	44,9 %	32	31	96,9 %	19	59,4 %	45	41	91,1 %	22	48,9 %
Ferro-Carvão	Zinco	123	315	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	49	0	0,0 %	0	0,0 %	32	0	0,0 %	0	0,0 %	45	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Arsênio	5,9	17	mg/kg	5	4	80,0 %	0	0,0 %	27	24	88,9 %	5	18,5 %	17	15	88,2 %	0	0,0 %	16	13	81,3 %	1	6,3 %
Montante	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	5	0	0,0 %	0	0,0 %	27	0	0,0 %	0	0,0 %	17	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Chumbo	35	91,3	mg/kg	5	0	0,0 %	0	0,0 %	27	0	0,0 %	0	0,0 %	17	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Cobre	35,7	197	mg/kg	5	4	80,0 %	0	0,0 %	27	12	44,4 %	0	0,0 %	17	2	11,8 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Cromo	37,3	90	mg/kg	5	5	100,0 %	0	0,0 %	27	23	85,2 %	5	18,5 %	17	15	88,2 %	1	5,9 %	16	15	93,8 %	0	0,0 %
Montante	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	5	0	0,0 %	0	0,0 %	27	0	0,0 %	0	0,0 %	17	1	5,9 %	0	0,0 %	15	0	0,0 %	0	0,0 %
Montante	Níquel	18	35,9	mg/kg	5	4	80,0 %	1	20,0 %	27	21	77,8 %	0	0,0 %	17	7	41,2 %	2	11,8 %	16	8	50,0 %	0	0,0 %
Montante	Zinco	123	315	mg/kg	5	0	0,0 %	0	0,0 %	27	1	3,7 %	0	0,0 %	17	0	0,0 %	0	0,0 %	16	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Arsênio	5,9	17	mg/kg	82	41	50,0 %	0	0,0 %	126	94	74,6 %	15	11,9 %	87	65	74,7 %	1	1,1 %	75	58	77,3 %	4	5,3 %
Região 1A	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	82	0	0,0 %	0	0,0 %	105	0	0,0 %	0	0,0 %	87	0	0,0 %	0	0,0 %	74	2	2,7 %	0	0,0 %
Região 1A	Chumbo	35	91,3	mg/kg	82	10	12,2 %	1	1,2 %	114	70	61,4 %	51	44,7 %	87	1	1,1 %	0	0,0 %	74	1	1,4 %	0	0,0 %
Região 1A	Cobre	35,7	197	mg/kg	82	36	43,9 %	1	1,2 %	126	36	28,6 %	0	0,0 %	87	17	19,5 %	0	0,0 %	74	10	13,5 %	0	0,0 %
Região 1A	Cromo	37,3	90	mg/kg	82	20	24,4 %	0	0,0 %	114	27	23,7 %	3	2,6 %	87	14	16,1 %	0	0,0 %	74	20	27,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	82	0	0,0 %	0	0,0 %	115	1	0,9 %	0	0,0 %	84	4	4,8 %	0	0,0 %	75	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1A	Níquel	18	35,9	mg/kg	82	34	41,5 %	15	18,3 %	114	76	66,7 %	13	11,4 %	87	39	44,8 %	12	13,8 %	75	20	26,7 %	2	2,7 %
Região 1A	Zinco	123	315	mg/kg	82	1	1,2 %	0	0,0 %	114	1	0,9 %	0	0,0 %	87	0	0,0 %	0	0,0 %	74	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 1B	Arsênio	5,9	17	mg/kg	102	67	65,7 %	8	7,8 %	160	121	75,6 %	10	6,3 %	50	48	96,0 %	3	6,0 %	23	21	91,3 %	1	4,3 %
Região 1B	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	102	0	0,0 %	0	0,0 %	160	0	0,0 %	0	0,0 %	50	0	0,0 %	0	0,0 %	23	1	4,3 %	0	0,0 %
Região 1B	Chumbo	35	91,3	mg/kg	102	15	14,7 %	0	0,0 %	160	27	16,9 %	0	0,0 %	50	2	4,0 %	0	0,0 %	23	1	4,3 %	0	0,0 %
Região 1B	Cobre	35,7	197	mg/kg	102	62	60,8 %	0	0,0 %	160	94	58,8 %	0	0,0 %	50	14	28,0 %	0	0,0 %	23	5	21,7 %	0	0,0 %
Região 1B	Cromo	37,3	90	mg/kg	102	62	60,8 %	6	5,9 %	160	113	70,6 %	9	5,6 %	50	38	76,0 %	0	0,0 %	23	16	69,6 %	0	0,0 %
Região 1B	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	102	11	10,8 %	0	0,0 %	160	27	16,9 %	0	0,0 %	48	2	4,2 %	0	0,0 %	23	1	4,3 %	0	0,0 %
Região 1B	Níquel	18	35,9	mg/kg	102	58	56,9 %	23	22,5 %	160	125	78,1 %	37	23,1 %	50	31	62,0 %	4	8,0 %	23	10	43,5 %	1	4,3 %
Região 1B	Zinco	123	315	mg/kg	102	1	1,0 %	0	0,0 %	160	3	1,9 %	0	0,0 %	50	0	0,0 %	0	0,0 %	23	1	4,3 %	0	0,0 %

Obs.: Os percentuais de superação dos valores orientadores para cada parâmetro no período de chuva de cada ano, foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das superações em relação ao ciclo de chuva anterior.

.Fonte: Arcadis, 2022.

Tabela 13-13.313.3-3: Percentuais de concentrações acima dos níveis 1 e 2 da CONAMA 454/12 para chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.

		-			Chuva - Janeiro a Março/2019					Chuva - Outubro/2019 a Março/2020					Chuva - Outubro/2020 a Março/2021					Chuva - Outubro/2021 a Março/2022				
Região	Parâmetro	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
Região 2A	Arsênio	5,9	17	mg/kg	87	57	65,5 %	2	2,3 %	246	59	24,0 %	0	0,0 %	140	108	77,1 %	3	2,1 %	44	14	31,8 %	0	0,0 %
Região 2A	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	87	1	1,1 %	0	0,0 %	246	0	0,0 %	0	0,0 %	140	5	3,6 %	2	1,4 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Chumbo	35	91,3	mg/kg	87	3	3,4 %	0	0,0 %	246	16	6,5 %	0	0,0 %	140	0	0,0 %	0	0,0 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Cobre	35,7	197	mg/kg	87	54	62,1 %	0	0,0 %	246	17	6,9 %	0	0,0 %	140	21	15,0 %	0	0,0 %	44	1	2,3 %	0	0,0 %
Região 2A	Cromo	37,3	90	mg/kg	87	80	92,0 %	6	6,9 %	246	117	47,6 %	42	17,1 %	140	87	62,1 %	2	1,4 %	44	13	29,5 %	0	0,0 %
Região 2A	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	87	1	1,1 %	0	0,0 %	246	0	0,0 %	0	0,0 %	140	0	0,0 %	0	0,0 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2A	Níquel	18	35,9	mg/kg	87	62	71,3 %	10	11,5 %	246	74	30,1 %	14	5,7 %	140	58	41,4 %	6	4,3 %	44	5	11,4 %	0	0,0 %
Região 2A	Zinco	123	315	mg/kg	87	0	0,0 %	0	0,0 %	246	2	0,8 %	0	0,0 %	140	0	0,0 %	0	0,0 %	44	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Arsênio	5,9	17	mg/kg	10	10	100,0 %	3	30,0 %	77	74	96,1 %	11	14,3 %	67	65	97,0 %	5	7,5 %	51	47	92,2 %	5	9,8 %
Região 2B	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	77	0	0,0 %	0	0,0 %	67	2	3,0 %	2	3,0 %	51	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Chumbo	35	91,3	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	77	31	40,3 %	0	0,0 %	67	2	3,0 %	0	0,0 %	51	4	7,8 %	0	0,0 %
Região 2B	Cobre	35,7	197	mg/kg	10	10	100,0 %	0	0,0 %	77	57	74,0 %	0	0,0 %	67	27	40,3 %	0	0,0 %	51	44	86,3 %	0	0,0 %
Região 2B	Cromo	37,3	90	mg/kg	10	10	100,0 %	0	0,0 %	77	76	98,7 %	13	16,9 %	67	60	89,6 %	2	3,0 %	51	48	94,1 %	4	7,8 %
Região 2B	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	76	0	0,0 %	0	0,0 %	67	1	1,5 %	0	0,0 %	50	1	2,0 %	0	0,0 %
Região 2B	Níquel	18	35,9	mg/kg	10	10	100,0 %	3	30,0 %	77	69	89,6 %	2	2,6 %	67	45	67,2 %	13	19,4 %	51	44	86,3 %	0	0,0 %
Região 2B	Zinco	123	315	mg/kg	10	0	0,0 %	0	0,0 %	77	0	0,0 %	0	0,0 %	67	0	0,0 %	0	0,0 %	51	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Arsênio	5,9	17	mg/kg	25	5	20,0 %	0	0,0 %	27	12	44,4 %	0	0,0 %	21	14	66,7 %	0	0,0 %	18	11	61,1 %	0	0,0 %
Região 2C	Cádmio	0,6	3,5	mg/kg	25	0	0,0 %	0	0,0 %	27	1	3,7 %	1	3,7 %	21	1	4,8 %	0	0,0 %	18	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Chumbo	35	91,3	mg/kg	25	1	4,0 %	1	4,0 %	27	1	3,7 %	0	0,0 %	21	0	0,0 %	0	0,0 %	18	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Cobre	35,7	197	mg/kg	25	19	76,0 %	0	0,0 %	27	1	3,7 %	0	0,0 %	21	0	0,0 %	0	0,0 %	18	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Cromo	37,3	90	mg/kg	25	16	64,0 %	0	0,0 %	27	8	29,6 %	0	0,0 %	21	6	28,6 %	0	0,0 %	18	7	38,9 %	0	0,0 %
Região 2C	Mercúrio	0,17	0,486	mg/kg	25	0	0,0 %	0	0,0 %	27	0	0,0 %	0	0,0 %	21	0	0,0 %	0	0,0 %	18	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Níquel	18	35,9	mg/kg	25	8	32,0 %	0	0,0 %	27	4	14,8 %	0	0,0 %	21	2	9,5 %	1	4,8 %	18	0	0,0 %	0	0,0 %
Região 2C	Zinco	123	315	mg/kg	25	0	0,0 %	0	0,0 %	27	0	0,0 %	0	0,0 %	21	0	0,0 %	0	0,0 %	18	0	0,0 %	0	0,0 %

Obs.: Os percentuais de superação dos valores orientadores para cada parâmetro no período de chuva de cada ano, foram ilustrados com setas indicando o aumento, redução ou manutenção das superações em relação ao ciclo de chuva anterior.

Fonte: Arcadis, 2022

- **Região Montante**

Esta região está localizada a montante da Barragem B1, contemplando área de saída do reservatório da Barragem B6 (PT-47E), incluindo, ribeirão Samambaia (PASU-07 e PT-07); a confluência com o córrego Feijão e o ribeirão Casa Branca (PT-10), este último participa no transporte de sedimentos provenientes de rochas do Grupo Nova Lima. 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 à montante da região afetada pelo rompimento da barragem B1, B4, B4A tendenciam a depositar sedimentos em áreas suscetíveis como margens de rio, áreas de remanso e na sua própria calha.

No período correspondente ao primeiro período chuvoso (janeiro/2019 a março/2019), os parâmetros que ultrapassaram o nível 1 do CONAMA 454/12 foram o As, Cu, Cr e Ni, sendo que o 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 início do segundo período chuvoso (outubro/2019 a março/2020), constatou-se que o As, Cr, e o Zn ultrapassaram o nível 1, sendo que, ocorreu aumento em relação ao nível 2 para o As e Cr, enquanto para o Ni e Cu houve redução no percentual ultrapassado em relação ao nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 no período anterior. Desta forma, além do intemperismo antrópico ou natural de solos e rochas que disponibilizam minerais para o rio Paraopeba, considerou-se também que as chuvas intensas de 2019/2020 podem ter mobilizado ainda mais sedimentos, seja em suspensão, por arraste ou até erosão de margens com minerais ou argilominerais contendo esses elementos e que puderam ser acumulados na calha do rio.

No período chuvoso 2020/2021, tendo em vista os desvios, observa-se que na região montante, houve elevação no percentual de desvios da CONAMA 454/12 nível 1 para Cr e Hg, ocorrendo elevação do percentual de desvios do nível 2 apenas para o Ni. Apesar do período ser chuvoso, com maior possibilidade de elevação dos percentuais de desvio, notou-se a redução destes percentuais para o nível 1 da CONAMA 454/12 no As, Cu e Ni, e no nível 2 para o As e Cr. Por fim, o Cd, Pb e o Zn não apresentaram desvios no período.

Para o período chuvoso de (outubro/2021 a março/2022), tendo em vista os valores orientadores da Resolução CONAMA 454/12, observa-se que na região montante houve redução no percentual de desvios da CONAMA 454 nível 1 para As (13 desvios, 81,3%), Cu e Hg (não houve desvios). Já para Cr (15 desvios, 93,8%) e Ni (8 desvios, 50%) ocorreu aumento em relação ao período chuvoso anterior. Em relação ao nível 2, somente As apresentou desvio (1 desvio, 6,3%). Os demais parâmetros não apresentaram desvios para o período em questão.

- **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, escavou uma área para acúmulo de água e sedimentos sendo limitada pela cortina metálica. A água represada proveniente do ribeirão Ferro-Carvão é vertida para as estações de tratamento de água ETAF 1 e ETAF 2 e, depois de tratada é lançada de volta ao rio Paraopeba.

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 chuvoso (janeiro a março/2019), os parâmetros As, Cu, Hg e Ni apresentaram desvio em relação ao nível 1 do CONAMA 454/12, e não houve nenhum parâmetro com concentrações acima do nível 2.

No início do segundo período chuvoso (outubro a março/2020), constatou-se aumento nas concentrações acima do nível 1 em relação ao período chuvoso anterior e estiagem para As, Cd, Cu, Cr, Pb Hg, Pb e Ni. Para o nível 2, também houve aumento em menor porcentagem para Cd, Cu, Cr e Ni, inclusive em relação ao período de estiagem. Os meses de janeiro a março de 2020 foram marcados por chuvas. Os aumentos em relação aos valores orientadores foram maiores em porcentagem que no período de outubro a dezembro/2019 para Pb, Hg e Ni, As, os quais superaram o nível 1 e nível 2 (somente As e Ni). Esse aumento foi atribuído ao acúmulo de sedimentos da bacia do rio Paraopeba e rejeitos da Mina Córrego do Feijão em consequência das ações de engenharia para contenção de rejeitos e tratamento da água na bacia do rio Paraopeba, haja vista o represamento da água e consequente decantação de sedimentos no leito que pudessem estar em suspensão.

No período chuvoso 2020/2021, os principais comportamentos dos percentuais de desvio da legislação na região Ferro-Carvão foram as elevações para o nível 1, no As, Cu, Pb, Hg e Ni, sendo que Cr, Cu e Ni, também, apresentaram elevação do percentual de desvios para o nível 2.

Em relação ao período chuvoso de 2021/2022 foi possível observar aumento dos desvios em relação ao período de chuva anterior para As (45 desvios, 100%), Cd (25 desvios, 55,6%) e Cu (44 desvios, 97,8%). Já os parâmetros que apresentaram redução, foram: Pb (14 desvios, 31,1%), Cr (9 desvios, 20%), Hg (2 desvios, 4,4%) e Ni (41 desvios, 91,1%). Para Zn não houve desvios. Para o nível 2, houve desvios para As (11 desvios, 24,4%), sendo observado aumento, já para Ni percebe-se redução (22 desvios - 48,9%). Isso pode estar relacionado com o aumento de sedimentos finos nas chuvas de 2021/2022.

Os aumentos das concentrações de um período para outro de chuva, podem ser decorrentes de contribuições de sedimentos mais finos que se acumularam na bacia de decantação em relação ao período anterior, que possuem capacidade de adsorverem metais. Como observados 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 e nela se depositaram sedimentos com característica química de rejeitos, conforme demonstrado no relatório de Fechamento de ciclo de abril/2021, elaborado pela Arcadis e os resultados analíticos estão associados com o rejeito e transportes naturais de materiais da própria bacia. Adicionalmente, a região 1A está disposta sobre rochas metavulcanossedimentares dos Grupo Itabira (Fm Cauê), Grupo Sabará e rochas gnáissicas do Complexo Bonfim. Os primeiros grupos podem conter minerais compostos por As, Cu, Ni e a disposição desses elementos no leito do rio Paraopeba também podem ser decorrentes 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).

No primeiro período chuvoso (janeiro a março/2019), as concentrações de As, Cu, Pb, Cr, Zn e Ni ultrapassaram o nível 1 do CONAMA 454/12, sendo as amostras maiores que o nível 2 para Pb, Cu e Ni.

No segundo período chuvoso (outubro/2019 a março/2020), constatou-se aumento nas concentrações (e percentual de desvios) tanto para o nível 1 quanto para o nível 2, em relação a estiagem e ao primeiro período chuvoso para As, Cr, Pb e Ni. O Cd, Cu, Hg e Ni, apresentaram desvios em relação ao nível 1, porém com percentuais inferiores aos observados no período de estiagem. Nos meses de janeiro a março de 2020, constatou-se que os aumentos acima do nível 1 se mantiveram para As, Pb, Cu e Ni, porém, tais aumentos foram menores em comparação com os meses de outubro a dezembro/2019, sugerindo que, apesar da intensidade das chuvas e elevação do nível de água do rio, as contribuições de aporte de sedimentos causados por eventuais erosões e deposições das margens do rio, bem como mobilizações associadas ao transporte do rejeito da barragem B1 e as remobilizações do leito do rio, foram menores.

No período chuvoso 2020/2021, na Região 1A observaram-se os seguintes comportamentos em relação aos desvios para nível 1: elevação para As e Hg; somente o Ni apresentou também elevação do percentual de desvios do nível 2. Houve redução do percentual de desvios para o nível 1 da legislação para o Cr, Cu, Ni e Pb. Não foram registrados desvios para o Cd e o Zn, e não foram registrados desvios para o nível 2 para os demais parâmetros. Ao longo do monitoramento observou-se elevações do percentual de As em relação ao Nível 1 da CONAMA 454/12. De modo geral, para os demais elementos observou-se elevações nos percentuais de desvios para o Nível 1, resultado do aumento da vazão do corpo hídrico.

Para a região 1A no período de chuva de 2021/2022 os parâmetros que apresentaram elevação do percentual de desvios para nível 1 foram: As (58 desvios, 77,3%), Cd (2 desvios, 2,7%), Pb (1 desvio, 1,4%) e Cr (20 desvios, 27%). Já os parâmetros que apresentaram redução foram: Cu (10 desvios, 13,5%) e Ni (20 desvios, 26,7%). Para o parâmetro Zn não ocorreram desvios. Para o nível 2 houve aumento dos desvios apenas para As (4 desvios, 5,3%) e redução para Ni (2 desvios, 2,7%). Para os demais parâmetros não ocorreram concentrações acima do nível 2 no período de chuva avaliado.

- **Região 1B**

A região 1B está posicionada em área afetada pelo rejeito das barragens B1, B4, B4A, disposta sobre rochas metavulcânicas do Grupo Itabira/Sabará, em unidades máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima e sobre granitóides e gnaisses do Complexo Bonfim. Portanto, a presença de Ni, Cu, As e Cr nos sedimentos de corrente observadas ao longo do período de monitoramento, sugere contribuições da própria bacia, seja de lixiviação de minerais, seja de contribuição antrópica e de contribuição de metais provenientes da barragem B1, neste último especificamente para Ni e Cu, visto que Cr e As tiveram ocorrência muito baixa no rejeito.

No período chuvoso de 2019 (janeiro a março/2019), os parâmetros As, Pb, Cu, Cr, Hg, Zn e Ni tiveram concentrações maiores que o nível 1 do CONAMA 454/12. Já para o nível 2, apenas As, Cr e Ni apresentaram desvios.

No início do segundo período chuvoso (outubro/2019 a março/2020), constatou-se desvios para As, Cu, Cr, Pb, Hg, Ni e Zn em relação ao nível 1 da legislação. Nos meses de janeiro a março de 2020, constataram-se que os aumentos acima do nível 1 se mantiveram para As, Pb, Cu, Hg e Ni. Com exceção do As, que teve mais aumentos nesses meses em relação ao início do período chuvoso, os demais parâmetros tiveram menores aumentos em relação ao valor orientador do CONAMA 454/12 no final do período chuvoso.

No ciclo de chuvas 2020/2021, na Região 1B, observou-se elevação do percentual de desvios da CONAMA 454/12 nível 1 apenas para o As e Cr. Houve redução dos percentuais de desvios para Cu, Pb, Hg, Ni e Zn. Para o nível 2, As e Ni apresentaram redução de desvios em relação ao período chuvoso anterior, e os demais não apresentaram desvios neste período chuvoso.

Para o período de chuva de 2021/2022 os parâmetros que superam os valores orientadores nível 1, foram: Cd, Pb, Hg e Zn, todos apresentando 1 desvio em 23 amostras analisadas, correspondendo a uma porcentagem de 4,3% das amostras. Já os parâmetros que apresentaram redução dos desvios, foram: As (21 desvios, 91,3%), Cu (5 desvios, 21,7%), Cr (16 desvios, 69,6%) e Ni (10 desvios, 43,5%). Para os nível 2, somente As e Ni apresentaram desvios (1 desvio, 4,3%).

- **Região 2A**

No período de chuva de 2019 (janeiro a março), os metais que apresentaram desvios em relação ao valor orientador nível 1 foram As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg e Ni, e para o nível 2, foram As, Cr e Ni. O metal Zn não apresentou desvios em relação ao nível 1 e 2 da legislação.

Na chuva de 2019/2020, apresentaram redução na percentagem de desvios, em relação à chuva de 2019, As, Cd, Cu, Cr, Hg e Ni para o nível 1, sendo que para o nível 2, também foi possível verificar redução para o As e Ni. Os parâmetros Pb e Zn apresentaram elevação e relação ao período chuvosos anterior, e o Cr, apresentou elevação em relação ao nível 2.

Quanto ao período de chuva 2020/2021, foi observado incremento em relação ao período anterior para o As, Cd, Cu, Cr e Ni em relação ao nível 1, e para o As e Cd em relação ao nível 2. Neste período, ocorreram reduções de desvios para Cr e Ni, considerando o nível 2 da legislação, e os demais parâmetros não apresentaram desvios.

Observou-se que, na Região 2A no período de chuva 2021/2022, comportamento de redução do percentual de desvios da legislação nível 1 para: As (14 desvios, 31,8% das amostras), Cu (1 desvio, 2,3% das amostras), Cr (13 desvios, 29,5% das amostras) e Ni (5 desvios, 11,4% das amostras) e nenhum desvio para o nível 2 da legislação. O parâmetro Pb não apresentou desvios para os dois últimos períodos chuvosos e o parâmetros Zn apresentou comportamento similar de não apresentar desvios para ambos os níveis ao longo de todos os períodos de chuva considerados, com exceção da chuva 2019/2020, onde foram verificados 2 desvios (0,8% das amostras) para nível 1.

- **Região 2B**

No período de chuva de 2019 (janeiro a março), As, Cu, Cr e Ni apresentaram desvios para o nível 1 da CONAMA 454/12. Destes, apenas As e Ni apresentaram desvio para o nível 2 da legislação.

Na chuva de 2019/2020, houve aumento de percentual de desvios para o nível 1 de Pb, enquanto os demais, As, Cu, Cr e Ni apresentaram reduções. Para o nível 2, As e Ni apresentaram redução, e Cr, elevação. O reservatório da UHE Retiro Baixo tem operado como um decantador e acumulador de sedimentos da bacia do rio Paraopeba. Na estiagem, com a redução da velocidade e vazão do rio, os metais presentes na bacia tendem a se complexarem e se depositarem no leito do reservatório, e no período chuvoso, ocorre um maior transporte desses elementos, o que pode ocasionar maiores concentrações de metais.

Quanto ao período de chuva 2020/2021, ocorreu aumento das concentrações de As, Cd e Hg para o nível 1 em relação ao período anterior, e para o nível 2, Cd e Ni apresentaram elevação. O parâmetro Zn não apresentou concentração acima dos níveis preconizados na legislação, assim como nos períodos anteriores.

Na Região 2B, ao longo do período de chuva 2021/2022, observou-se, que os metais Pb (4 desvios, 7,8%), Cu (44 desvios, 86,3%), Cr (48 desvios, 94,1%), Hg (1 desvio, 2%) e Ni (44 desvios, 86,3%) apresentaram aumento nos percentuais de desvios da legislação em seu nível 1, em relação ao período chuvoso anterior. Apresentaram comportamento de redução

de desvios, o As (5 desvios, 9,8%) e Cd (nenhum desvio). Para o nível 2, somente As (5 desvios – 9,8%) e Cr (4 desvios – 7,8%) apresentaram desvios.

- **Região 2C**

No período de chuva de 2019 (janeiro a março/2019), os parâmetros em desacordo com o nível 1 da CONAMA 454/12 foram: As, Pb, Cu, Cr e Ni. Para o nível 2, apenas 1 desvio, correspondente ao Pb foi contabilizado.

No segundo período de chuva (outubro/2019 a março/2020), os metais As e Cd apresentaram aumento na percentagem de desvios em relação ao nível 1, e apenas uma amostra de Cd violou o nível 2. Ao comparar os períodos, verifica-se que tanto o Hg quanto o Zn não apresentaram desvios para nenhum dos níveis.

Para a chuva de 2020/2021, constatou-se aumento dos desvios também para As e Cd, se tratando de nível 1, e para o Ni, aumento dos desvios para o nível 2.

A região 2C apresentou desvios pontuais no período de chuva de 2021/2022, sendo verificado redução de desvios para nível 1 de As (11 desvios, 61,1%) e aumento para Cr (7 desvios, 38,9%). Cd, Pb, Cu, Hg, Ni e Zn não apresentaram desvios neste período.

Observa-se que ao longo do monitoramento, ocorreu redução da quantidade de parâmetros que apresentaram concentrações acima dos níveis 1 e 2 da legislação, indicando a possibilidade da dispersão dos elementos nesta região.

13.4 Distribuição espacial dos parâmetros - Mapas temáticos

Os mapas temáticos presentes no ANEXO VIII permitem visualizar a evolução espacial dos metais mês a mês ao longo da bacia do rio Paraopeba durante todo o período de janeiro/2019 a março/2022, enquanto os mapas apresentados ao longo deste texto mostram o consolidado da evolução dos metais ao longo dos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. 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 Costa (2015) adotada pelo IGAM, visto que não há valores de comparação no CONAMA 454/12.

Manganês

A figura 13.4-1 indica o consolidado dos períodos de chuva de 2019 até 2021/2022. 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 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 chuva 2019. Elas foram até 5 vezes maiores que o valor orientador de Vicq (2015) que é de 3300mg/kg nas regiões 1A e 1B, enquanto na região 2A, as concentrações máximas ficaram 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. Nesse período de chuva iniciou-se o processo de dissipação das concentrações de manganês provenientes do rejeito (vide anexo VIII), enquanto na maioria dos tributários, as concentrações se mantiveram com característica de sedimentos naturais.

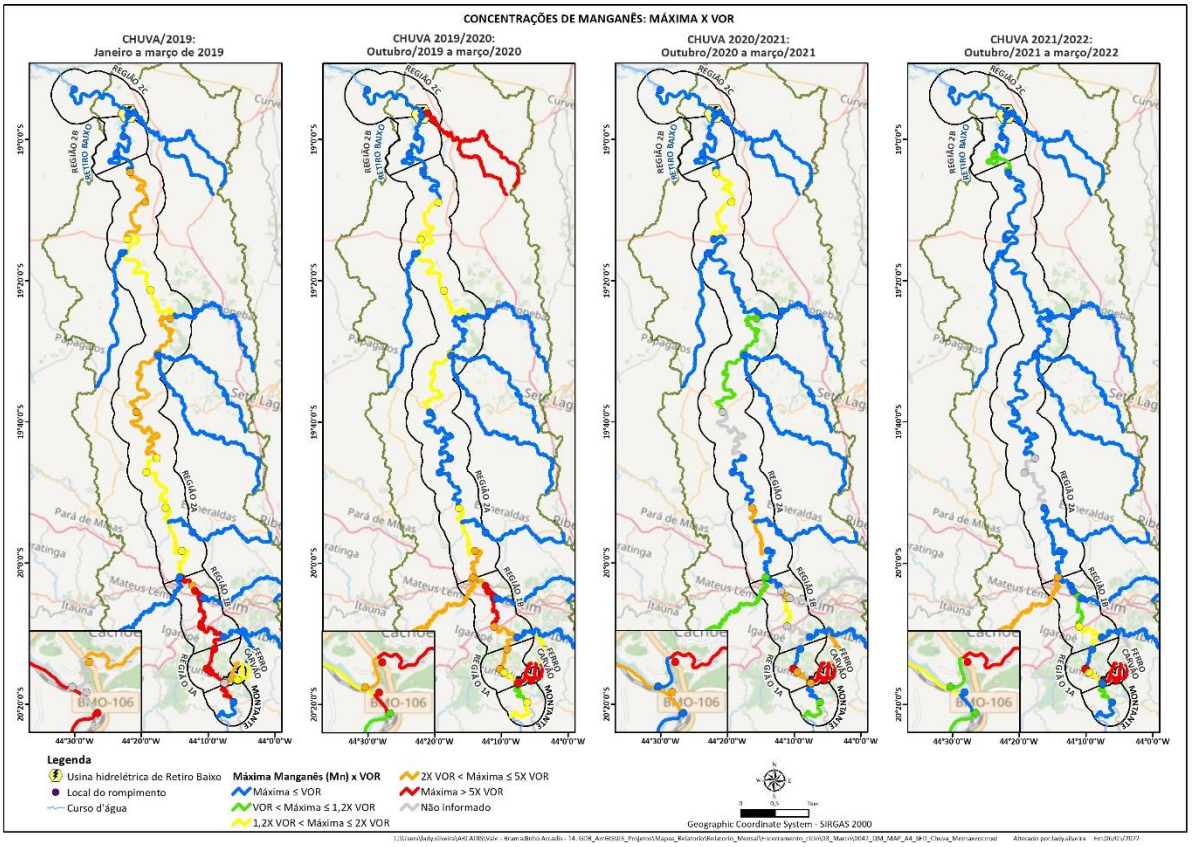
Na chuva de 2019/2020, de forma geral, observou-se que as concentrações se atenuaram em relação à referência de Vicq (2015) nas regiões 1A até 2A, sendo que as maiores concentrações ficaram persistentes na região fonte, do ribeirão Ferro-Carvão, e em seguida a região 1B, com valores até 5 vezes a referência de Vicq (2015). Na região 2A, apenas no início desse trecho percebeu-se aumento das concentrações de forma localizada nas proximidades do PT-53, 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.

No período de chuva de 2020/2021, as concentrações de manganês no rio Paraopeba permaneceram até 5 vezes o valor de Vicq (2015) na região fonte (ribeirão Ferro-Carvão) e, pontualmente, na região 1A. Já nas demais regiões, ocorreram incrementos de concentrações de forma localizada em relação ao período de chuva anterior, ficando a maior parte dos trechos com valores característicos aqueles verificados em sedimentos naturais. Ainda sobre as elevações verificadas, observa-se uma grande transição da situação do tributário da região 2C, passando de concentrações 5 vezes acima da referência (chuva 2019/2020) para concentrações inferiores ao VOR (chuva 2020/2021), o que pode estar relacionado as atividades de uso e ocupação do solo ocorrentes no período supracitado.

Para o último período de chuva, 2021/2022, verifica-se persistência de concentrações 5 vezes maior que a referência Vicq (2015) nas mesmas localidades do período anterior, Ferro Carvão e Região 1A. Para as regiões à jusante dessa, nota-se um comportamento predominante de redução das concentrações de manganês. Acúmulos pontuais foram observados no PT-20 na entrada do reservatório da UHE Retiro Baixo, onde o ambiente muda de lótico para intermediário, a velocidade da água é reduzida e os materiais transportados se dissiparam e depositaram nessas localidades, ainda que em concentrações até 1,2 vezes o valor de Vicq (2015), mas ainda manteve a característica de sedimento natural (vide capítulo 13).

Ao se avaliar a distribuição do Manganês, compreendendo os períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 (Figura 13.4-1), constatou-se, de modo geral, atenuação ao longo do tempo e espaço, com persistência de concentrações mais elevadas predominantemente na região do Ferro-Carvão e 1A, regiões mais afetada pelo rejeito das barragens, sendo que as demais regiões 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, 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 13.4.1: Evolução do Manganês no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



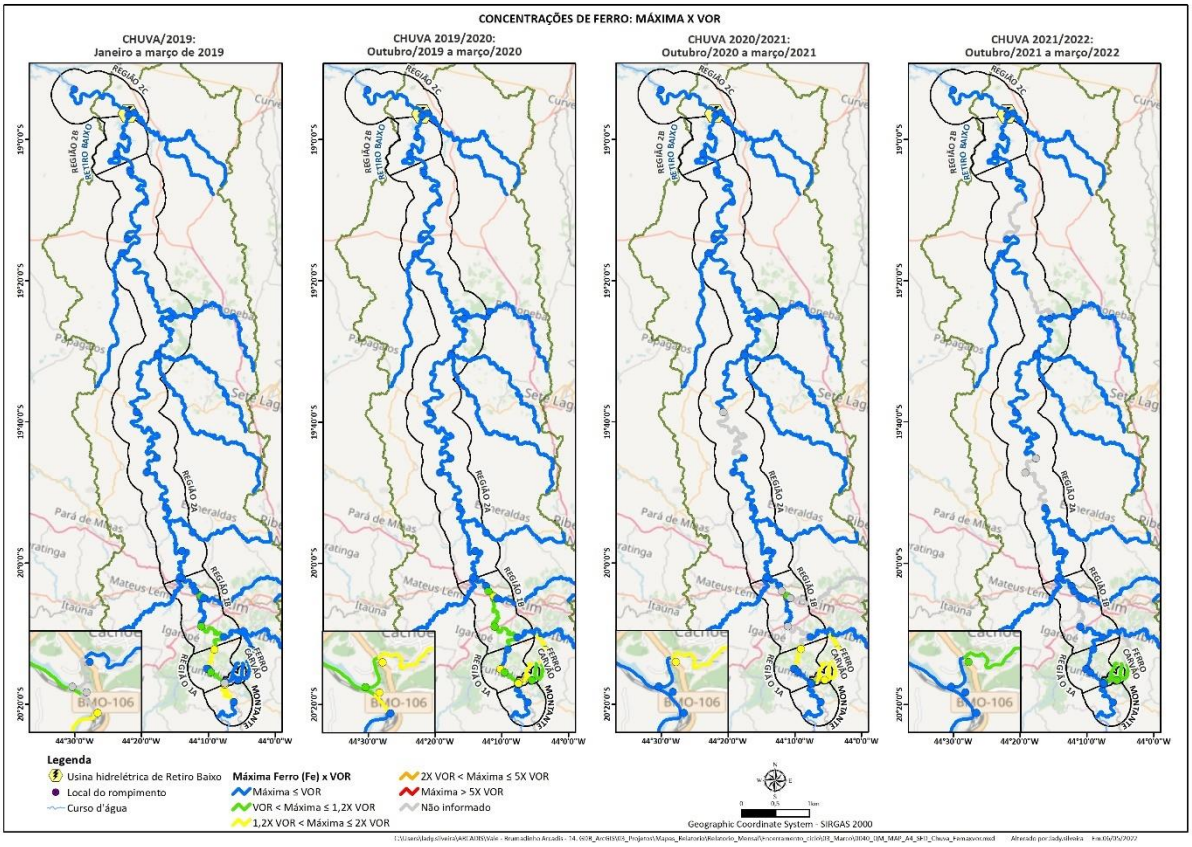
Ferro

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 chuva de 2019, as elevadas concentrações 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. A região Ferro–Carvão apresentou concentrações de Ferro abaixo da referência. Já nas regiões a jusante, os valores máximos ficaram até 1,2 e 2 vezes acima do VOR (região 1A) e entre o VOR e 1,2 vezes ele mesmo (região 1B).

De modo geral, ao se avaliar a distribuição do Ferro, compreendendo os períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 (Figura 12.4-2), as concentrações demonstraram redução ao longo da do tempo e espaço. Observa-se ainda que do período de chuva de 2019/2020 a 2020/2021 na região de Ferro Carvão e 1A havia concentrações mais elevadas do material, enquanto na chuva 2021/2022 essa disposição espacial se reduziu, não havendo variações espaciais de Ferro em nenhuma região, apenas no tributário de Ferro Carvão.

Figura 13.4.2: Evolução do Ferro no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Alumínio

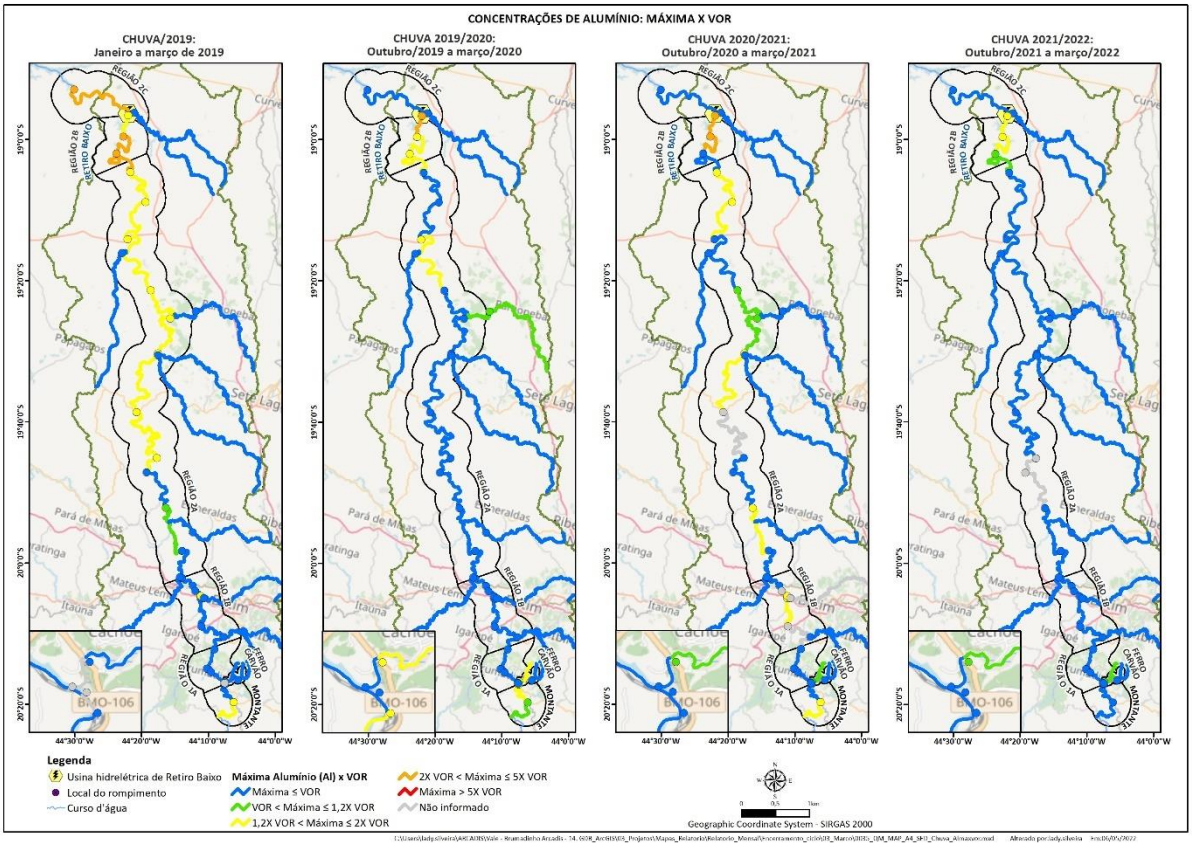
O Alumínio, que é um elemento abundante na bacia do rio Paraopeba, não o é no rejeito da Barragem B1 conforme já identificado por Geoenviron (2019) e Arcadis (2020, 2021) na avaliação da qualidade dos sedimentos. Ao se avaliar a distribuição dessa substância ao longo do rio, constatou-se que, nas regiões 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 chuva, 2019, enquanto nas regiões montante e parte da região 2A (a partir de PT-18, principalmente) as concentrações foram entre 1,2 a 2 vezes o valor proposto por Vicq (2015), e na 2B e 2C, de forma majoritária, entre 2 a 5 vezes o valor de referência.

Na chuva 2019/2020, as concentrações foram mais atenuadas nas regiões 1A a 2A, até um pouco a jusante do PT-49, enquanto nas regiões Montante e Ferro-Carvão, os valores de concentração de Alumínio foram até 1,2, 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 nesse período sazonal, 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.

Comparando-se os resultados das concentrações máximas de Alumínio da chuva 2019/2020 com a de 2020/2021, percebeu-se que foram semelhantes, exceto pelo ribeirão Ferro Carvão, que teve redução das concentração, na região 2A na qual no período de chuva 2020/2021 apresentou elevação das concentrações de Alumínio de forma localizada, mas ainda assim, atingindo a mesma máxima do período anterior, de até 2 vezes o valor proposto por Vicq (2015), e na região 2B, apresentou valor maior que o constatado no período anterior em parte do trecho.

Ao se avaliar o Alumínio nos mapas temáticos para as chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022 (Figura 12.4-3) tem-se a evidência de que as reduções não foram contínuas ao longo dos períodos, entretanto, para o último período de chuva, tal elemento ocorreu em maiores quantidades, apenas na região do reservatório, ficando até 2 vezes o valor de referência, sendo possível que essa condição esteja associada ao regime de fluxo intermediário à lêntico 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), além de outros materiais que são transportados e acumulados neste reservatório. Observa-se ainda que no primeiro período de chuva, 2019, havia disposição espacial de Alumínio acima do proposto por Vicq (2015) na região 2C, atingindo valores até 5 vezes acima do VOR, e isto, não foi verificado nos períodos de chuva posteriores.

Figura 13.4.3: Evolução do Alumínio no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Níquel

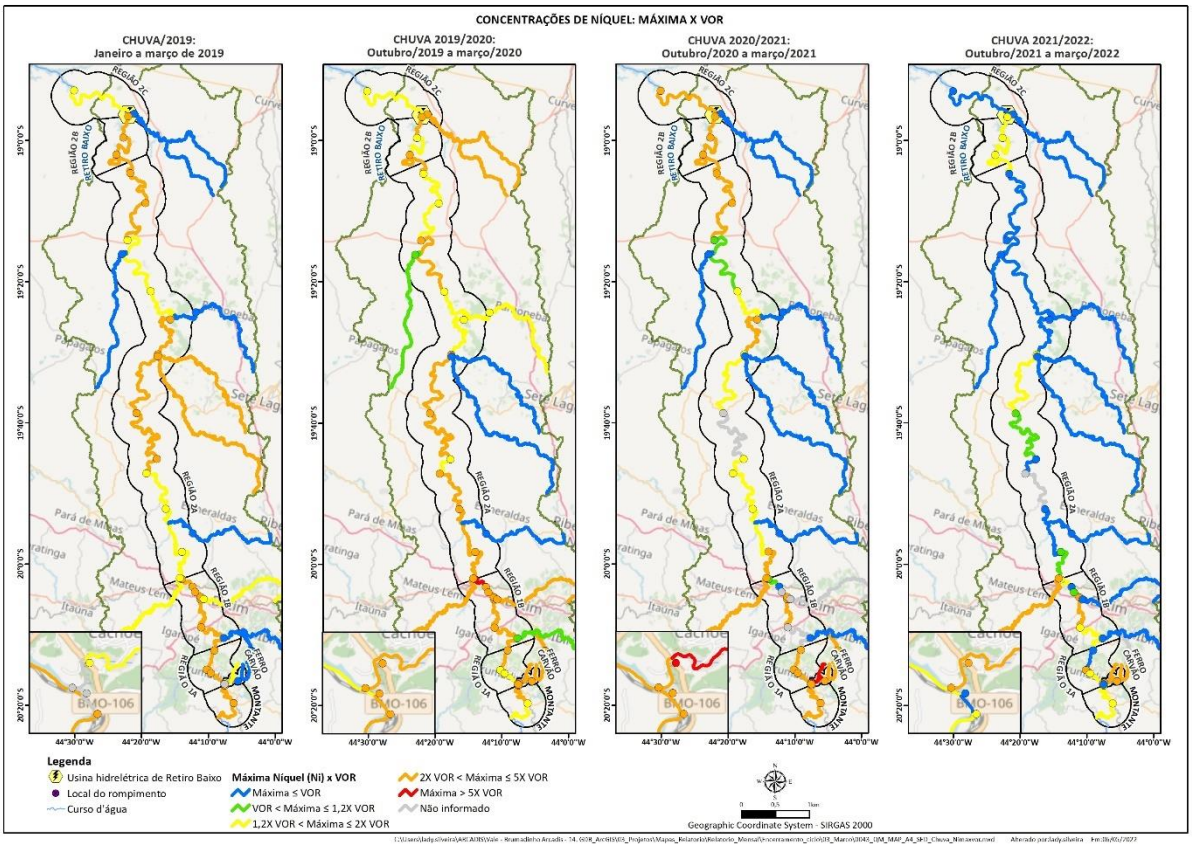
A figura 12.4-4 abaixo, as concentrações de Níquel estão apresentadas por períodos sazonais de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. Notadamente, com o rompimento da barragem, percebeu-se um incremento de níquel perceptível em termos de variação de concentração ao longo de todas as regiões, sendo as menores concentrações desse elemento verificadas nos tributários. No primeiro período chuvoso de 2019, as concentrações ainda estavam com características de sedimento natural no Ferro Carvão, entretanto, já apresentando valores mais elevados de Níquel para os demais trechos. A partir do período de chuva 2019/2020, foi perceptível o aumento nas concentrações em relação a Resolução CONAMA 454/12 também na região de Ferro Carvão, ficando entre 2 e 5 vezes acima do valor de referência (2019/2020 e 2021/2022) e acima de 5 vezes o VOR (2020/2021).

No período da chuva de 2019/2020, constatou-se que as concentrações de Ni foram maiores nas regiões do Ferro-Carvão, nos tributários da região 1B, e de forma localizada ao longo da região 2A e tributários da 2B. Percebe-se com isso que, 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 em várias regiões.

Já chuva de 2020/2021, as concentrações de Níquel em comparação com as chuvas anteriores apresentarão redução no início da região 2A bem como em seus tributários, e incremento desse elemento na região 2B de forma localizada e 2C, alcançando valores entre 2 e 5 vezes maior que a referência. Já na região de Ferro Carvão, área com água estancada (PT-12), as concentrações mantiveram-se altas, até 5 vezes acima do valor de referência da Resolução CONAMA 454/12.

No último período de chuva, 2021/2022, o panorama geral é de redução das concentrações de Níquel ao longo da bacia, com exceção da região de Ferro Carvão que continua apresentando as concentrações mais altas, entre 2 e 5 vezes o valor de referência. Observa-se ainda que a partir da porção média da região 2A (PT-16 a PT-17), as concentrações máximas ficaram entre 1,2 e 2 vezes o valor orientador.

Figura 13.4.4: Evolução do Níquel no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Cobre

Na figura 12.4-5 abaixo, está representado por períodos sazonais de chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. Com rompimento da barragem, percebeu-se um incremento de cobre no rio Paraopeba seja por causa das contribuições provenientes do rejeito da barragem B1, B4, B4A em que as concentrações no ribeirão Ferro-Carvão foram cerca de 5 vezes maiores que o nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, a partir do período de chuva 2019/2020, seja

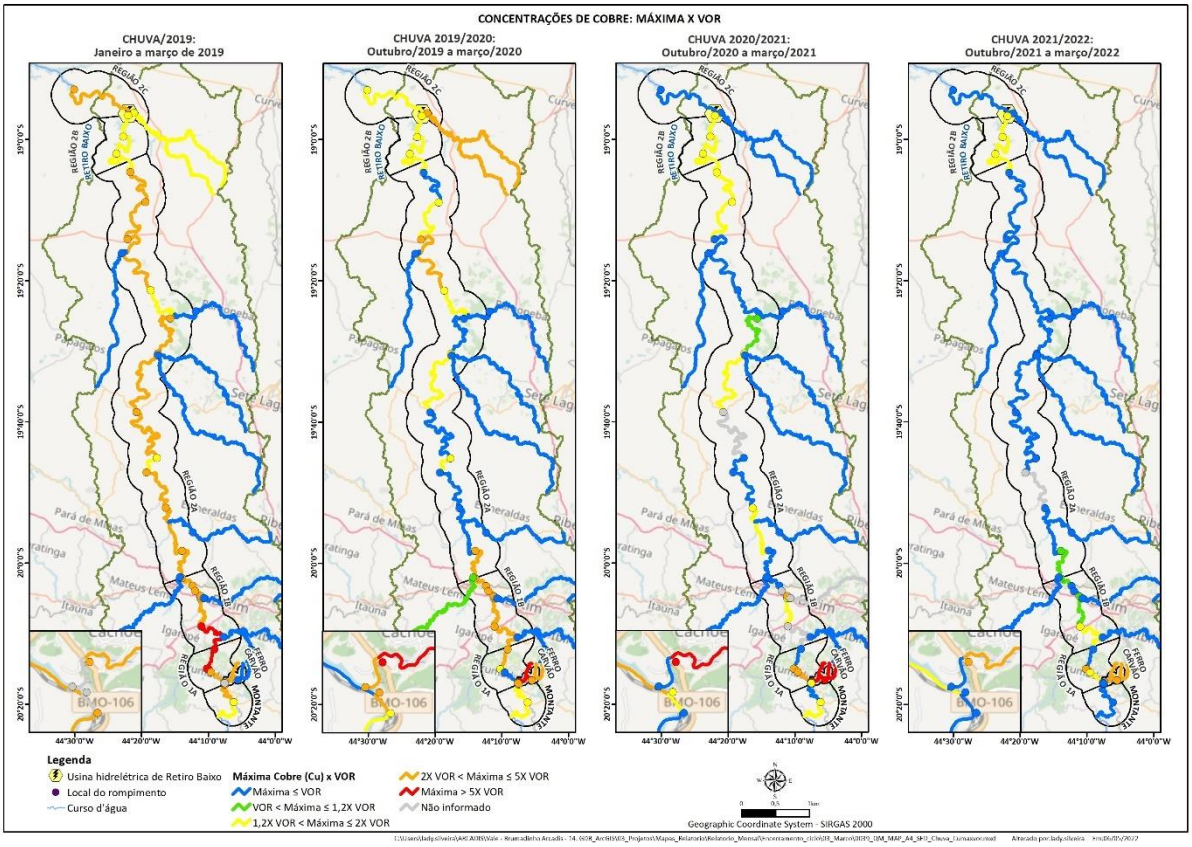
por causa de contribuições naturais provenientes da bacia como na região 1B devido a presença de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima.

Na chuva de 2019, as concentrações ficaram entre 2 a 5 vezes maiores em relação ao valor orientador do Cobre nas regiões do Ferro-Carvão, 1A a 2A, bem como 2C, enquanto região 2B o valor máximo verificado foi de 2 vezes a Resolução CONAMA 454/12. No período de 2019/2020, em relação a chuva anterior, as concentrações de Cobre foram menos expressivas na maior parte dos trechos e no Ferro-Carvão ficaram um pouco mais elevadas na região do PT-12, provavelmente por reflexo da condição hidrodinâmica alterada para lêntica nesta localidade e da presença de cobre no rejeito da barragem como se observou nos resultados das análises dos rejeitos elaborados por Geoenviron (2019).

Na chuva de 2020/2021, as reduções continuar ocorrendo ao longo das regiões, sendo o máximo verificado em Ferro Carvão, acima de 5 vezes o valor orientador. Para o último período chuvoso, 2021/2022, as concentrações continuaram a apresentar comportamento de redução, ficando com características de sedimento natural as regiões de Montante, 2A e 2C, em toda extensão, enquanto em Ferro Carvão ficaram entre 2 e 5 vezes maior que a Resolução CONAMA 454/12.

Ao avaliar a distribuição do Cobre, compreendendo os períodos de chuva supramencionados, percebe-se que as concentrações demonstram redução ao longo da evolução temporal e da espacial. Na chuva de 2019, havia disposição espacial de Cobre acima da legislação em todas as regiões, ao passo que, em 2021/2022, essa disposição se reduziu significativamente, ocupando no mapa, concentrações de no máximo 5 vezes o valor orientador, especificamente no Ferro-Carvão e próximo ao PT-02 na região 1A. Na Região 1B, as concentrações atingiram o limite máximo de até duas vezes o valor orientador, e de forma análoga na Região 2B. Nas demais regiões, 2A e 2C, predominou-se sedimento com características naturais, sendo que os máximos verificados foram de 1,2 vezes o valor orientador e menor que o valor orientador, respectivamente.

Figura 13.4.5: Evolução do Cobre no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Chumbo

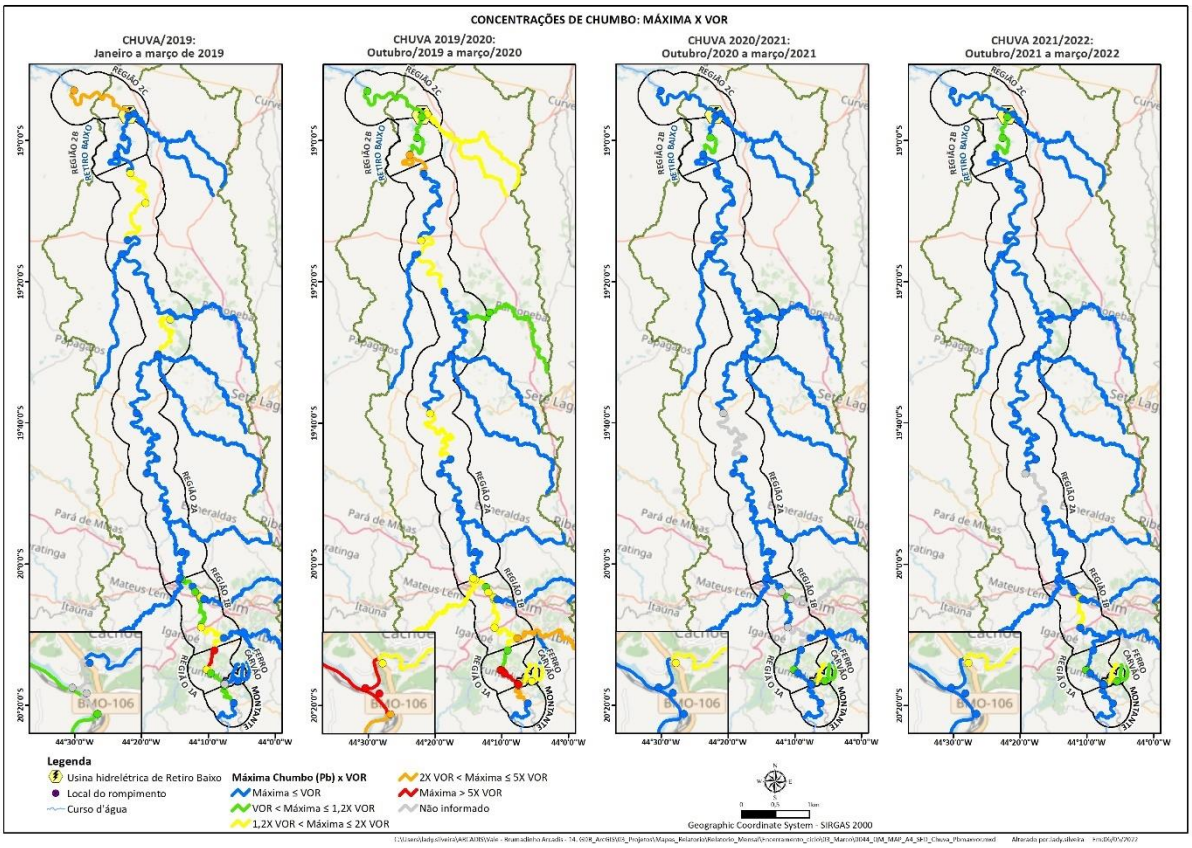
No período de chuva de 2019, as concentrações de Chumbo ficaram 5 vezes maior que o valor orientador da CONAMA 454/12 em parte da região 1A e 1B, na região 2A e 2C o comportamento predominante foi de concentrações máximas entre 2 a 5 vezes o valor orientador. Apenas na região 2A, onde fica o reservatório de Retiro Baixo as concentrações ficaram até duas vezes o VOR. Em geral, os tributários apresentaram características de sedimento natural.

Na chuva 2019/2020, os aumentos em relação ao valor orientador do CONAMA 454/12 ficaram limitados predominantemente em trecho da região do Ferro-Carvão, o que não ocorreu nas regiões imediatamente posteriores, 1A e 1B. Para as demais regiões, observa-se, reduções ou manutenções dos valores máximos ao longo de todo o rio Paraopeba.

Ao se comparar os dados dos dois últimos períodos chuvosos, 2020/2021 e 2021/2022, percebeu-se que o Chumbo apresentou atenuação no Ferro Carvão, região 1A e 1B, incremento no início da região 2A, atingindo ali concentrações de até 1,2 vezes o valor de referência e manutenção das concentrações a partir da região 2B.

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. Esse comportamento também pode ser observado ao se avaliar a distribuição espacial do Chumbo, compreendendo os períodos de chuva de 2019 a 2021/2022 (Figura 12.4-6), onde as concentrações, pontualmente, permanecem acima da legislação em todas as regiões, com exceção da região 2C.

Figura 13.4.6: Evolução do Chumbo no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Arsênio

A Figura 12.4-7 mostra as variações nos períodos de chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.

As concentrações de Arsênio na chuva de 2019 ficaram entre 1,2 a 5 vezes maiores que os valores de nível 1 da Resolução CONAMA 454/12, com permanência desde a região montante

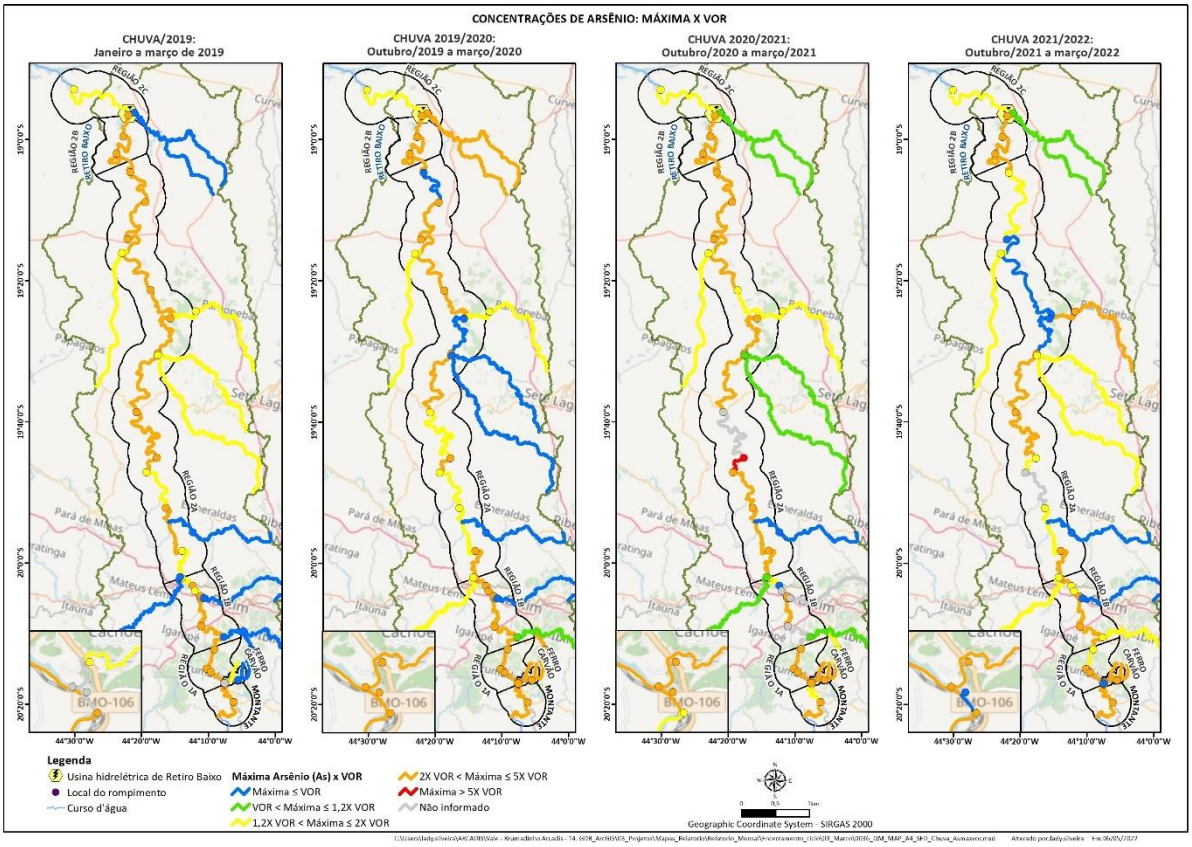
até a 2B, enquanto na 2C, as concentrações foram até 2 vezes maiores que a legislação neste período. Os tributários do rio Paraopeba apresentaram até 2 vezes o valor da legislação.

Na chuva 2019/2020, o Arsênio apresentou concentrações máximas semelhantes a 2019 nas regiões Montante, 1A, 1B, 2B, 2C e trechos da 2A que neste período teve inclusive ocorrência de concentrações máximas menores, abaixo do valor legal. No período de chuva 2020/2021, as concentrações máximas foram próximas as de 2019/2020, à exceção de Montante que apresentou redução, 2A que pontualmente, próximo ao PT-43, apresentou aumento de concentração desse elemento, sendo o valor máximo para essa região de até maior que 5 vezes o VOR.

Já na chuva 2021/2022, percebe-se poucas variações em relação ao período anterior, à saber, aumento das concentrações nas regiões de montante, 1B, e reduções pontuais ao longo dos trechos da região 2A. Em geral, as concentrações máximas ficaram até 5 vezes o valor de referência. Nota-se para a região 2C, assim como para os períodos pretéritos, manutenção dos valores máximos, ficando eles entre 1,2 e 2 vezes o valor de referência da legislação.

Esse comportamento o 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 a contenção do arsênio nesta área.

Figura 13.4.7: Evolução do Arsênio no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Cromo

Os mapas de distribuição espacial por períodos de estiagem, 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, estão na Figura 12.4-8. Na chuva de 2019, a concentração de cromo apresentou comportamento predominante ao longo do Paraopeba na faixa de 2 a 5 vezes o valor orientador. Em Ferro Carvão, as características do sedimento ficaram mais próximas aquelas verificadas em sedimentos naturais da região. No período de chuva 2019/2020, o comportamento variou pouco a partir do PT-53 na região 2A. As maiores mudanças ocorreram na porção mais alta da bacia, sendo verificadas concentrações em até 5 vezes o valor orientador na região e Ferro Carvão, 1B e início da região 2A, provavelmente, por causa de atividades de lixiviação de cromo de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima presente na margem esquerda do rio Paraopeba ou até mesmo consequência de erosão marginal.

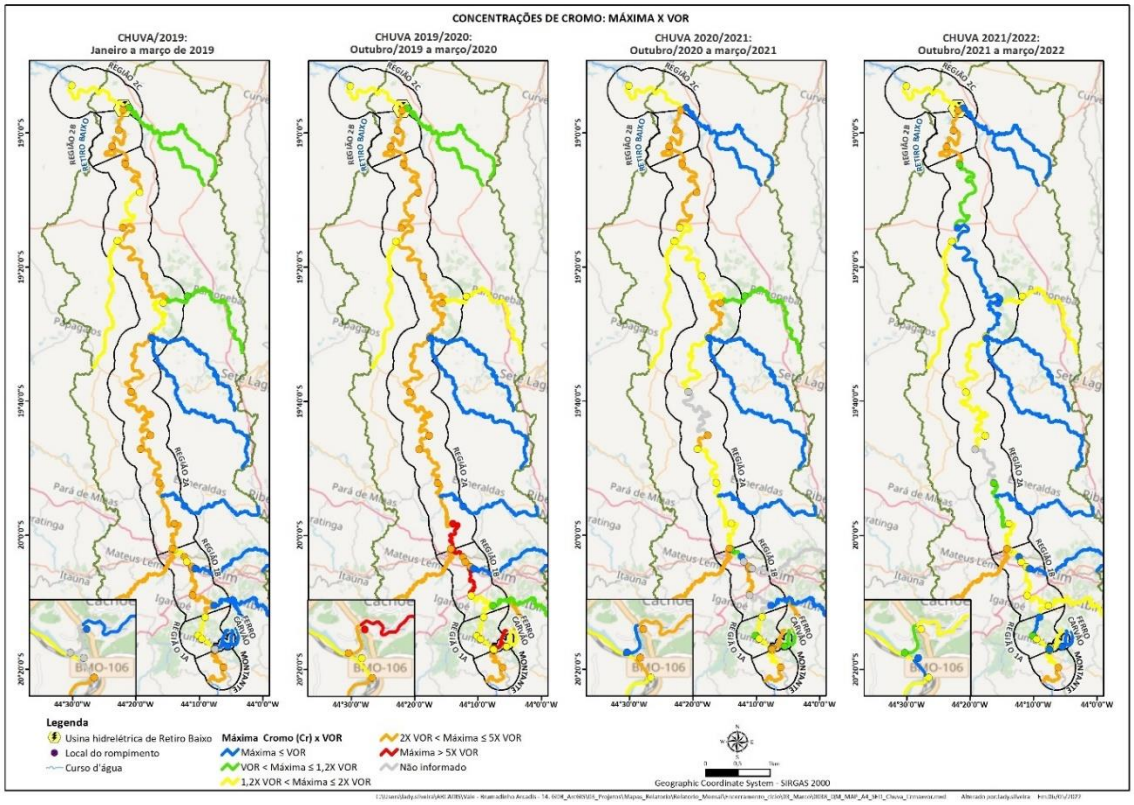
Na chuva de 2020/2021 observou-se a distribuição espacial do cromo na bacia acima do nível 1 em todas as regiões, com exceção para os tributários que apresentaram maior diversidade, alcançando em alguns deles, características de sedimentos naturais. Nota-se que em relação ao período anterior, houve redução das concentrações máximas verificadas na região 1B e 2A. Ao se comparar os cenários de chuva de 2020 com 2021, o primeiro foi muito mais intenso e pode ter carreado mais materiais quando comparados ao cenário de 2021 que as chuvas

foram mais moderadas e, portanto, o transporte e deposição de sedimentos para o rio foi menor. Já no último período de chuva, 2021/2022, nota-se comportamento similar ao do período passado, com reduções na região Ferro-Carvão, 1A a 2A.

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 chuvas de 2019 a 2021/2022 (Figura 12.4-8), também corrobora com o comportamento observado e que demonstra características da própria bacia, uma vez que as concentrações, mesmo atenuadas, permanecem acima da legislação, principalmente nos tributários.

Figura 13.4.8: Evolução do Cromo no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Cádmio

O Cádmio foi constatado em concentrações abaixo do limite de quantificação em 99% das amostras de sedimentos avaliadas no rio Paraopeba no período de chuva de 2019 (considerando aqui os meses de janeiro a março), quando houve o rompimento da barragem. A única ocorrência constatada acima dessa métrica neste período foi de uma amostra no PT-55 localizada em Curvelo, estando cerca de 250 Km a jusante da barragem B-1. No rejeito, as concentrações medianas foram de 0,2 mg/kg e algumas poucas amostras apresentaram valores acima de 1 mg/kg até 1,8 mg/kg (Geoenviron, 2019- Fase 1), indicando baixas concentrações no rejeito para comprometer a qualidade dos sedimentos no rio Paraopeba.

A Arcadis realizou uma avaliação técnica de todos os resultados de Cádmio em sedimentos de corrente, validados pela SGS Geosol, do período de 25/01/2019 a 16/03/2021. Para o programa PME foram reprocessadas 1951 amostras, que foram lidas no comprimento de onda 228nm no espectrômetro ICP-OES. Os resultados desse reprocessamento mostraram que 84,7% dos resultados avaliados no PME, ficaram abaixo do valor orientador do CONAMA 454/12 nível 1 (0,6 mg/kg), 14,2 % ficaram acima desta referência, sendo esses estão concentrados em pontos próximos ou jusante de Três Marias (PT-22, PT-25, PT-30 a PT-39, PT-44 a PT-46) e 1,1 % em outros pontos, mas sem persistência. Dessas amostras que apresentaram valores acima 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, 2021e).

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, 2021e). 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.

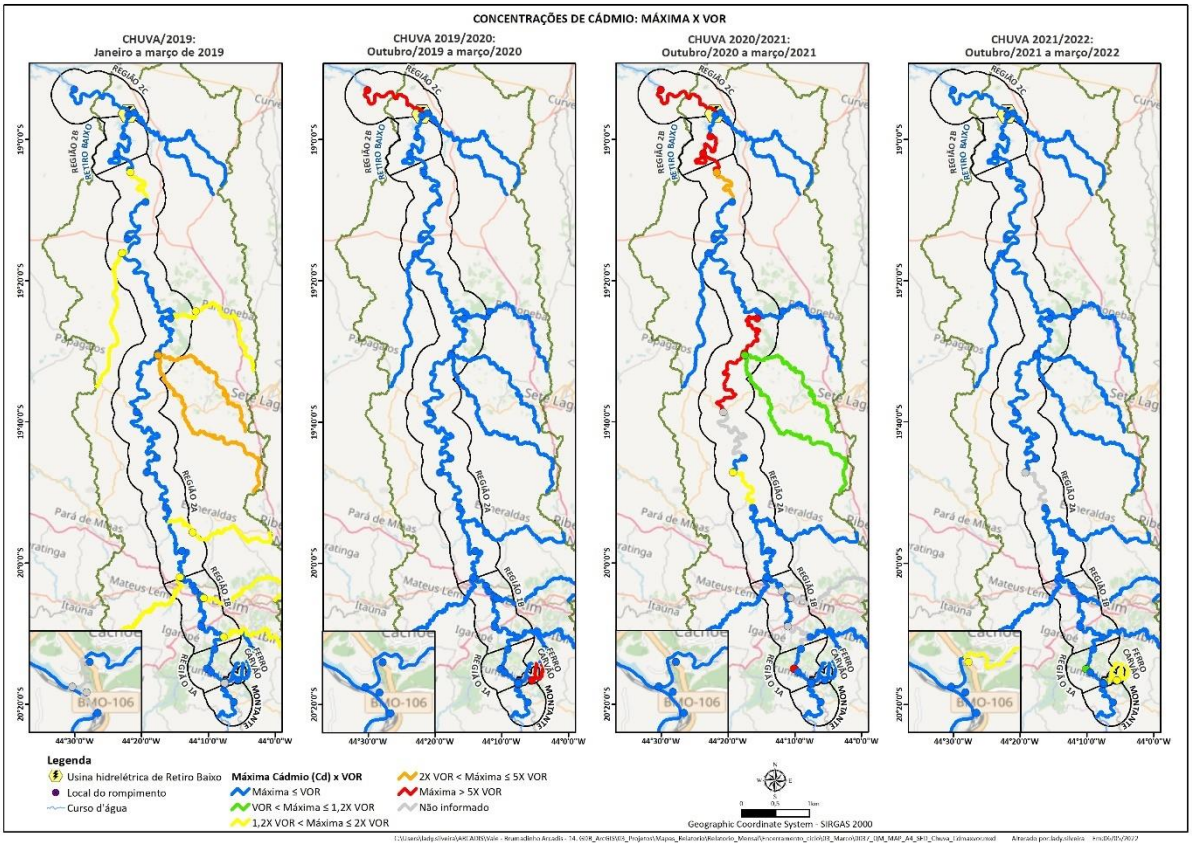
Na chuva de 2019 (Figura 12.4-9) foram constatadas ocorrências pontuais de cádmio na região 2A, em concentrações até 2 vezes acima da legislação na bacia do rio Paraopeba, enquanto nos tributários as concentrações se mantiveram até 5 vezes o valor de referência.

Na chuva de 2019/2020, observa-se incremento de cádmio na região de Ferro Carvão e 2C, atingindo concentrações máximas acima de 5 vezes o valor do VOR. Este comportamento não foi constatado para os tributários, sendo para eles, verificadas concentrações máximas abaixo do VOR. Para a chuva 2020/2021, houve algumas alterações em relação a chuva anterior, sendo elas identificadas principalmente a partir da região 2A e se estendendo para a região 2C, ficando as concentrações condicionadas a esses trechos entre menor que o valor orientador e 5 vezes acima desse mesmo valor. Essas concentrações localmente, podem se associar a alguma contribuição de uso e ocupação de solo.

Já na chuva de 2021/2022, houve um comportamento mais homogêneo ao longo da bacia para as concentrações máximas, ficando em todas as regiões com valores abaixo do VOR,

com exceção da região de Ferro Carvão, que apresentou concentrações entre 1,2 e 2 vezes o VOR nível 1.

Figura 12.4-9 - Evolução do Cádmio no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Zinco

O comportamento do Zinco associado aos períodos de chuva de 2019 a 2021/2022 está na Figura 12.4-10.

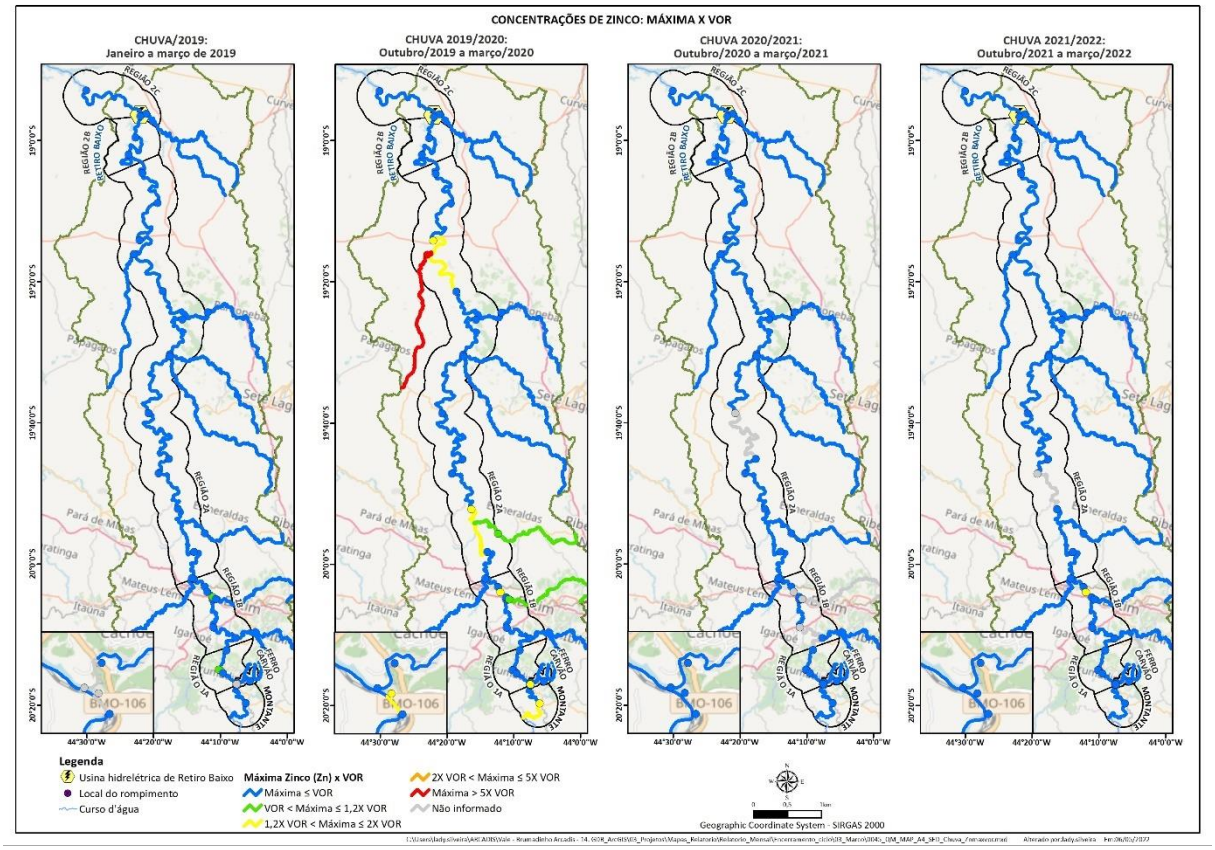
Na chuva de 2019 percebeu-se concentrações de zinco até 1,2 vezes acima da legislação na região 1A apenas, sendo provavelmente associado ao rompimento da barragem B1, ficando o restante das regiões com concentrações máximas abaixo do valor orientador do CONAMA 454/12.

Na chuva de 2019/2020, a região de montante e algumas partes da região 2A apresentaram alterações, atingindo valores até 2 vezes o VOR. Para o tributário da região 2A que alcançou até 5 vezes mais que o valor orientador, pode ser justificar esse comportamento devido as contribuições naturais da localidade, visto que o mesmo comprometeu apenas parcela do trecho imediatamente a jusante.

Para os dois últimos períodos de chuva, nota-se similaridade em grande parte das regiões. Exceção foi verificada pontualmente na região 1B para o zinco, próximo ao PT-14, ficando seu valor entre 1,2 e 2 vezes o valor orientador.

O Zinco apesar de constante na bacia do rio Paraopeba, manteve-se em concentrações que atendem a Resolução CONAMA 454/12 desde a chuva de 2019 e sua presença no rejeito foi baixa durante todo o período monitorado.

Figura 12.4-10 - Evolução do Zinco no sedimento nos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Mercúrio

Na figura 12.4-11 está o consolidado das concentrações máximas dos períodos de chuva de 2019 até 2021/2022.

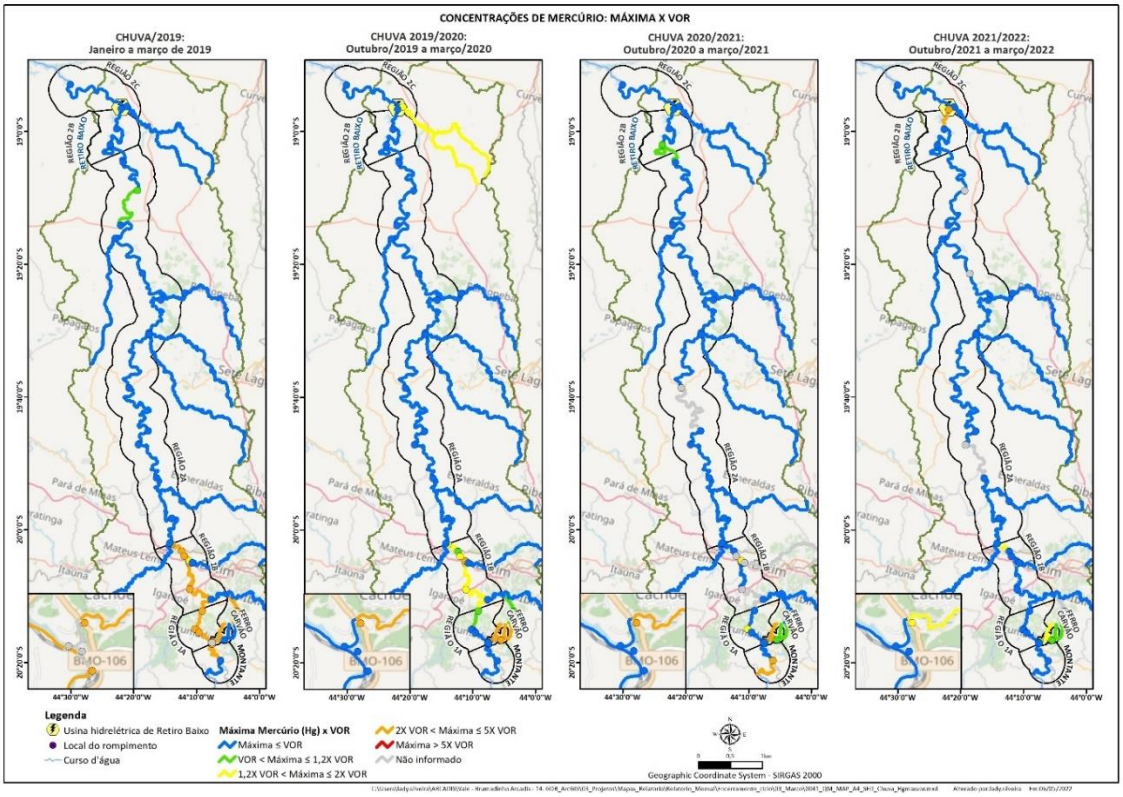
Na chuva de 2019, o mercúrio foi encontrado em concentrações mais elevadas na região de Montante, no ribeirão Ferro-Carvão e região 1B, sendo os valores verificados entre 2 a 5 vezes o valor de referência. No final da região 2A, entre o PT-19 e PT-55, concentração diferente do restante do trecho também pode ser evidenciada, ficando as concentrações máximas na ordem de 2 vezes o valor orientador.

Já na chuva de 2019/2020, o mercúrio foi encontrado no ribeirão Ferro-Carvão em concentrações mais elevadas, entre 2 a 5 vezes o valor estabelecido pela Resolução CONAMA 454/12. Nota-se ainda concentrações até duas vezes o VOR para este elemento na região 1B e no tributário da 2C.

Comparando-se a chuva de 2020/2021 com o de 2021/2022, constatou-se que as concentrações de mercúrio se reduziram nos setores em que foi detectado, em especial na região de Montante e Ferro-Carvão, provavelmente por causa do acúmulo de sedimentos finos na área escavada para a contenção da água. Na região 2B, percebe-se ocorrência pontual e mais elevada se mercúrio se comparado com o restante do trecho dessa região, atingindo valores de até 5 vezes o valor orientador. Cabe ressaltar que na região do Ferro-Carvão há histórico de garimpos e as concentrações do mercúrio podem ter tido contribuições dessas ações antrópicas que ocorreram previamente ao rompimento da barragem.

Em geral, ao se avaliar a distribuição do Hg, compreendendo os períodos de chuva de 2019 a 2021/2022 (Figura 12.4-11), as concentrações demonstram atenuação nas regiões a montante, Ferro-Carvão, 1A, 1B, 2A e 2C e acúmulo no reservatório da UHE Retiro Baixo (2B).

Figura 12.4-11 - Evolução do Mercúrio no sedimento nos períodos de chuva de 2019,2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022.



Avaliando-se os dados da CPRM das amostras de sedimentos coletadas entre 2008 e 2009, as análises químicas dos sedimentos da bacia do Paraopeba em 72% dos resultados obtidos acima do limite de quantificação laboratorial e com mediana de 0,04mg/kg. Os resultados estão distribuídos entre 0,01mg/kg (P25) e 0,08mg/kg (P75) na bacia, indicando presença natural de mercúrio nos sedimentos, entretanto foram detectados pontos de *outliers* com concentrações acima do limite nível 1 (0,17mg/kg) e nível 2 (0,49 mg/kg) do CONAMA 454/12, podendo indicar fontes antrópicas (mineração) e/ou relacionadas às rochas da Suíte Alto Maranhão deste elemento desde a época da amostragem pela CPRM (entre os anos de 2008 e 2009). Apesar do método de amostragem e análise química serem diferentes do adotado pela VALE, as concentrações mais elevadas de Hg detectadas na região do Ferro-Carvão e 1B, principalmente nos períodos de chuva de 2019 e 2019/2020, coincidem com as condições da bacia do rio Paraopeba. Na região do Ferro-Carvão há evidências de garimpo de ouro praticado no passado, o que indica possibilidade de ações antrópicas como o uso de Hg para amálgama com ouro. Esta condição precisa ser investigada para fins de confirmação desta ocorrência.

13.5 Considerações

Para a comparação dos percentuais de desvios em relação aos valores orientadores, no período de chuva/2022, constatou-se que as regiões Ferro-Carvão, 1A, 1B e 2B são as regiões que apresentaram as maiores persistências de elementos em concentrações acima da referência. Na chuva em análise, manganês, ferro e alumínio superaram os valores orientadores Vicq (2015) e arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e zinco superaram 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 As e Ni no PT-11, PT-12 (região Ferro-Carvão) e PT-14 (região 1B), As e Cr no PT-20, PT-28 e PT-21(região Retiro Baixo), apenas As no PT-52 (região montante) e Ni no PT-13 (região 1A).

Os pontos localizados entre PT-11 (Ferro-Carvão) e PT-14 (Região 1B) estão localizados nas regiões mais afetada 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 e PT-14 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 de Retiro Baixo) também possuem predomínio das frações finas (silte e argila), no entanto, há ausência de concentrações de Ferro acima do valor de referência proposto por Vicq (2015) e o Manganês, ultrapassou o valor de referência pontualmente. Por outro lado, observa-se que apenas nesses locais ocorrem 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 de 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 chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, observou-se que os parâmetros que apresentaram elevação nos percentuais em relação ao nível 1 para a chuva 2021/2022 foram: Arsênio (Ferro-Carvão e região 1A), Cádmio (Ferro-Carvão, 1A e 1B), Chumbo (1A, 1B e 2B), Cobre (Ferro-Carvão e 2B), Cromo (montante, 1A, 2B e 2C), Mercúrio (1B e 2B), Níquel (montante e 2B) e Zn (região 1B). Para o nível 2, apresentaram elevação o Arsênio (montante, Ferro-Carvão, 1A e 2B) e Cromo (região 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 traços vem, em geral, reduzindo na maior parte das regiões monitoradas, condição que se perpetuou na chuva de 2021/2022. 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.

14. Evolução da composição química dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais: Aplicação dos índices químicos composicionais

14.3 Objetivo

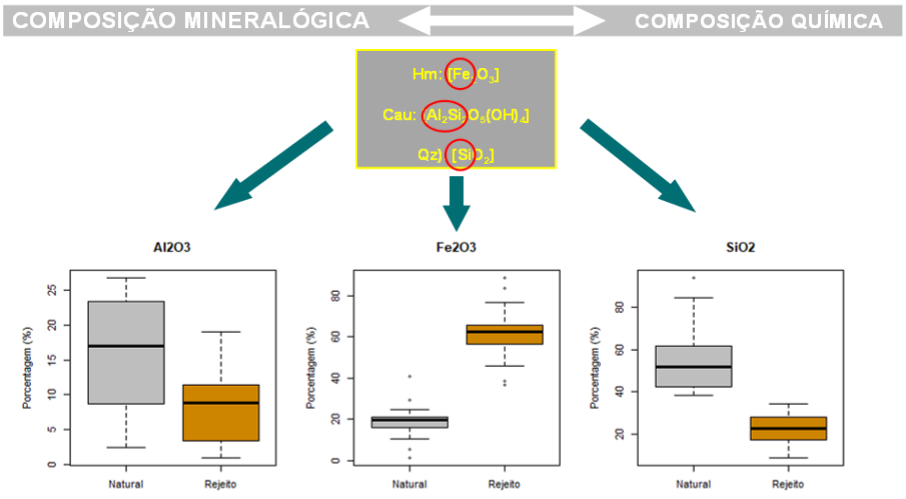
O objetivo da avaliação da evolução da composição químicas dos sedimentos ao longo dos períodos sazonais foi verificar se houve redução na extensão dos sedimentos com características químicas de rejeitos ao longo do rio Paraopeba ao se comparar com os períodos anteriores.

14.4 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 da barragem 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 14.2-1)

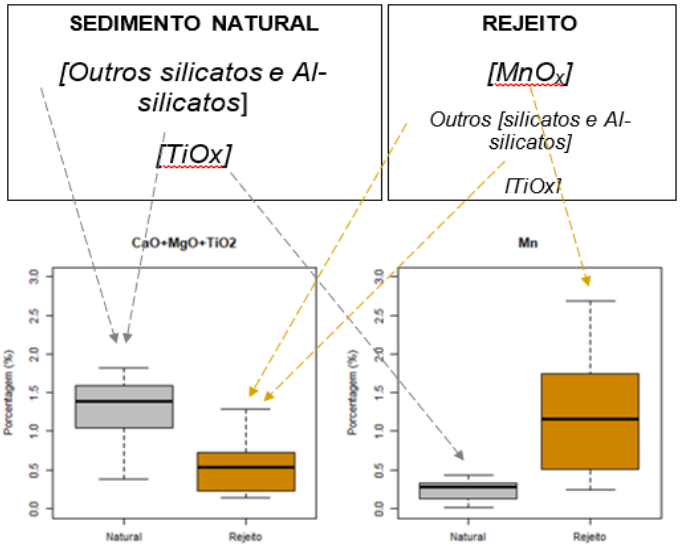
Figura 14.4.1: Identificação da composição mineralógica e química predominante do rejeito da barragem B1, porcentagem de ocorrência de Al_2O_3, Fe_2O_3 e SiO_2 nos rejeitos e sedimentos naturais.



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 14.2-2).

Figura 14.4.2: Boxplot de concentrações Manganês para dados de rejeitos e sedimentos naturais de Arcadis e Vale (2020).



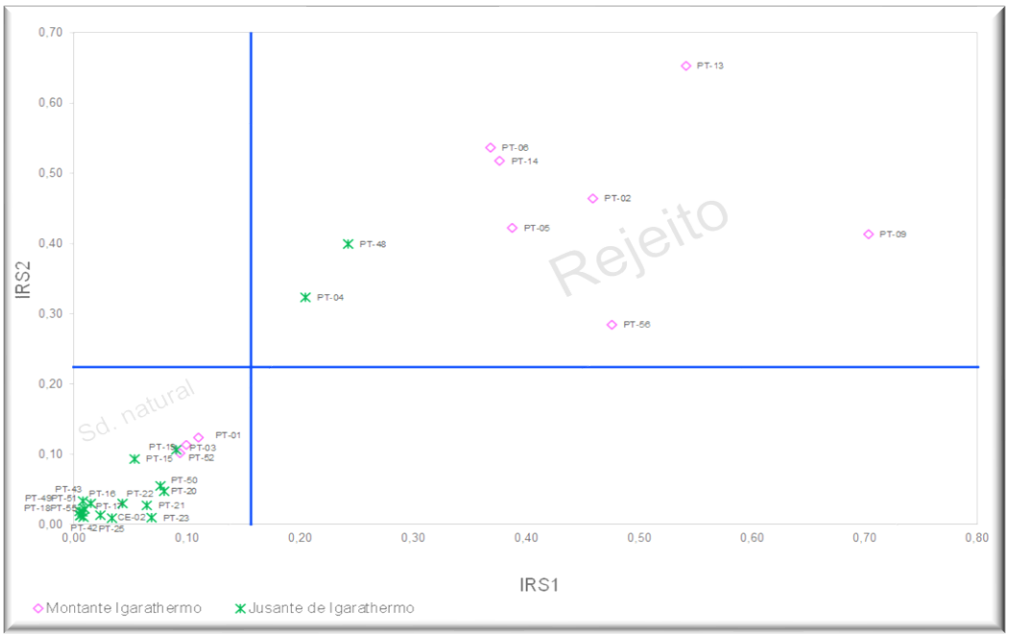
Fonte: Relatório de Fechamento de Ciclo, outubro/2020.

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 14.2-3) 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 14.4.3: 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 14-3 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 e para os períodos de chuva de 2019 até as chuvas de 2021/2022.

Os índices balizadores 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 2021. A região de montante, regiões 2B e 2C, não afetadas pelo rejeito da barragem apresentaram relação dos índices IRS 1 e IRS 2 muito baixa quando comparadas com as áreas afetadas, sendo que a região de montante, que apresentou os maiores valores. Nesta relação, estas regiões foram interpretadas como regiões com características químicas de sedimentos naturais, não afetados por rejeito. Os balizadores identificados na avaliação dos dados brutos foram calculados novamente considerando o percentil 95 (P95) de cada região para evitar *outliers* considerando o período completo até o verão de 2022. Com isso, os resultados corresponderam 0,10 e 0,14, respectivamente, para IRS1 e IRS2, limitando a característica composicional de sedimento natural. Detalhes dessa análise acham-se no relatório de Fechamento de Ciclo do período de janeiro/2019 a março/2021 elaborado por Arcadis (2021).

14.5 Análise dos resultados

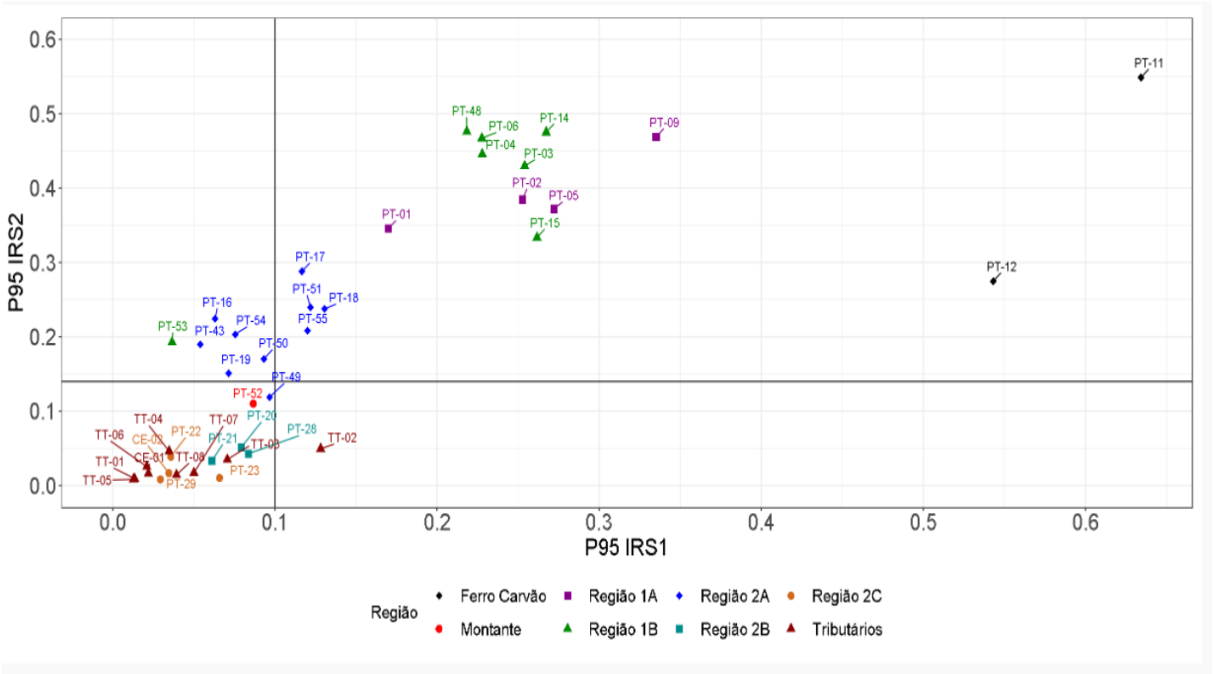
Avaliação por período sazonal

A avaliação desse item contempla todo o período sazonal de chuvas para facilitar a identificação da evolução dos resultados de IRS 1 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 valores elevados para os índices químicos composicionais 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 14.3-1**, que Mn e Fe apresentaram os maiores índices da relação de Mn e Fe 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 14.5.1: Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuvas de 2019.



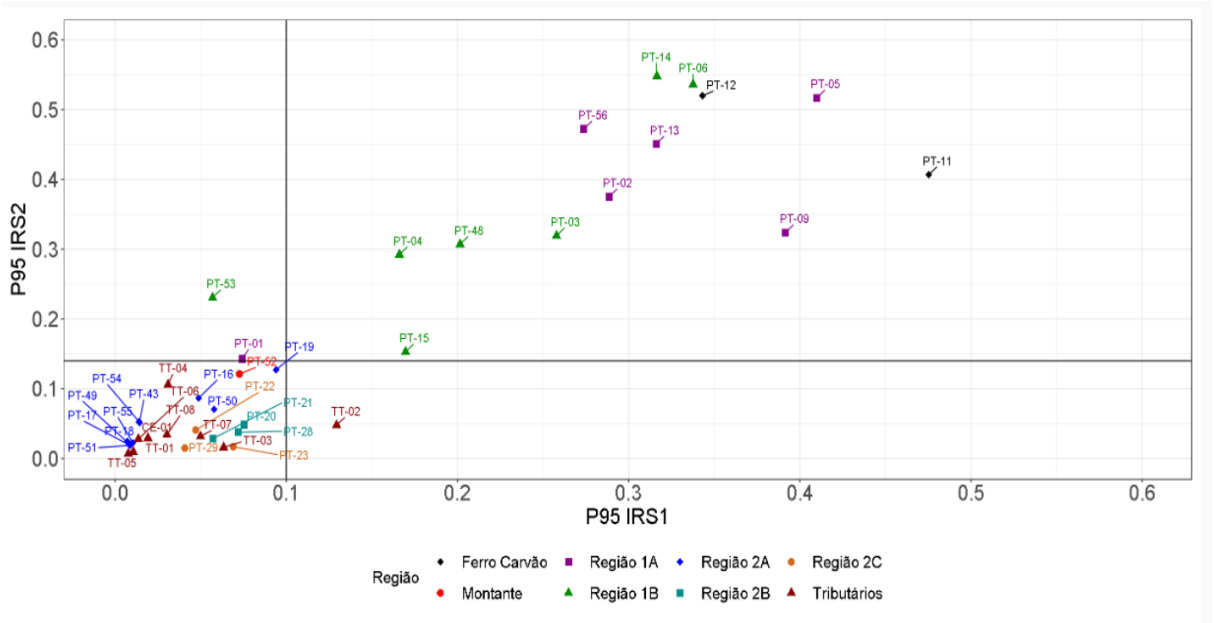
Elaboração: Arcadis (2022)

Em relação ao período de estiagem de 2019 (Figura 14.3-2) 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 dos pontos para a característica composicional de sedimento natural incluindo maioria dos pontos, indicando 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, nesse período. Em relação aos tributários (TT), todos permaneceram com característica química de sedimento natural, exceto o TT-02, no ribeirão Sarzedo que pode ter recebido influência de sedimentos provenientes do transporte de materiais erodidos/intemperizados provenientes de arraste das áreas mais escarpadas, ou de minério exposto no terminal de carregamento de minério localizado a montante de ponto, ou 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.

No novo ciclo de chuvas que se iniciou em 2019/2020 **(Figura 14.3-2)** constatou-se a migração dos índices composicionais das amostras dos sedimentos da região 2A, alterando-

se de característica química de rejeito para característica química de sedimento natural e algumas amostras indicaram uma fase indeterminada entre estas características. 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 0,2 e 0,5 e na região 1A, o espalhamento do IRS1 foi maior, até 0,9. Por outro lado, o IRS2 apresentou valores mais constantes entre 0,4 e 0,7. Similarmente aos demais períodos, as amostras dos sedimentos das regiões montante, 2B e 2C, além dos tributários permaneceram com característica de sedimento natural.

Figura 14.5.2: Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2019/2020.



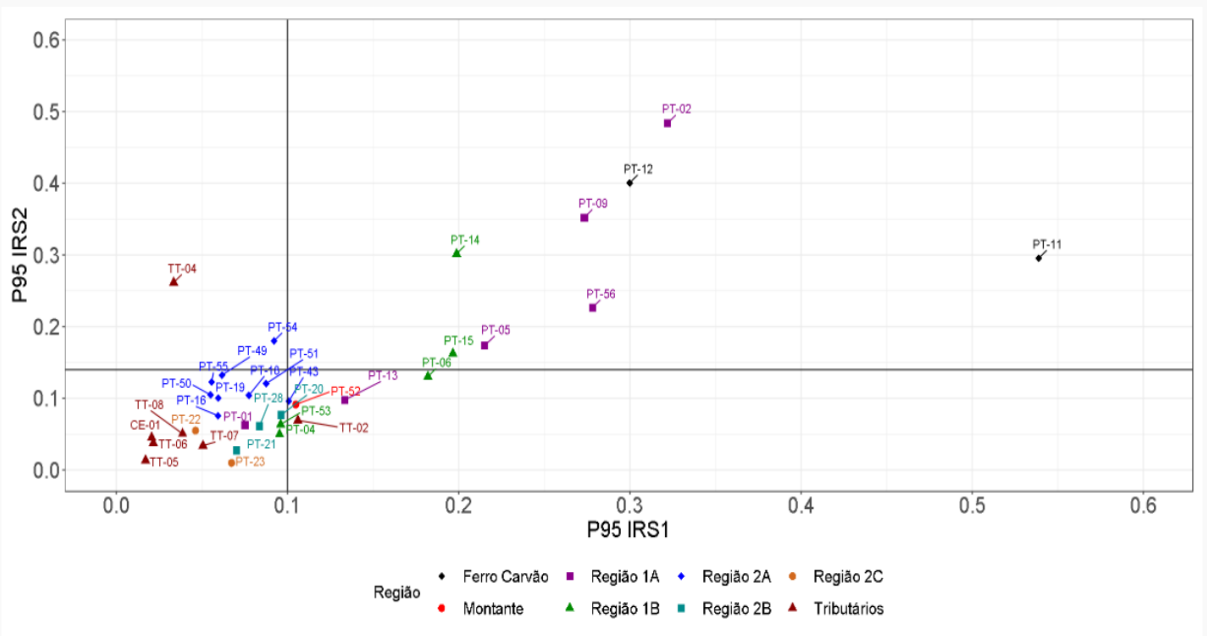
Elaboração: Arcadis (2022).

O período de estiagem de 2020 mostrou que nos pontos das regiões 1A e 1B, a característica composicional química dos rejeitos foi mantida. Na região 2A, os resultados apontaram uma pequena parcela de presença de finos oriundos dos rejeitos, misturados com a maioria de sedimentos naturais nestes pontos. Na região do 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. Neste período, os valores de IRS 2 foram menores que no período anterior, e os pontos monitorados mantiveram uma tendência indicando migração em direção aos sedimentos com característica composicional natural. Na região 2A, somente os pontos PT-19 e o PT-43 foram amostrados na estiagem de 2019. Os resultados dos índices indicaram o primeiro ponto manteve a de característica de sedimento natural, enquanto elas apresentaram valores IRS1 coerentes com aqueles de sedimentos naturais, mas valores IRS2 apontando para rejeitos. Isto poderia apontar uma pequena parcela de presença de finos oriundos dos rejeitos, misturados com a maioria de sedimentos naturais

nestes pontos. 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.

No período de chuvas 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 14.3-3**). Os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão destacam-se por apresentarem maiores valores de IRS 1, 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 alguns deles, como aqueles do PT-54 e PT-49, não apresentaram característica composicional definida, mas elas apresentaram valores IRS1 coerentes com aqueles de sedimentos naturais e valores IRS2 apontando para rejeitos. Isto poderia apontar uma pequena parcela de presença de finos oriundos dos rejeitos, misturados com a maioria de sedimentos naturais nestes pontos. Semelhante ao período anterior, isto faz sentido com a dinâmica fluvial sobre o transporte preferencial de finos em suspensão.

Figura 14.5.3: Avaliação dos índices IRS 1 e IRS 2 nas regiões Montante a 2C ao longo do período sazonal de chuva de 2020/2021.

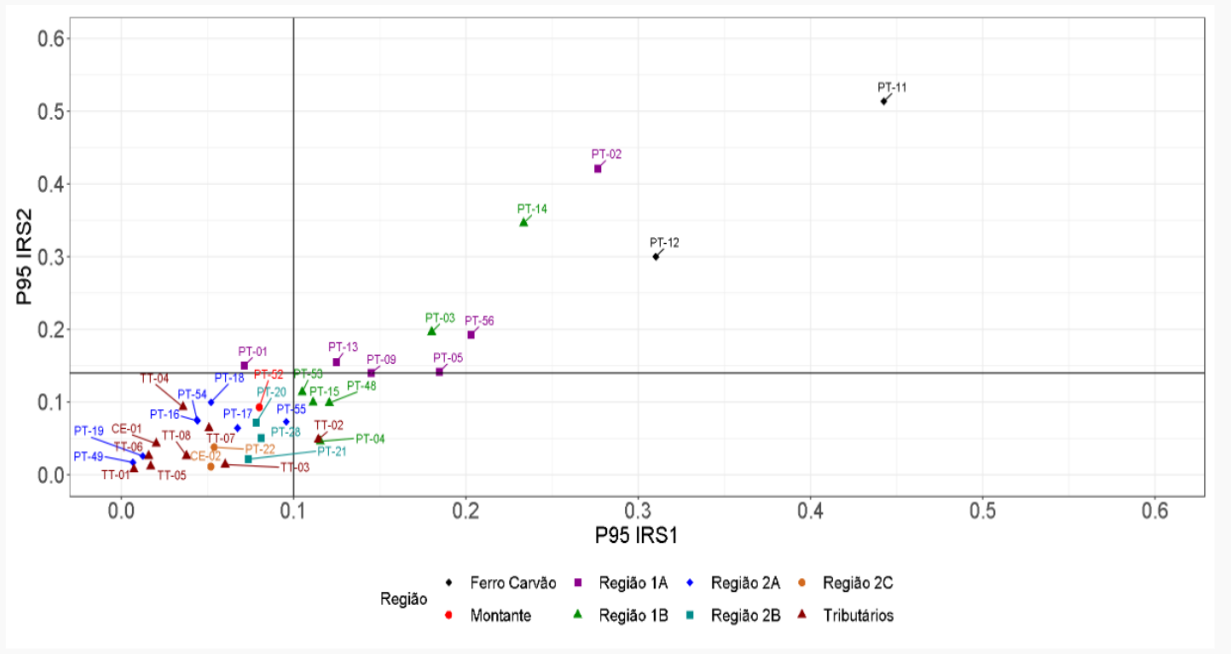


Elaboração: Arcadis (2022).

No período de estiagem de 2021 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-15 já se observou migração para sedimentos com característica natural.

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 indica a posição do sedimento com característica química de rejeitos (**Figura 14.3-4**) e o PT-15 teve maior elevação do IRS1, migrando para uma região de comportamento sem característica definida. Os sedimentos no ribeirão Ferro-Carvão novamente se destacaram por apresentarem os maiores valores de IRS 1 e IRS 2. Já 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 IRS1 coerente com aqueles de sedimentos naturais e valor IRS2 apontando para rejeitos, indicando novamente parcela de finos dos rejeitos misturados aos sedimentos naturais.

Figura 14.5.4: 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

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., IRS1*IRS2) 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.

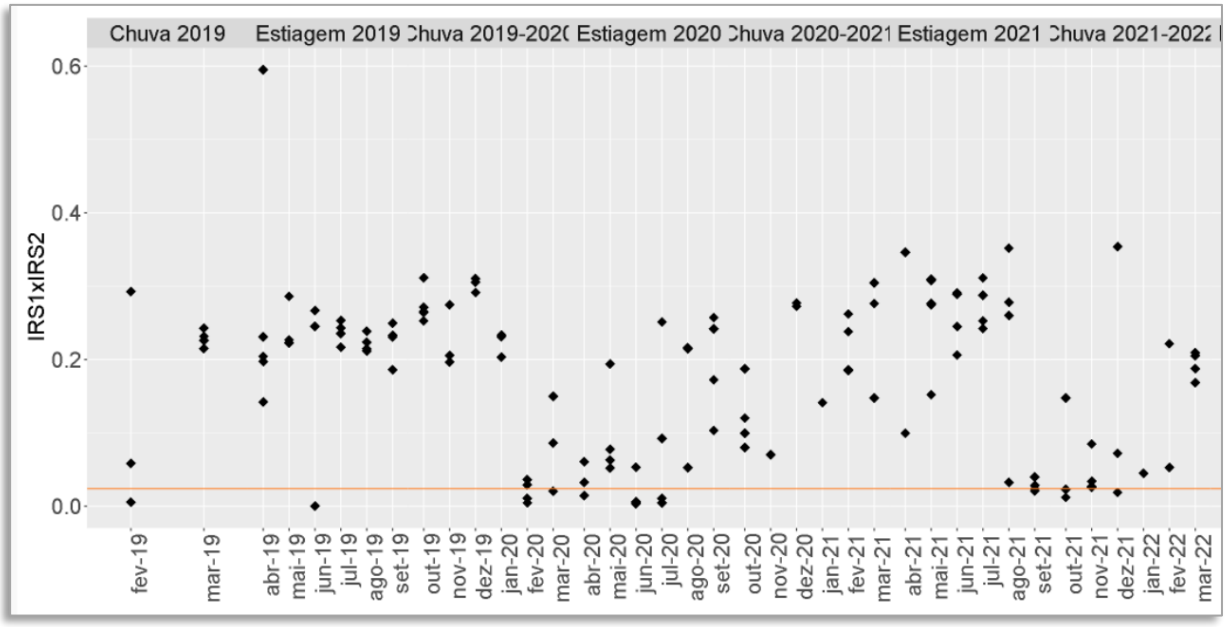
Neste caso, por analogia, os balizadores (P95) determinados anteriormente foram multiplicados entre si, obtendo-se o valor de 0,0192. Este limite foi aplicado na análise temporal apresentada abaixo.

PT-02

Para o PT-02 distante, cerca de 18 km da barragem B1. Quando considerado o produto IRS1*IRS2 ao longo tempo (Figura 14.3-5), 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

IRS1*IRS2, 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.

Figura 14.5.5: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-02.



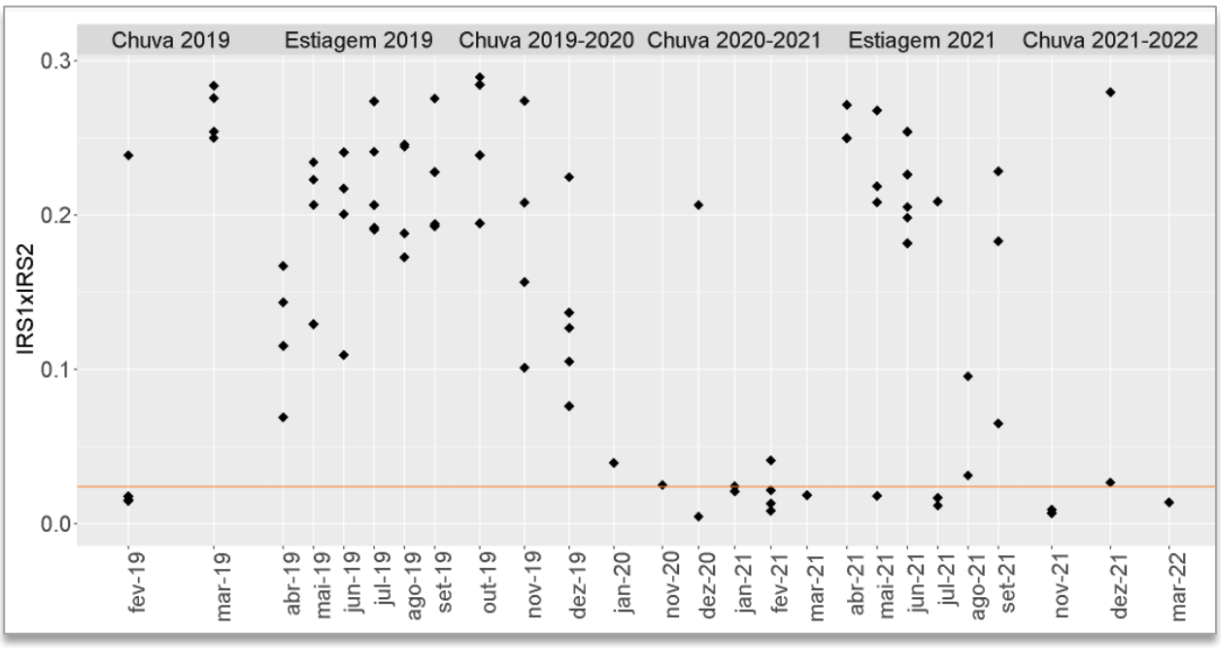
Elaboração: Arcadis (2022)

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 IRS1*IRS2 mostrou uma estabilidade da dispersão dos dados, no campo de materiais com características de rejeitos, até o período outubro-novembro/2019 (Figura 14.3-6) A partir daí, houve uma tendência de decréscimo dos valores, 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 de rejeitos nesta localidade e repetindo o ciclo, nas chuvas de 2021/2022 constatou-se nova oscilação nos valores, com característica de sedimento natural e de rejeito.

Figura 14.5.6: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-14.



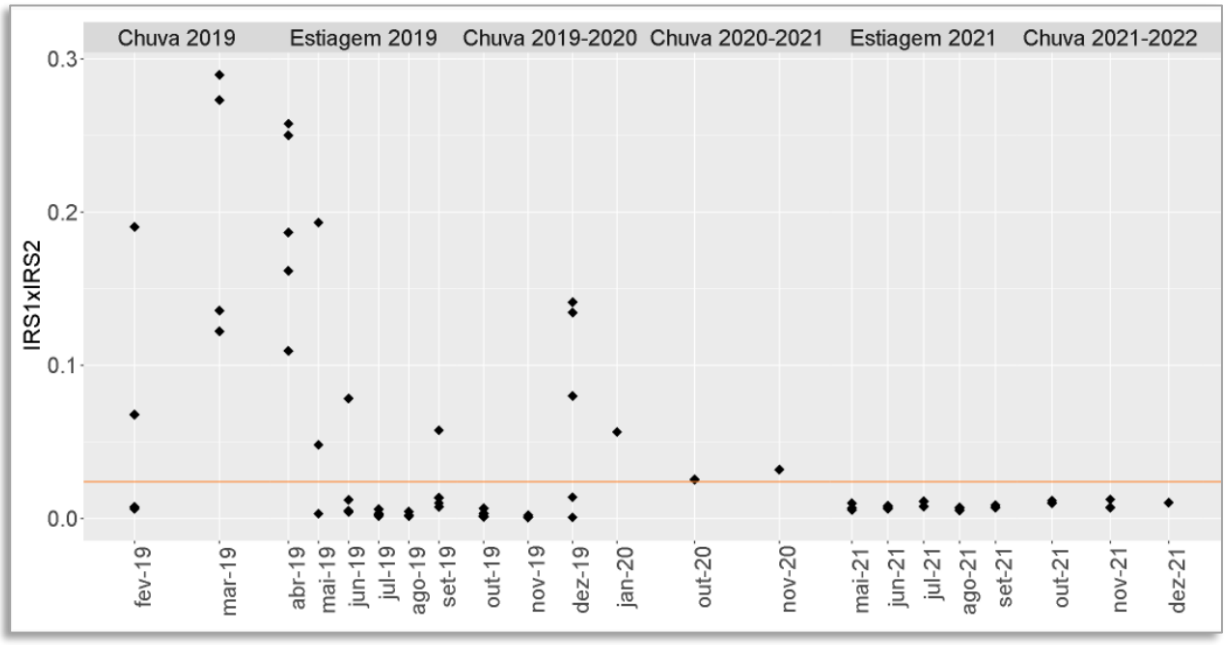
Elaboração: Arcadis (2022)

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 houve dificuldade de acesso ao ponto por conta de alagamentos e condições inseguras para a coleta do sedimento.

Os resultados do produto IRS1*IRS2 são apresentados na Figura 14.3-7. Entre fevereiro e abril de 2019, 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 IRS1 * IRS2 mantinha a característica química de rejeito para os sedimentos locais e 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.

Figura 14.5.7: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a dezembro/2021 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-15.

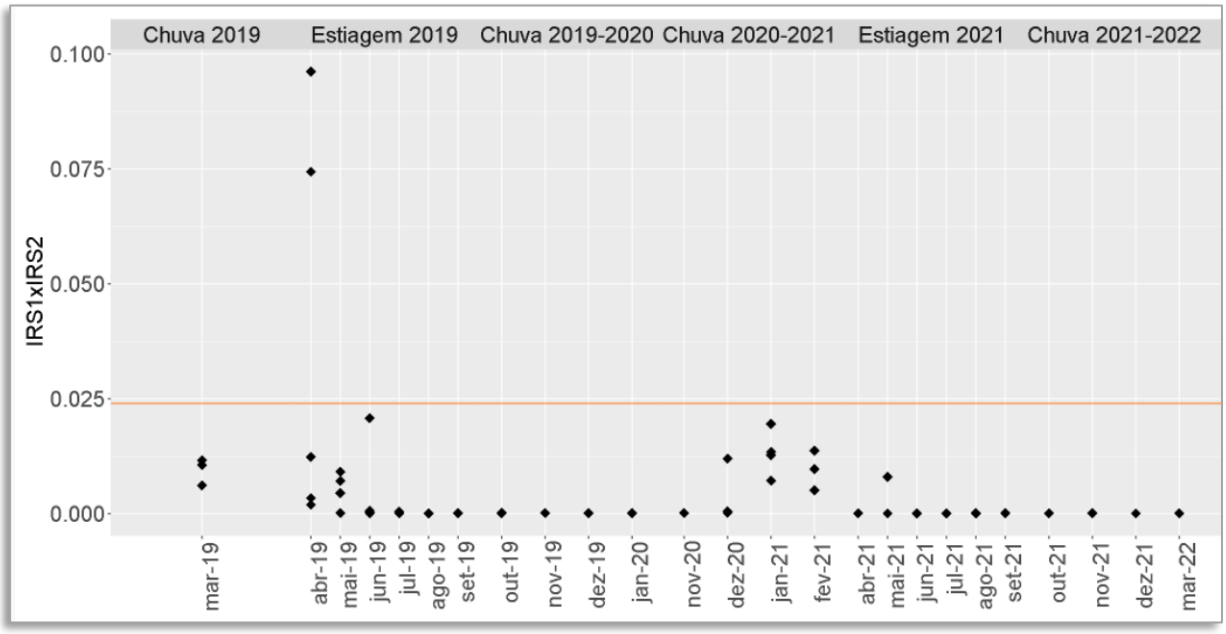


Elaboração: Arcadis (2022)

PT-49

Na região 2A, os dados IRS1 x IRS2 das amostras do ponto PT-49 indicaram característica química composicional predominantemente de sedimentos naturais, ao longo do período avaliado. Na avaliação do parâmetro IRS1*IRS2 (Figura 14.3-8) 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.

Figura 14.5.2: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-49.



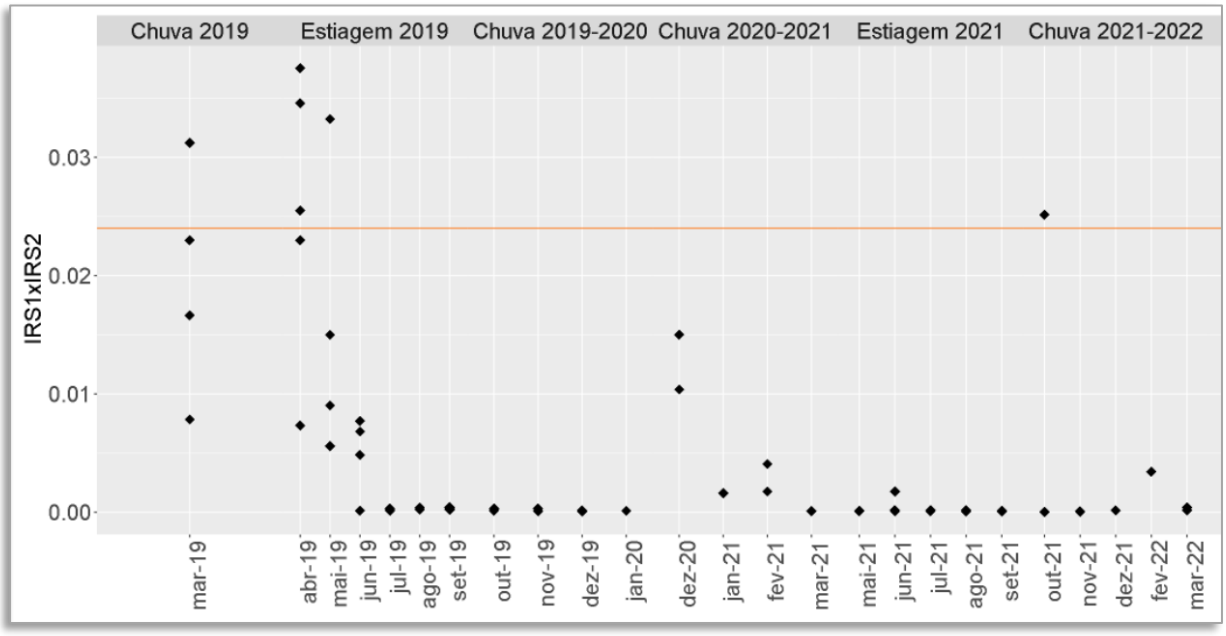
Elaboração: Arcadis (2022)

PT-55

A dispersão dos resultados no PT-55 no diagrama (IRS1*IRS2), 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 já tangencia os sedimentos com característica natural e evolui para tal composição até março/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 à montante não se evidenciou variação nos pontos monitorados. Os resultados são representados no diagrama da Figura 14.3-9.

Relembrando 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 14.5.3: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de fevereiro/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-55.



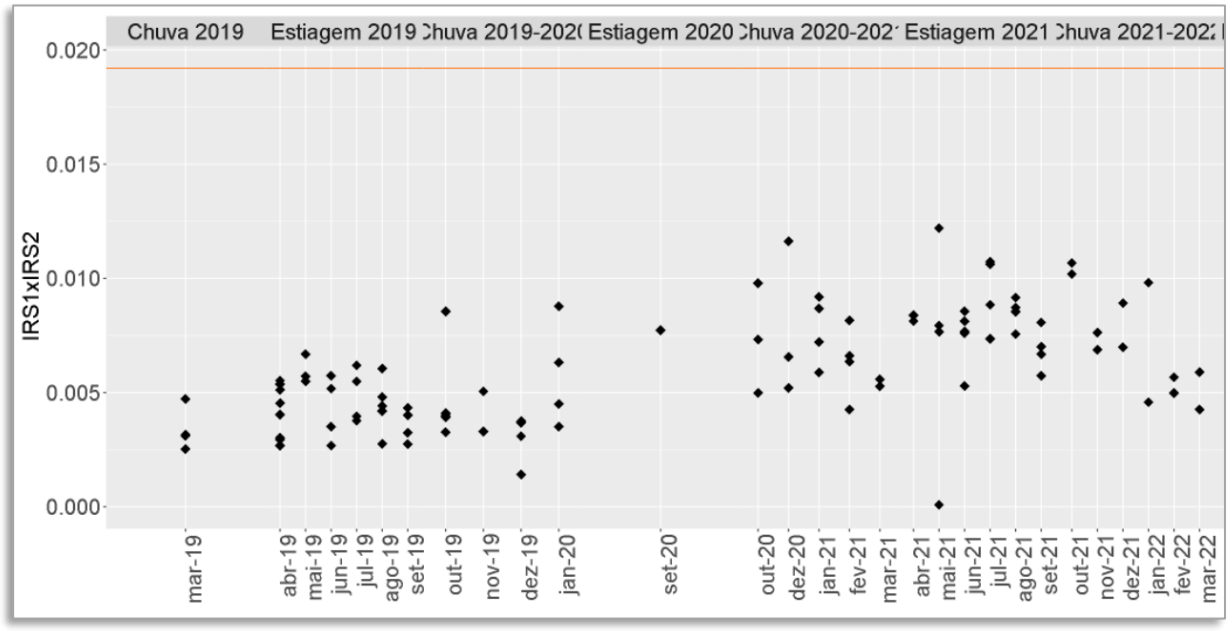
Elaboração: Arcadis (2022)

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.

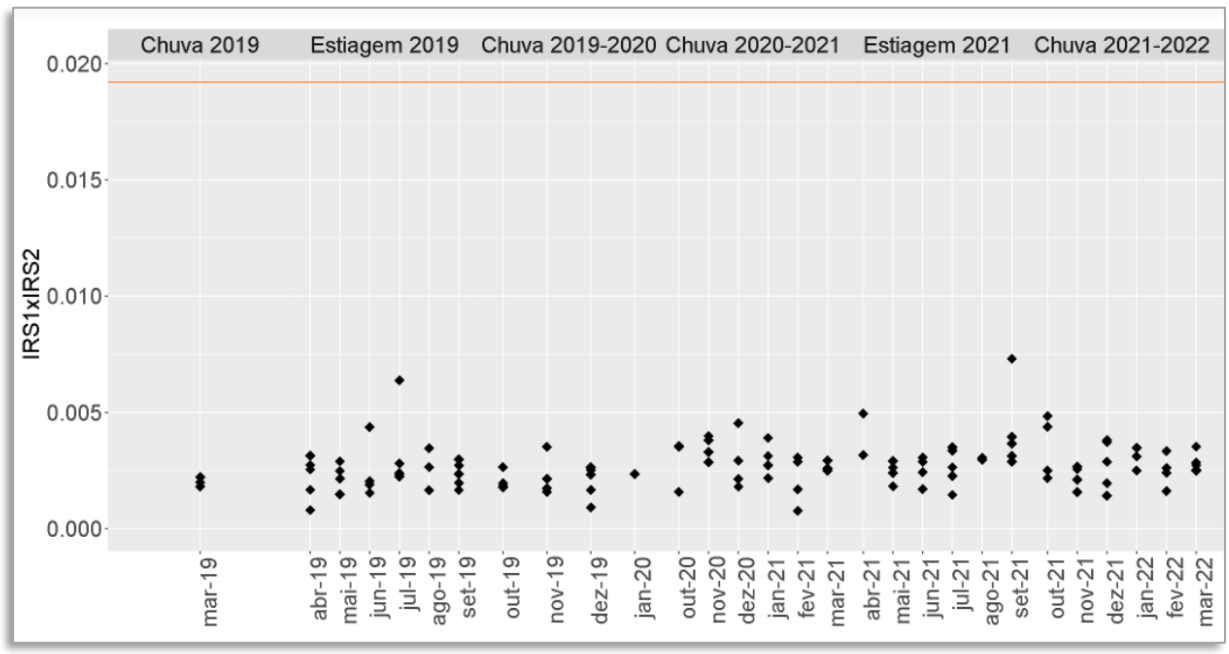
O diagrama dos produtos IRS1*IRS2 (Figura 14.3-10 e Figura 14.3-11) indicaram materiais com característica química de sedimentos naturais durante todo o período monitorado até março/2022.

Figura 14.5.4: Evolução dos sedimentos ao longo dos meses de março/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2 no PT-20.



Elaboração: Arcadis (2022)

Figura 14.5.11: Evolução dos resultados de sedimentos em relação aos índices IRS 1 x IRS2 no PT-21, ao longo dos meses de março/2019 a março/2022 em relação ao fator multiplicador IRS 1 e IRS 2.



Elaboração: Arcadis (2022)

14.6 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 de chuvas 2021/2022 e, espacialmente até o ponto de monitoramento PT-14, localizado a montante do barramento da UTE Igarapé.

- 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. Nas chuvas de 2019/2020 até as chuvas 2020/2021, a característica química do rejeito foi evidenciada até o PT-15, 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 as chuvas de 2021/2022.

- 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 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, aonde 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.

15. Análise qualitativa integrada entre as variações químicas dos metais na água superficial e sedimentos ao longo dos períodos sazonais

15.3 Objetivo

A avaliação integrada entre as matrizes água e sedimentos foi realizada para se evidenciar qualitativamente, as variações dos metais nessas duas matrizes nos períodos sazonais das chuvas de 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e avaliar se as maiores e menores concentrações identificadas no período são nos mesmos trechos e se estes trechos continuam afetados pelo rejeito da barragem B1, B4, B4A.

15.4 Metodologia

O método aplicado foi a elaboração 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, chumbo, cobre, níquel e arsênio para os períodos sazonais de chuva 2019, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022 e estão apresentados nos **Gráficos 15.3-1** a **15.3-7**.

Estes gráficos são avaliados da seguinte forma: as colunas representam as concentrações dos sedimentos e as linhas representam a água superficial, e isso, para cada período sazonal. O período sazonal delas e as cores de cada período acompanham as colunas dos sedimentos. Esta exposição é para avaliar o comportamento de metais prioritários (Mn, Fe, Al) e traços (Pb, Cu, Ni, As) 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), avançando para a confluência do ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba PT-56, seguindo para a Região 1A (PT-13 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 (PT-57 a PT-23). 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 consideradas levaram em consideração as características do rejeito e a avaliação dos tipos de transporte sob baixa energia de fluxo que poderiam ter capacidade transporte de materiais em suspensão e deposição dos sedimentos de fundo, desde a confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão, até a UHE Retiro Baixo, bem como de sua deposição em locais com maior ou menor sinuosidade no rio Paraopeba.

15.5 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, B4A. À medida que se afastou dessas regiões e da fonte, as concentrações desses metais, de forma geral, foram se atenuando nas duas matrizes, seja pela redução da contribuição dos rejeitos da barragem, 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.

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 o que proporciona 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 foram acumulados e ainda evidenciados entre as regiões 1A até o PT-14, na região 1B. Ademais, a morfologia do corpo hídrico (declividade do rio, sinuosidade transicional 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, observou-se o 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 15.3-1 a 15.3-7 mostram a avaliação qualitativa integrada entre essas duas matrizes nos períodos de chuva.

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, e os utilizando como referência prévia ao rompimento da barragem B1 e identificando-se os pontos de monitoramento da Vale sobre este mapa, 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, enquanto 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, após o rompimento da barragem B1, na Região 1A, o aporte de sedimentos contendo manganês aumentou da chuva de 2019/2020 para chuva 2020/2021 (com exceção para os pontos PT-13 e PT-05), e reduziu entre os dois últimos períodos chuvosos, 2020/2021 para 2021/2022 (exceção foi verificada para o PT-13). Nas regiões a jusante dessa, percebe-se, em geral, um comportamento de redução dos teores de Manganês, ao longo dos períodos de chuva.

A **Figura 15.3-1a** mostra as variações ao longo dos períodos de chuva. Há de se perceber que, entre as regiões classificadas como mais afetadas pelo rejeito denso da barragem B1, ou seja, entre as regiões 1A e 1B (PT-01 e PT-14), estão predominantemente as maiores concentrações do Manganês nos sedimentos. 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 chuva constataram-se que na região montante, PT-52, as concentrações máximas reduziram de 6.100 mg/kg (chuva 2019/2020) para 2.463 mg/kg (chuva 2021/2022).

Na região 1A, correspondente aos pontos PT-13 ao PT-05, as concentrações máximas diminuíram ou apresentaram pouca variação no tempo, à saber: 22.576 mg/kg a 26.630 mg/kg (chuva 2019); 4.877 mg/kg e 21.641 mg/kg (chuva 2019/2020); 2.779 mg/kg e 18.975 mg/kg (chuva 2020/2021) e de 2.355 mg/kg e 18.261 mg/kg (chuva 2021/2022). Na região 1B (PT-03 ao PT-15), as concentrações máximas apresentaram redução ao longo da escala temporal, sendo constatados os valores mínimos e máximos a seguir para os períodos chuvosos considerados: de 15.572 mg/kg a 29.293 mg/kg (chuva 2019); 15.100 mg/kg e 23.898 mg/kg (chuva 2019/2020); de 5.400 mg/kg e 15.175 mg/kg (chuva 2020/2021) e de 740 mg/kg e 18.171 mg/kg (chuva 2021/2022).

Para as regiões menos afetadas pelo rompimento da barragem, a partir da região 2A (PT-53 ao PT-55), as concentrações também apresentaram comportamento predominante de redução, tendo variado de 4.780 mg/kg a 15.300 mg/kg (chuva 2019); 228 mg/kg a 8.500 mg/kg (chuva 2019/2020); de 1.202 mg/kg a 7.974 mg/kg (chuva 2021/2022) e de 286 mg/kg e 2.812 mg/kg (chuva 2021/2022). Na região 2B (PT-20 ao PT-21), as variações apresentaram comportamentos distintos, apresentando valores máximos de Manganês no sedimento em diferentes períodos. As oscilações foram de 609 mg/kg a 1.310 mg/kg (chuva 2019); de 1.530 mg/kg a 3.209 mg/kg (chuva 2019/2020), de 1.715 mg/kg a 3.178 mg/kg (chuva 2020/2021) e de 1.466 mg/kg a 3.598 mg/kg (chuva 2021/2022). Na região 2C (PT-57 ao PT-23), houve aumento das concentrações no sedimento em termos de escala temporal para o PT-22 e redução para o PT-23. As variações foram de 368 mg/kg a 1.500 mg/kg (chuva 2019), 875 mg/kg a 1.776 mg/kg (chuva 2019/2020), de 342 mg/kg a 1.710 mg/kg (chuva 2021/2022) e de 316 mg/kg a 1.900 mg/kg (chuva 2021/2022).

De forma geral, para as concentrações medianas, **Figura 15.3-1b**, 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 na chuva de 2019/2020 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) até este último período de chuvas de 2022, 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).

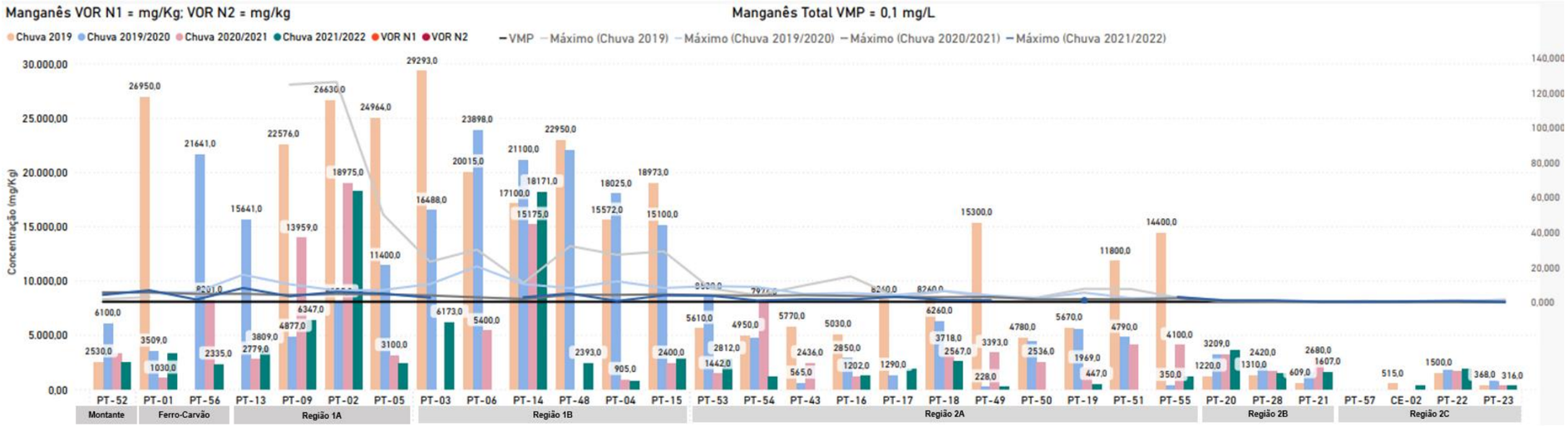
Da mesma forma, ao se integrar essa avaliação ao comportamento das águas, as concentrações máximas de Manganês total na água superficial tiveram redução nas concentrações ao longo dos quatro períodos de chuva.

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 as concentrações máximas já superavam os valores da Resolução COPAM 01/2008 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. No caso da água superficial, as concentrações atenuaram no tempo e espaço também, sendo que, na chuva, as concentrações oscilam, haja vista o aumento dos materiais em suspensão transportados sob regime de maior fluxo.

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 óxidos 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 somente 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). De acordo com 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.

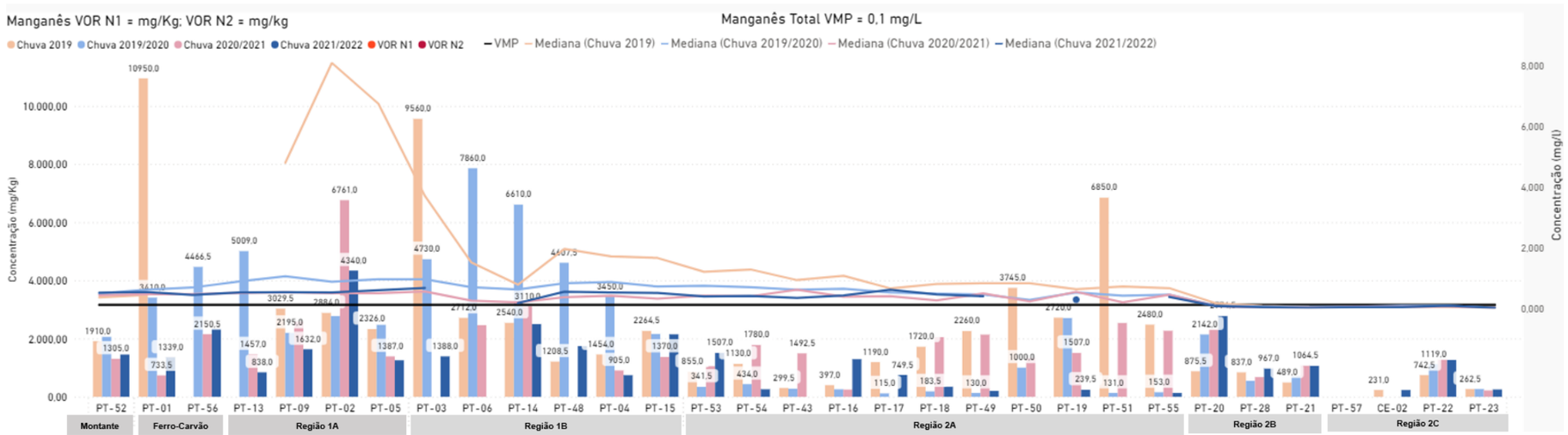
Manganês

Figura 15.5.1a: Evolução das concentrações máximas de manganês em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022. A linha sólida preta representa o valor de referência para Manganês obtido de Vicq (2015).

Figura 15.5.2b: Evolução das concentrações medianas de manganês em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração mediana do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



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 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 15.3-2a**, que na região Montante, as concentrações máximas estiveram na faixa de 110.000 a 135.000 mg/kg ao longo dos períodos de chuva de 2019 e 2019/2020, com reduções nos próximos períodos, 110.000 mg/kg a 800 mg/kg, nas chuvas de 2020/2021 e 2021/2022. As maiores concentrações ficaram nas regiões 1A e 1B (PT-13 ao PT-15), na chuva de 2019 (entre 279.000 e 363.000 mg/kg), 2020/2021 (entre 221.000 e 358.000 mg/kg) como também na chuva de 2021/2022 (89.000 mg/kg e 277.000 mg/kg), enquanto na chuva 2019/2020 a maior concentração foi verificada na região de Ferro Carvão (acima de 375.000 mg/kg), correspondente ao ponto PT-56. Para a maioria dos pontos que compõe esses dois trechos analisados, percebeu-se redução nas concentrações máximas ao longo dos períodos sazonais considerados. As exceções correspondem ao PT-13, PT-02 e PT-04, pontos que apresentaram incremento entre os dois últimos períodos de chuva. Entretanto, elas ainda permaneceram maiores quando comparadas aos resultados obtidos pela CPRM em 2008 e 2009 em tributários desta região. Mais ainda, as concentrações máximas para o período de chuva recente, ficaram acima de 89.000 mg/kg nessas regiões, enquanto tanto a montante quanto a jusante nas regiões 1A e 1B, as concentrações foram menores que 86.400 mg/kg, mostrando que o trecho mais afetado pelo rejeito da barragem continua na chuva de 2021/2022 com as maiores concentrações de Ferro.

Na região 2A (PT-53 ao PT-55), as concentrações máximas foram menores em relação a 1A e 1B, variando na chuva de 2019 (120.000 mg/kg a 278.000 mg/kg); na chuva 2019/2020 (13.700 mg/kg a 152.000 mg/kg), chuva 2020/2021 (52.600 mg/kg a 185.000 mg/kg), enquanto na chuva 2021/2022 (5.802 mg/kg a 80.304 mg/kg), percebendo assim uma redução das concentrações máximas de Ferro no sedimento ao longo dos períodos monitorados. Na região 2B (PT-20 ao PT-21), as concentrações nas chuvas de 2019 a 2020/2021 foram predominantes entre 56.300 e 121.000 mg/kg, evidenciando um comportamento de redução quando comparado ao último período de chuva 2021/2022 (85.373 mg/kg a 69.908 mg/kg). Nas duas regiões, em alguns pontos as variações foram maiores que a referência da CPRM de 2008 a 2009 (maiores que 35.000 mg/kg até a 2B) 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 (PT-57 ao PT-23), as concentrações máximas de ferro foram predominantemente na faixa de 40.000 e 80.000 mg/kg ao longo das chuvas 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 redução nas concentrações de Ferro ao longo dos períodos sazonais. Para os resultados medianos (**Figura 15.5.3b**), são verificadas concentrações mais reduzidas quando comparadas aos resultados máximos para os pontos ao longo de toda a bacia. Verificando-se a distribuição desses elementos com o comportamento dos índices químicos composicionais evidencia-se predominância das maiores concentrações de Ferro até o PT-14 em 2021 e 2022 (em 2019 e 2020 avançavam até o PT-54 e PT-15, respectivamente), indicando predomínio de sedimentos com composição química de rejeitos UTE Igarapé,

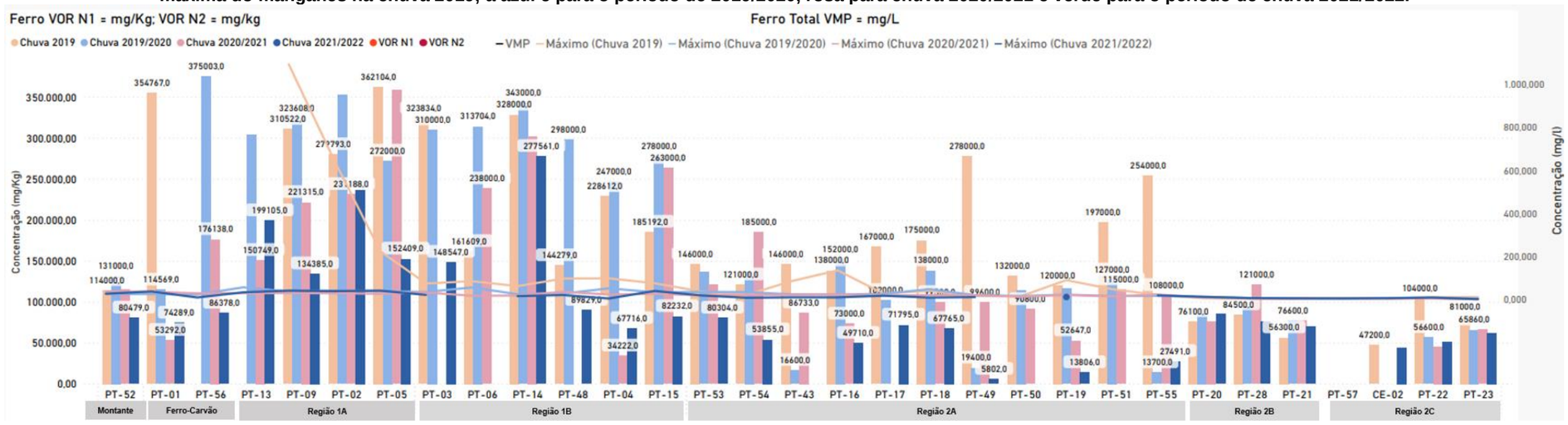
Esta evidência também fora observada na avaliação da carga de fundo do rio Paraopeba (Relatório DISPERSÃO DE REJEITOS NA CARGA DE FUNDO DO RIO PARAOPEBA APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM B1, 2ª CAMPANHA (2020, Arcadis 2021b). Neste estudo, as análises mineralógicas evidenciaram que a densidade dos sedimentos (acima de 3,2g/cm3) 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/cm3. 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 da barragem 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 granitóides e gnaisses do Complexo Bonfim e metassedimentos do Grupo Bambuí.

Avaliando-se o comportamento da água, percebe-se, no **Gráfico 15.3-2**, 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, o PT-52. À medida de se deslocou da fonte, 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 na chuva de 2019/2020 a 2021/2022, indicando com isso, que apesar da presença do rejeito da barragem B1 nos trechos das regiões 1A e 1B, as concentrações desse metal na água mostraram redução, haja vista a maior diluição dos materiais em suspensão transportados sob regime de maior fluxo.

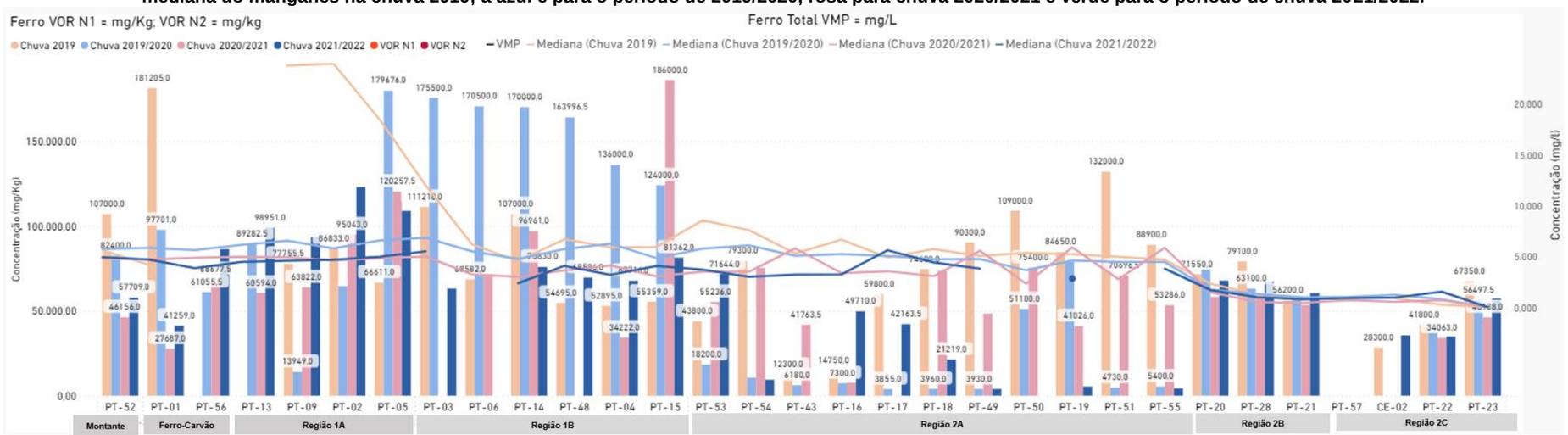
Ferro

Figura 15.5.4a: Evolução das concentrações máximas de ferro em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Figura 15.5.5b: Evolução das concentrações medianas de ferro em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração mediana do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 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 12600 mg/kg; na Região Ferro-Carvão, se encontravam as menores concentrações de Al, na ordem de 8000 mg/kg; na Região 1A, chegava a 12600mg/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 24600 mg/kg.

Avaliando-se os resultados ao longo dos períodos sazonais de chuva, percebeu-se que, na Região Montante do rompimento da barragem (PT-52), já eram apontadas concentrações entre 46.000 e 61.000 e mg/kg (chuva 2019, 2019/2020), na ordem de 84.500 na chuva 2020/2021 e redução no próximo período chuvoso, totalizando em 30.305 mg/kg (2021/2022), sendo esse último valor, até 2,5 vezes maior que os dados da CPRM (2018) (**Figura 15.3-3**a). 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.

As regiões 1A e 1B (PT-13 ao PT-15), foram as mais afetadas pelo rejeito da barragem B1. A região 1A, apresentou, redução nas concentrações máximas de alumínio para os dois primeiros períodos analisados, variando entre 17.037 mg/kg a 21.412 mg/kg (chuva 2019); 18.820 mg/kg a 39.012 mg/kg (chuva 2020/2021), aumento das concentrações para o terceiro período de chuva, variando de 10.967 mg/kg a 25.800 mg/kg (chuva 2020/2021) e novamente, redução para o último período de chuva, variando de 9.145 mg/kg a 19.087 mg/kg (2021/2022).

Na região 1B, as variações foram maiores que em 1A ficando entre 19.615 mg/kg a 77.300 mg/kg (chuva 2019); 24.600 mg/kg a 38.500 mg/kg (chuva 2019/2020), entre 5.379 mg/kg e 77.000 mg/kg (chuva 2020/2021) e 8.070 mg/kg e 28.981 mg/kg (chuva 2021/2022) e mostraram que o rompimento da barragem teve contribuição de alumínio em 2019, porém em concentrações menores que na região Montante (com exceção do PT-14) 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, apresentaram as maiores concentrações, principalmente a partir do PT-18 até reservatório de Retiro Baixo, onde verificou-se, acúmulo de concentrações de Al entre 86.000 mg/kg a 103.000 mg/kg (chuva 2019), entre 76.900 mg/kg a 99.000 mg/kg (chuva 2019/2020), entre 39.900 mg/kg a 137.000 mg/kg (chuva 2020/2021) e entre 49.400 mg/kg a 60.300 mg/kg (chuva 2021/2022).

Quanto aos resultados medianos (**Figura 15.5.3b**), 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. 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 (PT-57 ao PT-23), a jusante da UHE Retiro Baixo, também, é envolvida por contribuições de rochas intemperizadas do Grupo Bambuí. 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 na **Figura 15.3-3a** 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. As chuvas atípicas de 2019/2020, reflete nas concentrações de Alumínio concentrações mais elevadas no Ferro-Carvão e região 1A. Os ápices verificados nas regiões 1B e 2A podem estar relacionados ao material mais enriquecido em Al proveniente das regiões a montante delas. Já na chuva de 2020/2021, percebeu-se que as concentrações máximas também se reduziram na bacia do rio Paraopeba, sendo desta vez, com máximas semelhantes até a região 2A, mostrando, mais uma vez, a contribuição de aportes locais e da presença de alumínio provenientes potencialmente de solos e de intemperismos de rochas da bacia. 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).

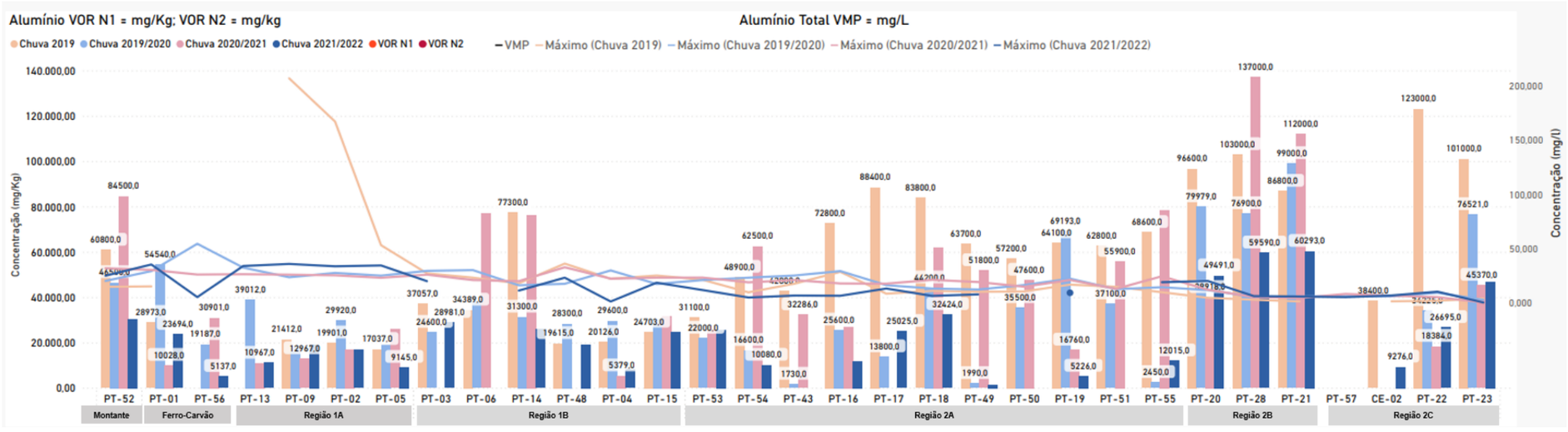
Já o Alumínio dissolvido, no meio aquoso natural, é, em princípio, controlado principalmente por Al-óxi-hidróxidos como a gibbsita (α-Al_2O_3), um óxido de Al cristalino muito comum em solos e sedimentos naturais (vide referencial térico, Relatório de Fechamento de ciclo de abril/2021 e outubro/2021). 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.

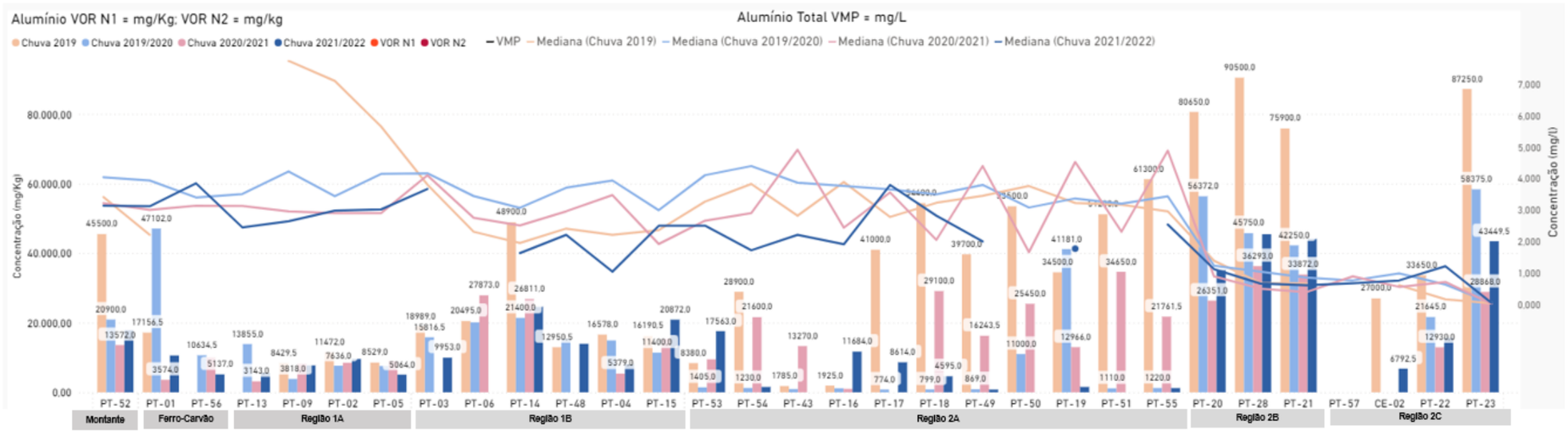
Alumínio

Figura 15.5.6a: Evolução das concentrações máximas de alumínio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Figura 15.5.7b: Evolução das concentrações medianas de alumínio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração mediana do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



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 (**Figura 15.3-4a**), 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).

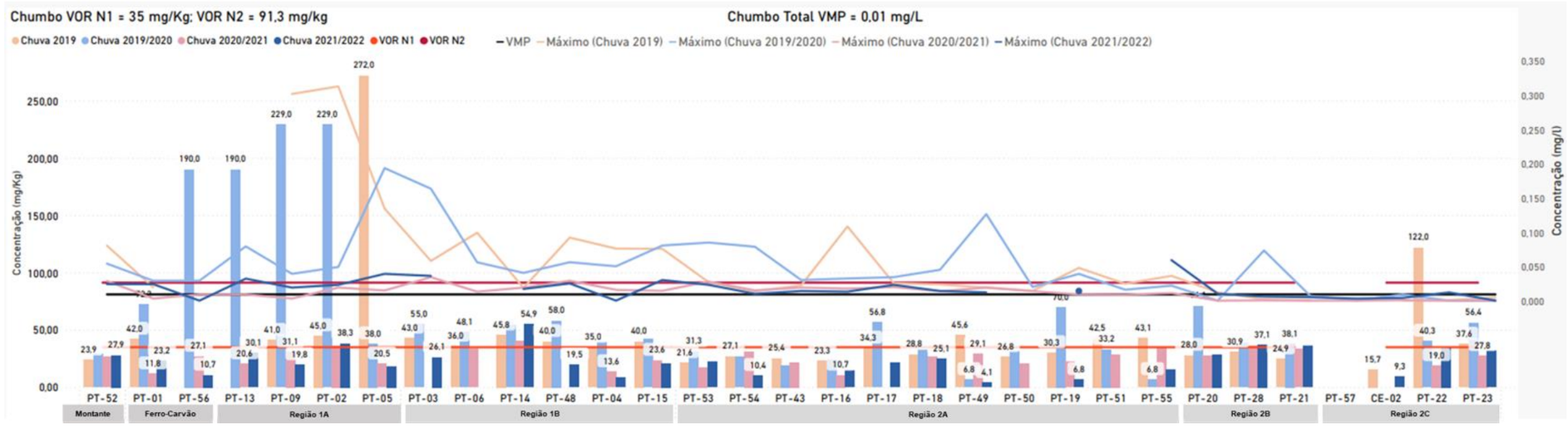
A Região 1A, entre os pontos PT-13 e PT-05, apresentaram concentrações na ordem de 229 a 272 mg/kg nos períodos de chuva de 2019 e 2019/2020 e se reduziram bruscamente para a abaixo de 40 mg/kg no último período de chuva, ficando qualitativamente superior, mas ainda próximo as concentrações levantadas pela CPRM (2018). Os valores anômalos de chumbo não se dispersaram para outras regiões, ainda que tenham sido detectadas concentrações na faixa 122 mg/kg na região 2C na chuva de 2019 e posteriormente, de 70 mg/kg na chuva de 2019/2020 na região 2A e 2B. Vale ressaltar que os valores medianos para o PT-05 (18 mg/kg) e PT-22 (16 mg/kg), ambos registrados em 2019, distanciam-se em até 16 e 8 vezes, respectivamente, dos valores máximos registrados para estes pontos (**Figura 15.3-4b**). Na Região 1B, do ponto PT-03 ao PT-15, a máxima concentração verificada foi de 58 mg/kg, sendo o comportamento predominante de redução das concentrações ao longo dos períodos de chuva, com excessão do PT-14 que apresentou elevação no período de chuva 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.

Na região 2A (PT-53 a PT-55), observa-se para a maioria desses pontos, um comportamento decrescente ao longo dos períodos, principalmente em relação ao último período de chuva 2021/2022. Os resultados máximos variaram de 4,1 mg/kg (PT-49, chuva 2021/2022) a 70 mg/kg (PT-19, chuva 2019/2020). Na região 2B, que contempla os pontos PT-20, PT-28 e PT-21, a uma pequena variação das concentrações máximas ao longo dos períodos, com exceção do PT-20 que apresenta na chuva de 2019/2020, concentração máxima de 71,10 mg/kg. Na última região, 2C, as máximas ficaram entre 9,3 (CE-02, chuva 2021/2022) e 122 mg/kg (PT-22, chuva 2019). Ressalta-se que a mediana do PT-22 não ultrapassou 16 mg/kg.

Avaliando-se os resultados da água ao longo dos períodos sazonais de chuva, analogamente, ao que ocorreu com o sedimento, percebeu-se que o período mais intenso da presença do Chumbo total foi no primeiro período de chuva de 2019 e na região mais afetada, principalmente. Valores mais altos também foram verificados no início da Região 1B na chuva de 2019/2020. Nos períodos seguintes, sua ocorrência foi se reduzindo a ocorrências pontuais, possivelmente, relacionadas a aportes locais, e não ultrapassaram o VMP.

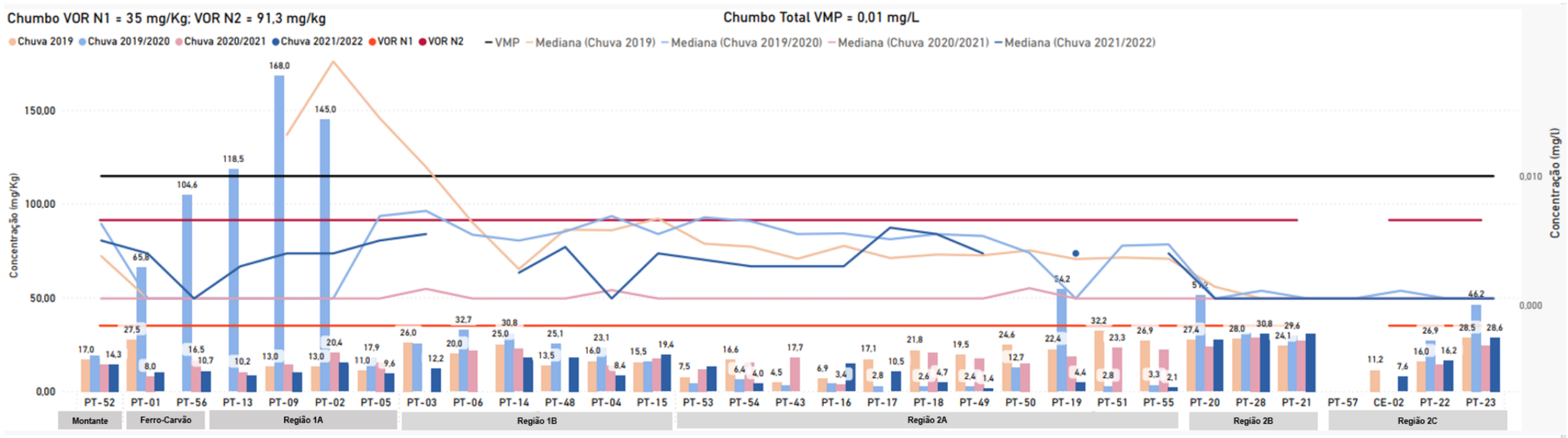
Chumbo

Figura 15.5.8a: Evolução das concentrações máximas de chumbo em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Figura 15.5.9b: Evolução das concentrações medianas de chumbo em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



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 chuva na **Figura 15.3-5a,** tem-se que no decorrer dos períodos considerados, as concentrações de níquel nos sedimentos, principalmente no final da região 1B e ao longo da 2A, se apresentaram menores que as regiões adjacentes a essas, 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.

Observa-se que na Região 1A (PT-13 ao PT-15), as concentrações máximas variaram de 12,5 mg/kg (PT-05, chuva 2021/2022) a 60,4 (PT-13, chuva 2019/2020). Já na Região 1B (PT-03 ao PT-15), houve variação de 11 mg/kg (PT-04, chuva 2021/2022) a 182 mg/kg (PT-15, chuva 2019/2020), sendo este último valor, bem divergente do quantificado para a mediana deste ponto no mesmo período, 19,85 mg/kg (**Figura 15.3-5b)**.

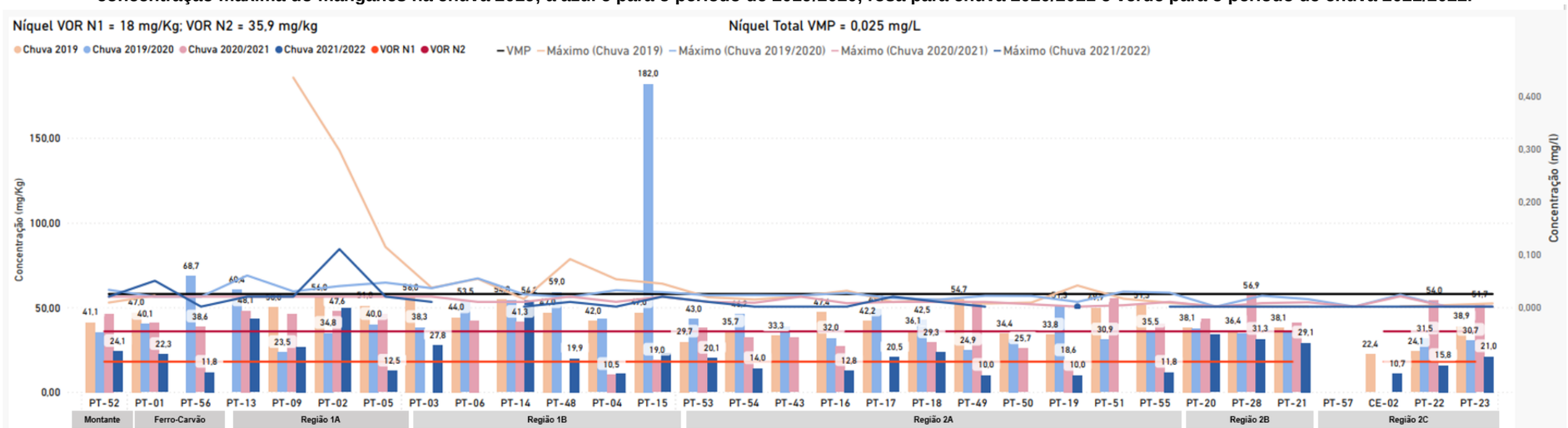
Na região 2A (PT-53 a PT-55), observa-se principalmente no decorrer dos últimos três períodos de chuva, uma redução das concentrações máximas. Tais resultados variaram de 10 mg/kg (PT-49 e PT-19, chuva 2021/2022) a 54,7 mg/kg (PT-49, chuva 2019). Na região 2B, que contempla os pontos PT-20, PT-28 e PT-21, a uma pequena variação das concentrações, sendo verificada redução entre o período de chuva 2019 para 2019/2020 e de 2020/2021 para 2021/2022, com máximas ficando entre 29,1 mg/kg e 56,9 mg/kg. Na última região, 2C, do PT-57 ao PT-23, as máximas ficaram entre 10,7 (CE-02, chuva 2021/2022) e 54 mg/kg (PT-22, chuva 2020/2021). Ao se comparar estes valores, de forma qualitativa, com os dados da CPRM (2018), os dados coletados permaneceram em até três vezes mais elevados.

Na análise desses dados, percebeu-se que a bacia teve 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 chuva de 2021/2022, a redução do Níquel foi maior em todo o rio Paraopeba. Em alguns locais como no PT-02 e PT-14 ainda se notaram alguns acúmulos do Níquel sendo reflexo da condição morfodinâmica local e que reteve mais 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 (**Figura 15.3-5b).** 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.

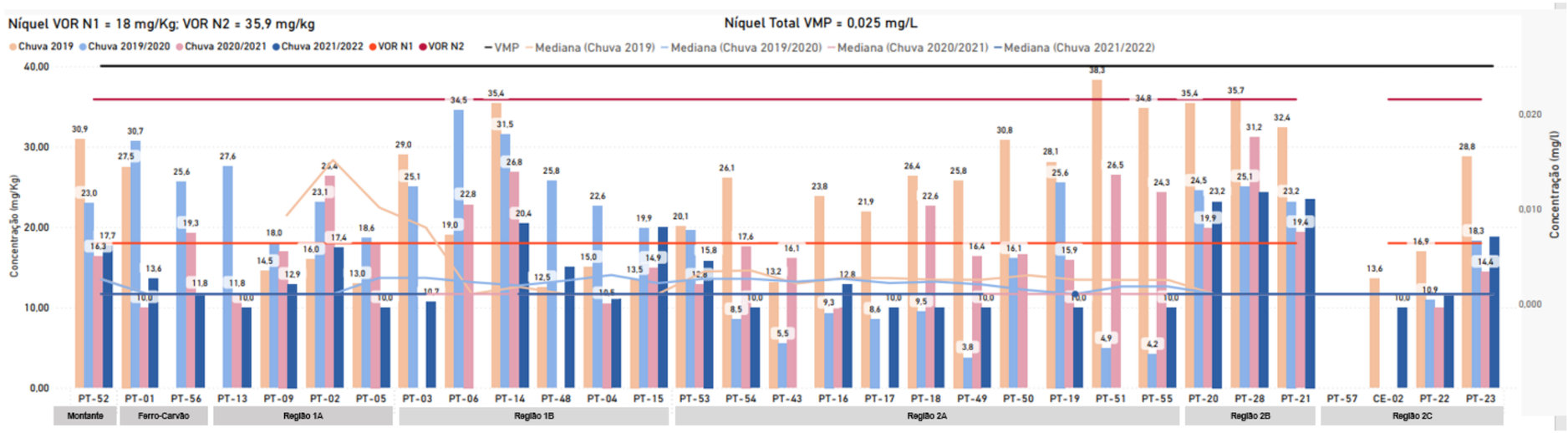
Níquel

Figura 15.5.10a: Evolução das concentrações máximas de níquel em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis, 2022.

Figura 15.5.11b: Evolução das concentrações medianas de níquel em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



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 chuva, notou-se uma nítida redução dos valores máximos de cobre no tempo e no espaço (**Figura 15.3-6a**) no rio Paraopeba. A Região 1A, entre os pontos PT-13 e PT-05, apresentaram concentrações na ordem de 16,2 (PT-56, chuva 2021/2022) a 199 mg/kg (PT-02, chuva 2019). Percebe-se para esse trecho que os registros máximos foram verificados principalmente na chuva de 2019, seguido de um posterior comportamento de redução ao longo dos pontos, com exceção do PT-02, que apresentou aumento de cobre no sedimento no último período de chuva. Na Região 1B, do ponto PT-03 ao PT-15, a máxima concentração verificada foi de 154 mg/kg, na chuva de 2019/2020, sendo o comportamento predominante de redução das concentrações ao longo dos períodos de chuva, com exceção do PT-14 que apresentou elevação no período de chuva 2021/2022, assim como também verificado para outros parâmetros. Ainda assim, para este ponto, a concentração mediana neste período, não ultrapassou 32 mg/kg (**Figura 15.3-6b)**. 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.

Na região 2A (PT-53 a PT-55), observa-se para a maioria desses pontos, um comportamento decrescente ao longo dos períodos, apesar de ser perceptível aumento das concentrações na chuva de 2020/2021. O resultado máximo atingiu 93,4 mg/kg (PT-51, chuva 2019) e os valores mais amenos ficaram próximos a 5 mg/kg. Na região 2B, que contempla os pontos PT-20, PT-28 e PT-21, houve redução das concentrações entre os dois primeiros períodos chuvosos e aumento entre os dois últimos, todavia, as variações entre eles não apresentaram grande oscilação entre os máximos atingidos, 42,70 mg/kg (PT-21, chuva 2021/2022) e 63,6 mg/kg (PT-28, chuva 2019). Na última região, 2C, as máximas ficaram entre 10,2 (CE-02, chuva 2021/2022) e 61,5 mg/kg (PT-23, chuva 2019).

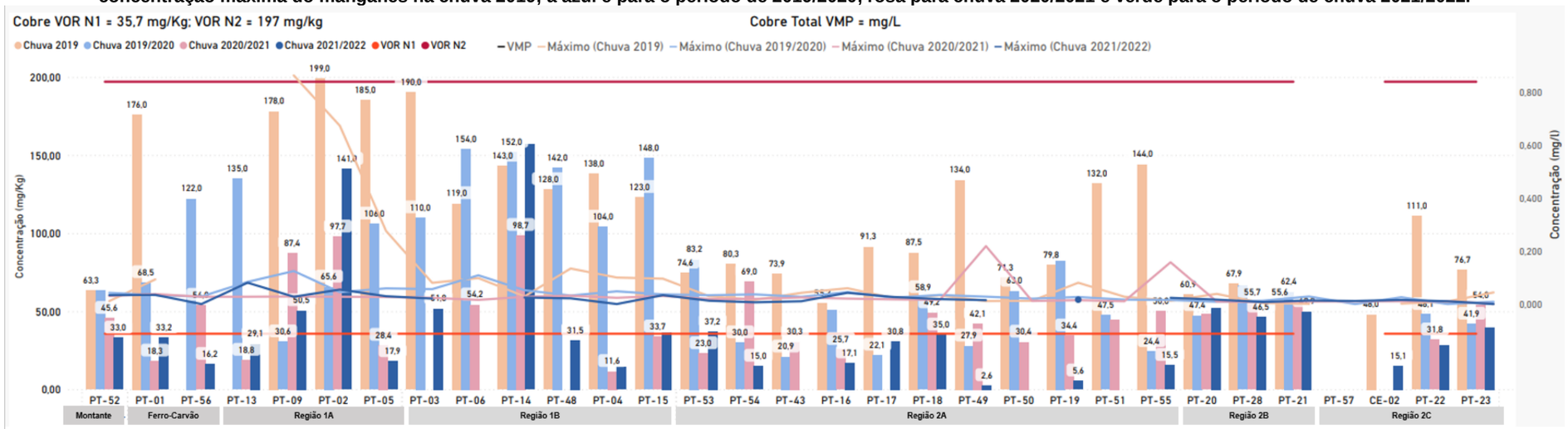
Há de se notar que materiais contendo cobre podem ter adentrado à bacia seja por causa da presença do rejeito, seja por contribuições difusas (intemperismos de rochas, efluentes, dragagens de areia, erosões do solo). Estas concentrações são maiores quando comparadas qualitativamente com os resultados 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 15.3-6a** que o Cobre total foi mais elevado nas regiões 1A e 1B na chuva de 2019, variando os valores máximos de 0,86 mg/L a 0,03 mg/L, bem como também foram superiores em relação a Região de Montante, na qual apresentou valor máximo de 0,1 mg/L (PT-52). Para as regiões a jusante da 1B, houve redução significativa do quantitativo de Cobre na água, ficando os valores máximos entre 0,08 mg/L e menor que 0,01 mg/L. 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. Logo, acima no nível 2 ficou apenas a concentração do PT-09, ficando os demais pontos avaliados, acima do nível 1.

Observa-se ainda que, para a chuva de 2019/2020, houve redução do quantitativo de Cobre, ficando as regiões 1A e 1B, ainda com os valores mais altos. Em 2020/2021, as reduções mantiveram com exceção dos máximos verificados no PT-49 (0,22 mg/L) e PT-55 (0,16 mg/L). Para a chuva de 2021/2022, os maiores valores foram verificados na 1A (atingindo 0,08 mg/L no PT-13), superando aqueles registrados no período de chuva anterior.

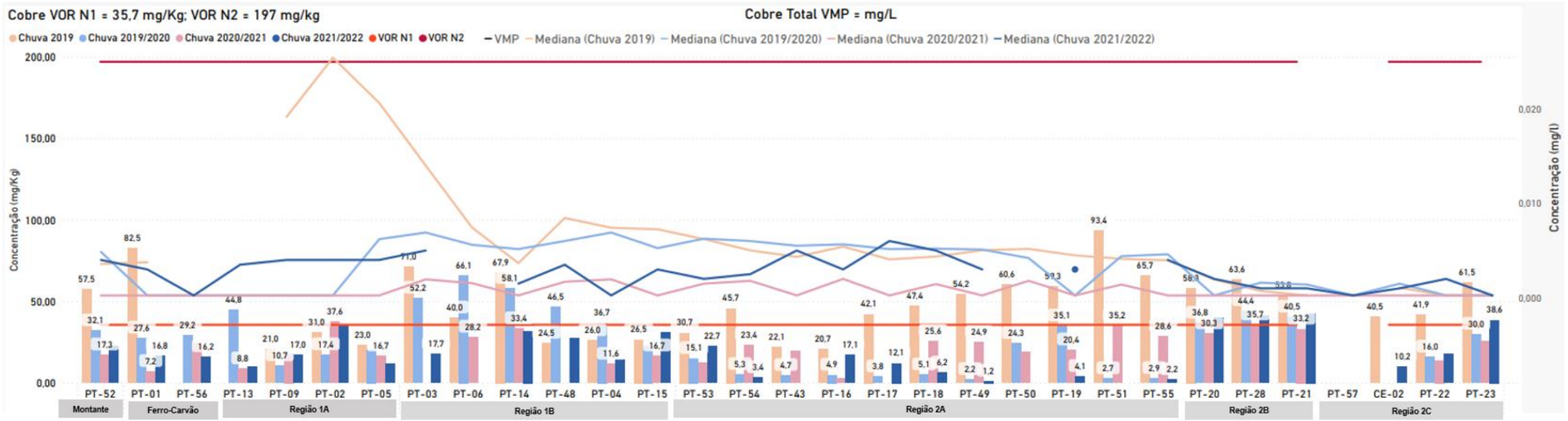
Quanto as concentrações medianas **(Gráfico 15.3-6b)**, de maneira geral, nota-se um distanciamento das mesmas em relação aos valores máximos, principalmente da Região de Ferro-Carvão até o final da Região 1B, e na 2A com foco para o período de chuva de 2019.

Figura 15.5.12a: Evolução das concentrações máximas de cobre em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



Elaboração: Arcadis (2022).

Figura 15.5.13b: Evolução das concentrações medianas de cobre em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022.



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 de chuva (**Figura 15.3-7a**), tem-se que apresentam tendência de concentrações de forma semelhante com as estações secas (Arcadis, 2021 relatório de Fechamento de ciclo, abril/2021). As variações entre os períodos sazonais também são próximas mostrando um pequeno aumento nos períodos de estiagem em relação ao de chuvas.

A Região 1A, entre os pontos PT-13 e PT-05, apresentaram concentrações na ordem de 11,6 (PT-05, chuva 2021/2022) a 27,2 mg/kg (PT-13, chuva 2019/2020). Percebe-se para esse trecho pouca variação entre os períodos de chuva. Na Região 1B, do ponto PT-03 ao PT-15, a máxima concentração verificada foi de 27 mg/kg, na chuva de 2019, sendo o comportamento predominante de redução para este ponto ao longo dos períodos de chuva. Na 2A, nota-se uma elevação de Arsênio na chuva 2020/2021 no ponto PT-16, entretanto, variações menos abruptas são verificadas nos demais períodos de chuva para este ponto. Ainda nesta região, verifica-se maiores distanciamento das concentrações máximas no PT-49 e PT-55. Nas regiões mais a jusante, 2B e 2C, percebe-se também pouca variabilidade das concentrações máximas para os pontos com informação para a chuva/2019 a chuva 2021/2022.

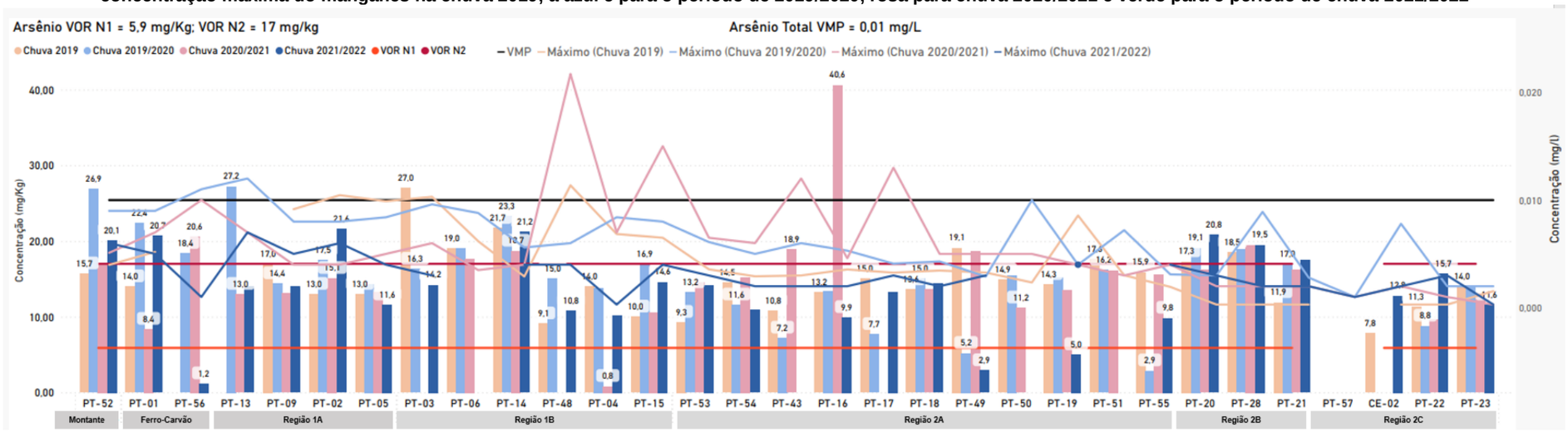
Quanto as concentrações medianas, **Figura 15.3-7b**, nas regiões imediatamente após o Ferro Carvão, 1A e 1B, nota-se em geral, poucas variações entre os períodos de chuva considerados. Na região 2A (PT-53 a PT-55), observa-se uma discrepância entre os períodos chuvosos, principalmente quando se compara chuva de 2019 e 2020/2021 com as demais, sendo as menores as menores concentrações desse elemento disponíveis no período de chuva 2021/2022. Os valores máximos para essa região variaram de 0,9 (PT-49, chuva 2021/2022) 14,4 mg/kg (PT-55, chuva 2019). Na região 2B, que contempla os pontos PT-20, PT-28 e PT-21, houve um comportamento dominante de redução das concentrações entre os períodos chuvosos, sendo os máximos atingidos de 11,10 mg/kg (PT-21, chuva 2019) e 18 mg/kg (PT-28, chuva 2019). Na última região, correspondente aos pontos PT-57 a PT-23, os resultados máximos oscilaram entre 3,8 mg/kg (CE-02, chuva 2019) e 10,6 mg/kg (PT-23, chuva 2019).

As maiores concentrações que ocorreram em 2019 e nas regiões 1A (próximo a confluência com o Ferro-Carvão e no PT-02) e na 1B (entre o PT-06 e o PT-14, próximos ao barramento da usina termoelétrica de Igarapé) 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).

Com relação à água superficial, na Região 1A, a disponibilidade de arsênio total foi maior em 2019 em relação a todas as outras regiões. Na chuva de 2019/2020 bem como 2020/2021, observa-se redução significativa do quantitativo deste elemento. Já na estiagem de 2020, as

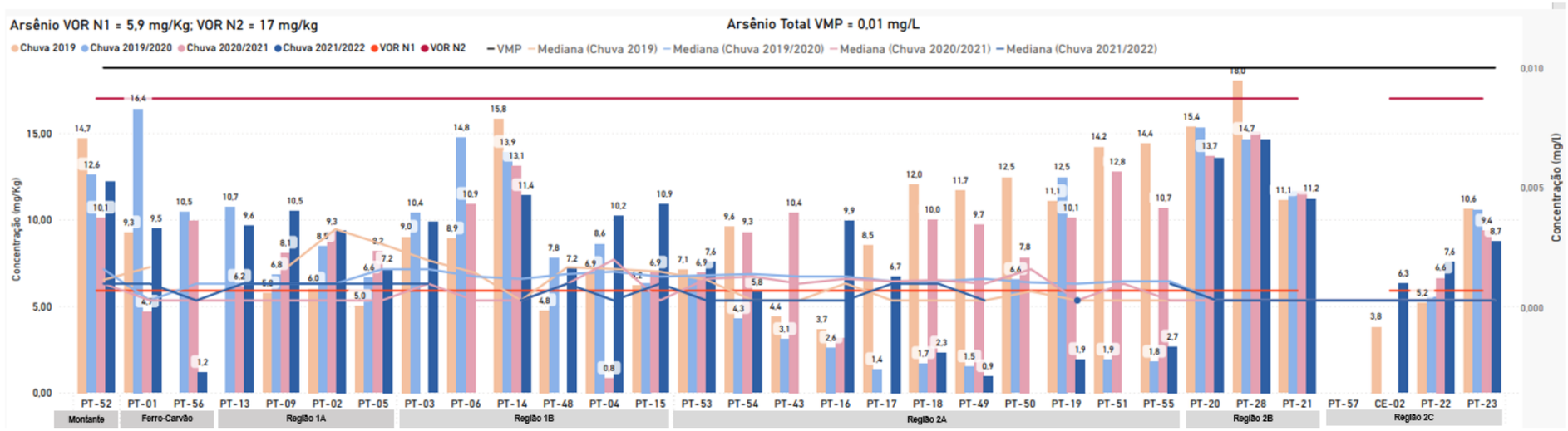
concentrações de arsênio total foram pontualmente maiores na região 2A entre PT-54 e PT-49. Considerando que as concentrações de arsênio só aumentaram nestas localidades, a fonte de seu aumento não foi exatamente identificada, podendo ser reflexo de atividades locais como extração de areia do rio. O 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 ao fato das concentrações identificadas à montante do PT-54 serem todas, com exceção do PT-14, menores que no trecho entre PT-54 e PT-49. No período de chuva de 2021/2022, de modo geral, as concentrações de arsênio total apresentaram proximidade com as concentrações verificadas anteriormente, e em alguns pontos específicos da região 2A, aumento em relação aos períodos anteriores, indicando persistência das concentrações.

Figura 15.5.14a: Evolução das concentrações máximas de arsênio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022



Elaboração: Arcadis (2022).

Figura 15.5.15b: Evolução das concentrações medianas de arsênio em relação aos períodos de chuva de 2019, 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022. As linhas e colunas apresentadas nas cores laranja representam a concentração máxima do manganês na chuva 2019; a azul é para o período de 2019/2020, rosa para chuva 2020/2021 e verde para o período de chuva 2021/2022



Elaboração: Arcadis, 2022.

15.6 Considerações

Em relação a água superficial, os analitos Manganês e Ferro foram os parâmetros indicadores que melhor definiram o deslocamento de sólidos em suspensão no rio Paraopeba em decorrência de suas persistências ao longo do tempo e do espaço. O Alumínio diferente dos anteriores, teve baixas concentrações na área fonte e à medida que se afastava da região do rompimento e avançava em direção a terrenos aos granitóides do Complexo Belo Horizonte e metassedimentares do Grupo Bambuí, sua concentração natural aumentava, indicando que a maior contribuição do Al já é proveniente da bacia, sendo, assim, caracterizado como um indicador secundário.

Na bacia do rio Paraopeba, desde antes do rompimento da barragem, ocorriam concentrações de Manganês total e Ferro total em todas as regiões monitoradas, ou seja, de Montante até à Região 2. Com o rompimento da barragem no período chuvoso de 2019, constatou-se um enriquecimento das concentrações dos referidos parâmetros, evidenciado na água até o ponto PT-21, na região do reservatório da UHE Retiro Baixo. A condição de baixas velocidades associada ao elevado fator de diluição e dispersão observado nesse ambiente, promoveu atenuação/diluição dessas concentrações, sem a observância de alterações nos valores de concentrações para além do ponto de monitoramento PT-21 (Km 315) e não se observou reflexo específico de materiais em suspensão da barragem B1 além do referido ponto PT-21. No caso dos sedimentos, as evidências foram identificadas com o manganês até o PT-55 no período chuvoso 2019 somente, ou seja, no km 281 antes de adentrar ao reservatório da UHE Retiro Baixo, não se constatando materiais com característica química do rejeito da barragem B1 além deste ponto e neste período.

Na chuva de 2019 percebeu-se que as concentrações dos principais elementos traçadores na água aumentaram com a elevação do quantitativo de chuva, aumento de nível da água e turbidez. Isso confirmou a tendência de aumento nas concentrações dos principais metais associados à assinatura química do rejeito ao longo do tempo e do espaço e um movimento de materiais que antes, no período de estiagem, apresentavam pouca mobilidade. Nas chuvas seguintes observadas, 2019/2020 e 2020/2021, a avaliação temporal mostrou o mesmo comportamento para os parâmetros quando comparada os períodos de chuva e estiagem. Considerando apenas os períodos de chuva, observa-se que em todos eles, o Alumínio, Ferro e Manganês apresentaram redução em toda área monitorada, em termos espaciais, e quando comparada a qualidade para esses parâmetros ao longo do tempo, nota-se para o Manganês, teores mais elevados na matriz de água na chuva de 2019, redução na chuva 2019/2020 e aumentos esporádicos na chuva de 2021/2022 se comparada com o período de 2020/201, principalmente na região de Montante a 1A e a partir da região 2B. Para o Alumínio, observa-se também maiores concentrações na chuva de 2019, e entre a chuva de 2019/2020 e 2021/2022, elevações pontuais ao longo desses períodos, o que pode ser relacionado a contribuições difusas. Considerando o último período de chuva, nas regiões 1B e 2A, esse elemento apresentou um menor quantitativo. Já para o Ferro, as maiores concentrações ocorreram na chuva de 2019 e as menores na chuva de 2021/2022. O comportamento para esses elementos mostra que, apesar dos incrementos pontuais, há uma melhora na qualidade das águas do rio Paraopeba.

Em relação aos metais traços como Chumbo, Níquel, Cobre e Arsênio avaliados, percebeu-se também redução temporal nas concentrações desses elementos desde 2019 quando havia material em suspensão proveniente do rejeito no rio Paraopeba e que aumentou as concentrações desses metais na água e foi se atenuando ao longo do tempo.

Como já mencionado no capítulo referente as conclusões das avaliações da água superficial, 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 como às contribuições das variações sazonais que afetaram a bacia como um todo. Esta esteve sujeita a condições hidrológicas com períodos de alta e baixa pluviosidade/vazão e com potencial de ressuspensão de rejeitos e sedimentos da calha do rio, além de escoamento superficial de sedimentos naturais na bacia como um todo.

Em relação aos sedimentos, na chuva de 2019, percebe-se dissipação das concentrações dos majoritários e traços, com exceção do Alumínio, que apresenta um evidente comportamento de elevação ao longo da bacia. Este elemento também acompanhou a pluma de turbidez em baixas concentrações, porém, à medida que se afastou da região do rompimento e avançou em direção a terrenos metassedimentares do Supergrupo Minas (Grupo Bambuí), sua concentração natural aumentou e camuflou seu comportamento, caracterizando-o, assim, como um indicador secundário. Vale destacar que na bacia do Paraopeba desde antes do rompimento da barragem ocorriam concentrações de Manganês total e Ferro total em todas as regiões monitoradas, ou seja, Montante até a Região 2. Com o rompimento da barragem, constatou-se um enriquecimento das concentrações dos referidos parâmetros, evidenciado até o ponto PT-21, na região do reservatório da UHE Retiro Baixo.

No ciclo de chuva 2019/2020, as concentrações das frações totais dos elementos traços na água superficial foram, de forma geral, menores quando comparadas com a chuva de 2019. Os aumentos foram verificados para a seguinte relação parâmetro-pontos: Chumbo (PT-52 ao PT-02, PT-03 ao PT-53, PT-17, PT-18, PT-50, PT-19, PT-20 ao PT-21 e PT-23), Níquel (PT-06, PT-48 ao PT-43, PT-17, PT-18, PT-19 e PT-22), Cobre (PT-52, PT-06 ao PT-48, PT-15, PT-53 e PT-19) e Arsênio (PT-52, PT-01, PT-02 ao PT-48, PT-15, PT-53, PT-16, PT-18, PT-50, PT-19, PT-20 ao PT-21). Para o Alumínio, Ferro e Manganês, entre esses períodos foi verificada redução do quantitativo, de maneira geral.

Na chuva de 2020/2021, o que se percebeu foi um aumento de Alumínio na região do reservatório de Retiro Baixo e para o Ferro e Manganês, uma redução espaço-temporal.O Manganês mostrou redução, porém localmente, na região montante, 1A e 1B em locais de maior retenção hidráulica (PT-02, PT-14) houve aumento pontual desse elemento. Importante lembrar que na avaliação dos índices químicos composicionais, os sedimentos com característica química de rejeitos predominam até o PT-14. O Arsênio também teve aumento na região 1B e entre PT-53 e PT-16. Nestas localidades há de se considerar a ocorrência de rochas máficas e ultramáficas do Grupo Nova Lima, que podem conter minerais contendo Arsênio em sua composição.

Para o período de chuva 2021/2022, na análise de tendência espacial de chuva ponto a ponto, o que se observou foi aumento na região 1A e 1B principalmente para Ferro e Manganês, e incrementos de Alumínio na região 2C. Em termos temporais, ao comparar os dois últimos

períodos de chuva, houve em geral, redução das concentrações dos majoritários. Considerando os traços, aumentos mais relevantes foram verificados, para o Chumbo no PT-14, Níquel no PT-13, PT-02 e PT-14, Cobre no PT-02 e PT-14 e Arsênio no PT-52, PT-01, PT-02, PT-14, PT-20, PT-28 e PT-21. Repara-se que onde está o reservatório da UHE Retiro Baixo, os sedimentos continuaram se acumulando sem observação de uma tendência definida.

Isso posto, tem-se que tanto para a água superficial quanto para os sedimentos existe uma condição mais favorável em termos de atenuação de concentração ao longo do tempo.

16. 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. 2020. *Relatório da qualidade da água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba*. Fechamento de ciclo (janeiro/2019 a setembro/2020).

ARCADIS. 2020. *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 & 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. 2020. *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. 2021. *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. 2021. *Relatório Ambiental Simplificado – Disposição de Rejeito em Cava (RAS):* Água Superficial. Relatório Anual – Março/2021. Belo Horizonte/MG.

ARCADIS.2021e. Informe Mensal de Desvios e Tratativas – *Capítulo 2: Avaliação dos resultados de Cádmio em sedimentos* – Dezembro/2021. Belo Horizonte/MG.

ARCADIS. 2022. *Programa Especial de Monitoramento da Qualidade de Águas e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno.* Abril/2022

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 COPAM/CERH-MG Nº 1, de 5 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte, 2008.

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.

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.