

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Jéssica Ingrid Matos Araújo

**ANÁLISE DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA E DE
SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS SITUADOS A JUSANTE DO ROMPIMENTO
DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO SITUADA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÓPEBA**

Belo Horizonte
2022

Jéssica Ingrid Matos Araújo

**ANÁLISE DOS DADOS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DA ÁGUA E DE
SEDIMENTOS DE RESERVATÓRIOS SITUADOS A JUSANTE DO ROMPIMENTO
DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO SITUADA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÓPEBA**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, Prevenção e Controle da Poluição

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa
Oliveira

Coorientadora: Lenora Nunes Ludolf Gomes

A663a

Araújo, Jéssica Ingrid Matos.

Análise dos dados de monitoramento de qualidade da água e de sedimentos de reservatórios situados a jusante do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro situada na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba [recurso eletrônico] / Jéssica Ingrid Matos Araújo. – 2022. 1 recurso online (184 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira.

Coorientadora: Lenora Nunes Ludolf Gomes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 160-184.

Bibliografia: f. 150-159.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Água - Qualidade - Teses. 4. Reservatório - Sedimentação - Teses. 5. Reservatórios - Teses. 6. Paraopeba, Rio (MG) - Teses. I. Oliveira, Sílvia Maria Alves Corrêa. II. Gomes, Lenora Nunes Ludolf. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

["Análise dos dados de monitoramento de qualidade da água e de sedimentos de reservatórios situados a jusante do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro situada na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba "]

[Jéssica Ingrid Matos Araújo]

Dissertação de Mestrado] defendida e aprovada, no dia [11 de fevereiro de 2022], pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação **EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**] da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

[Profa. Dra. Gilmare Antônia da Silva - **Membro Externo**]

[UFOP]

[Profa. Dra. Wanderlene Ferreira Nacif - **Membro Externo**]

[IGAM]

[Profa. Dra. Lenora Nunes Ludolf Gomes - **Coorientadora**]

[UNB]

[Profa. Dra. Silvia Maria Alves Corrêa Oliveira - **Orientadora**]

[UFMG]

APROVADA PELO COLEGIADO DO PPG SMARH

Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima - Coordenadora

Belo Horizonte, 11 de fevereiro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Silvia Maria Alves Correa Oliveira, Professora do Magistério Superior**, em 14/02/2022, às 07:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lenora Nunes Ludolf Gomes, Usuário Externo**, em 14/02/2022, às 12:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanderlene Ferreira Nacif, Usuário Externo**, em 21/02/2022, às 09:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilmare Antônia da Silva, Usuária Externa**, em 01/03/2022, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 18/05/2022, às 14:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1249613** e o código CRC **04E34A49**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre caminhando comigo e me protegendo.

Ao meu esposo Lucas, por todo amor, companheirismo, suporte, paciência, por acreditar em mim quando eu mesma tinha dúvida e pela compreensão da minha ausência em diversos momentos importantes das nossas vidas.

À minha mãe e ao meu padrasto, pela paciência, amor, aceitação das minhas ausências e estudos em horários atípicos ao longo dessa trajetória.

À minha orientadora Sílvia e coorientadora Lenora, pela paciência, por todo apoio, ensinamentos e pelas inúmeras contribuições para esse trabalho.

Às pesquisadoras do GETEDA Ana, Gabriela, Karla e Marina, pelo apoio, parceria, incentivo, ensinamentos e companheirismo durante essa jornada.

À minha família, meus amigos(as) e colegas, pelos momentos de descontração e incentivo ao longo dessa caminhada, pelas palavras de conforto e carinho em diversas momentos.

Aos amigos(as) e colegas do Programa do Pós-Graduação de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH) - 2020/1, por todo incentivo, apoio, companheirismo em vários momentos ao longo do Mestrado, mediante o ensino remoto.

Aos amigos(as) e colegas de trabalho, pelo companheirismo, pelas palavras de encorajamento e conforto e por contribuírem para que fosse possível conciliar o Mestrado com o trabalho.

Aos alunos de Iniciação Científica que me acompanharam ao longo da etapa final dessa jornada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH) que contribuíram para minha formação.

Aos funcionários do SMARH, por sempre sanarem as minhas dúvidas.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite e por todas as contribuições.

Ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por todo auxílio e pela disponibilização dos dados de monitoramento.

À Capes, pela disponibilização da bolsa de pesquisa, durante um certo período do Mestrado.

RESUMO

As atividades minerárias são de extrema importância para o Estado de Minas Gerais, no entanto, podem gerar diversos danos ao meio ambiente. No dia 25 de janeiro de 2019 houve o rompimento da barragem de contenção de rejeitos de minério de ferro B1, na Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG, com a liberação de 12 Mm³ de rejeito para o meio ambiente, sendo que uma parcela desse rejeito foi dissipada pelo rio Paraopeba. Para avaliar a qualidade da água e dos sedimentos dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas Retiro Baixo e Três Marias, situadas a jusante da barragem de contenção de rejeitos B1, foram empregados os dados do Programa Especial de Monitoramento da Qualidade da Água e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno (PMQS-TM), efetuado pela Vale S.A, nas bacias hidrográficas do rio Paraopeba (SF3) e do Entorno da Represa de Três Marias (SF4). Diversas ferramentas estatísticas foram empregadas como: a) testes não-paramétricos U de *Mann-Whitney* (MW) e de *Kruskal-Wallis* (KW), para verificar se existe diferença significativa entre os valores de mediana dos parâmetros analisados nos períodos seco e chuvoso; b) a análise de conformidade aos padrões da legislação vigente ou aos valores de referência existentes; c) Análise de Cluster (AC) e a Fatorial (AF) para verificar as variações de qualidade da água nos diversos pontos de monitoramento e quais parâmetros foram responsáveis pelos impactos. Foi efetuado o tratamento prévio do banco de dados e adotados critérios para a seleção dos pontos de monitoramento, parâmetros e período de dados a ser considerado. As análises foram realizadas considerando: os distintos compartimentos (água e sedimentos); os ecossistemas lânticos e lóticos; os períodos secos e chuvosos; além da profundidade da coluna d'água, no caso dos ecossistemas lânticos. Como resultado obteve-se que: i) por meio do teste de MW verificou-se o predomínio das diferenças significativas nos dados referentes à avaliação da qualidade da água, no período chuvoso; ii) foram observados elevados percentuais de desconformidade dos parâmetros de qualidade da água aos limites vigentes na legislação e dos parâmetros de qualidade dos sedimentos aos valores de referência existentes na literatura; iii) através da AC foi observado o agrupamento dos pontos por semelhança nos diferentes ecossistemas; iv) por meio da AF foi possível verificar quais os parâmetros explicam a maior variabilidade dos dados na água e nos sedimentos; v) através dos testes não-paramétricos supracitados identificou-se os parâmetros que apresentavam diferença significativa entre os distintos compartimentos,

baseando-se nos agrupamentos anteriormente formados; vi) a comparação dos dados de pré e pós-rompimento indicou diferenças significativas, tanto no período seco, quanto no chuvoso, na estação situada a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo; vii) a análise espacial das estações imediatamente a montante e a jusante da UHE Retiro Baixo indicou que o ferro total apresentou diferença em ambos os períodos em estudo, quanto o manganês total apenas no período chuvoso.

Palavras-chave: Qualidade da água. Sedimentos. Rompimento de barragem. Reservatório da UHE Retiro Baixo. Reservatório da UHE Três Marias. Rio Paraopeba. Análises multivariadas.

ABSTRACT

Mining activities are extremely important for the State of Minas Gerais, however, they can cause several damages to the environment. On January 25, 2019, the B1 iron ore tailings containment dam at the Córrego do Feijão Mine, in Brumadinho/MG, burst, releasing 12 Mm³ of tailings into the environment, a portion of this tailings was dissipated by the Paraopeba River. Data from the Special Program for Monitoring the Quality of Water and Sediments of the Três Marias and surroundings (PMQS-TM), carried out by Vale SA, in the hydrographic basins of the Paraopeba River (SF3) and the surroundings of the Três Marias Reservoir (SF4). Several statistical tools were used, such as: a) non-parametric U of Mann-Whitney (MW) and Kruskal-Wallis (KW) tests, to verify if there is a significant difference between the median values of the parameters analyzed in the dry and rainy seasons; b) analysis of compliance with current legislation standards or existing reference values; c) Cluster Analysis (CA) and Factor Analysis (FA) to verify the variations in water quality at the various monitoring points and which parameters were responsible for the impacts. The database was pre-processed, and criteria were adopted for the selection of monitoring points, parameters and data period to be considered. The analyzes were carried out considering: the different compartments (water and sediments); lentic and lotic ecosystems; dry and rainy periods; besides this the depth of the water column was also considered, in the case of lentic ecosystems. As a result, it was found that: i) through the MW test, the predominance of significant differences in the data referring to the evaluation of water quality in the rainy season was verified; ii) high percentages of non-compliance of water quality parameters were observed to the limits in force in the legislation and of the sediment quality parameters to the reference values existing in the literature; iii) through the CA, the grouping of points by similarity in the different ecosystems was observed; iv) through FA it was possible to verify which parameters explain the greater variability of data in water and sediments; v) through the non-parametric tests mentioned above, the parameters that presented significant differences between the different compartments were identified, based on the groups previously formed; vi) the comparison of pre- and post-disruption data indicated significant differences, both in the dry and in the rainy season, in the station located upstream of the Retiro Baixo HPP reservoir; vii) the spatial analysis of the stations immediately upstream

and downstream of the HPP Retiro Baixo indicated that the total iron showed a difference in both periods under study, as the total manganese only in the rainy season.

Keywords: Water quality. Sediments. Dam failure. Retiro Baixo HPP reservoir. HPP reservoir of Três Marias. Paraopeba River. Multivariate analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Localização das bacias hidrográficas do rio Paraopeba e do Entorno da Represa de Três Marias.....	39
Figura 4.2 - Quantitativo de atividades licenciadas entre 2013 e 2019, conforme a classe e as atividades previstas da Deliberação Normativa COPAM nº 217/2017*, na área em estudo (CH SF3 e SF4).....	40
Figura 4.3 - Uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas do rio Paraopeba (SF3) e no Entorno da Represa de Três Marias (SF4) no ano de 2019, em que houve o rompimento da barragem de rejeitos B1.....	42
Figura 4.4 - Localização da mina Córrego do Feijão.....	44
Figura 4.5 - Área da barragem da mina do Córrego do Feijão antes e depois da ruptura da barragem de contenção de rejeitos B1.....	46
Figura 5.1 - Localização dos pontos de monitoramento, por trecho, contemplados na área de abrangência do PMQS-TM.....	52
Figura 5.2 - Fluxograma do tratamento preliminar do banco de dados bruto de qualidade da água.....	53
Figura 5.3 - Fluxograma do tratamento preliminar do banco de dados brutos das análises dos sedimentos.....	53
Figura 5.4 - Resumo das etapas metodológicas vinculadas às análises estatísticas desenvolvidas no trabalho.....	56
Figura 5.5 - Localização dos 14 pontos de monitoramento, do PMQS-TM, considerados nas análises multivariadas.....	57
Figura 5.6 - Diagrama unifilar dos pontos de monitoramento avaliados nas análises multivariadas.....	57
Figura 5.7 - Listagem dos parâmetros avaliados na qualidade da água e dos sedimentos.....	61
Figura 5.8 - Listagem dos pontos de monitoramento e dos parâmetros analisados no teste não-paramétrico U de <i>Mann-Whitney</i>	63
Figura 5.9 - Organização dos dados para a análise de conformidade dos parâmetros aos limites vigentes ou aos valores de referência existentes.....	64

Figura 6.1 - Gráfico <i>box-plot</i> da temperatura (°C) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	71
Figura 6.2 - Gráfico <i>box-plot</i> da temperatura (°C) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	71
Figura 6.3 - Gráfico <i>box-plot</i> do NTK (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	73
Figura 6.4 - Gráfico <i>box-plot</i> do NTK (mg/L) na água, em ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	73
Figura 6.5 - Gráfico <i>box-plot</i> da turbidez (NTU) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	75
Figura 6.6 - Gráfico <i>box-plot</i> da turbidez (NTU) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	75
Figura 6.7 - Gráfico <i>box-plot</i> da cor (mg Pt/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	77
Figura 6.8 - Gráfico <i>box-plot</i> da cor (mg Pt/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	77
Figura 6.9 - Gráfico <i>box-plot</i> de ferro total (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	79
Figura 6.10 - Gráfico <i>box-plot</i> de ferro total (mg/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	79
Figura 6.11 - Concentração de ferro total, na água, em superfície, ao longo do tempo, nos três primeiros pontos mais próximos ao rompimento (PT-51, PT-55, PT-20), com destaque para o período chuvoso.....	80
Figura 6.12 - Gráfico <i>box-plot</i> de manganês total (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	81
Figura 6.13 - Gráfico <i>box-plot</i> de manganês total (mg/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).....	82
Figura 6.14 - Concentração de manganês total, na água, em superfície, ao longo do tempo, nos três primeiros pontos mais próximos ao rompimento (PT-51, PT-55, PT-20), com destaque para o período chuvoso.....	83

Figura 6.15 - Gráfico <i>box-plot</i> de alumínio total (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	84
Figura 6.16 - Gráfico <i>box-plot</i> de alumínio total (mg/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período(seco e chuvoso).	84
Figura 6.17 - Gráfico <i>box-plot</i> do potencial de oxirredução (ORP) (mV) no sedimento, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	86
Figura 6.18 - Gráfico <i>box-plot</i> do potencial de oxirredução (ORP) (mV) no sedimento, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	86
Figura 6.19 - Gráfico <i>box-plot</i> das concentrações de alumínio total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	87
Figura 6.20 - Gráfico <i>box-plot</i> das concentrações de alumínio total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	88
Figura 6.21 - Gráfico <i>box-plot</i> das concentrações de carbono orgânico total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	89
Figura 6.22 - Gráfico <i>box-plot</i> das concentrações de carbono orgânico total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).	89
Figura 6.23 - Dispersão dos valores máximos de ferro em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 12/12/2019, nas estações de monitoramento da calha do rio Paraopeba.....	94
Figura 6.24 - Gráfico dos percentuais de ultrapassagem aos valores de referência propostos por Costa (2015), para os parâmetros manganês e alumínio nos sedimentos.....	94
Figura 6.25 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lóticos, no período chuvoso.	96
Figura 6.26 - Gráficos das cargas dos dois primeiros Fatores, na água, extraídos dos dados de qualidade da água após rotação <i>varimax raw da</i> AF, referentes à análise dos Grupos formados na AC, para os ecossistemas lóticos, no período chuvoso.....	99
Figura 6.27 - Uso do solo no entorno do ponto de monitoramento TM-05, no interior do reservatório da UHE Três Marias.	101

Figura 6.28 - Uso do solo no entorno dos pontos de monitoramento TM-06, TM-07 e PT-23, no interior do reservatório da UHE Três Marias.	103
Figura 6.29 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, na água, no período chuvoso.	106
Figura 6.30 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro nitrato que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, na água, no período chuvoso.	107
Figura 6.31 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro OD na água, que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, na água, no período chuvoso.	108
Figura 6.32 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro pH que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, na água, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.	109
Figura 6.33 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro temperatura que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, na água, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.	109
Figura 6.34 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro sólidos dissolvidos totais que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, na água, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.	110
Figura 6.35 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lênticos, no período chuvoso.	111
Figura 6.36 - Gráficos das cargas dos dois primeiros Fatores, nos sedimentos, extraídos após rotação <i>varimax raw</i> da AF, referentes à análise dos grupos formados na AC, para os ecossistemas lênticos, no período chuvoso.	114
Figura 6.37 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro manganês que apresentou diferença significativa no sedimento, entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.	116
Figura 6.38 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro cromo que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, no sedimento, no período chuvoso.	117
Figura 6.39 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lóticos, no período chuvoso.	118

Figura 6.40 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores extraídos após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes às análises de qualidade da água do grupo 2, para os ecossistemas lóticos, no período chuvoso.....	119
Figura 6.41 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lóticos, no período chuvoso.	120
Figura 6.42 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lenticos, no período seco.....	121
Figura 6.43 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores, na água, extraídos dos dados de qualidade da água após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes à análise dos Grupos formados na AC, para os ecossistemas lenticos, no período seco.	124
Figura 6.44 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro OD que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lenticico, na água, no período seco.....	126
Figura 6.45 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro SDT que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lenticico, na água, no período seco.....	127
Figura 6.46 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro condutividade elétrica que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lenticico, na água, no período seco.....	127
Figura 6.47 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro pH que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lenticico, na água, no período seco.	128
Figura 6.48 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lenticos, no período seco.....	129
Figura 6.49 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro arsênio que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lenticico, no sedimento, no período seco.	130
Figura 6.50 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro mercúrio que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lenticico, no sedimento, no período seco.....	131
Figura 6.51 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lóticos, no período seco.....	132
Figura 6.52 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores extraídos após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes às análises de qualidade da água do grupo 2, para os ecossistemas lóticos, no período seco.....	134

Figura 6.53 - Gráficos <i>box-plots</i> para o parâmetro COT que apresentou diferença significativa entre os grupos 1 e 2 do dendrograma, no ecossistema lótico, por período (chuvoso à esquerda - LoC e seco à direita - LoS).....	135
Figura 6.54 - Uso do solo no entorno do ponto de monitoramento CE-01, situado no afluente do rio Paraopeba.	136
Figura 6.55 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lóticos, no período seco.....	137
Figura 6.56 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores extraídos após rotação varimax raw da AF, referentes às análises de qualidade dos sedimentos do grupo 2, para os ecossistemas lóticos, no período seco.	138
Figura 6.57 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro alumínio no sedimento que apresentou diferença significativa entre os grupos 1 e 2 do dendrograma, no ecossistema lótico, no período seco.	139
Figura 6.58 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro COT no sedimento que apresentou diferença significativa entre os grupos 1 e 2 do dendrograma, no ecossistema lótico, no período seco.	139
Figura 6.59 - Gráficos <i>box-plots</i> para o parâmetro ferro dissolvido que apresentou diferença significativa para o ponto de monitoramento situado a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP078/PT-19) antes do rompimento (1997-2018) e depois do evento (2019 a 2021), sendo à esquerda para o período seco e à direita para o chuvoso.....	141
Figura 6.60 - Gráficos <i>box-plots</i> para o parâmetro ferro dissolvido que apresentou diferença significativa para o ponto de monitoramento situado a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP099/JRB-01), antes do rompimento (2007-2018) e depois do evento (2019 a 2021), para o período chuvoso.....	142
Figura 6.61 - Gráficos <i>box-plots</i> para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa para o ponto de monitoramento situado a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP078/PT-19), antes do rompimento (1997-2018) e depois do evento (2019 a 2021), sendo à esquerda para o período seco e à direita para o chuvoso.....	143
Figura 6.62 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro ferro total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período seco.	144

Figura 6.63 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro ferro total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período chuvoso.....	145
Figura 6.64 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período seco.	145
Figura 6.65 - Gráfico <i>box-plot</i> para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período chuvoso.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Percentual do uso e ocupação de terra nas CHs SF3 e SF4, no ano em que houve o rompimento da barragem de rejeitos B1 (2019).....	41
Tabela 5.1 - Critérios adotados para realização da unificação/seleção das possíveis replicatas das análises físico-químicas e biológicas, dos pontos de monitoramento contemplados no PMQS-TM.....	54
Tabela 5.2 - Valores de referência para os parâmetros químicos avaliados nos sedimentos. .	65
Tabela 6.1 - Valores médios dos percentuais de violação dos parâmetros de qualidade da água, por ecossistema do ambiente aquático, conforme os limites previstos pela DN COPAM-CERH nº 01/20018, para águas Classe 2, com destaque para os valores médios que foram superiores no período seco, quando comparado ao período chuvoso.	90
Tabela 6.2 - Valores médios dos percentuais de violação geral dos parâmetros de qualidade de sedimento, por ecossistema do ambiente aquático, conforme os limites previstos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 (Nível 1 e Nível 2).....	92
Tabela 6.3 - Valores médios dos percentuais de ultrapassagem aos valores de referência propostos por Costa (2015), para sedimentos, por ecossistema.	93
Tabela 6.4 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade da água, dos ecossistemas lênticos, no período chuvoso (LeC).	96
Tabela 6.5 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes ao grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período chuvoso.	98
Tabela 6.6 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro manganês total na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.	106
Tabela 6.7 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro nitrato, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	107

Tabela 6.8 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro OD, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	108
Tabela 6.9 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro pH na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	109
Tabela 6.10 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro temperatura, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	109
Tabela 6.11 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro sólidos dissolvidos totais, na água,, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.	110
Tabela 6.12 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade do sedimento, dos ecossistemas lênticos, no período chuvoso (LeC).	111
Tabela 6.13 - Cargas fatoriais dos parâmetros de sedimento para cada Fator após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes ao grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período chuvoso.	113
Tabela 6.14 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro manganês, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.	116
Tabela 6.15 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro cromo, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.	117
Tabela 6.16 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade da água, dos ambientes lêntico, no período seco (LeS).	122
Tabela 6.17 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes ao Grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período seco.....	123

Tabela 6.18 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro OD, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	126
Tabela 6.19 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro SDT, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	127
Tabela 6.20 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro condutividade elétrica, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%..	127
Tabela 6.21 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro pH, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	128
Tabela 6.22 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade do sedimento, dos ecossistemas lênticos, no período seco (LeS).....	129
Tabela 6.23 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro arsênio, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.....	130
Tabela 6.24 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro mercúrio, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.	131
Tabela 6.25 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes ao grupo 2 formado pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lóticos, no período seco.....	133
Tabela 6.26 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade do sedimento para cada Fator após rotação <i>varimax raw da AF</i> , referentes ao grupo 2 formado pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lóticos, no período seco.....	138
Tabela 6.27 - Resultado do teste U de <i>Mann-Whitney</i> para os dados de qualidade da água antes e pós-rompimento, para os pontos de monitoramento situados em ecossistemas lóticos, antes e após o reservatório da UHE Retiro Baixo, por período em estudo.	140

Tabela 6.28 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro ferro total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período seco, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.	144
Tabela 6.29 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro ferro total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período chuvoso, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.....	145
Tabela 6.30 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro manganês total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período seco, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.....	145
Tabela 6.31 - Resultados do teste de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> para o parâmetro manganês total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período chuvoso, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%. ..	146

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AC - Análise de Cluster

ADA - Área Diretamente Afetada

AF - Análise Fatorial

Al - Alumínio

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

ANM - Agência Nacional de Mineração

As - Arsênio

B1 - Barragem de contenção de rejeito I

B-IV - Barragem de contenção de rejeito IV

B-IV-A - Barragem de contenção de rejeito IV-A

Ba - Bário

BD1 - Banco de dados contendo informações sobre a qualidade da água e dos sedimentos dos pontos de monitoramento em estudo (período de abril/2019 a março/2021)

BD1 (água) - Banco de dados de qualidade da água dos pontos de monitoramento em estudo (período de abril/2019 a março/2021)

BD1 (sedimentos) - Banco de dados de qualidade dos sedimentos dos pontos de monitoramento em estudo (período de abril/2019 a março/2021)

BD2 - Banco de dados padronizado contendo informações sobre a qualidade da água e dos sedimentos dos pontos de monitoramento em estudo (período de maio/2019 a dezembro/2020)

BD2 (água) - Banco de dados de qualidade da água dos pontos de monitoramento em estudo (período de maio/2019 a dezembro/2020)

BD2 (sedimentos) - Banco de dados de qualidade dos sedimentos dos pontos de monitoramento em estudo (período de maio/2019 a dezembro/2020)

CERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos

CH - Circunscrição Hidrográfica

CHs - Circunscrições Hidrográficas

Cl-*a* - Clorofila *a*

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais
COT - Carbono Orgânico Total
CPRM - Serviço Geológico do Brasil
Cr - Cromo
Cu - Cobre
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DN - Deliberação Normativa
E. coli - *Escherichia coli*
F - Fundo
Fe - Ferro
H₂S - Sulfeto de Hidrogênio
H_a - Hipótese alternativa
Hg - Mercúrio
H_o - Hipótese nula
IDE-SISEMA - Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas
KW - Teste não-paramétrico de *Kruskal-Wallis*
Lab. - Laboratório
LeC - Ecossistema lêntico no período chuvoso
LeS - Ecossistema lêntico no período seco
LoC - Ecossistema lótico no período chuvoso
LoS - Ecossistema lótico no período seco
MG - Minas Gerais
Mn - Manganês
MW - Teste não-paramétrico U de *Mann-Whitney*
NA - Não Analisado
Ni - Níquel
N-NO₃⁻ - Nitrato
NTK - Nitrogênio Total *Kjeldahl*
OD - Oxigênio Dissolvido

ORP - Potencial de Oxirredução

P - Fósforo

Pb - Chumbo

pH - Potencial Hidrogeniônico

PME - Plano de Monitoramento Especial

PMQS-TM - Programa Especial de Monitoramento da Qualidade da Água e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno

R - Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SF3 - Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba

SF4 - Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SST - Sólidos Suspensos Totais

T - Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias

TDH - Tempo de Detenção Hidráulica

UHE - Usina Hidrelétrica

ZF - Zona Fótica

ZI - Zona Intermediária

Zn - Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	28
2	OBJETIVOS.....	30
2.1	Objetivo geral	30
2.2	Objetivos específicos	30
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	31
3.1	Impactos sobre a qualidade do ambiente aquático	31
3.2	Monitoramento da qualidade do ambiente aquático	32
3.3	Características dos sedimentos que contribuem para a alteração da qualidade do ambiente aquático	33
3.4	Qualidade da água em reservatórios hidrelétricos	34
3.5	Legislação sobre a qualidade da água e dos sedimentos	35
3.6	Análises estatísticas usualmente empregadas em dados de monitoramento ambiental.....	35
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.1	Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba.....	43
4.1.1	Rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da mina de Córrego do Feijão.....	44
4.1.2	Medidas adotadas e estudos desenvolvidos após o rompimento da Barragem B1.....	47
4.2	Bacia Hidrográfica Entorno da Represa de Três Marias	50
5	METODOLOGIA.....	51
5.1	Caracterização e tratamento dos bancos de dados	51
5.2	Avaliação da qualidade das águas e dos sedimentos dos reservatórios a jusante do rompimento	55
5.2.1	Análise de conformidade aos padrões legais de qualidade das águas e comparação com valores de referência para os sedimentos	63
5.2.2	Comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos nas estações de monitoramento	65
5.3	Comparação entre a qualidade da água antes e após o rompimento.....	67

5.4 Comparação entre a qualidade da água após o rompimento antes e após a UHE Retiro Baixo.....	68
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
6.1 Variação dos parâmetros de qualidade das águas e dos sedimentos nos períodos chuvoso e seco.....	69
6.1.1 Parâmetros de qualidade da água.....	70
6.1.1.1 Temperatura	70
6.1.1.2 NTK	72
6.1.1.3 Turbidez	74
6.1.1.4 Cor.....	76
6.1.1.5 Ferro total.....	78
6.1.1.6 Manganês total.....	80
6.1.1.7 Alumínio total.....	83
6.1.2 Parâmetros de qualidade dos sedimentos.....	84
6.1.2.1 Potencial de oxirredução (ORP)	85
6.1.2.2 Alumínio	86
6.1.2.3 Carbono Orgânico Total (COT)	88
6.2 Análise de conformidade aos padrões legais de qualidade das águas e comparação com valores de referência para sedimentos	89
6.2.1 Análise de conformidade aos padrões legais de qualidade das águas.....	89
6.2.2 Comparação dos parâmetros medidos no sedimento com valores de referência para sedimentos.....	91
6.3 Comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos nos pontos de monitoramento – período chuvoso	95
6.3.1 Ecossistemas lênticos.....	95
6.3.1.1 Análise da qualidade da água.....	95
6.3.1.2 Análise da qualidade dos sedimentos.....	110
6.3.2 Ecossistemas lótico.. ..	117
6.3.2.1 Análise da qualidade da água.....	117
6.3.2.2 Análise da qualidade dos sedimentos.....	120
6.4 Comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos nos pontos de monitoramento – período seco	121
6.4.1 Ecossistemas lênticos.....	121
6.4.1.1 Análise da qualidade da água.....	121
6.4.1.2 Análise da qualidade dos sedimentos.....	128
6.4.2 Ecossistemas lóticos.....	132
6.4.2.1 Análise da qualidade da água.....	132
6.4.2.2 Análise da qualidade dos sedimentos.....	136
6.5 Comparação entre a qualidade da água antes após o rompimento	139
6.5.1 Ferro dissolvido.....	140

6.5.2 Manganês total.....	142
6.6 Comparação entre a qualidade da água após o rompimento antes e após a UHE Retiro Baixo.....	143
7 CONCLUSÕES.....	147
8 RECOMENDAÇÕES.....	149
REFERÊNCIAS	150
APÊNDICE I.....	160
APÊNDICE II	172
APÊNDICE III.....	174
ANEXO I.....	181
ANEXO II.....	182

1 INTRODUÇÃO

Inúmeras atividades humanas contribuem para a deterioração do ambiente aquático. As características físico-químicas e biológicas da água podem ser influenciadas tanto por processos naturais, quanto por atividades antrópicas, como é o caso da mineração.

Dentre as substâncias minerais produzidas no Brasil, em escala industrial, está o minério de ferro. O estados que mais se destacaram no Brasil, no ano de 2020, em termos de exportação de minério de ferro e seus concentrados são: Pará, contribuindo com 54,2% das exportações, e Minas Gerais, com 38,1% (COMEX STAT, 2020).

As atividades minerárias são de extrema importância para o estado de Minas Gerais, no entanto, podem gerar inúmeros danos ao meio ambiente. O estado de Minas Gerais possui 853 municípios (IBGE, 2017). Desse total, mais de 400 exercem a atividade minerária (IBRAM, 2016).

Dentre os impactos da mineração está a possibilidade de ocorrência do rompimento das barragens. Conforme SNISB (2020), do total de barragens de contenção de rejeitos de mineração cadastradas no país, cerca de 43% estão situadas no estado de Minas Gerais.

Conforme Armstrong, Petter e Petter (2019), as falhas envolvendo barragem de rejeitos são consideradas raras, entretanto, o quantitativo desses eventos praticamente dobrou nos últimos 20 anos. Segundo Thompson *et al.* (2020), os riscos de ocorrência de tais eventos no Brasil são elevados.

Em menos de 4 anos ocorreram duas tragédias ambientais, em Minas Gerais, relacionadas ao rompimento de barragens de rejeito de minério de ferro. A primeira se deu em 05 de novembro de 2015, na Barragem de Fundão, de propriedade da Samarco Mineração S/A, em Mariana/MG, com a liberação de cerca de 32 Mm³ de rejeitos de minério de ferro para o meio ambiente. Quadra *et al.* (2019) cita que os impactos ambientais desse acontecimento foram de longa duração e alcance, já que alguns compostos podem continuar nos sedimentos por décadas.

Já em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da Barragem de contenção de rejeitos B1, na mina Córrego do Feijão, de propriedade da Vale S.A, em Brumadinho/MG, com liberação de 12 Mm³ de rejeitos de minério de ferro (WISE URANIUM PROJECT, 2021). Uma parcela dos rejeitos alcançou e se dissipou pelo rio Paraopeba, sendo esse um relevante afluente da Bacia do rio São Francisco.

A jusante do rompimento da barragem de contenção B1 existem dois ecossistemas lênticos. O primeiro deles é a Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo e a segundo é a UHE Três Marias - onde ocorre a confluência do rio Paraopeba com o rio São Francisco.

Diante desse evento e dos inúmeros impactos ambientais provenientes do ocorrido, torna-se importante a realização de pesquisas cujo enfoque é a análise integrada da qualidade da água e dos sedimentos, visto a tendência de sedimentação do material alóctone - constituído pelo rejeito e pelos materiais por ele carregados ao longo da sua trajetória.

Nesse contexto, essa avaliação se justifica pela importância nacional da bacia hidrográfica do rio São Francisco e pela grande quantidade de usuários e de finalidades de uso de suas águas, com distintas qualidades requeridas. Além disso, os resultados obtidos nessa pesquisa poderão nortear tomada de decisões com o enfoque na recuperação dos recursos hídricos impactados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a qualidade da água e dos sedimentos dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas de Retiro Baixo e de Três Marias, situados a jusante do rompimento da barragem de contenção de rejeitos de minério de ferro da mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, no estado de Minas Gerais.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência dos períodos seco e chuvoso na qualidade das águas e dos sedimentos nos ecossistemas lênticos e lóticos situados na área em estudo.
- Verificar a alteração dos valores e concentrações dos parâmetros de qualidade da água e dos sedimentos dos ambientes lênticos e lóticos, após o rompimento da barragem.
- Avaliar a conformidade dos parâmetros de qualidade da água monitorados nos ambientes em estudo em relação aos limites previstos nas legislações vigentes, para os períodos seco e chuvoso.
- Confrontar os valores observados para os parâmetros de qualidade dos sedimentos monitorados nos ambientes em estudo com os valores de referência existentes na literatura, para os períodos seco e chuvoso.
- Analisar as variações espaciais dos dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais dos ambientes lênticos e lóticos e os parâmetros responsáveis pelas alterações.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Impactos sobre a qualidade do ambiente aquático

A água é fundamental à vida e o aumento da sua demanda, juntamente com a poluição, vem comprometendo sua qualidade e quantidade. A qualidade da água pode ser influenciada tanto por atividades antrópicas, quanto por processos naturais. Dentre os processos naturais está a precipitação, a lixiviação do solo, o intemperismo e os processos erosivos. São exemplos de atividades antrópicas as fontes pontuais e as difusas de poluição, a dragagem, o desmatamento e a mineração.

O uso e ocupação do solo também influencia na qualidade e na quantidade dos recursos hídricos. Conforme MapBiomas (2019), no ano de 2019 houve o predomínio do uso do solo pela atividade agropecuária (54,38%), no estado de Minas Gerais. Destaca-se que essa atividade contribui, principalmente, para a poluição difusa. Embora a atividade minerária seja uma atividade importante para a economia de Minas Gerais, conforme Mapbiomas (2019), o percentual equivalente ao uso e ocupação para essa finalidade compreende apenas cerca de 0,05% da área total do estado.

A atividade minerária contribui para a alteração quali-quantitativa dos recursos hídricos, por exemplo, por meio do aumento da concentração de metais nos cursos d'água. Guimarães *et al.* (2017) cita que os impactos e os riscos mais significativos da mineração são vinculados às barragens de rejeitos e aos depósitos de estéril. Segundo Hatje *et al.* (2017), os acidentes envolvendo barragens de rejeitos se diferenciam das demais fontes antropogênicas de metais em termos de quantidade de material liberado e a velocidade de dispersão da lama.

Em consulta no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB, no Brasil existem cadastradas 857 barragens de contenção de rejeitos provenientes da mineração. Desse total, cerca de 43% delas estão situadas no estado de Minas Gerais e apenas 59,4% são reguladas (SNISB, 2021). Esse percentual é preocupante visto que alguns impactos socioambientais e econômicos podem extrapolar as fronteiras estaduais.

Nesse contexto, os recursos hídricos são impactados de forma direta e indireta por uma série de atividades e processos. Diante ao cenário, os programas de monitoramento são importantes por contribuírem para essa avaliação quali-quantitativa do ambiente aquático.

3.2 Monitoramento da qualidade do ambiente aquático

O monitoramento das águas consiste no acompanhamento periódico das características quali-quantitativas dos recursos hídricos e a sua adequada realização é pré-requisito para o sucesso da gestão das águas (ALMEIDA, 2013; MAGALHÃES JÚNIOR, 2000). Por meio de um monitoramento sistemático é possível avaliar a qualidade da água ao longo do tempo e do espaço (ALMEIDA, 2013; ANDRADE et al., 2007; CARR; NEARY, 2008). Além disso, é possível compreender a dinâmica do ambiente aquático e averiguar a existência de padrões de estratificação, no caso dos ecossistemas lênticos.

A avaliação da qualidade contribui para a compreensão dos impactos aos quais a bacia hidrográfica está submetida, sendo fundamental para o entendimento do ecossistema e o estabelecimento de estratégias para o controle ambiental (PARRON; DAPHNE; PEREIRA, 2011). Ou seja, o monitoramento das águas auxilia na gestão dos recursos hídricos, por meio da seleção de áreas prioritárias, na identificação de problemas incipientes (ANA,2013), no levantamento de relações causa-efeito (MAGALHÃES JÚNIOR, 2000), no direcionamento da tomada de decisões e no acompanhamento das medidas já realizadas.

Por meio do monitoramento da qualidade das águas é possível efetuar a comparação entre diferentes cursos d'água (ANA, 2013). Entretanto, a ausência de padronização da periodicidade dos programas de monitoramento de qualidade das águas e dos parâmetros a serem monitorados pode ser um dificultador para a comparação entre a qualidade dos cursos d'água. Muitos programas de monitoramento são deficitários por questões técnicas, institucionais, financeiras ou políticas (CALAZANS, 2015).

Apenas a realização de análises químicas não é suficiente para a avaliação de impactos ambientais no ecossistema aquático (ALMEIDA; MARTINS; TUNDISI, 2011). Para um melhor diagnóstico, além da análise dos parâmetros físico-químicos e biológicos, é importante

a realização de ensaios ecotoxicológicos e do biomonitoramento. Muitas vezes tais análises integradas não são realizadas, não sendo possível concluir sobre a integridade desses ambientes.

Almeida (2013) cita que os dados das análises, se coletados durante um longo período, podem resultar num banco de dados extenso e complexo. A elevada quantidade de parâmetros pode dificultar a interpretação dos resultados (TRINDADE, 2013). É fundamental que a qualidade da água seja monitorada para a compreensão do quão comprometida ela está frente os impactos sofridos (FERNANDES; GOMES, 2016) e quanto mais informações se obtiver, maiores os subsídios para uma avaliação integrada do ecossistema.

Os desafios vinculados à qualidade da água em reservatórios estão relacionados à manutenção dos usos múltiplos, visto que cada uso requer uma qualidade específica. Nesses ambientes é fundamental a realização de amostragens em diferentes profundidades para se avaliar como estão os valores dos parâmetros ao longo da coluna d'água.

As alterações de determinados parâmetros podem desencadear uma série de impactos ao ambiente aquático. O conhecimento da qualidade do ambiente aquático deve levar em consideração tanto a presença de compostos na água, quanto nos sedimentos. Para o sucesso da compreensão do ecossistema aquático é preciso entender a dinâmica de todos os seus compartimentos.

3.3 Características dos sedimentos que contribuem para a alteração da qualidade do ambiente aquático

O sedimento é o compartimento do ambiente aquático essencial para a “dinâmica de transporte, acumulação e disponibilização de contaminantes” (DE ALMEIDA; ROCHA, 2006) e é preferencial para o armazenamento e transformação de grande parte dos poluentes advindos de origem antrópica (DE ALMEIDA; ROCHA, 2006). Os contaminantes do sedimento podem estar em diversas fases e possuírem distintas afinidades com a fração sólida. Conforme Eggleton e Thomas (2004), a ressuspensão de contaminantes associados aos sedimentos pode ser proveniente de processos naturais ou atividades antrópicas.

A capacidade de retenção de contaminantes nos sedimentos varia conforme a capacidade de troca de íons, a composição mineral, a textura e o teor de matéria orgânica. Esse acúmulo nos sedimentos se dá, por exemplo, por meio de interações eletrostáticas; adsorção aos óxidos de alumínio, ferro e manganês; e complexação com a matéria orgânica. Já a liberação desses poluentes pode ocorrer com a variação de temperatura, pH e potencial redox (REZENDE, 2009).

3.4 Qualidade da água em reservatórios hidrelétricos

Diversos fatores internos e externos podem influenciar na dinâmica de um reservatório. Ao se comparar reservatórios de diferentes portes, aqueles com menores dimensões (área e o volume) tendem a ser mais impactados por fatores externos, quando comparados aos de maiores dimensões (POMPÊO *et al.*, 2015). Além disso, devido à menor velocidade da água em lagos e reservatórios, o material particulado afluente tende a depositar mais rapidamente, o que reduz a quantidade de partículas em suspensão.

Dentre as características dos reservatórios que podem influenciar na qualidade de suas águas e determinar suas características limnológicas destacam-se: o tempo de detenção hidráulica (TDH) da água; o aumento da retenção de sedimentos e a estratificação térmica (COURA, 2020). Essas características encontram-se relacionadas e fazem com que nesses ambientes, a qualidade da água seja influenciada, principalmente, pelo gradiente vertical da coluna d'água.

O TDH irá influenciar no metabolismo desses ambientes, na dinâmica do processo de estratificação e na circulação da coluna d'água, assim como na sedimentação do particulado lacustre. Por sua vez, nos sedimentos, os processos físicos, químicos e biológicos poderão levar à transformação dos compostos acumulados ao longo do tempo e levar ao processo de enriquecimento da coluna d'água (fertilização interna). Por exemplo, durante o período de estratificação térmica da coluna d'água, a camada mais profunda, denominada hipolímnio, pode estar anóxica, favorecendo a solubilização e transferência dos compostos presentes no sedimento, como Fe e Mn, amônia, fosfato, silicatos, carbonatos, íons de cálcio e gás sulfídrico, para a água. No período de circulação esses compostos poderão ser então disponibilizados para as camadas mais superficiais da coluna d'água, alterando assim, a qualidade da água nesses ambientes. Ao mesmo tempo, a desestratificação da coluna d'água fará com que as

concentrações de oxigênio dissolvido da superfície sejam distribuídas verticalmente, provocando a oxidação da interface água-sedimento e assim, a precipitação dos compostos que ficaram retidos no fundo (ESTEVEZ, 1998).

Diante desse contexto, para se ter maior conhecimento da dinâmica dos reservatórios é fundamental a análise dos sedimentos e o monitoramento da qualidade da água em diferentes profundidades.

3.5 Legislação sobre a qualidade da água e dos sedimentos

Os padrões de qualidade variam com o enquadramento do curso d'água. Vale destacar que quanto menor a classe do curso d'água, maior a restrição da qualidade das águas. Em âmbito nacional, a classificação e as diretrizes de enquadramento são regidos pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (CONAMA, 2005). No estado de Minas Gerais, tais parâmetros são previstos pela Deliberação Normativa (DN) Conjunta COPAM/CERH nº 01, de 5 de maio de 2008 (COPAM; CERH-MG, 2008).

Inexiste legislação brasileira para qualidade dos sedimentos, portanto, para fins de análise dos mesmos são adotados valores de referência ou padrões internacionais. Muitos estudos vinculados aos sedimentos confrontam os resultados das análises químicas com o previsto na Resolução CONAMA nº 454 de 1 de novembro de 2012 (IGAM, 2020a). Essa Resolução estabelece “as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional” (CONAMA, 2012).

3.6 Análises estatísticas usualmente empregadas em dados de monitoramento ambiental

Conforme já abordado nesse trabalho, os dados gerados nos monitoramentos de água e sedimentos podem resultar em um banco de dados extenso e complexo, abrangendo uma série de parâmetros. Uma ampla gama de estudos na área de monitoramento de qualidade da água são desenvolvidos com o emprego de dados secundários provenientes de monitoramentos sistemáticos, como é o caso dos trabalhos de Costa (2021), Coura (2020), Dantas (2020), Oliveira *et al.* (2017), Pinto (2021), Soares (2021), Soares (2017), Trindade (2013). Para a análise dos dados e/ou realização de testes estatísticos usualmente são empregados softwares,

tais como o R, o *Statistica* e/ou o *XLSTAT*, conforme pode-se observar nos estudos de Calazans (2015), Costa *et al.* (2017), Ferreira *et al.* (2020), Guimarães *et al.* (2017), Lima (2020), Oliveira *et al.* (2017), Soares e Soares (2021) e Trindade *et al.* (2017).

Os dados ambientais geralmente não possuem distribuição normal e apresentam muitos dados censurados e *outliers* (SABINO; VIEIRA; ALMEIDA, 2014). Ressalta-se que nas análises estatísticas, na presença de resultados abaixo do limite de detecção do método analítico (dados censurados), por questões mais restritivas, geralmente adota-se o módulo informado, como mencionado em diversos estudos (DANTAS, 2020; GUIMARÃES, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2017; SOARES, 2017; TRINDADE, 2013). Destaca-se que os bancos de dados ambientais, geralmente, apresentam muitos dados faltantes.

Dentre os testes estatísticos usualmente empregados tem-se os testes de hipóteses, que tratam de inferências e auxiliam na tomada de decisões. Tais testes baseiam-se no nível de significância para rejeitar ou não uma hipótese, podendo essa ser nula (H_0) e alternativa (H_a). A hipótese alternativa geralmente apoia a teoria que se quer dar suporte, ao passo que a nula está vinculada à contradição da mesma, sendo o intuito desse teste provar que H_0 é falsa.

Uma importante ferramenta para a análise e interpretação de bancos de dados extensos é a utilização de testes não paramétricos como o U de *Mann Whitney* (MW) e o *Kruskal-Wallis* (KW). O teste não paramétrico U de *Mann Whitney* é empregado para a comparação das medianas de duas amostras independentes (VON SPERLING; VERBYLA; OLIVEIRA, 2020). Usualmente esse teste é empregado ao nível de significância de 5% para a identificação de parâmetros que exibiram alterações significativas ($p < 0.05$) entre duas amostras estudadas. Diversos estudos na área ambiental empregaram esse teste estatístico como é o caso de Christofaro (2009), Coura (2020), Dantas (2020) e Sabino, Vieira e Almeida (2014). Por meio desses testes, por exemplo, é possível avaliar se existe diferença significativa entre as concentrações dos distintos parâmetros no período seco e chuvoso.

Diferente do teste U de *Mann Whitney*, o teste não paramétrico de *Kruskal-Wallis* é aplicado para verificar, comumente ao nível de significância de 5%, se existe diferença significativa ($p < 0.05$) entre mais de duas amostras independentes. Geralmente é empregado para testar se

grupos de amostras independentes foram obtidos de populações que continham mesma mediana (H_0) ou se nem todas eram igual (H_a) (VON SPERLING; VERBYLA; OLIVEIRA, 2020). Esse teste vem sendo empregado em uma série de estudos, como os de Calazans *et al.* (2018), Christofaro (2009), Costa (2021), Dantas (2020), Oliveira *et al.* (2019), Pinto, Calazans e Oliveira (2019), Pinto *et al.* (2021) e Soares, Pinto e Oliveira (2020). Para identificar os grupos que apresentam diferença significativa, posteriormente ao teste de KW, é aplicado um teste de comparações múltiplas, sendo bastante usual o teste de *Dunn*.

Utilizam-se as estatísticas multivariadas quando existe uma grande quantidade de variáveis sendo medidas simultaneamente (MINGOTI, 2005). Conforme Soares (2017), a estatística multivariada auxilia na classificação, modelagem e interpretação de conjuntos de dados grandes e complexos, visto que reduzem a dimensionalidade dos dados, contribuindo assim, para a extração de informações úteis. Diversos estudos empregaram técnicas multivariadas para a realização da avaliação e interpretação de dados de qualidade da água, como é o caso de Calazans (2015), Dantas (2020), Pinto (2021) e Soares (2017,2021). Tais técnicas contribuem para a definição das prioridades e podem auxiliar no controle da poluição nas águas superficiais.

As análises multivariadas geralmente requerem uma padronização prévia dos dados, que consiste na conversão t das variáveis em escala Z $((X - \mu)/\sigma)$, resultando em variáveis com média 0 e desvio-padrão 1. Conforme Liu *et al.* (2003), esse procedimento contribui para a redução da influência de variáveis que possuem variância grande ou vice-versa. Isso contribui para evitar interferências no resultado, tendo em vista as diferentes unidades de medida dos parâmetros analisados (TRINDADE, 2013; SOARES, 2021). Dessa forma os dados se tornam adimensionais (SOARES, 2021).

Dentre as análises multivariadas tem-se a Análise de Cluster (AC) e a Análise Fatorial (AF). Por meio da AC é possível dividir o banco de dados em grupos menores, baseados nas suas características, e isso auxilia na interpretação das informações obtidas (DANTAS, 2020).

A distância Euclidiana é medida de similaridade empregada para calcular a distância entre os objetos classificados pela AC (SIMEONOV *et al.*, 2002; ZHANG *et al.*, 2011; DANTAS, 2020). Quanto menor é o valor encontrado, mais similares são os elementos alvo da

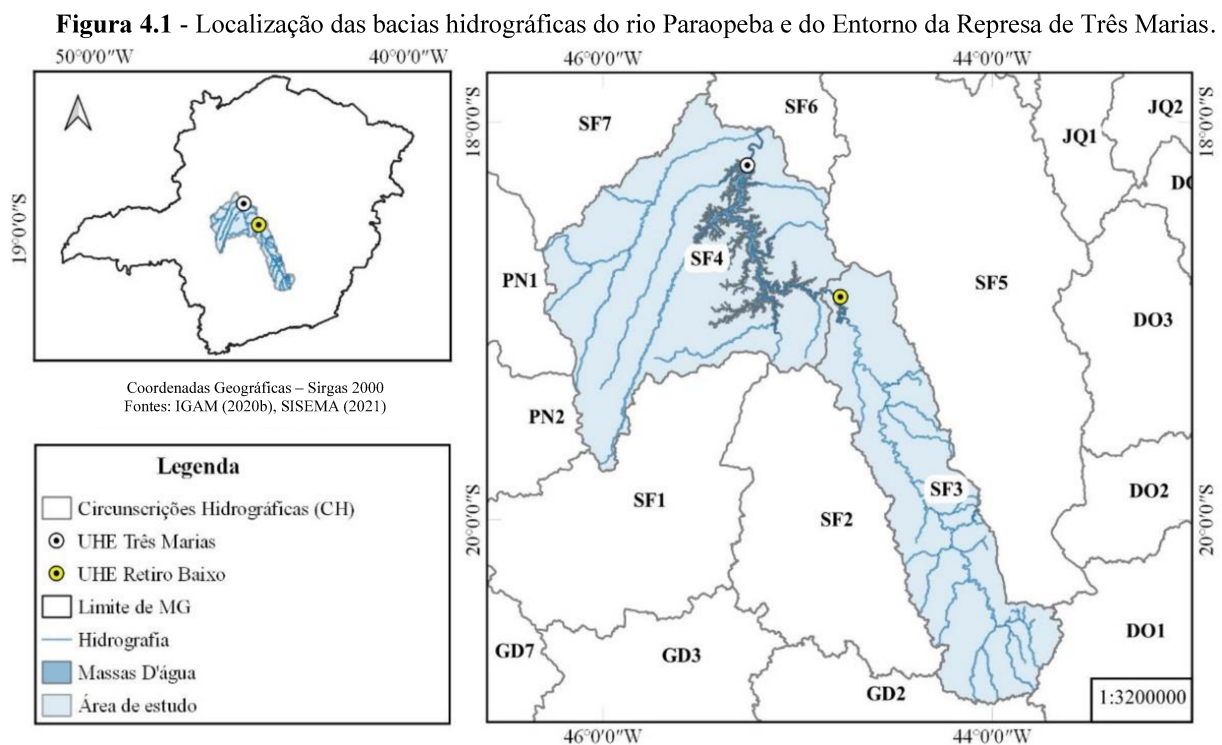
comparação. O resultado da AC é o dendrograma, que é um gráfico cujo eixo horizontal apresenta os elementos amostrais e o vertical, a similaridade (MINGOTI, 2005). Existem diferentes métodos de agrupamentos: Ligação Simples, Ligação Completa, Média das distâncias, do Centróide e Ward (MINGOTI, 2005; HAIR JR *et al.*, 2009). Esses métodos resultam em dendrogramas distintos (DANTAS, 2020).

A interpretação dos clusters provenientes da AC é uma tarefa importante e o local do corte pode ser definido de forma subjetiva, por meio da análise visual dos grupos formados ou através de alguns critérios, como o quantitativo de grupos formados (MINGOTI, 2005; BORCARD; GILLET; LEGENDRE, 2011; DANTAS, 2020). Conforme Hair Jr. *et al.* (2009), embora existam métodos que auxiliem na seleção da quantidade de grupos, a decisão final cabe ao pesquisador, tendo em vista a subjetividade.

A AF é uma técnica multivariada cujo objetivo é diminuir a quantidade de variáveis de uma análise. Ela resulta em fatores por meio da análise de inter-relação dentro do conjunto de variáveis em estudo. Para facilitar a interpretação dos dados é usual efetuar a rotação dos fatores (CRUZ *et al.*, 2018).

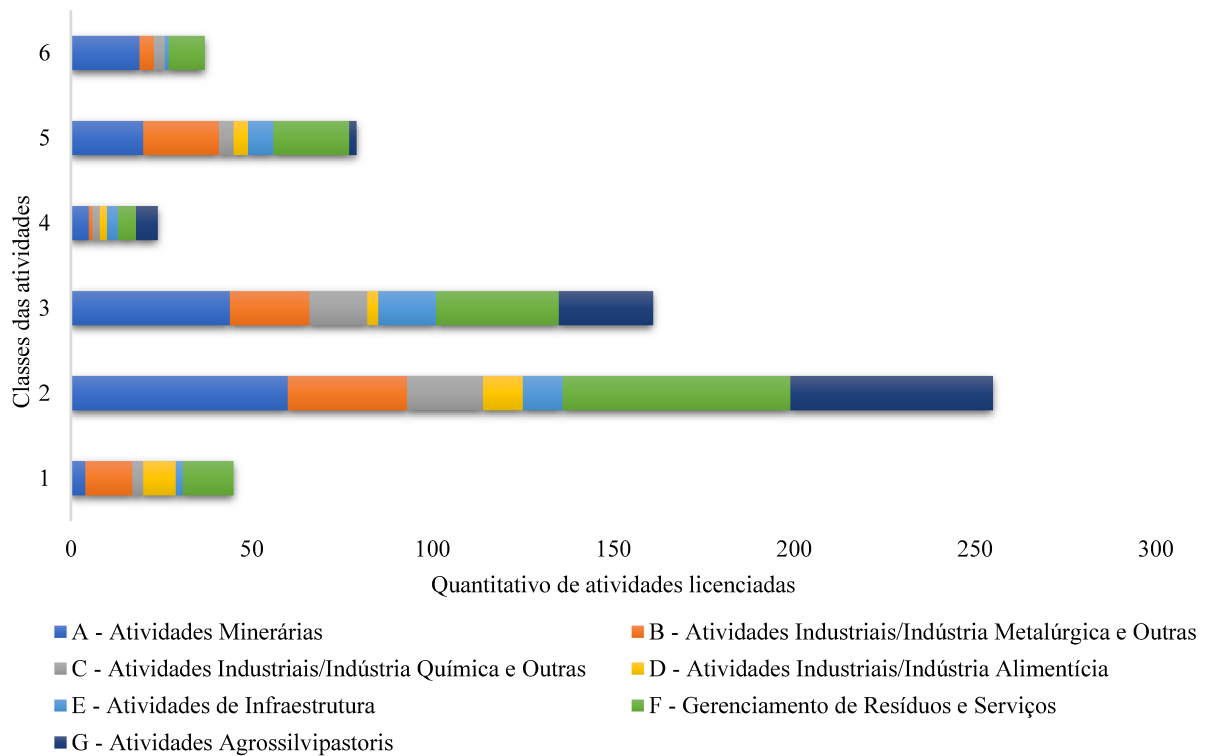
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desse trabalho contempla duas Circunscrições Hidrográficas, cujo breve detalhamento é apresentado a seguir: bacia hidrográfica do rio Paraopeba (SF3) e a bacia hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias (SF4) – Figura 4.1. Vale destacar que o rompimento se deu na bacia hidrográfica SF3, sendo essa portanto, a diretamente afetada pelo evento.



Por meio da consulta a listagem do histórico de Empreendimentos Licenciados entre 2013 e 2019 pela SEMAD, na plataforma do IDE-SISEMA (Figura 4.2), observou-se que na área de estudo estão situadas 601 atividades licenciadas. Desse total predominam-se as atividades minerárias (código A - cerca de 25%), seguidas pelo gerenciamento de resíduos e serviços (código F - aproximadamente 24%).

Figura 4.2 - Quantitativo de atividades licenciadas entre 2013 e 2019, conforme a classe e as atividades previstas da Deliberação Normativa COPAM nº 217/2017*, na área em estudo (CH SF3 e SF4).



*Estabelece critérios para classificação e locais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos/atividades em Minas Gerais. Fonte: SISEMA, 2021 - Adaptado.

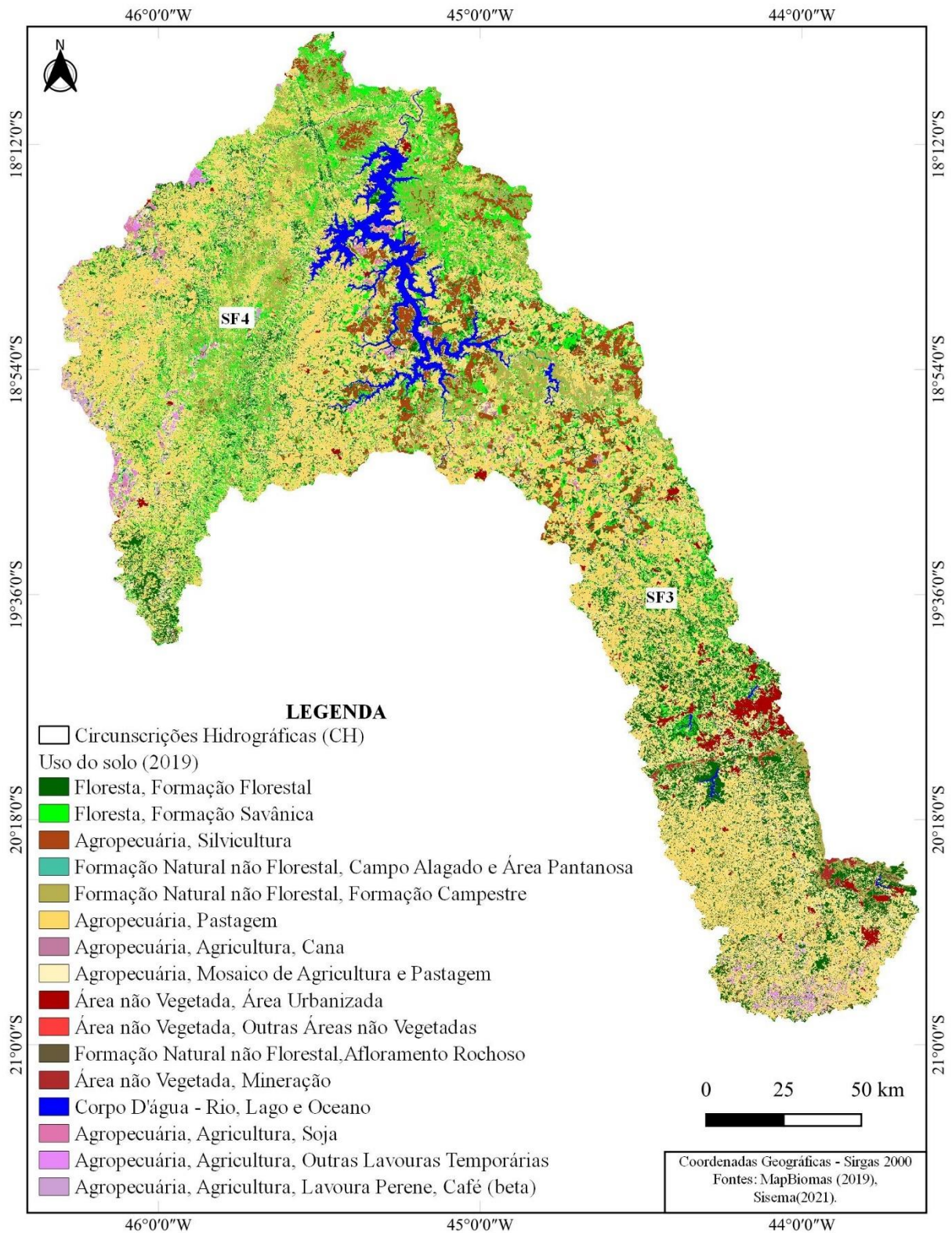
A caracterização do uso e ocupação do solo da área em estudo foi efetuada com base nas imagens do MapBiomas, referentes ao ano de 2019 (MAPBIOMAS, 2019). Por meio do *software* QGIS 3.16 foi efetuado o recorte para a área de estudo (CHs SF3 e SF4), seguido pela reclassificação de cada tipologia e a extração do conteúdo presente na tabela de atributos - para a obtenção das áreas relativas a cada classe de uso e ocupação do solo. A seguir apresenta-se o mapa de uso do solo da região em estudo, no ano de 2019 (Figura 4.3). Observa-se nessa Figura o predomínio da agropecuária (aproximadamente 62%, segundo a Tabela 4.1), seguida pelas florestas (cerca de 25%, conforme apresentado na Tabela 4.1). Dentre as atividades contempladas na agropecuária, destacaram-se as áreas de pastagem e o mosaico de agricultura e pastagem.

Tabela 4.1 - Percentual do uso e ocupação de terra nas CHs SF3 e SF4, no ano em que houve o rompimento da barragem de rejeitos B1 (2019).

Rótulos de Linha	Área (km²)	% Área
Agropecuária	19.093,34	62,26%
Agricultura - Lavoura Perene (Café)	109,81	0,36%
Agricultura - Lavoura Temporária (Cana)	49,48	0,16%
Agricultura - Lavoura Temporária (Outras Lavouras Temporárias)	276,49	0,90%
Agricultura - Lavoura Temporária (Soja)	134,53	0,44%
Mosaico de Agricultura e Pastagem	5.068,50	16,53%
Pastagem	11.905,65	38,82%
Silvicultura	1.548,88	5,05%
Área não Vegetada	559,24	1,82%
Área Urbanizada	433,21	1,41%
Mineração	76,69	0,25%
Outras Áreas não Vegetadas	49,34	0,16%
Corpo D'água	968,49	3,16%
Rio, Lago e Oceano	968,49	3,16%
Floresta	7.665,35	24,99%
Formação Florestal	4.119,47	13,43%
Formação Savânica	3.545,88	11,56%
Formação Natural não Florestal	2.382,59	7,77%
Afloramento Rochoso	10,16	0,03%
Campo Alagado e Área Pantanosa	141,87	0,46%
Formação Campestre	2230,56	7,27%
Total Geral	30.669,01	100,00%

Fonte: Baseado em Mapbiomas, 2019.

Figura 4.3 - Uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas do rio Paraopeba (SF3) e no Entorno da Represa de Três Marias (SF4) no ano de 2019, em que houve o rompimento da barragem de rejeitos B1.



4.1 Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba está situada na região central do estado, e conforme IGAM (2013), possui área de drenagem de 12.054 km², que corresponde a cerca de 2,5% da área total do estado de Minas Gerais. É dividida em sub-bacias, sendo elas: Alto, Médio e Baixo Paraopeba (COBRAPE, 2020).

Contempla 48 municípios, dos quais 35 estão sediados nesta bacia hidrográfica e, segundo dados do IBGE (2010) *apud* IGAM (2013), apresenta uma população aproximada de 2.349.024 habitantes (IGAM, 2013). O curso d'água principal possui 510 km de extensão (IGAM, 2013), cuja nascente está situada em Cristiano Ottoni e desagua no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Três Marias, em Felixlândia (CPRM, 2020; IGAM, 2013). A leste essa bacia hidrográfica é limitada pelo Quadrilátero Ferrífero e a bacia do rio das Velhas e a oeste pela bacia do rio Pará (CPRM, 2020).

Essa bacia está localizada em uma região com grandes áreas de plantações, pecuária e mineração (CPRM,2020). A mineração de ferro e manganês ocorre no Quadrilátero Ferrífero e no Alto e Médio Paraopeba. Outras atividades desenvolvidas na bacia são a extração de areia e argila; a lavra de ardósia; as indústrias metalúrgicas, têxteis, alimentícias e químicas; a siderurgia; a agropecuária; a silvicultura e a horticultura (IGAM, 2013).

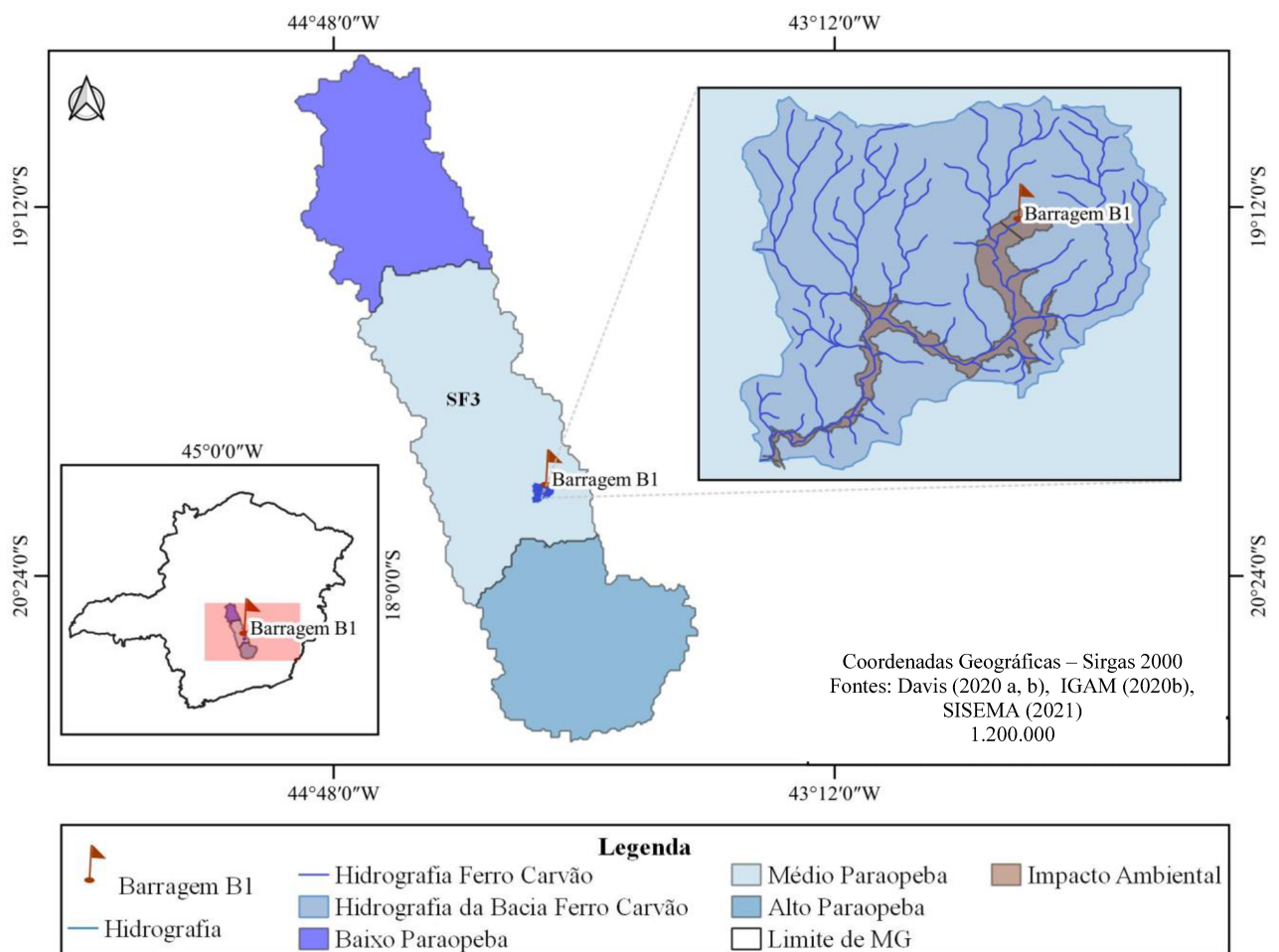
Essa bacia apresenta concentrações elevadas de alguns compostos. Esses podem ser de origens naturais (tais como a composição das rochas e solos, já que apresenta jazidas de ferro, manganês e ouro) ou antrópicas (CPRM, 2020).

A alteração na qualidade das águas nessa bacia está vinculada aos lançamentos de esgotos sanitários e à agropecuária. Entretanto, a situação pode ter sido agravada pela mineração, pelas indústrias (tais como abatedouros, automóveis, cerâmicas, laticínios, metalurgia, siderurgia e de produtos de limpeza), além das cargas poluidoras difusas e dos processos erosivos (IGAM, 2018b). Dentre os municípios que mais contribuem para piora da qualidade das águas dessa bacia destaca-se Betim, pela grande quantidade de indústrias existentes, assim como a elevada contribuição de efluentes domésticos não tratados (IGAM, 2013).

4.1.1 Rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da mina de Córrego do Feijão

Na bacia do rio Paraopeba, em 25 de janeiro de 2019, houve o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1. O evento ocorreu na mina Córrego do Feijão (Figura 4.4), que está situada no Quadrilátero Ferrífero, no Médio Paraopeba, na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), em Brumadinho/MG, na bacia hidrográfica do ribeirão Ferro-Carvão - cuja área é de 32,8 km² (CPRM, 2020).

Figura 4.4 - Localização da mina Córrego do Feijão.



As atividades nessa mina se iniciaram em 1956, pela Cia de Mineração Ferro e Carvão, e no ano de 1973 o empreendimento passou para o controle da Ferteco Mineração S.A. A construção da Barragem de contenção de rejeitos B1 foi iniciada em 1976 e, em 2001, a atual empresa Vale S.A adquiriu a Ferteco Mineração S.A, dirigindo-a desde então. Ao longo dos anos essa

barragem passou por diversos alteamentos a montante (AMPLO ENGENHARIA E GESTÃO DE PROJETOS LTDA, 2019a, 2019b).

Gomes (2009) cita que o processamento do minério de ferro nessa unidade gerava elevada quantidade de finos. Em 2008, para se produzir 6.039.597 toneladas de produto foram geradas 1.479.157 toneladas de rejeito - sendo esses estocados na B1 (GOMES, 2009). Essa quantidade de rejeitos gerados corresponde a 24,5% do total produzido.

O rompimento da Barragem de contenção de rejeitos de minério de ferro B1 ocorreu em 25 de janeiro de 2019 (IGAM, 2020a), por volta das 12:28h (CARVALHO, 2019), na Mina de Córrego do Feijão. O evento em questão causou o rompimento das barragens B-IV e B-IV-A, situadas a jusante, resultando no carreamento de rejeitos até a UHE Retiro Baixo (SEMAD *et al.*, 2020). Conforme atualização efetuada em 11/11/2021, pela Vale S.A (2021b), o quantitativo de óbitos confirmados pela Defesa Civil foi de 263 pessoas identificadas pelo Instituto Médico Legal e 7 estão sem contato.

A barragem de contenção de rejeitos B1 continha rejeitos provenientes do beneficiamento a úmido de minério de ferro. “A estrutura da barragem tinha área total de aproximadamente 27 hectares, 87 metros de altura e não recebia rejeitos desde 2016” (IGAM, 2020a). Além disso, essa barragem era classificada na categoria de risco baixo e dano potencial associado alto, devido às chances de perdas humanas e impactos socioeconômicos e ambientais em caso de emergência (ANM, 2019).

Pelas grandes proporções é considerado “um evento trágico sem precedentes” (COBRAPE, 2020), que gerou impactos sociais e ambientais que não podem ser medidos (VERGILIO *et al.*, 2020). Dentre os impactos provenientes do rompimento da barragem de rejeitos B1 estão os danos ao patrimônio público e privado; a alteração quali-quantitativa de água e os prejuízos socioeconômicos diretos e indiretos sobre a biodiversidade (SEMAD *et al.*, 2020).

O evento promoveu a liberação aproximada de 12 milhões de m³ (Mm³) de rejeitos de minério de ferro, sendo que a maioria ficou contida do ribeirão Ferro-Carvão até a confluência com o rio Paraopeba. Uma parcela desse rejeito foi espalhada até o remanso da UHE Retiro Baixo

(IGAM, 2020a). Segundo Semad *et al* (2021), cerca de 2 Mm³ ficaram no remanescente da barragem, 7,8 Mm³ foram distribuídos na calha do ribeirão Ferro-Carvão e 2,2 Mm³ se dissiparam até o remanso supracitado. Conforme IGAM (2020a), dentre os impactos desse evento está a alteração da qualidade hídrica, com destaque para os parâmetros turbidez, ferro e alumínio dissolvidos e manganês total.

A área diretamente afetada (ADA) pelos rejeitos provenientes da barragem de rejeitos B1 é de, aproximadamente, 306 hectares. O evento promoveu a alteração no uso e ocupação do solo e da qualidade das águas superficiais de forma expressiva (SOARES *et al.*, 2021). Na Figura 4.5 apresenta-se a vista aérea dessa barragem antes e depois o evento do rompimento.

Figura 4.5 - Área da barragem da mina do Córrego do Feijão antes e depois da ruptura da barragem de contenção de rejeitos B1.



Fonte: CPRM, 2019.

O movimento de massa causado pelo rompimento, além do rejeito propriamente dito, continha o material alóctone por ele carregado, como edificações, veículos, vegetação ou seres vivos (CPRM, 2020). Portanto, o material que se dissipou pelo rio Paraopeba não era composto apenas pelo rejeito proveniente da B1, visto o carregamento de diversos materiais que existiam a jusante e foram conduzidos pelo movimento de massa.

Conforme CPRM (2020), o material constituinte do rejeito era grosso, com poucos finos e água interna. Conforme Soares *et al.* (2021), as características específicas do rejeito podem contribuir

para que o solo fique impróprio para a agropecuária e para a construção civil, por exemplo, por período até o momento inestimável.

Os elementos As, Cu, Ni, Cd e Hg associados ao Fe (valores que ultrapassam 20%) e Mn (acima de 5 mil ppm) “refletem a presença do rejeito proveniente da barragem B1 no leito do rio Paraopeba, apesar de todos eles já estarem presentes anteriormente ao rompimento da barragem” (CPRM, 2020).

Conforme Soares (2021), os parâmetros alumínio dissolvido, chumbo total, cor verdadeira, ferro dissolvido, ferro total, manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez confirmaram a alteração na qualidade da água na bacia do rio Paraopeba mediante a ocorrência do rompimento da Barragem B1. Segundo IGAM (2020a), no trecho até o município de Curvelo/MG, os teores nos sedimentos de ferro, manganês, mercúrio, cobre, níquel e chumbo são indicativos da presença de rejeitos da barragem de rejeitos B1 nesse compartimento.

4.1.2 Medidas adotadas e estudos desenvolvidos após o rompimento da Barragem B1

Com o rompimento da Barragem de rejeitos B1 uma série de medidas foram tomadas com o intuito de analisar a qualidade das águas e dos sedimentos, além de acompanhar o espalhamento da pluma de rejeitos. Dentre as principais ações realizadas pelo IGAM está a recomendação da suspensão dos usos da água bruta do Paraopeba (até o município de Pompéu) e de poços e cisternas (até 100 metros da calha desse rio, até o município de Três Marias); emissão de outorgas de emergência, para as finalidades de abastecimento público, consumo humano e de dessedentação de animais; concessão de novo ponto de captação, à Copasa, tendo em vista que a captação foi impactada pelo rompimento; instalação de placas informativas sobre os usos de água não recomendados no Paraopeba; dentre outras (IGAM, 2020a).

Além disso, foi criado pelo IGAM um canal para divulgação dos resultados de qualidade de água, com linguagem mais acessível disponível em: <http://www.feam.br/component/content/article/15/1992-boletim-informativo-do-cidadao-sobre-a-qualidadedaagua-no-rio-paraopeba> (ANA *et al.*, 2021). As ações e programas de recuperação na bacia hidrográfica do rio Paraopeba encontram-se disponível em: <http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio->

paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba.

Conforme já abordado anteriormente, dentre os inúmeros impactos provenientes do rompimento da barragem B1 está a alteração do ambiente aquático. Nesse contexto, uma série de estudos e monitoramentos vinculados à qualidade das águas e dos sedimentos foram realizados.

A avaliação da série histórica dos dados de monitoramento da Rede Básica do IGAM, do ano de 2000 até 2018 - ou seja, antes do evento ocorrido - sendo uma estação situada a montante e sete a jusante do rompimento da barragem B1, indicou que os maiores índices de violações aos limites preconizados pela Deliberação Normativa Conjunta nº 1 de 2008 foram verificados para o parâmetro manganês total, para a estação a montante, seguida pela imediatamente a jusante ao local do rompimento. Observou-se violação em todas as estações de monitoramento para os parâmetros turbidez; chumbo total e manganês, alumínio e ferro dissolvidos. O maior quantitativo de violações se deu no período chuvoso (IGAM, 2019).

Diante a ocorrência do evento foi criada uma rede integrada de monitoramento do rio Paraopeba, do IGAM, em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (Copasa) (IGAM, 2020a). Vale destacar que o IGAM, a COPASA e o CPRM/ANA já realizavam monitoramentos periódicos nesse rio, entretanto, o processo foi intensificado com o rompimento (ANA *et al.*, 2019a).

O monitoramento efetuado pelo IGAM foi denominado Monitoramento Especial do rio Paraopeba e iniciado de montante para jusante do local do rompimento, a partir de 26 de janeiro de 2019 – ou seja, no dia seguinte ao evento. Esse monitoramento perfazia análises de qualidade da água e dos sedimentos (IGAM, 2020a).

A análise dos resultados de água e sedimentos efetuadas pelo IGAM até 30 de dezembro de 2019 - ou seja, após o rompimento da barragem B1 - revelou que nos primeiros 60 dias após o ocorrido foram verificados os maiores impactos na qualidade da água, sendo consideráveis os

valores de turbidez, ferro, manganês, alumínio e metais pesados (IGAM, 2020a). No período seco, a redução da turbidez e dos metais pode estar vinculada à “deposição do rejeito que está na coluna d’água no leito do rio” (IGAM, 2020a). De jusante da barragem de rejeitos B1 até o município de Curvelo, “os teores de ferro, manganês, mercúrio, cobre, níquel e chumbo em sedimentos estiveram superiores aos valores encontrados no trecho a montante do impacto” (IGAM, 2020a), sendo esse um impacto proveniente do rompimento.

As análises realizadas por Teramoto *et al.* (2021) revelaram uma falta de correlação entre os metais nas amostras de água e de sedimento, sendo que isso pode estar vinculado a processos dinâmicos de sorção e dessorção. Por meio da dessorção os elementos como arsênio, cobre e manganês podem ser liberados do sedimento em suspensão.

Vergilio *et al.* (2020) analisou a concentração de elementos diversos em amostras de água e sedimentos, cinco dias após o rompimento, de montante até jusante do local do evento. Além das análises químicas, foram avaliados os efeitos biológicos em organismos pertencentes a diferentes níveis tróficos e verificou-se que a água e os sedimentos podem induzir efeitos tóxicos, como a inibição no crescimento celular da alga *Raphidocelis subcapitata*; a imobilidade no microcrustáceo *Daphnia similis*; nos peixes foi verificada a indução de 20% de mortalidade e acúmulo de metais no tecido muscular.

Souza *et al.* (2021) avaliou o potencial toxicogenético da água e dos sedimentos do rio Paraopeba cinco dias após o evento, empregando a *Allium cepa* (cebola). Os resultados obtidos revelaram o potencial citogenotóxico da água e dos sedimentos. Além disso, os resultados indicaram a biodisponibilidade de metais do sedimento para a coluna d’água e os altos níveis dos metais, assim como a ação sinérgica com o meio, podem causar efeitos genotóxicos em um curto período de tempo.

Estudo desenvolvido por Thompson *et al.* (2020) contemplou análises físico-químicas, microbiológicas e ensaios ecotoxicológicos empregando a água coletada em sete pontos no rio Paraopeba, em 1/2/2019 e quatro meses após o evento. Os resultados indicaram que a turbidez alcançou 30 vezes o padrão vigente para Classe 2 e o ferro dissolvido foi cerca de 3 vezes o recomendado, conforme a Resolução CONAMA nº 357/2005. Foi detectada alta toxicidade da

água do rio Paraopeba, além da possível ameaça à saúde pública, tendo em vista a proliferação de organismos patogênicos e tóxicos.

Os estudos apresentados foram realizados com abordagens e tipos de dados diferentes, contudo, no geral buscaram, de certa forma, avaliar o impacto do rompimento da barragem B1 para o ambiente aquático e/ou a toxicidade do rejeito.

4.2 Bacia Hidrográfica Entorno da Represa de Três Marias

A bacia hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias (SF4) está situada na região central do estado de Minas Gerais, no Alto rio São Francisco, abrangendo 23 municípios, dos quais 15 possuem sede nessa bacia (CBH SF4, [s.d.]; GAMA ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015). Possui área de drenagem de aproximadamente 18.710 km² e uma população estimada de 218.000 habitantes, sendo a grande maioria situada na área urbana. Os usos e ocupações do solo predominantes nessa bacia são vegetação arbórea nativa (28,08 %), cerrado (21,44%), pastagem cultivada (20,59 %) e cultura agrícola (14,35%) (GAMA ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015).

A alteração na qualidade das águas nessa bacia está associada aos lançamentos de esgotos sanitários (destaque para os provenientes dos municípios de Abaeté, Biquinhas, Rio Paranaíba, São Gotardo e Tiros) e à agropecuária. A poluição da qualidade das águas pode ter sido intensificada pelas indústrias, com destaque para a extração de minerais não-metálicos. Além disso, as cargas difusas, os processos erosivos e o assoreamento também contribuem para a alteração da qualidade das águas (IGAM, 2018a).

Nessa bacia está situada a represa da Usina Hidrelétrica de Três Marias. Segundo Lima (2020), essa UHE possui um papel importante no desenvolvimento do Alto São Francisco, já que possui usos múltiplos como a pesca, a piscicultura e a agropecuária, além do fornecimento de energia. De acordo com a Vale S.A (2021c), os rejeitos não chegaram a atingir o rio São Francisco, pararam na UHE Retiro Baixo, e não houve contaminação das águas na UHE Três Marias.

5 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido por meio da avaliação de dados secundários de análises físico-químicas e biológicas do Programa Especial de Monitoramento da Qualidade da Água e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno (PMQS-TM), sob responsabilidade da Vale S.A (VALE, 2021c), e disponibilizados por meio do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

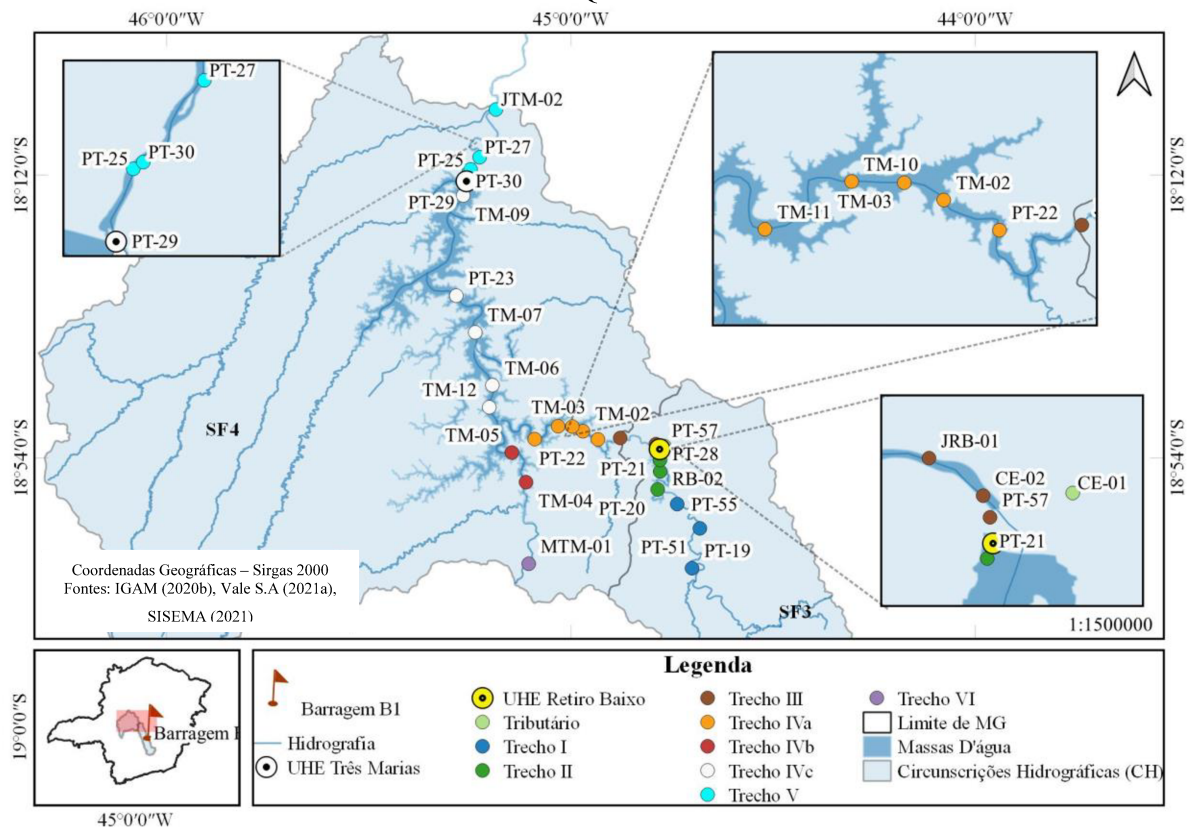
5.1 Caracterização e tratamento dos bancos de dados

O PMQS-TM abrange a Rede Integrada de Monitoramento de Qualidade das Águas e Sedimentos do Rio Paraopeba, estabelecida em conjunto IGAM, ANA, COPASA e CPRM. Esse Programa “intensifica o monitoramento e amplia a malha amostral do atual escopo do Plano de Monitoramento Emergencial (PME) executado pela Vale S.A, que teve início em 25/01/2019” (VALE S.A, 2021a). Portanto, nesse trabalho, quando se utiliza o termo “PMQS-TM”, também estão inclusos alguns pontos pertencentes ao PME.

O monitoramento do PMQS-TM foi efetuado abrangendo tanto ecossistemas lóticos, quanto lênticos - como é o caso do reservatório da UHE Retiro Baixo e da UHE Três Marias (VALE S.A, 2021a). Conforme pode-se observar na Figura 5.1, a área de interesse engloba uma parcela da Circunscrição Hidrográfica (CH) do Rio Paraopeba (SF3) e a do Entorno da Represa de Três Marias (SF4).

Dos 30 pontos de monitoramento do PMQS-TM, em 14 foram efetuadas amostragens de água em diferentes profundidades (superfície, zona fótica, zona intermediária e fundo), sendo 02 deles no reservatório da UHE Retiro Baixo (RB-01 (ponto PT-20 do PME) e RB-02) e 12 em Três Marias (TM-01 (ponto PT-22 do PME), TM-02, TM-03, TM-04, TM-05, TM-06, TM-07, TM-08 (ponto PT-23 do PME), TM-09, TM-10, TM-11 e TM-12). A localização desses 30 pontos de monitoramento é evidenciada no diagrama unifilar apresentado no Anexo I e na Figura 5.1. Maiores detalhamentos sobre cada ponto de monitoramento são apresentados no Anexo II.

Figura 5.1 - Localização dos pontos de monitoramento, por trecho, contemplados na área de abrangência do PMQS-TM.

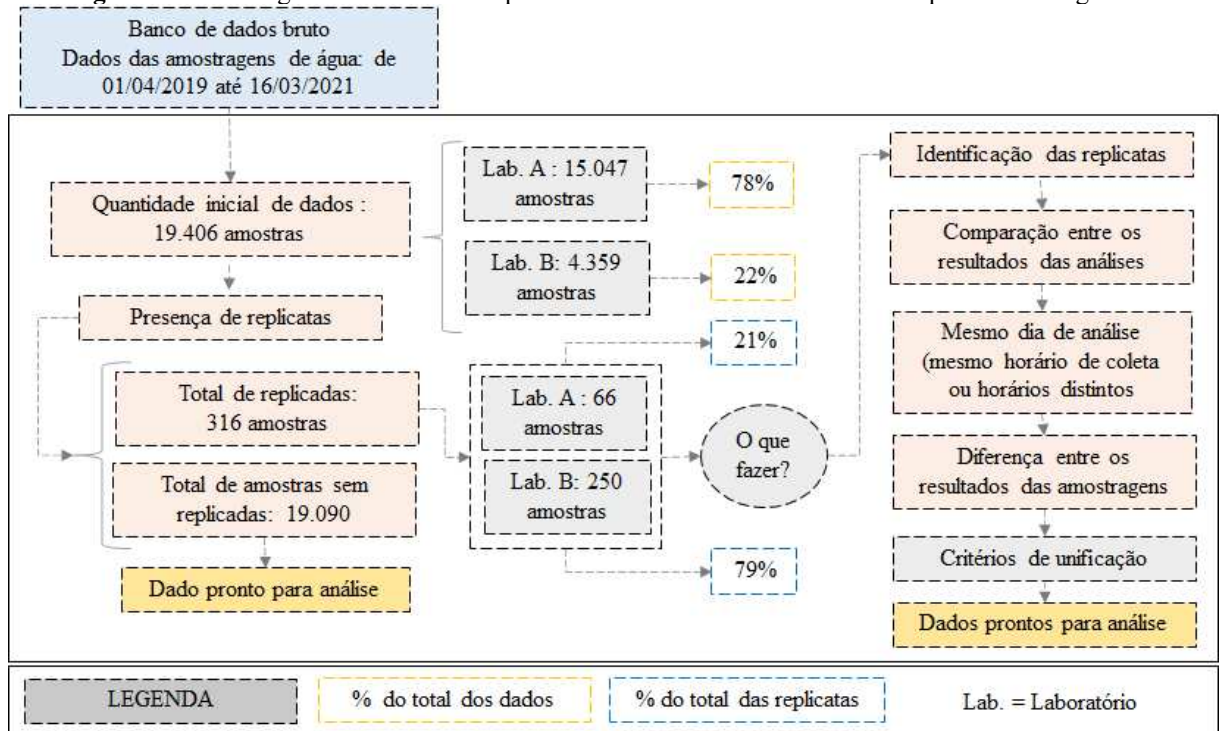


Ao todo foram analisados no PMQS-TM 68 parâmetros de qualidade da água (dos quais 60 foram analisados em laboratório e 8 em campo) e 19 em sedimentos de fundo e em suspensão (VALE, 2021d). Além disso, foram disponibilizados os dados da distribuição granulométrica (VALE, 2021d), entretanto os mesmos não foram avaliados nesse estudo.

Os dados foram disponibilizados em planilhas em Excel. O banco de dados inicial era composto por 19.406 amostragens de qualidade da água, obtidas de 01/04/2019 a 16/03/2021, e 1.605 amostragens de sedimentos, referentes ao período de 01/04/2019 a 11/03/2021.

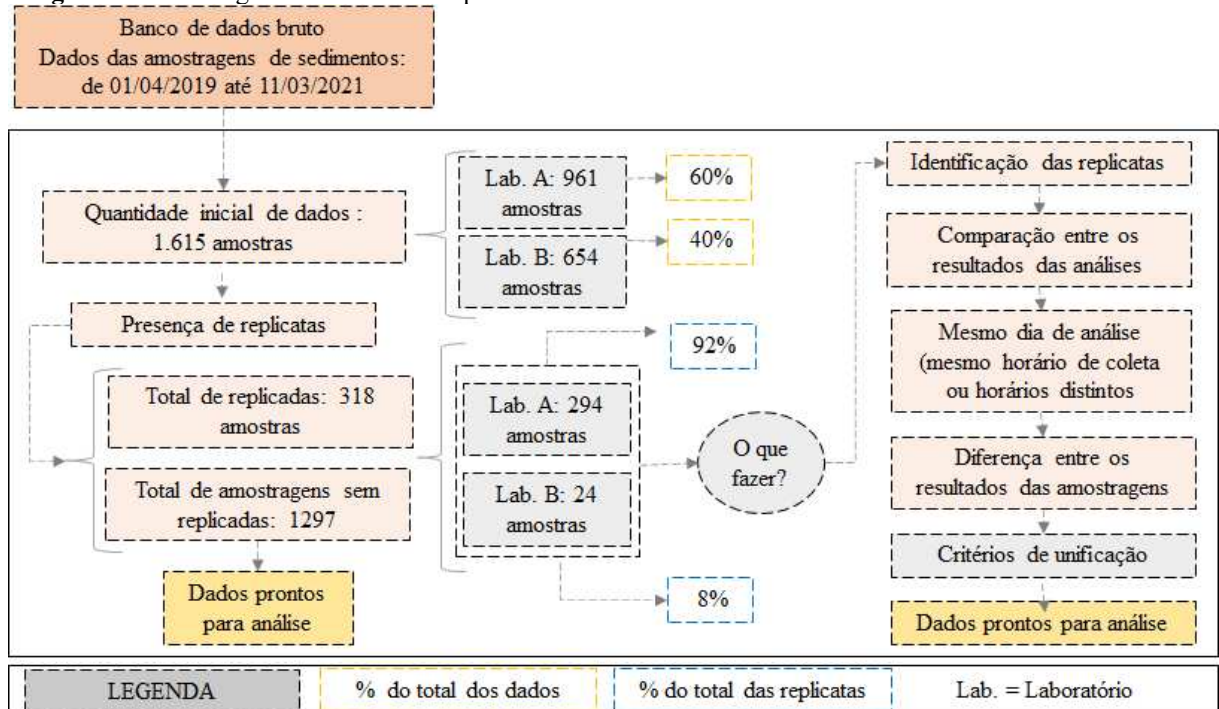
Em alguns casos foi verificada a presença de mais de uma amostragem por ponto de monitoramento e profundidade. Isso pode estar relacionado à existência de replicatas, dentre outros fatores. Para obter uma amostragem por dia, ponto de monitoramento e profundidade, foi efetuado um tratamento preliminar dos dados conforme apresentado nas Figuras 5.2 e 5.3.

Figura 5.2 - Fluxograma do tratamento preliminar do banco de dados bruto de qualidade da água.



Fonte: Baseado nos dados de Vale S.A, 2021d.

Figura 5.3 - Fluxograma do tratamento preliminar do banco de dados brutos das análises dos sedimentos.



Fonte: Baseado nos dados de Vale S.A, 2021d.

Mediante a identificação de replicadas foi realizada a seleção dos resultados a serem considerados na análise, conforme os critérios de unificação apresentados na Tabela 5.1, de forma a se obter um resultado por dia, profundidade e laboratório. A seleção do laboratório foi efetuada baseando-se no quantitativo de amostras de água e de sedimentos. Além disso, nos reservatórios deu-se prioridade para o laboratório que realizou o monitoramento em profundidades distintas. Considerou-se como dados faltantes aqueles que apresentam ao menos uma *flag* qualificador nos resultados (por exemplo: NA - Não Analisado).

Tabela 5.1 - Critérios adotados para realização da unificação/seleção das possíveis replicatas das análises físico-químicas e biológicas, dos pontos de monitoramento contemplados no PMQS-TM.

Combinações		Resultado na unificação
<	Número	Número (sem realização de média)
<	NA, 0 ou <	Módulo do limite informado
NA	Número	Número (sem realização de média)
NA	NA	NA
NA	<	Módulo do limite informado
Número	Número	Média entre os resultados
Número	NA, 0 ou <	Número (sem realização de média)
0	Número	Número (sem realização de média)
0	NA	NA
0	0	0
0	<	Módulo do limite informado

Legenda: NA = Não analisado.

Após o tratamento dos dados foi verificado que 40 amostras de água e 28 de sedimentos, possuíam dados faltantes para todos os parâmetros. Diante disso, tais resultados de análise foram excluídos do banco de dados.

A frequência de monitoramento da qualidade das águas e dos sedimentos variou ao longo das estações de monitoramento, no período em estudo (abril/2019 até março/2021). Isso contribuiu para que estações não apresentassem o mesmo número de dados e periodicidade de coleta.

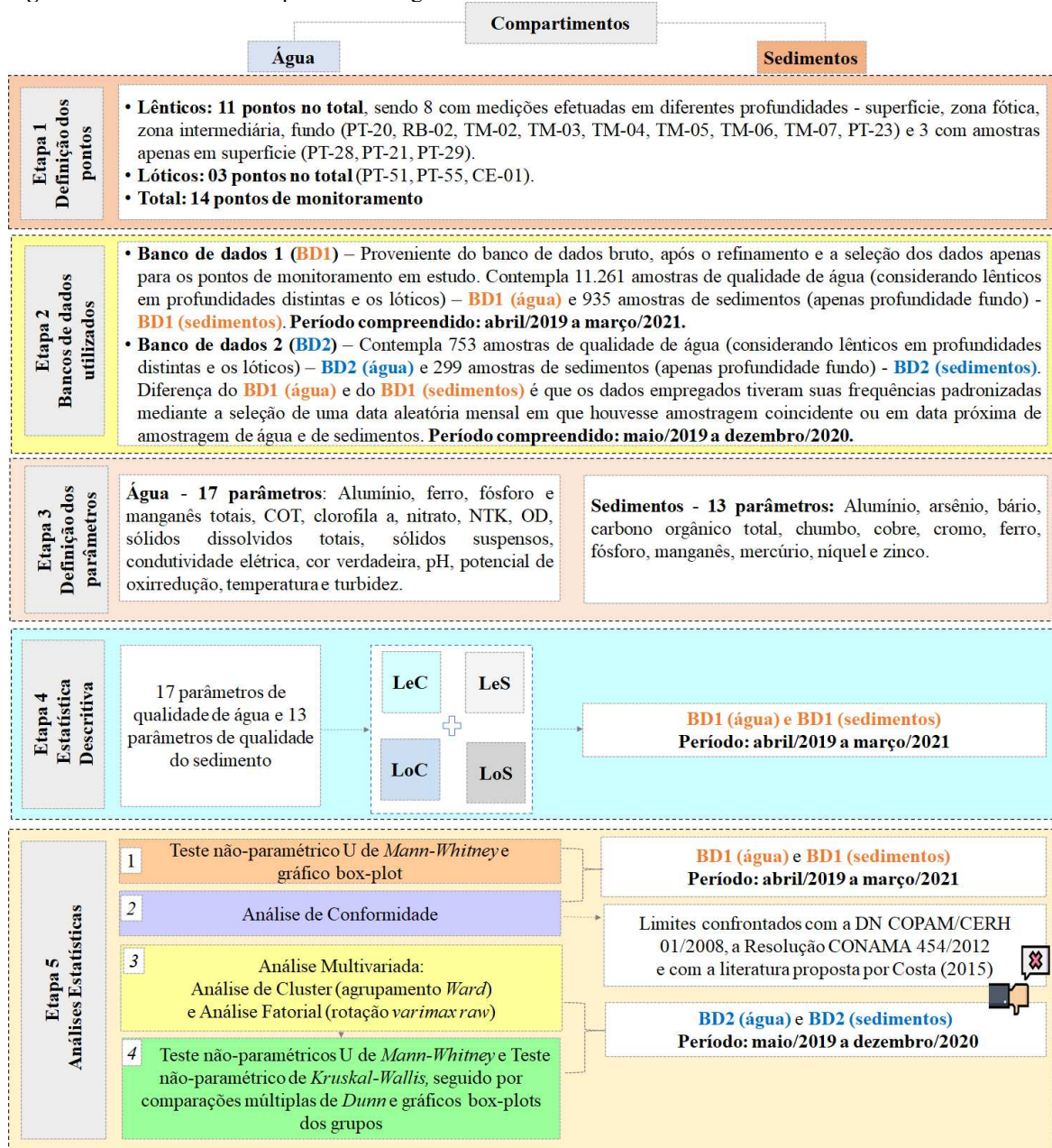
Os *outliers* foram analisados caso a caso para a verificação de quais seriam mantidos ou excluídos do banco de dados de qualidade da água e dos sedimentos. Vale destacar que os *outliers* podem ocorrer naturalmente no meio ambiente. A magnitude dos impactos provenientes do rompimento da barragem de rejeitos B1 pode contribuir para a ocorrência dos mesmos. Diante ao contexto, apenas cinco valores extremos analisados nas amostras de água

foram removidos. No casos dados censurados, por questões mais restritivas, empregou-se o módulo do limite de quantificação do método analítico informado.

5.2 Avaliação da qualidade das águas e dos sedimentos dos reservatórios a jusante do rompimento

Para a realização dos testes estatísticos, os dados foram segregados para se obter o maior detalhamento possível do cenário estudado. Na Figura 5.4 apresenta-se um breve resumo das etapas metodológicas da elaboração desse estudo, sendo o maior detalhamento apresentado no texto a seguir.

Figura 5.4 - Resumo das etapas metodológicas vinculadas às análises estatísticas desenvolvidas no trabalho.



Legenda: LeC = Ecosistema lêntico no período chuvoso; LeS = Ecosistema lêntico no período seco; LoC = Ecosistema lótico no período chuvoso; LoS - Ecosistema lótico no período seco.

Alguns dos pontos de monitoramento não foram contemplados nas análises por pelo menos um dos motivos citados a seguir: por possuírem poucos dados de água e/ou de sedimentos (JRB-01, JRB-02); não apresentarem dados em um ou mais meses do ano (PT-19, TM-02, TM-03); por estarem após o reservatório da UHE Três Marias (PT-25, PT-27, JTM-02) ou no rio São Francisco (MTM-01), a montante do reservatório. Tendo em vista esses critérios, apenas 14

pontos de monitoramento analisados no PMQS-TM foram considerados nas análises multivariadas, sendo 03 em ecossistemas lóticos (PT-51, PT-55 e CE-01 - tributário do rio Paraopeba) e 11 nos lênticos (PT-20, PT-28, RB-02, PT-21, PT-22, TM-04, TM-05, TM-06, TM-07, PT-23, PT-29) - conforme apresentado na Etapa 1 da Figura 5.4 e ilustrado na Figura 5.5 e na Figura 5.6.

Figura 5.5 - Localização dos 14 pontos de monitoramento, do PMQS-TM, considerados nas análises multivariadas.

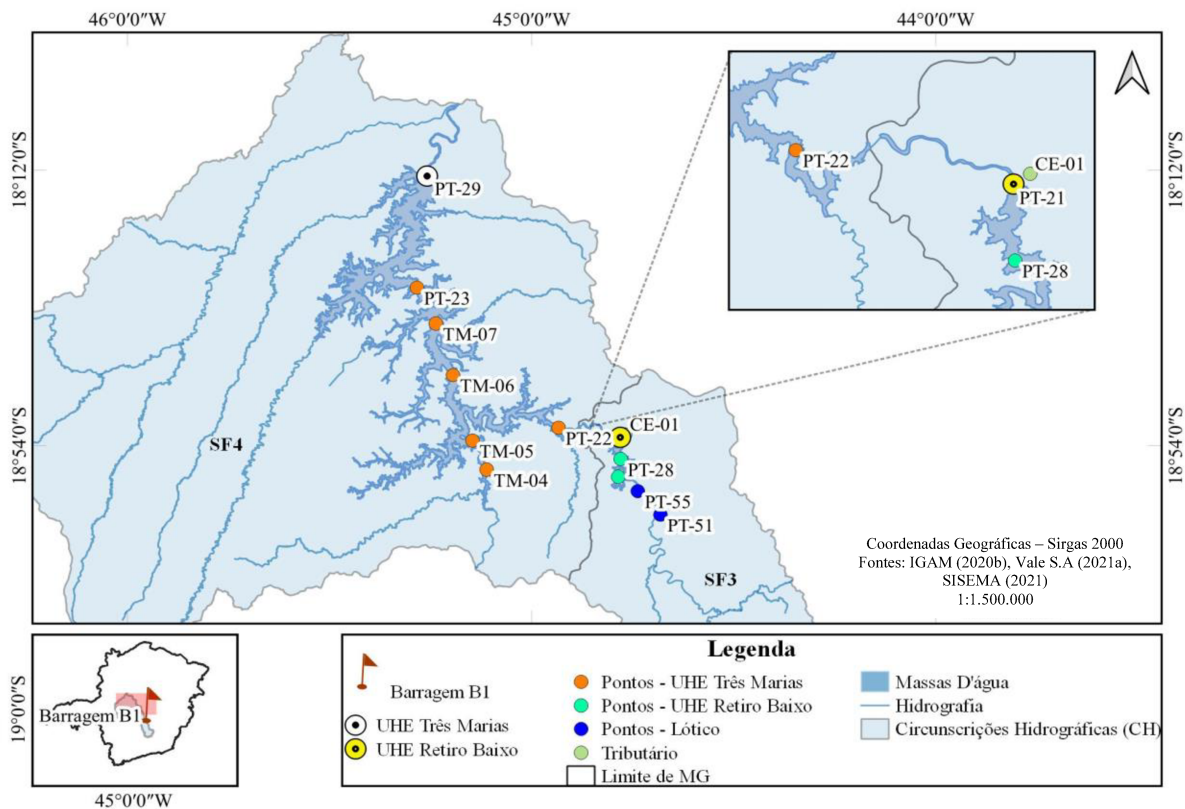
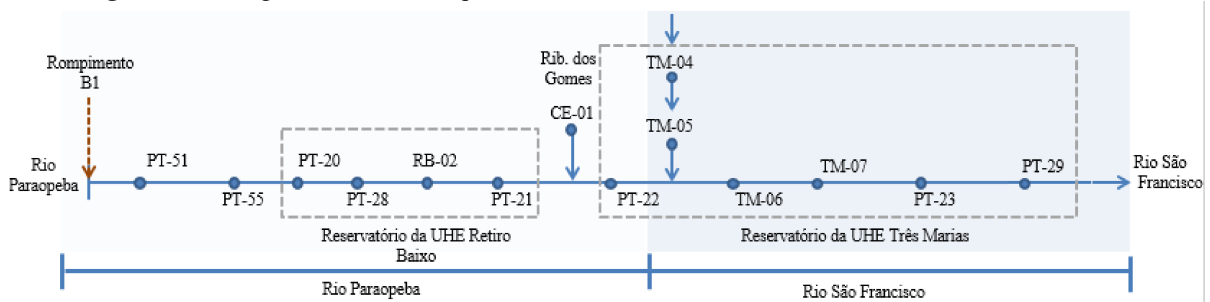


Figura 5.6 - Diagrama unifilar dos pontos de monitoramento avaliados nas análises multivariadas.



A seguir serão apresentadas algumas considerações importantes sobre alguns dos pontos de monitoramento analisados nesse estudo:

- O ponto PT-51 está situado em um ecossistema lótico. Destaca-se que é o ponto de monitoramento situado mais próximo ao local do rompimento, dentre os 14 pontos em estudo. Maiores detalhamentos sobre a localização desse ponto são apresentados no Anexo II.
- Embora o PT-21 esteja no vertedouro da UHE Retiro Baixo, em todas as análises realizadas nesse estudo esse ponto de monitoramento foi analisado em conjunto com os demais pontos situados no interior do reservatório da UHE Retiro Baixo, ou seja, foi considerado como pertencente a um ambiente lêntico.

Para a realização das análises foram utilizados dois bancos de dados distintos (BD1 e BD2 – ilustrados na Figura 5.4, Etapa 2). Denominou-se BD1 o banco de dados contendo informações sobre a qualidade da água e dos sedimentos dos pontos de monitoramento em estudo (período de abril/2019 a março/2021), podendo esse ser relativo às análises de água (BD1 (água)) ou de sedimentos (BD1 (sedimentos)). Para aplicação das análises multivariadas, que requerem um banco de dados homogêneo (BD2 – ilustrado na Figura 5.4), foi necessário um pré-processamento do banco de dados. Como nem todas as estações iniciaram o monitoramento em todas as profundidades em abril/2019, optou-se em iniciar as análises no mês seguinte. Portanto, os bancos de dados BD2 (água) e BD2 (sedimentos) continham dados de monitoramento de maio/2019 até dezembro/2020.

Para a seleção dos parâmetros que seriam considerados na análise (Etapa 3 da Figura 5.4) alguns critérios foram adotados, como apresentado a seguir.

Parâmetros de qualidade da água:

- a) Banco de dados era inicialmente composto por 68 parâmetros.
- b) Cálculo do Nitrogênio *Kjeldahl* Total (NTK), baseando-se na soma das concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal.
- c) Exclusão dos parâmetros: nitrito, nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal.

- d) Cálculo do percentual de dados faltantes e remoção dos parâmetros que apresentaram acima de 40% de dados faltantes e 90% de dados censurados, considerando todo o banco de dados em estudo (ecossistemas lóticos e lênticos, levando-se em consideração as distintas profundidades).
- e) Remoção de parâmetros baseando-se no critério do percentual de dados faltantes (> 40%): cianeto livre (mg/L) (45,85%), cromo hexavalente (mg/L) (40,49%), fenol total (mg/L) (41,00%), metilmercúrio (mg/L) (100,00%), substâncias tensoativas que reagem com o azul de metileno (mg/L) (41,00%), sulfetos como H₂S não dissociado (mg/L) (85,44%) e transparência (m) (89,14%).
- f) Remoção de parâmetros baseando-se no critério do dados censurados (> 90%): arsênio dissolvido (mg/L) (99,62%), arsênio total (mg/L) (97,70%), cádmio dissolvido (mg/L) (100,00%), cádmio total (mg/L) (99,87%), chumbo dissolvido (mg/L) (99,11%), chumbo total (mg/L) (95,79%), cobre dissolvido (mg/L) (97,57%), cobre total (mg/L) (93,36%), cromo dissolvido (mg/L) (99,74%), cromo total (mg/L) (94,89%), mercúrio dissolvido (mg/L) (99,87%), mercúrio total (mg/L) (99,87%), níquel dissolvido (mg/L) (99,62%), níquel total (mg/L) (97,70%), urânio dissolvido (mg/L) (100,00%), urânio total (mg/L) (99,11%), zinco dissolvido (mg/L) (94,64%), DBO (mg O₂/L) (98,72%) e sólidos sedimentáveis (ml/L) (99,11%).
- g) Segregação do banco de dados em ecossistemas (lênticos e lóticos) e períodos (seco e chuvoso).
- h) As análises iniciaram em abril/2019, ou seja, após mais de dois meses de ocorrência do evento do rompimento da barragem de rejeitos B1. As análises estatísticas desenvolvidas no presente projeto foram baseadas em dois bancos de dados: BD1 (água) e BD2 (água), detalhados na Etapa 2, da Figura 5.4 De forma sintética o BD1 (água) contempla os resultados de abril/2019 a março/2021 e foi resultado do banco de dados bruto, após o tratamento dos dados preliminar (Figuras 6.2 e 6.3) e da seleção dos dados para os 14 pontos de monitoramento em estudo. Já o BD2 (água) - (Etapa 2 da Figura 5.4), foi criado tendo em vista a estatística multivariada, já que nessa análise é fundamental se ter a mesma quantidade de amostras por mês, por ponto de monitoramento e profundidade, portanto, houve a padronização da frequência dos resultados das amostras de forma a se obter um

valor por mês. A seleção da data da amostra mensal, no período de maio/2019 até dezembro/2020, se deu de forma aleatória, entretanto, foi levado em consideração as datas coincidentes ou próximas, para a coleta de água e de sedimentos.

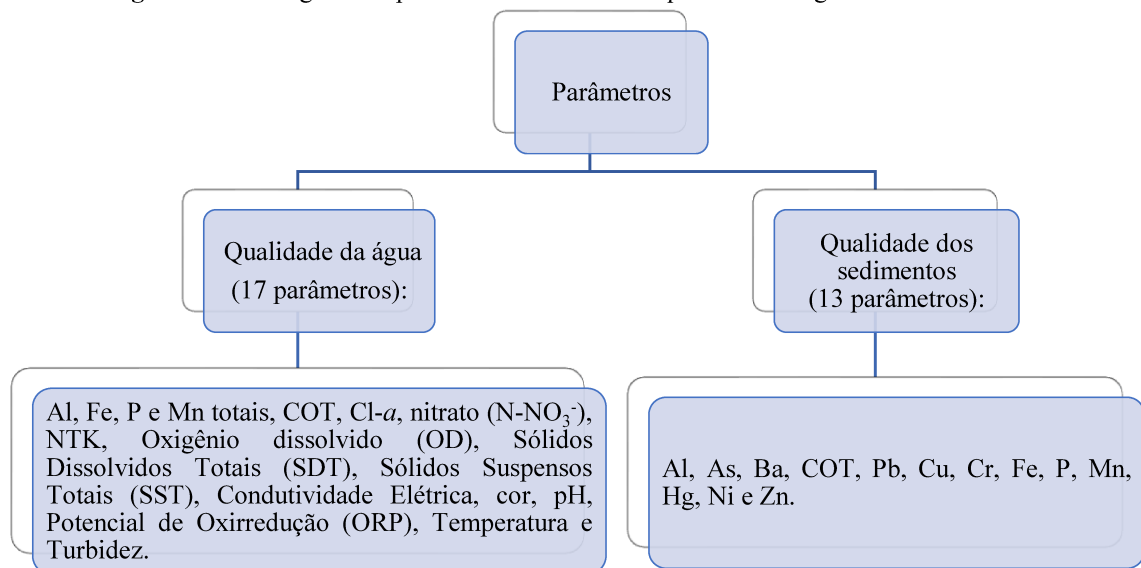
- i) Após a segregação dos dados por ecossistema (lêntico e lótico) e período (seco e chuvoso), verificou-se que muitos parâmetros ainda possuíam elevado percentual de dados faltantes, sendo necessário um refinamento dos mesmos a serem considerados nas análises estatísticas. Portanto, adotou-se como critério de exclusão o percentual de dados faltantes acima de 10% em pelo menos um ecossistema e período em estudo. Um total de 10 parâmetros se enquadraram nesse critério, sendo eles: bário dissolvido, bário total, cianeto, cobalto dissolvido, cobalto total, cromo trivalente, vanádio dissolvido, vanádio total, saturação de OD e *E. coli*.
- j) Tendo em vista que alguns parâmetros possuíam fração dissolvida e total, optou-se pela manutenção apenas daqueles que possuíam fração total. Os seguintes parâmetros foram excluídos das análises: alumínio, ferro, manganês e fósforo dissolvidos.
- k) Mediante a presença de todas as frações de sólidos no banco de dados (sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, sólidos sedimentáveis e sólidos totais), optou-se pela remoção do parâmetro sólidos totais.
- l) Foram excluídos das análises os parâmetros que não ultrapassaram o limite previsto pela DN COPAM CERH nº 01/2008, sendo eles o sulfato e o cloreto total.
- m) A temperatura foi mantida visto que é um parâmetro importante nas análises dos reservatórios.
- n) Finalmente, realizou-se a exclusão dos parâmetros que não possuem limites previstos pela DN COPAM CERH nº 01/2008, sendo eles: cálcio total, potássio total, sódio total, alcalinidade e magnésio total.

Parâmetros de qualidade de sedimento:

- a) O banco de dados de qualidade dos sedimentos era inicialmente composto por 19 parâmetros.
- b) Assim como foi feito para os dados de qualidade da água, os parâmetros de qualidade dos sedimentos foram segregados por ecossistema e período.
- c) Adotou-se como critério de exclusão o percentual de faltantes acima de 10% em pelo menos um ecossistema e período. Um total de cinco parâmetros se enquadraram nesse critério, sendo eles: cobalto, NTK, potencial de oxirredução, urânio e vanádio.
- d) Além disso, o parâmetro cádmio não apresentou variância e por esse fato também não foi incluso nas análises.

Esse refinamento dos parâmetros resultou em um total de 17 analisados na qualidade da água e 13 nos sedimentos (Figura 5.7) - Etapa 3 da Figura 5.4.

Figura 5.7 - Listagem dos parâmetros avaliados na qualidade da água e dos sedimentos.



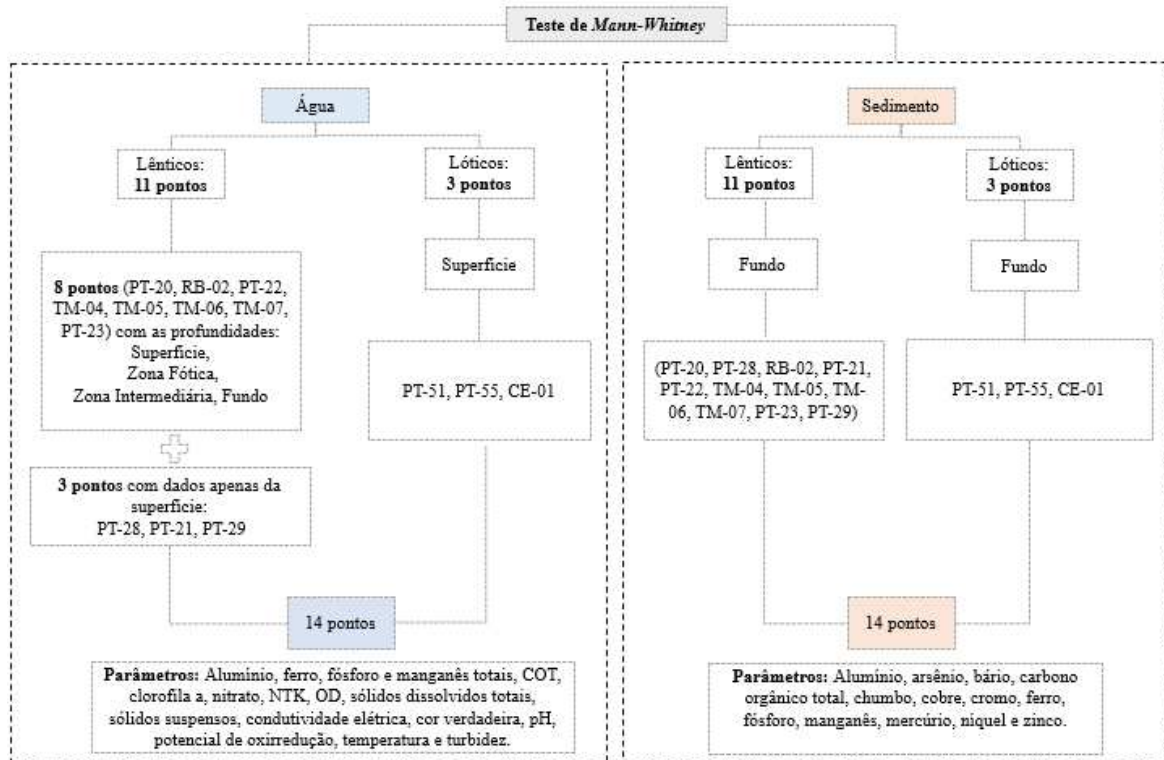
Observa-se, portanto, que nem todos os parâmetros analisados na água foram analisados no sedimento. Os parâmetros coincidentes entre os compartimentos são: alumínio, ferro, fósforo, manganês totais, além de carbono orgânico total.

Por meio do *software* Statistica 10.0 calculou-se a estatística descritiva dos dados brutos (BD1 (água) e BD1 (sedimentos) - ilustrado na Etapa 4 da Figura 5.4, selecionados por meio das etapas anteriores por parâmetro, ponto de monitoramento, ecossistema, período e profundidade. Nessa estatística foram considerados os percentis 25%, 50% (mediana) e 75%.

Os dados ambientais geralmente não possuem distribuição normal e por esse fato foram empregados nas análises estatísticas os testes não-paramétricos. Conforme Von Sperling, Verbyla e Oliveira (2020), quando o coeficiente de assimetria é próximo de zero, os dados seguem distribuição Normal. Portanto, diante ao contexto, foram empregados testes não-paramétricos nas análises estatísticas. Todas as análises estatísticas foram efetuadas ao nível de significância de 5%, por meio do *software* Statistica 10.0 e os gráficos gerados nesse *software* ou no R 4.1.0 (Etapa 5 da Figura 5.4).

Para verificar se existe diferença significativa entre os valores dos parâmetros em um mesmo ponto de monitoramento e profundidade, no período seco e chuvoso, nos diferentes compartimentos em estudo, foi realizado o teste não-paramétrico U de *Mann-Whitney* ($\alpha = 5\%$) – Etapa 5, na Figura 5.4. Os dados foram organizados conforme apresentado na Figura 5.8. Em caso de diferença significativa, para a melhor visualização dos resultados, foram gerados os gráficos *box-plot*.

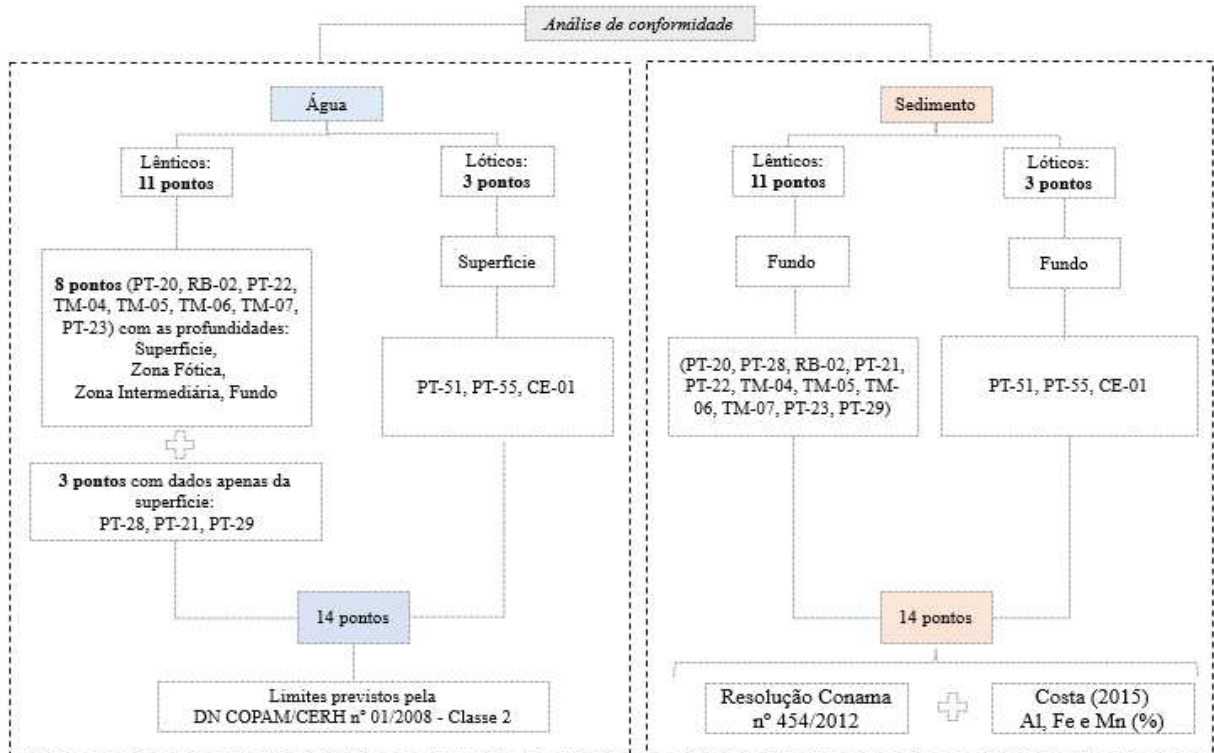
Figura 5.8 - Listagem dos pontos de monitoramento e dos parâmetros analisados no teste não-paramétrico U de *Mann-Whitney*.



5.2.1 Análise de conformidade aos padrões legais de qualidade das águas e comparação com valores de referência para os sedimentos

Para a comparação dos resultados obtidos com os valores de referência existentes, os dados foram organizados conforme ilustrado na Figura 5.9.

Figura 5.9 - Organização dos dados para a análise de conformidade dos parâmetros aos limites vigentes ou aos valores de referência existentes.



Para a análise de conformidade aos padrões os dados dos parâmetros de qualidade da água foram confrontados com os limites legais previstos na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 01, de 5 de maio de 2008 (COPAM; CERH-MG, 2008), para água Classe 2 - Etapa 5, na Figura 5.4. Dentre os 17 parâmetros de qualidade da água em estudo, 13 possuem limites estabelecidos pela DN COPAM/CERH nº 01/2008, para a classe supracitada.

Em se tratando de sedimentos, inexistente legislação nacional que contemple tais limites. Entretanto, para fins comparativos, os resultados foram confrontados com os Níveis I e II previstos na Resolução CONAMA nº 454/2012 (CONAMA, 2012) - Etapa 5, na Figura 5.4. Os limites considerados nesse estudo foram apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valores de referência para os parâmetros químicos avaliados nos sedimentos.

Item	Parâmetro	Resolução CONAMA nº 454/2012		Unidade de Medida
		Nível 1*	Nível 2**	
1	Arsênio	5,90	17,00	mg/Kg As
2	Chumbo	35,00	91,30	mg/Kg Pb
3	Cobre	35,70	197,00	mg/Kg Cu
4	Cromo	37,30	90,00	mg/Kg Cr
5	Mercúrio	0,17	0,486	mg/Kg Hg
6	Níquel	18,00	35,90	mg/Kg Ni
7	Zinco	123,00	315,00	mg/Kg Zn

* Nível 1 - Limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota. **Nível 2 - Limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota. Fonte: CONAMA (2012) – adaptado.

Para os parâmetros alumínio (Al), ferro (Fe) e manganês (Mn), foram adotados os valores de referência definidos por Costa (2015), no “Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (*background*) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero” e também utilizados pelo IGAM (2020a), sendo eles: 4,52% para alumínio; 28,10% para ferro e de 0,33% para manganês. “Os resultados desses metais são expressos em porcentagem de peso seco (%) dada as suas importâncias relativas quanto à composição dos sedimentos que geralmente são encontrados” (IGAM, 2020a). Após a organização dos dados (Figura 5.9), foi efetuada a análise da quantidade de violações por parâmetro, tendo em vista todos os pontos estudados.

5.2.2 Comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos nas estações de monitoramento

Para a análise multivariada, os dados de água e de sedimentos foram divididos em lânticos e lóticos. Em seguida, tendo em vista a data da análise, os dados foram segregados em período seco (abril a setembro) ou chuvoso (outubro a março).

A AC foi realizada com o intuito de agrupar os pontos de monitoramento conforme as similaridades e a localização geográfica, visto que existem pontos de monitoramento situados em ambientes lóticos e nos reservatórios (UHE Retiro Baixo e UHE Três Marias). Vale destacar que os ambientes lânticos em estudo possuem características muito distintas.

Cada profundidade da coluna d'água amostrada em uma mesma estação de monitoramento foi considerada como um ponto de monitoramento específico. Portanto, embora existissem 14 estações de monitoramento nos reservatórios, foram considerados um total de 35 pontos de

monitoramento nos ecossistemas lênticos (8 pontos de monitoramento contendo amostragens em quatro profundidades e 3 contendo apenas amostragens em superfície) e 3 nos lóticos.

Inicialmente foi efetuada a padronização dos dados realizada no *software Statistica 10.0*. Para a construção dos clusters foram levados em consideração os resultados dos 17 parâmetros de qualidade da água padronizados (alumínio total, carbono orgânico total, clorofila a, ferro total, nitrato, NTK, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos, condutividade elétrica, cor verdadeira, pH, oxirredução, temperatura e turbidez) e de 13 parâmetros de qualidade dos sedimentos (alumínio, arsênio, bário, chumbo, cobre, cromo, ferro, fósforo, manganês, mercúrio, níquel e zinco totais, carbono orgânico total).

Com o intuito de justificar os agrupamentos obtidos na AC e identificar quais são os parâmetros em estudo responsáveis pela poluição/degradação, aplicou-se a AF, para cada agrupamento que continha mais de um ponto de monitoramento. Os resultados obtidos foram discutidos com base nos autovalores de cada fator (acumulado ou não).

Todos os autovalores considerados nesse estudo foram superiores a 1. Para a seleção das cargas significativas adotou-se o que foi proposto por Liu, Lin e Kuo (2003) que considera cargas maiores que 0,75 fortes, entre 0,75-0,50 moderadas e entre 0,50-0,30 fracas, entretanto, nesse estudo foram empregadas apenas as cargas fortes. Foi gerado o gráfico das cargas dos dois primeiros fatores e em seguida foram destacados aqueles resultados que são fortemente correlacionados a cada um desses.

Em seguida foram aplicados testes não-paramétricos para os 17 parâmetros de qualidade da água e para os 13 de sedimento. Dependendo da quantidade de grupos formados, efetuou-se o teste não-paramétrico de MW - no caso dos ecossistemas lóticos cujos agrupamentos sempre formaram dois grupos - ou o teste de KW seguido por comparação múltiplas de *Dunn*, quando aplicável, na presença de mais de dois grupos sendo comparados. Objetivou-se com isso conhecer os parâmetros que apresentaram diferença significativa entre os distintos compartimentos, ecossistemas e períodos.

5.3 Comparação entre a qualidade da água antes e após o rompimento

No intuito de avaliar a qualidade da água antes e após o rompimento da barragem de rejeitos B1 levou-se em consideração o banco de dados BD1 (água) - de abril/19 até março/2021- e a série histórica da Rede Básica de monitoramento, do IGAM - de dezembro/1997 até novembro/2018, sendo utilizado todo o histórico de dados de monitoramento.

Destaca-se que duas estações pertencentes à Rede Básica do IGAM (BP078 e BP099) coincidem com os pontos de monitoramento do PMQS-TM (respectivamente, PT-19 e JRB-01). Ambos os pontos de monitoramento estão situados no rio Paraopeba. Destaca-se que o ponto de monitoramento BP078/PT-19 está situado a montante da UHE Retiro Baixo, enquanto a BP099/JRB-01 está a jusante desse reservatório.

Vale destacar que o rompimento se deu em janeiro, ou seja, no período chuvoso, e os dados de monitoramento do PMQS-TM são de abril/2019, já no período seco. Conforme o IGAM (2020a), os maiores impactos na qualidade da água se deram nos 60 dias após o ocorrido e os dados do PMQS-TM são após esse período.

Para a comparação da qualidade da água antes e após o rompimento, foi realizada a verificação da existência de diferença significativa entre os valores obtidos para os parâmetros ferro dissolvido e manganês total. Destaca-se que o parâmetro ferro total não foi incluso nas análises tendo em vista que não era monitorado na Rede Básica do IGAM antes do rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Ressalta-se que o parâmetro ferro dissolvido não fez parte do banco de dados utilizado nas outras análises desse estudo (apresentadas na Etapa 5, da Figura 6.4). Foi realizado o teste não-paramétrico de MW ($\alpha = 5\%$), no software *Statistica* 10.0, seguido pela elaboração dos gráficos *box-plots*, para a melhor visualização dos resultados. Os resultados dessa etapa metodológica são apresentados no item 6.5 do presente trabalho.

5.4 Comparação entre a qualidade da água após o rompimento antes e após a UHE Retiro Baixo

Com o intuito de avaliar a evolução temporal do rejeito ao longo dos ecossistemas lóticos situados na área de abrangência do PMQS-TM, optou-se pela seleção de 6 pontos de monitoramento (sendo 3 a montante da UHE Retiro Baixo (PT-19, PT-51 e PT-55) e 3 a jusante desse reservatório (PT-57 e JRB-01) e um afluente do rio Paraopeba (CE-01)).

Observa-se que os pontos de monitoramento considerados diferem daqueles selecionados nas análises estatísticas apresentadas no item 5.2 desse estudo. Efetuou-se a aplicação do teste não paramétrico de KW para os valores obtidos para os parâmetros ferro dissolvido, ferro total e manganês total, no período seco e no chuvoso. Foram empregados os dados das amostragens do PMQS-TM, de abril/2019 até março/2021 (Etapa 2, BD1 (água) – Figura 6.4). Os resultados dessa etapa metodológica são apresentados no item 6.6 do presente trabalho.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após todo o tratamento dos dados do PMQS-TM e seleção dos pontos de monitoramento a serem monitorados, foram analisadas cerca de 11.261 amostras de qualidade da água (BD1 (água)) e 935 amostras de sedimentos (BD1 (sedimentos)), conforme apresentado na Etapa 2 da Figura 5.4. A estatística descritiva contendo os percentis 25%, 50% (mediana) e 75% foi realizada para os parâmetros e pontos de monitoramento em estudo, para os distintos compartimentos (Etapa 4 da Figura 5.4). Os resultados são apresentados no Apêndice I.

6.1 Variação dos parâmetros de qualidade das águas e dos sedimentos nos períodos chuvoso e seco

Os resultados do teste de *Mann-Whitney* são apresentados no Apêndice II desse estudo. A análise dos resultados revela que, de forma geral, a maior ocorrência de diferença significativa entre as medianas dos parâmetros em estudo é verificada nas amostras de água, se comparada com as de sedimentos. De forma geral, espera-se que o escoamento superficial proveniente da ocorrência das chuvas promova o carreamento de compostos para os recursos hídricos, dentre eles os sólidos, podendo alterar assim, a concentração de determinados parâmetros tanto na água, quanto no sedimento. Vale destacar que embora a ocorrência de diferença significativa entre as medianas dos valores medidos, para os parâmetros em estudo, seja mais evidenciada nos dados de qualidade da água (Apêndice II), os parâmetros avaliados nos sedimentos podem ser influenciados pela sazonalidade em virtude dos processos de estratificação e circulação d'água.

Comparando-se os resultados obtidos para os ecossistemas lênticos e os lóticos observou-se que a maioria dos parâmetros monitorados na água, na superfície dos ecossistemas lóticos, apresentou diferença significativa em função da sazonalidade, exceto o parâmetro fósforo total, para o PT-51 (rio Paraopeba a montante da UHE Retiro Baixo), e a condutividade elétrica e os SDT, para o ponto CE-01 (Ribeirão dos Gomes, tributário do rio Paraopeba, a jusante da UHE Retiro Baixo).

Nos ecossistemas lênticos, a menor ocorrência de diferença significativa entre as medianas dos parâmetros de qualidade da água, quando comparados os períodos seco e chuvoso, foi

verificada para as estações de amostragem da UHE Três Marias, com destaque para os parâmetros COT, condutividade elétrica, OD e sólidos suspensos. As diferenças significativas para a temperatura, não apenas na superfície da água, mas também nas outras profundidades, podem estar indicando a ocorrência de estratificação térmica (verão chuvoso) e circulação (inverno seco) da coluna d'água, que caracterizam o regime monomítico normalmente observado nos corpos d'água lênticos da região. O mesmo foi observado para as estações de monitoramento localizadas na UHE Retiro Baixo (Apêndice II).

Em relação ao reservatório da UHE Retiro Baixo, o ponto de monitoramento que apresentou ocorrência de diferença significativa entre as medianas de grande parte dos parâmetros em estudo na água (exceto clorofila *a*), nos períodos seco e chuvoso, foi o PT-20, sendo esse o primeiro ponto de monitoramento nesse reservatório.

Dentre os pontos de monitoramento situados no reservatório da UHE Três Marias, o que apresentou o maior número de parâmetros com diferença significativa na água foi o PT-22, situado no remanso desse reservatório. Observou-se também que há uma redução no número de diferenças significativas nas estações localizadas após a afluência do rio São Francisco, no corpo central do reservatório.

Os parâmetros de qualidade da água que mais se destacaram em termos da ocorrência de diferença significativa (superiores e/ou inferiores) entre os períodos secos e chuvosos são: temperatura e NTK, seguidos por turbidez, cor, ferro total, manganês e alumínio totais. Esses parâmetros serão brevemente detalhados a seguir.

6.1.1 Parâmetros de qualidade da água

6.1.1.1 Temperatura

Apresenta-se os gráficos box-plots (Figuras 6.1 e 6.2) com o intuito de visualizar a distribuição do parâmetro temperatura, nos períodos seco e chuvoso, nos ecossistemas em estudo. Vale destacar que, para fins comparativos, os gráficos estão com a mesma escala.

Figura 6.1 - Gráfico *box-plot* da temperatura (°C) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

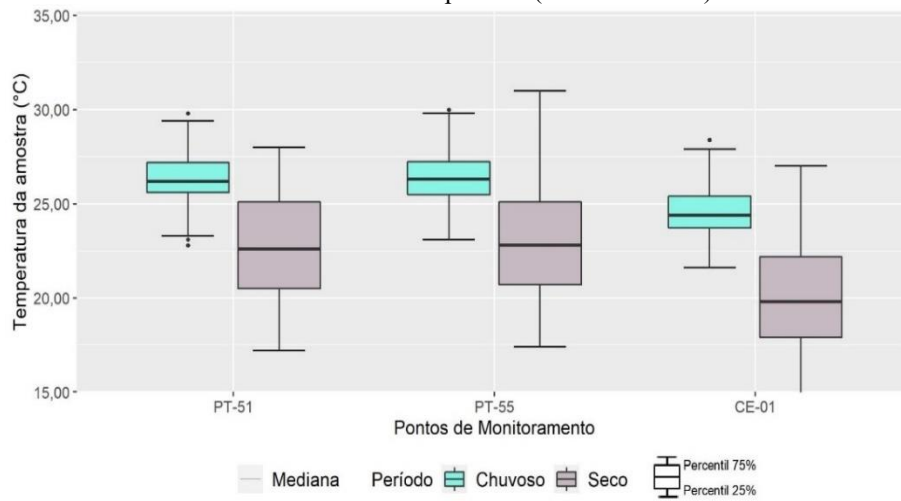
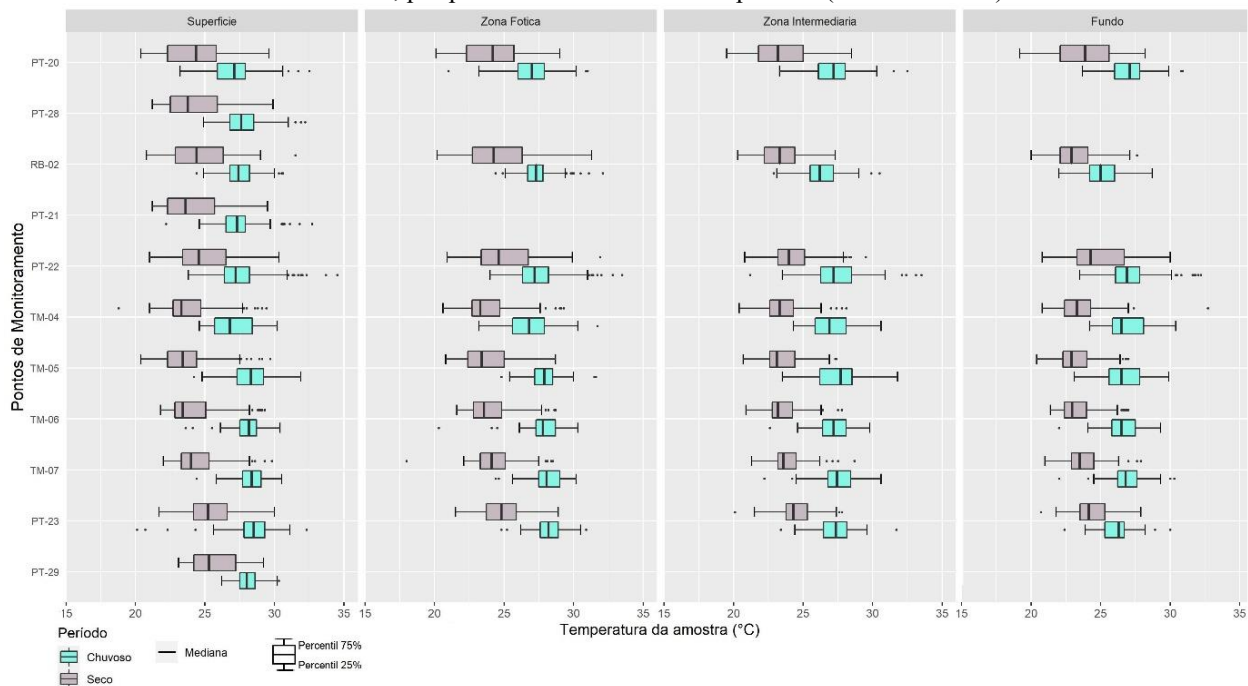


Figura 6.2 - Gráfico *box-plot* da temperatura (°C) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Por meio das Figuras 6.1 e 6.2 é possível reforçar o resultado observado no teste de *Mann-Whitney* em que todos os pontos de monitoramento e suas respectivas profundidades apresentaram diferença significativa entre o período seco e chuvoso, para o parâmetro temperatura. Por meio da estatística descritiva (Apêndice I) é possível verificar diferenças entre

as medianas das temperaturas medidas no período chuvoso, com valores mais elevados do que no período seco.

A temperatura da água pode ser influenciada por origens naturais, como é o caso da transferência de calor, ou por fontes antropogênicas, como é o caso dos despejos industriais. Elevações desse parâmetro, dentro da faixa usual de temperatura; diminuem a solubilidade de oxigênio dissolvido; aumentam as reações físicas, químicas e biológicas e a taxa de transferência de gases, com conseqüente propagação de odores (VON SPERLING, 2014).

Por meio das Figuras 6.1 e 6.2 verifica-se que a temperatura se manteve dentro do limite de 40°C previstos pela DN COPAM/CERH nº01/2008. Além disso, observa-se na Figura 6.2 que a temperatura oscila entre as diferentes profundidades, podendo isso estar vinculado aos processos de estratificação térmica nos reservatórios. Observa-se que para um mesmo período, houve pequena variação da mediana da temperatura entre as profundidades (Figura 6.2), entretanto, não é possível afirmar se essa diferença é suficiente para haver diferença significativa, visto que não foi efetuado um teste estatístico específico.

Observou-se que dentre os ecossistemas lóticos, o que apresentou as menores medianas no período seco e no chuvoso foi o ponto CE-01 (Figura 6.1), afluente do rio Paraopeba e não impactado diretamente pelo rompimento da barragem de rejeitos B1. Nos ecossistemas lênticos, verifica-se que, como esperado, as maiores temperaturas foram observadas na superfície (Figura 6.2).

6.1.1.2 NTK

O nitrogênio é um parâmetro essencial para o crescimento de algas, podendo favorecer o fenômeno da eutrofização. As conversões das formas de nitrogênio requerem consumo de oxigênio. O Nitrogênio Total *Kjeldahl* (NTK) é dado pelo somatório do nitrogênio amoniacal com o nitrogênio orgânico. Assim como a temperatura, o NKT apresentou diferença significativa em todos os ecossistemas e profundidades (Figuras 6.3 e 6.4). Vale destacar que a diferença significativa do NTK pode estar vinculada ao carreamento de compostos nitrogenados, mediante o escoamento superficial em áreas com o predomínio de atividades agropecuárias durante o período das chuvas.

Figura 6.3 - Gráfico *box-plot* do NTK (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

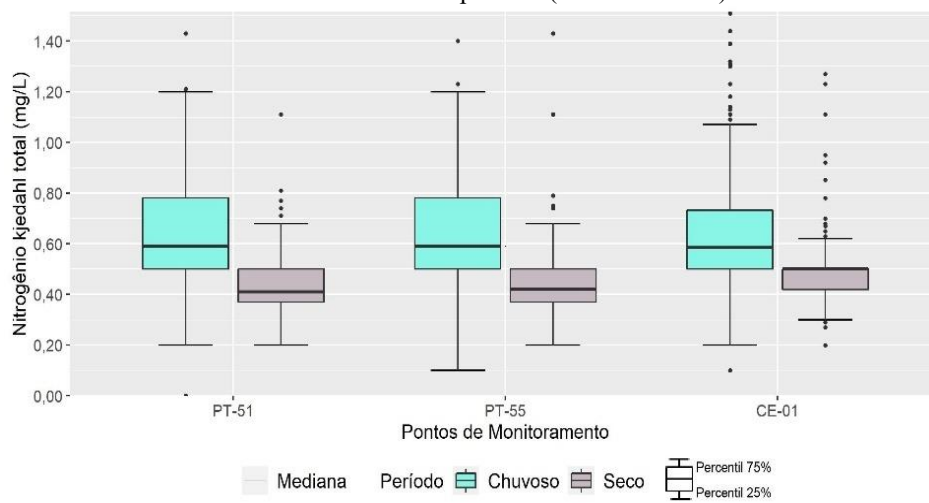
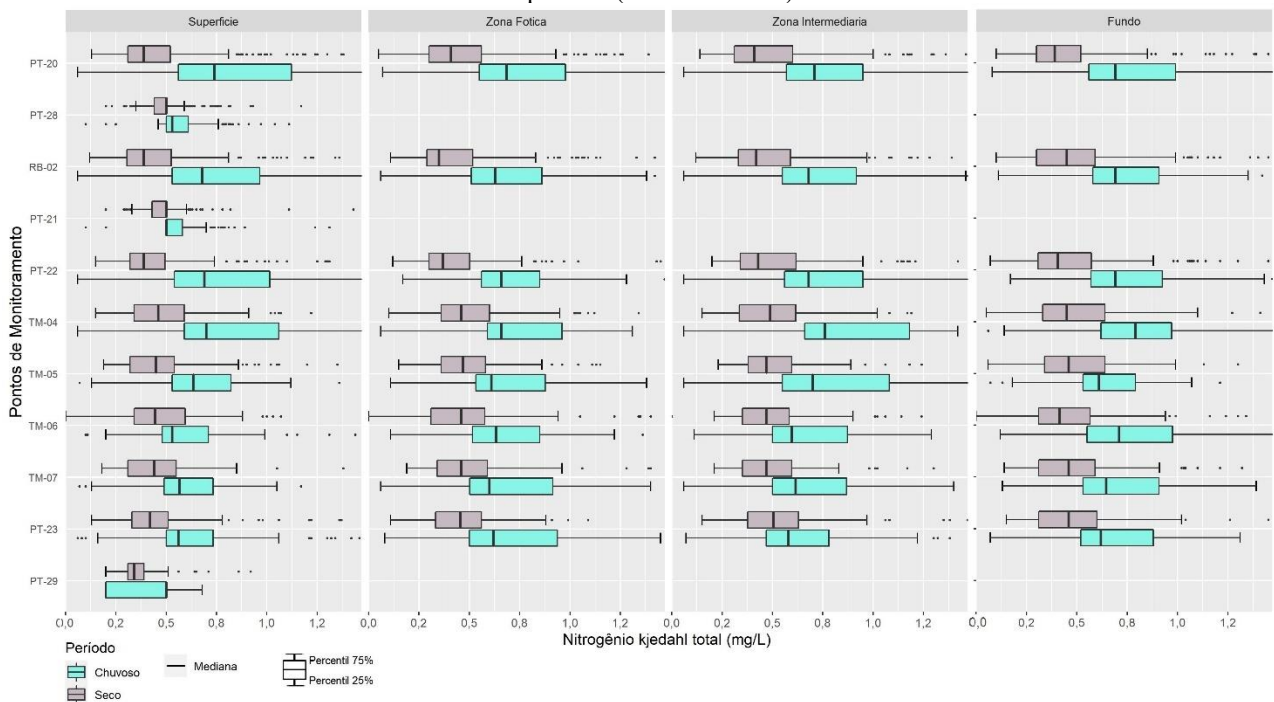


Figura 6.4 - Gráfico *box-plot* do NTK (mg/L) na água, em ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Como observado nos resultados da estatística descritiva (Apêndice I), verifica-se que, majoritariamente, a faixa de variação dos valores de NTK (percentis 25%, 50% e 75%) na água, para os pontos de monitoramento situados tanto nos ecossistemas lênticos, quanto nos lóticos, apresentou valores superiores no período chuvoso (Tabela I.1 e I.2).

Nos ecossistemas lóticos a menor mediana dos dados superficiais foi observada no período seco, no PT-51 (0,41 mg/L), já a maior foi verificada no período chuvoso, nos pontos PT-51 e PT-55 (0,59 mg/L) – Apêndice I. Dentre os ecossistemas lênticos, as menores medianas para o parâmetro NTK monitorado na água, independente da profundidade, foram observadas no período seco, para os pontos PT-23 (0,33 mg/L) e PT-29 (0,34 mg/L). Já as maiores medianas para o parâmetro NTK, dentre os ecossistemas lênticos, foram verificadas no período chuvoso, no ponto TM-04 (0,72 mg/L), seguido pelo PT-20 (0,71 mg/L). Destaca-se que o TM-04 está situado no braço do reservatório da UHE Três Marias sob a influência do rio São Francisco, já o PT-20 está no início do reservatório da UHE Retiro Baixo, sob influência do rio Paraopeba.

6.1.1.3 Turbidez

A turbidez tem relação direta com a presença de sólidos suspensos em água. Pode possuir origem natural (partículas de rocha, argila, silte, algas e microrganismos) ou antrópica (lançamentos de efluentes domésticos e industriais, erosão) e, nesse último caso, pode estar associada a organismos patogênicos e compostos tóxicos. A turbidez no ambiente aquático contribui para a redução da penetração de luz na coluna d'água, podendo comprometer a sobrevivência dos organismos fotossintetizantes (VON SPERLING, 2014).

Mediante a ocorrência do rompimento da barragem de rejeitos B1, a mistura do rejeito com a água promoveu imediatamente o aumento da turbidez da água. Por meio da Figura 6.5 e da Figura 6.6 - que apresentam a mesma escala - verifica-se que as maiores medianas ocorreram nos pontos de monitoramento situados a montante da represa da UHE Retiro Baixo, no período chuvoso (Figura 6.5).

Figura 6.5 - Gráfico *box-plot* da turbidez (NTU) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

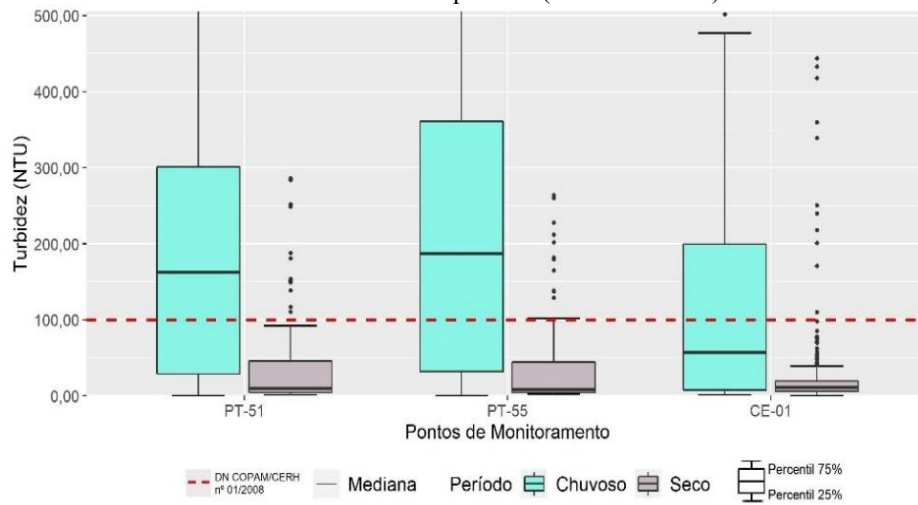
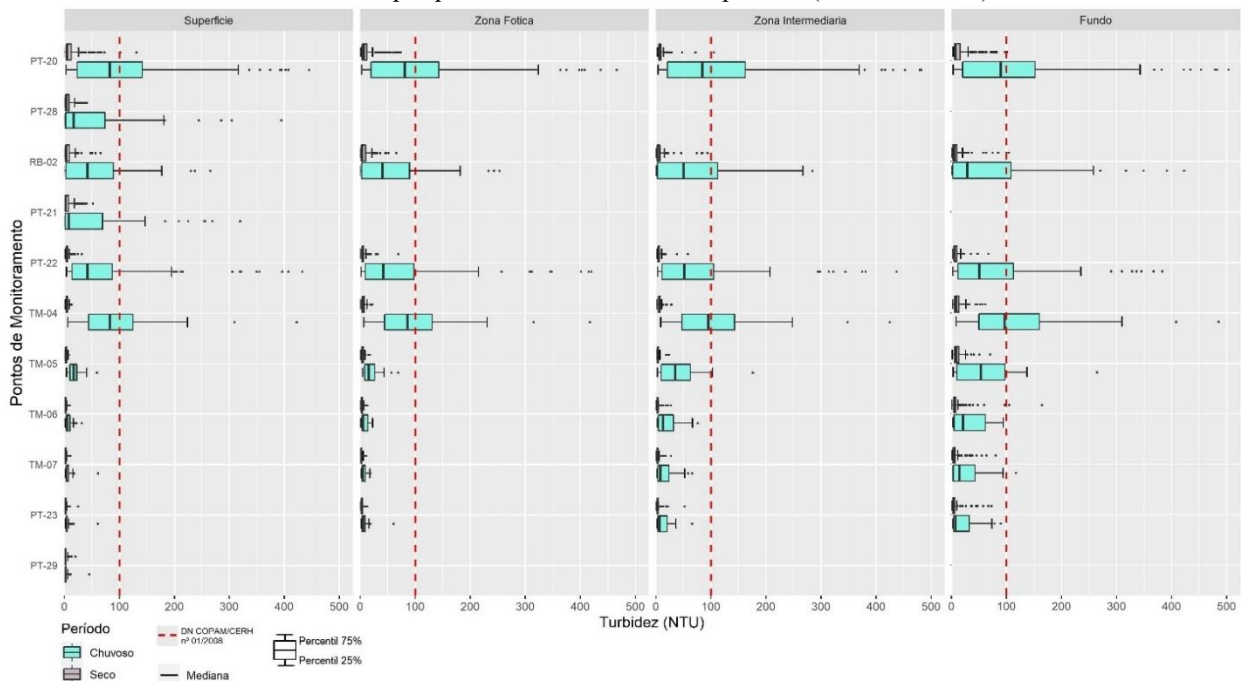


Figura 6.6 - Gráfico *box-plot* da turbidez (NTU) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada vermelha representa o limite previsto para águas Classe 2, na DN COPAM/CERH nº 01/2008.

Os ecossistemas lóticos tendem a promover a sedimentação das partículas suspensas na água, visto a redução da velocidade da água. O parâmetro turbidez apenas não apresentou diferença significativa no valor da mediana para o ponto PT-29 (superfície), situado a montante da barragem da UHE Três Marias.

Observa-se que os maiores valores de mediana para esse parâmetro, no período chuvoso, foram evidenciados, respectivamente, nos pontos de monitoramento situados nos ecossistemas lóticos (superfície): PT-55 (187 NTU) e PT-51(162 NTU). Destaca-se que o ponto CE-01 está situado no Ribeirão dos Gomes com afluência no rio Paraopeba, a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo. O valor da mediana da turbidez no período chuvoso foi de 57 NTU (Figura 6.5).

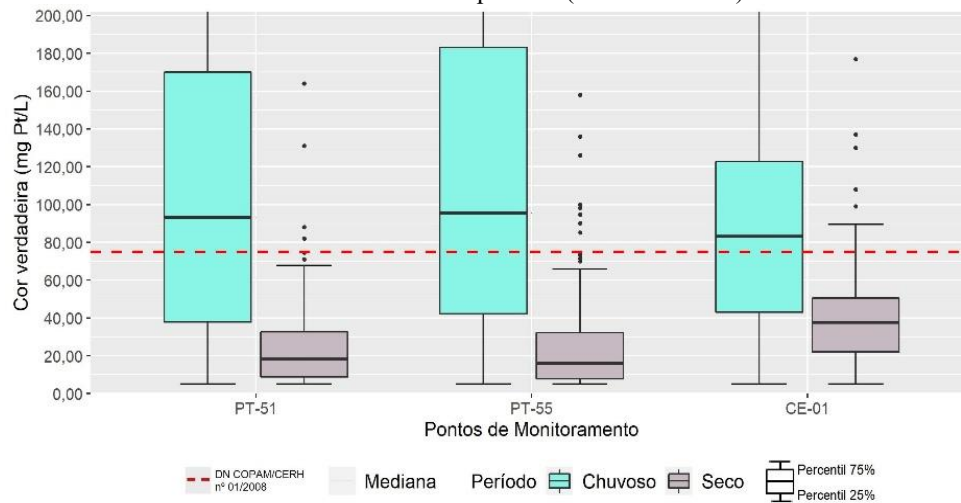
Destaca-se que esses valores das medianas nos ecossistemas lóticos PT-51 e PT-55 ultrapassaram o limite previsto pela DN COPAM/CERH nº 01/2008, para águas Classe 2, de 100 NTU. Portanto observam-se elevados valores de turbidez a montante da UHE Retiro Baixo, provavelmente vinculados ao rompimento da barragem B1.

6.1.1.4 Cor

A cor é um parâmetro físico influenciado pela presença de sólidos dissolvidos em água. Pode ser proveniente da decomposição natural da matéria orgânica, tais como ácidos húmicos e fúlvicos; ferro e manganês. Entretanto, pode possuir origem antrópica, como é o caso dos resíduos industriais e os efluentes domésticos (VON SPERLING, 2014).

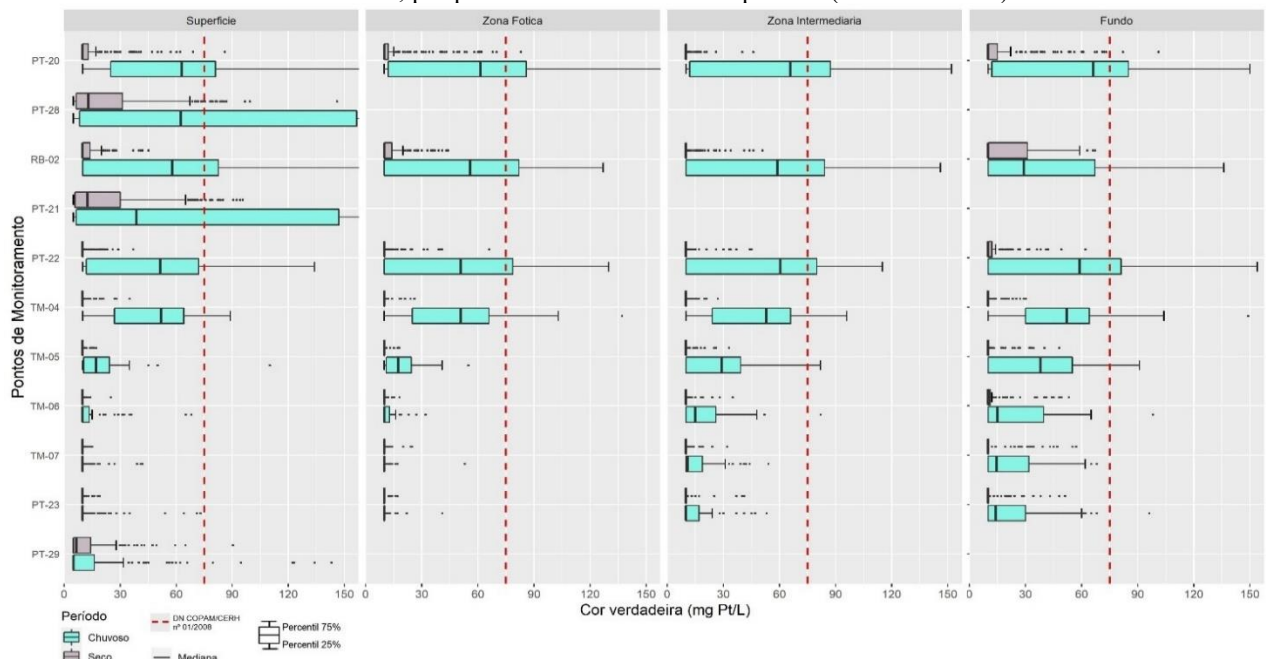
A maioria dos pontos de monitoramento em estudo apresentaram diferença significativa para esse parâmetro em função da sazonalidade, exceto TM-07 (zona fótica) e PT-29 (superfície) – Apêndice II. Conforme observa-se nas Figuras 6.7 e 6.8, a cor da água apresenta as maiores medianas no período chuvoso, em ambos os ecossistemas em estudo.

Figura 6.7 - Gráfico *box-plot* da cor (mg Pt/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada vermelha representa o limite previsto para águas Classe 2, na DN COPAM/CERH n° 01/2008.

Figura 6.8 - Gráfico *box-plot* da cor (mg Pt/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada vermelha representa o limite previsto para águas Classe 2, na DN COPAM/CERH n° 01/2008.

Por meio da Figura 6.7 verifica-se que a cor ultrapassa o limite previsto pela DN COPAM-CERH n° 01/2008 (75 mg Pt/L para águas Classe 2) nos ecossistemas lóticos situados a montante da represa da UHE Retiro Baixo: PT-55 (mediana = 95,55 mg Pt/L) e no PT-51 (93,20 mg Pt/L), de acordo com o Apêndice I. Esse resultado pode estar associado ao evento do

rompimento da barragem de rejeitos B1 e as concentrações dos compostos Fe e Mn, abundantes no rejeito.

Além disso, o valor observado no ponto PT-55 pode estar vinculado à possível contribuição de despejos domésticos provenientes do aglomerado rural de Cachoeira do Choro. A mediana obtida no tributário do rio Paraopeba (CE-01), no período chuvoso, também violou o limite previsto pela legislação vigente (83,05 mg Pt/L), cujos usos dos solo predominantes no entorno são: formação campestre e a pastagem. Observa-se que em todos os ecossistemas lênticos, para os distintos períodos, os valores das medianas não ultrapassaram o limite previsto pela DN COPAM/CERH nº 01/2008.

Vale destacar que assim como a turbidez, a cor pode estar vinculada ao impacto do acúmulo de rejeito proveniente da barragem B1 e ao escoamento superficial proveniente das precipitações, assim como aos processos de lixiviação do solo.

6.1.1.5 Ferro total

O ferro e o manganês totais estão vinculados às atividades minerárias e são encontrados, sobretudo, no rejeito de mineração de ferro. Grande parte do ferro proveniente da barragem B1 está associado à fração total e não à dissolvida. Portanto, a compreensão desses parâmetros é fundamental para o entendimento do impacto do desastre proveniente do rompimento da barragem B1 (IGAM, 2020a).

Por meio da análise dos gráficos *box-plot* das Figuras 6.9 e 6.10 verifica-se que as medianas dos valores de ferro total na água, no período chuvoso, são maiores do que as observadas no período seco. Situação análoga foi observada para o parâmetro cor (item 6.1.1.4). A maioria dos pontos de monitoramento apresenta diferença significativa para os valores desse parâmetro em função da sazonalidade, exceto os pontos situados no reservatório da UHE Três Marias: TM-07 e PT-23 (na zona fótica) e PT-29 (superfície).

Figura 6.9 - Gráfico *box-plot* de ferro total (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

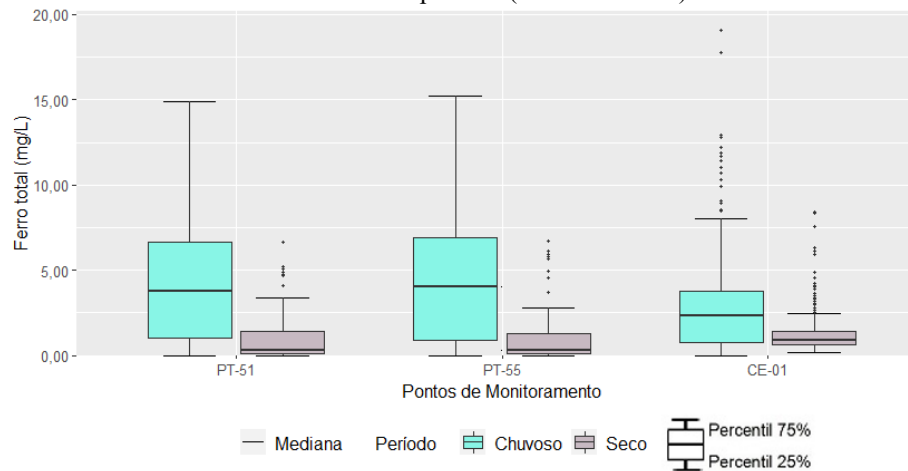
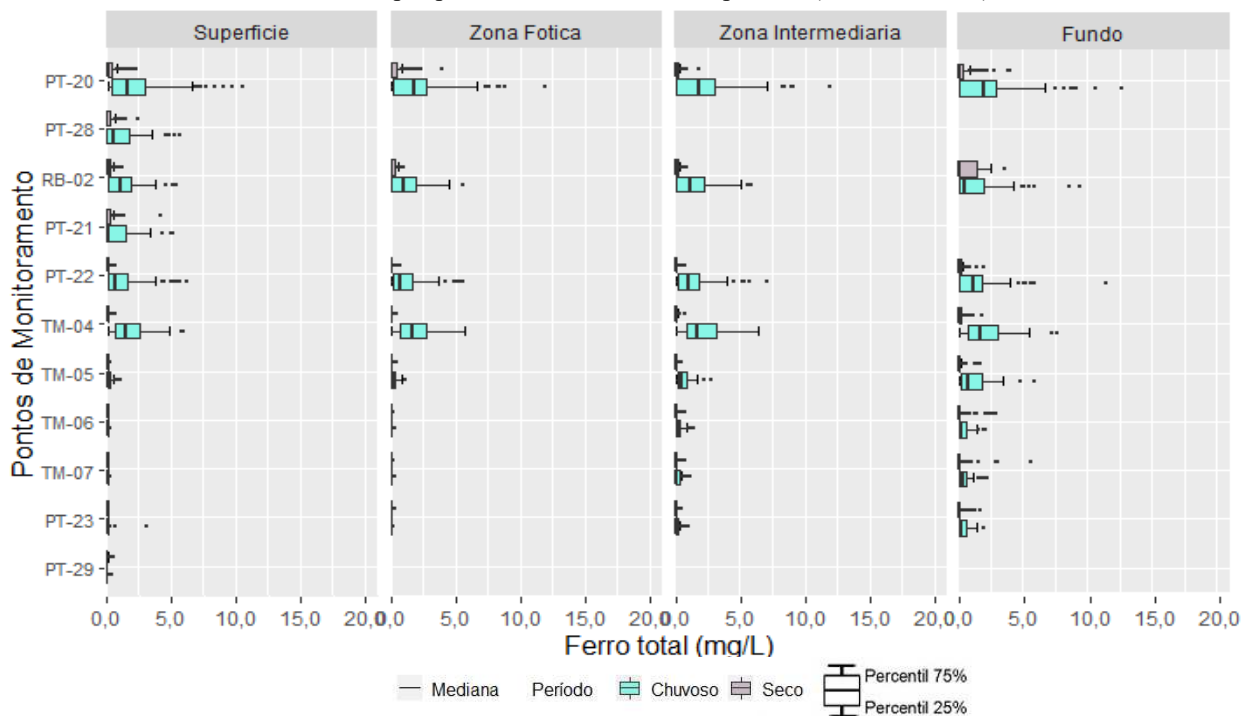


Figura 6.10 - Gráfico *box-plot* de ferro total (mg/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

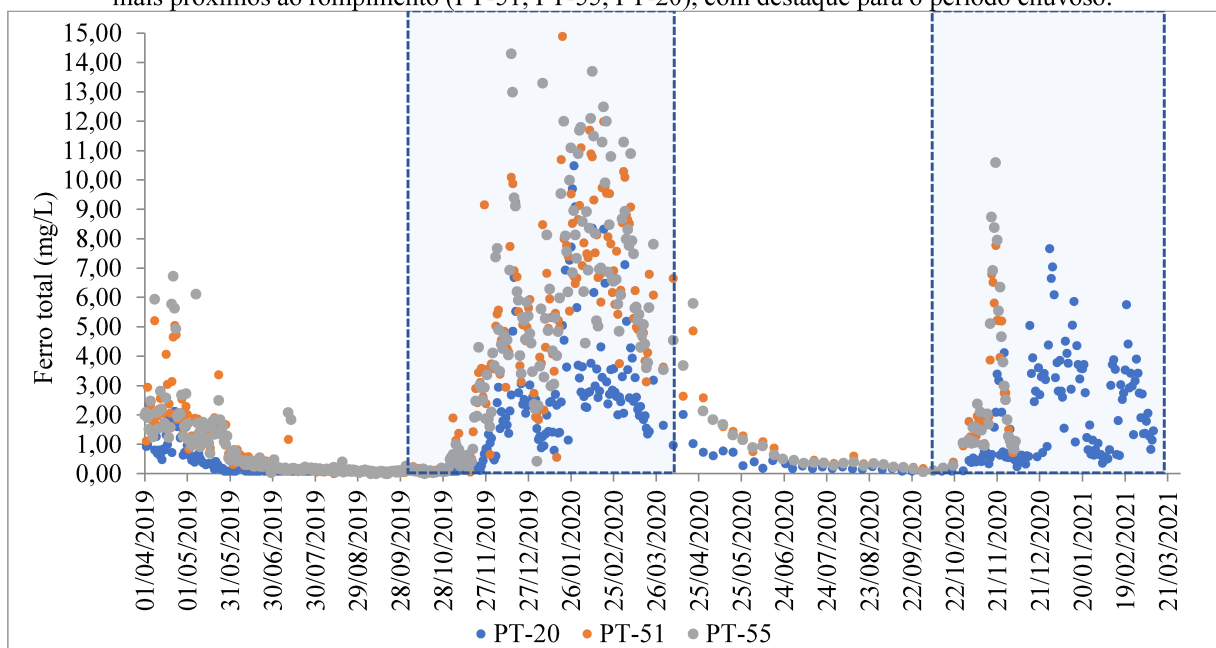


Observa-se que as maiores medianas de ferro total, no período chuvoso, estão presentes nos pontos de monitoramento mais próximos ao local do rompimento (PT-55 – 4,05 mg/L e PT-51 – 3,77 mg/L, conforme evidenciado no Apêndice I, na Tabela I.1) e há uma redução dos valores observados no interior do reservatório da UHE Retiro Baixo. Conforme Soares (2021), dentre os parâmetros de qualidade da água analisados antes e após o rompimento da barragem B1, que

contribuíram para a alteração da qualidade da água na calha do rio Paraopeba, estão o ferro total e sua fração dissolvida.

Na Figura 6.11 observa-se a série temporal dos valores de ferro total medidos, em superfície, nos pontos de monitoramento PT-51, PT-55 (localizados a montante do reservatório de Retiro Baixo) e PT-20 (localizado no reservatório de Retiro Baixo). Baseando-se no banco de dados BD1 (água) - (Etapa 2, da Figura 5.4), as maiores concentrações de ferro total na água, medidos na superfície, nos distintos ecossistemas, predominaram no período chuvoso, sendo que elevados valores foram observados de novembro/2019 até março/2020 (Figura 6.11). Isso pode estar relacionado, por exemplo, ao próprio escoamento superficial, com conseqüente carreamento do rejeito que ficou armazenado nas áreas impactadas.

Figura 6.11 - Concentração de ferro total, na água, em superfície, ao longo do tempo, nos três primeiros pontos mais próximos ao rompimento (PT-51, PT-55, PT-20), com destaque para o período chuvoso.



6.1.1.6 Manganês total

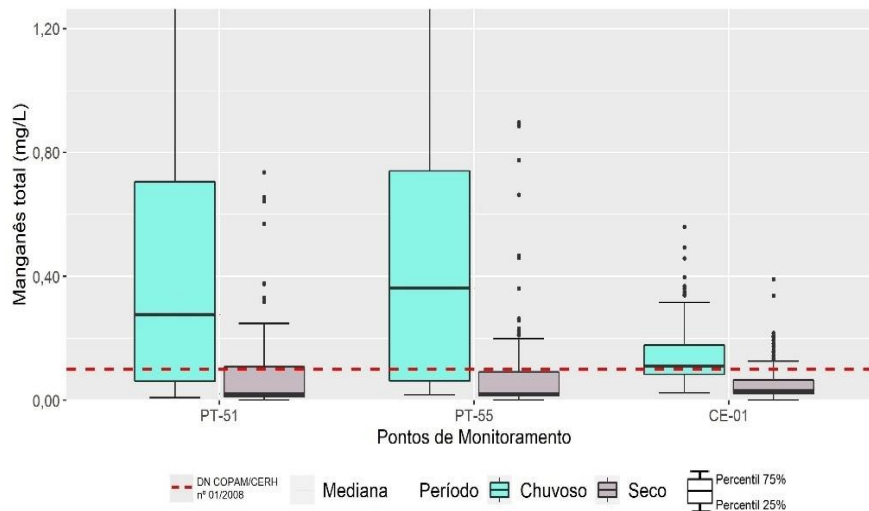
A maioria dos pontos de monitoramento, incluindo as profundidades dos pontos de monitoramento situados no interior dos reservatórios, apresentou diferença significativa entre as medianas de manganês total, para um mesmo ponto de monitoramento, nos períodos seco e

chuvoso, exceto: as zonas intermediárias dos pontos TM-05, TM-06 e PT-23, no ponto PT-29 – em superfície, a montante do barramento do reservatório da UHE Três Marias.

Em relação aos valores de manganês, observa-se por meio das Figuras 6.12 e 6.13 que os pontos que apresentaram as maiores concentrações da fração total, no período chuvoso, foram, respectivamente: PT-55 e PT-51 (0,362 mg/L e 0,2765 mg/L), situados no ecossistema lótico e RB-02 (0,11 mg/L), no lântico - conforme apresentado no Apêndice I. Portanto, as maiores concentrações medianas para o parâmetro manganês total na água são observadas no rio Paraopeba, nos pontos situados mais próximo ao local do rompimento (Figura 6.12).

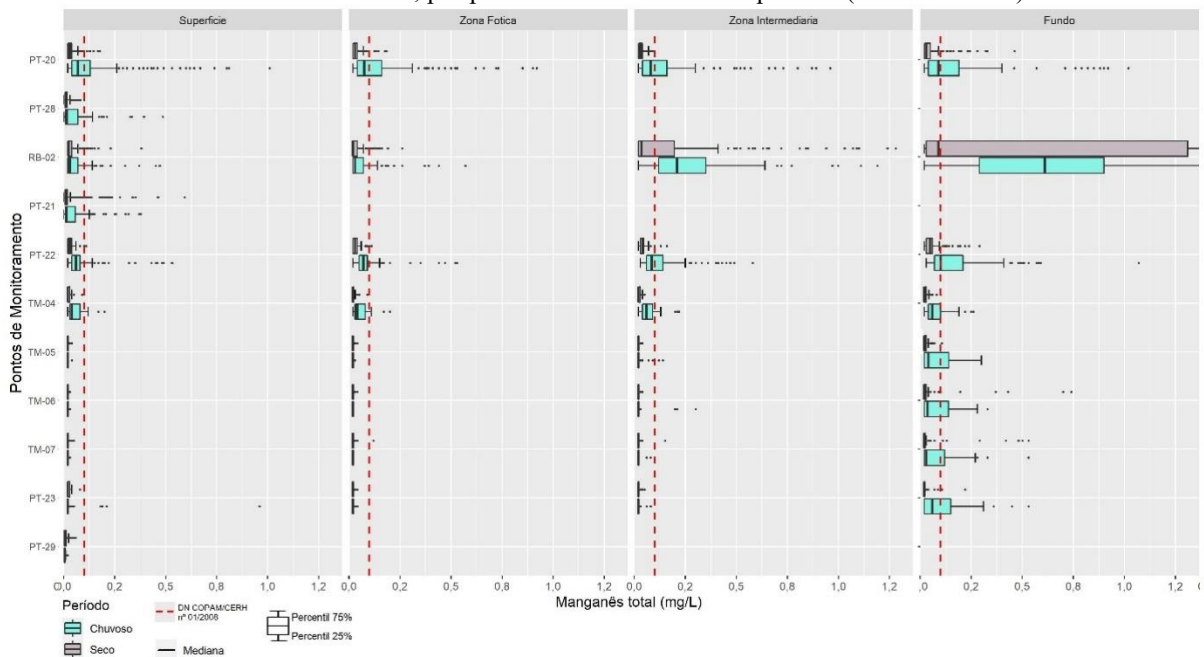
Por meio da Figura 6.13 verifica-se que a maioria das medianas do parâmetro manganês total nos ambientes lânticos, independentemente do período e das profundidades, são inferiores ao limite previsto pela DN COPAM/CERH nº01/2008, para águas Classe 2, de 0,1 mg/L. Vale destacar que embora esse limite seja aplicável para água superficial, para fins comparativos, efetuou-se a representação para as demais profundidades.

Figura 6.12 - Gráfico *box-plot* de manganês total (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada vermelha representa o limite previsto para águas Classe 2, na DN COPAM/CERH nº 01/2008.

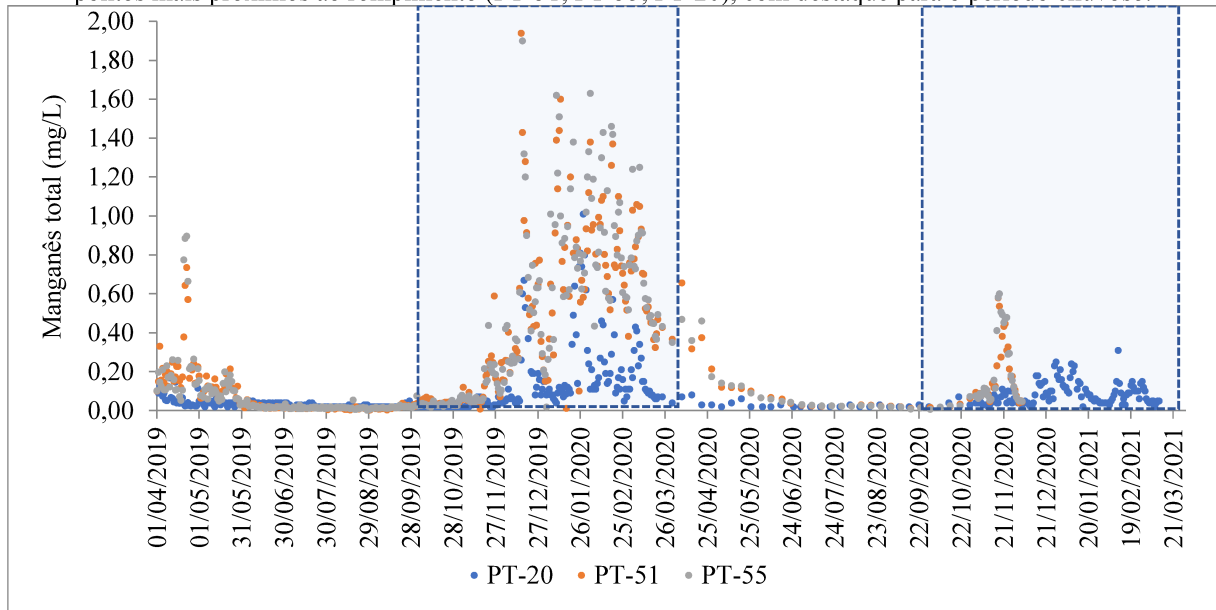
Figura 6.13 - Gráfico *box-plot* de manganês total (mg/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada vermelha representa o limite previsto para águas Classe 2, na DN COPAM/CERH nº 01/2008.

Observa-se na Figura 6.14 que as concentrações de manganês total na água se comportam de forma similar ao observado para o ferro total (Figura 6.11). Conforme já abordado nesse estudo, as elevadas concentrações no período chuvoso podem estar atreladas ao fato do ferro e manganês totais serem abundantes no rejeito e de estarem presentes nas características geoquímicas locais. O escoamento superficial e a lixiviação do solo mediante à ocorrência das chuvas podem contribuir para os valores de manganês observados na superfície da água.

Figura 6.14 - Concentração de manganês total, na água, em superfície, ao longo do tempo, nos três primeiros pontos mais próximos ao rompimento (PT-51, PT-55, PT-20), com destaque para o período chuvoso.



6.1.1.7 Alumínio total

Para o parâmetro alumínio total, na água, verificou-se que todos os pontos de monitoramento nos ecossistemas lóticos apresentaram diferença significativa entre as medianas. Já dentre os lênticos, os únicos que não apresentaram diferença foram: TM-07 (fundo), PT-23 (zona fótica e fundo) e PT-29 (superfície).

Por meio da Figura 6.15 e da Figura 6.16 verifica-se que as medianas dos valores de alumínio total, no período chuvoso, são superiores ao do período seco. As maiores medianas das concentrações foram verificadas nos pontos do rio Paraopeba (PT-55 com 2,88 mg/L e PT-51 com 2,75 mg/L, conforme evidenciado na Tabela I.1, do Apêndice I), seguido pelos pontos dos ecossistemas lênticos PT-20 (1,14 mg/L). Segundo IGAM (2020a), o alumínio dissolvido na água pode estar associado às atividades minerárias desenvolvidas na parte mais alta da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Figura 6.15 - Gráfico *box-plot* de alumínio total (mg/L) na água superficial em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

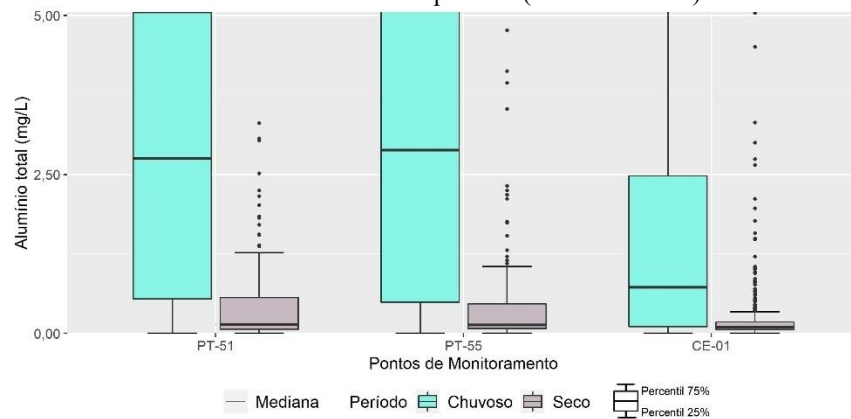
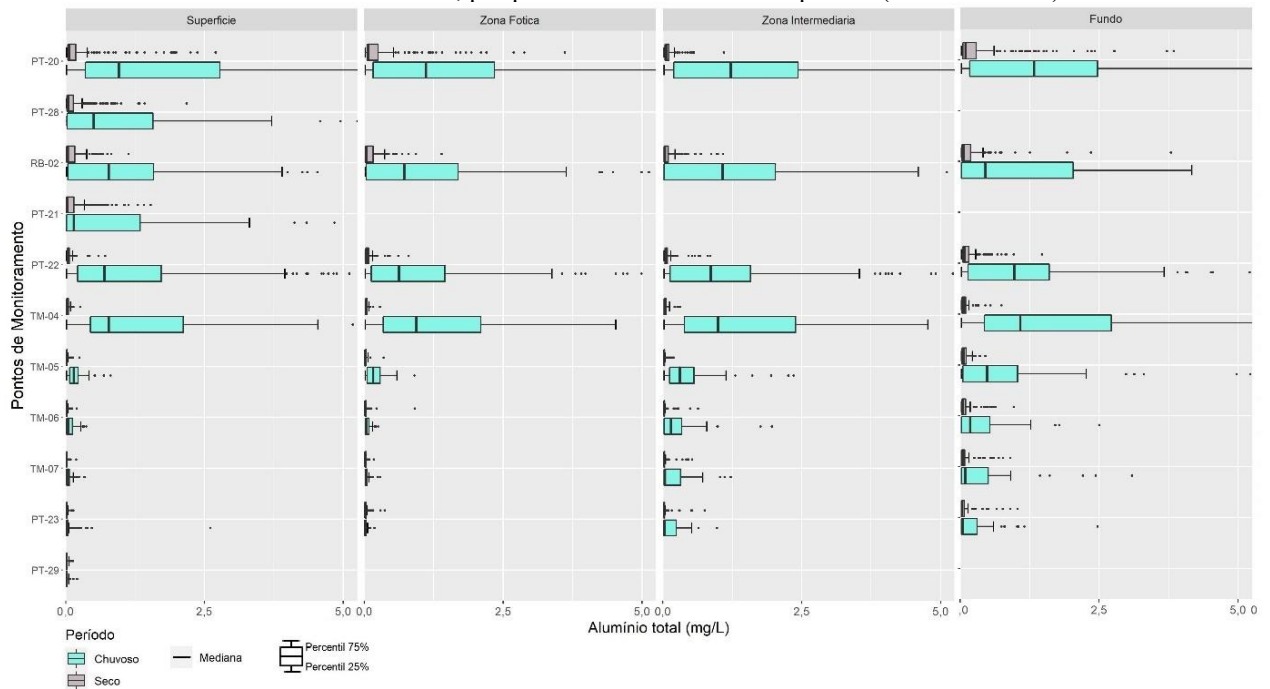


Figura 6.16 - Gráfico *box-plot* de alumínio total (mg/L) na água, em diferentes profundidades, nos ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



6.1.2 Parâmetros de qualidade dos sedimentos

Na análise dos dados de sedimentos observou-se maior ocorrência de diferenças significativas entre as medianas dos dados monitorados, nos períodos seco e chuvoso, nos pontos situados nos ecossistemas lóticos, quando comparado com os pontos nos ecossistemas lênticos.

Foi observado que os parâmetros com maior ocorrência de diferença significativa, comparando-se os ecossistemas em estudo, são: potencial de oxirredução, seguido por alumínio e COT. Os gráficos *box-plots* desses parâmetros serão apresentados a seguir.

6.1.2.1 Potencial de oxirredução (ORP)

O potencial de oxirredução (ORP) está associado à capacidade de oxidação ou redução do meio. O teste de *Mann-Whitney* revelou que esse parâmetro apresentou diferença significativa entre os períodos seco e chuvoso, para os dados de sedimentos, com exceção dos pontos: PT-51 (lótico) e PT-28, PT-21, TM-04, TM-07 e PT-29, dentre os lênticos. Embora tenham sido encontradas diferenças significativas entre os valores de ORP nos sedimentos, nos pontos de monitoramento nos ambientes lóticos (Figura 6.17), observa-se que tanto no período chuvoso, quanto no período seco, o sedimento apresentou potencial eletronegativo positivo, sendo esse um indício do alto estado de oxidação do meio, característico de um ambiente aeróbio.

Já nos pontos de monitoramento localizados nos reservatórios (Figura 6.18), observa-se tanto no período chuvoso, quanto no período seco, o predomínio do potencial eletronegativo no sedimento, refletindo a condição de anoxia do sedimento nesses ambientes. Ressalta-se que o estado de oxirredução dos sedimentos e da interface água sedimento irá indicar se os compostos presentes no sedimento serão solubilizados para a água (potencial eletronegativo) ou retidos nesse compartimento (potencial eletropositivo).

Figura 6.17 - Gráfico *box-plot* do potencial de oxirredução (ORP) (mV) no sedimento, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

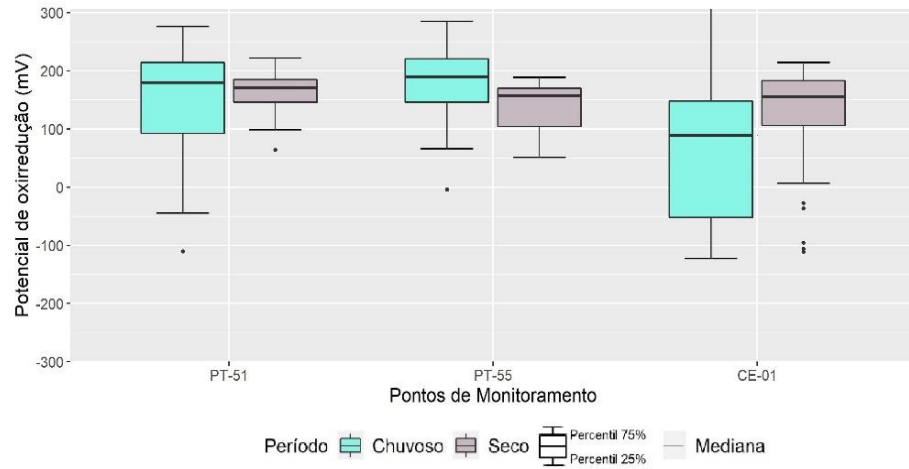
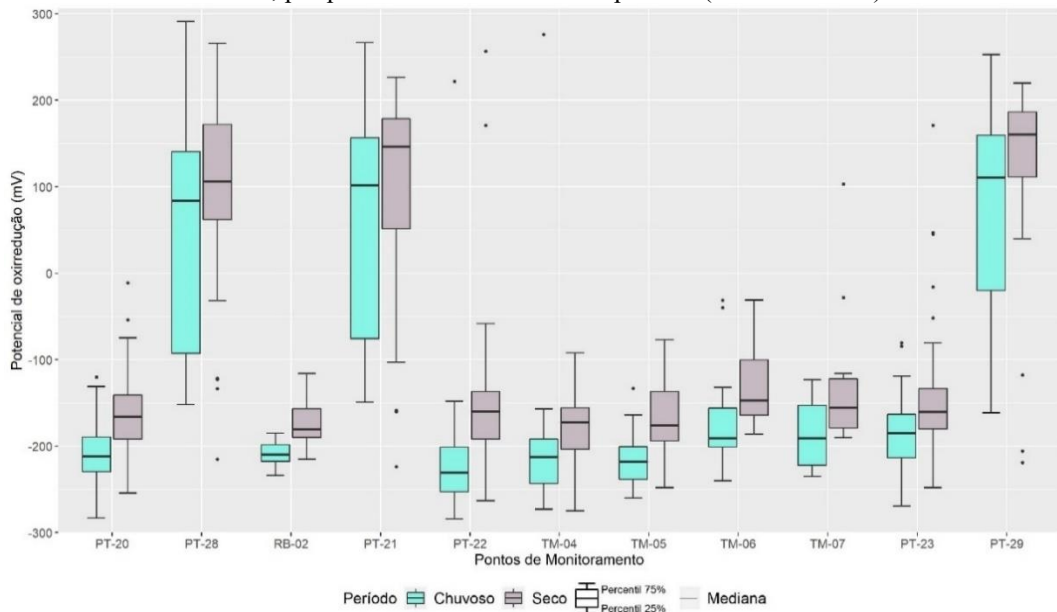


Figura 6.18 - Gráfico *box-plot* do potencial de oxirredução (ORP) (mV) no sedimento, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

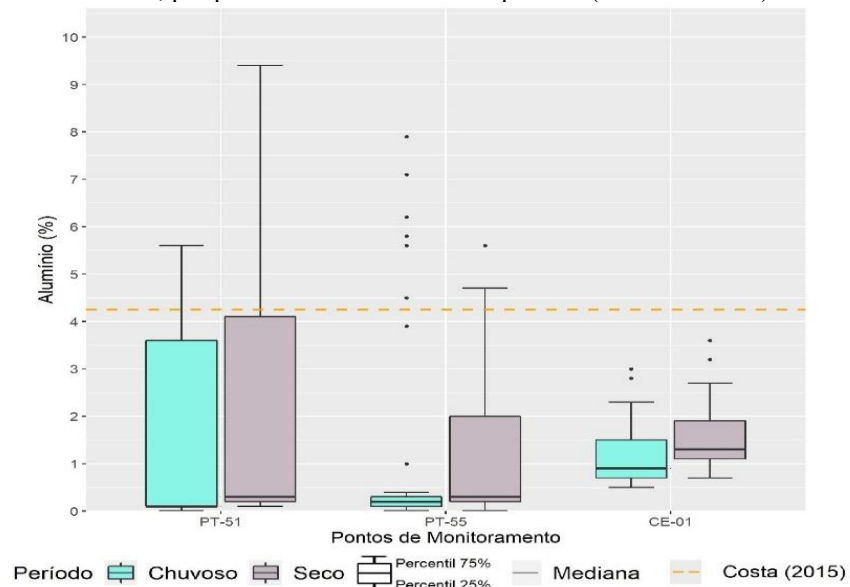


6.1.2.2 Alumínio

Por meio da Figuras 6.19 e 6.20 observa-se que as medianas dos teores de alumínio nos sedimentos geralmente são mais elevadas nos ecossistemas lenticos, quando comparado aos lóticos, com destaque para a UHE Retiro Baixo, que contribuiu para a retenção dos rejeitos provenientes da barragem B1. Além disso, verifica-se que os casos que ultrapassaram ao valor de referência proposto por Costa (2015) se deram nos ecossistemas lenticos, sendo esses propícios ao acúmulo de compostos mediante a redução da velocidade da água. De acordo com

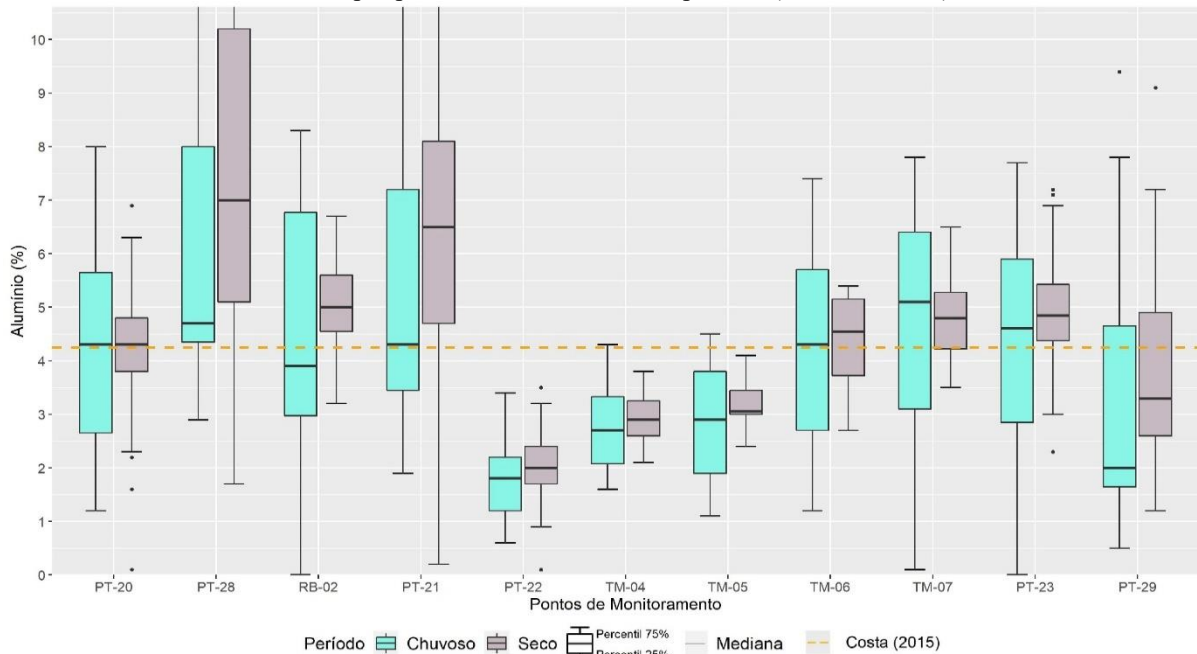
CPRM (2020), o alumínio nos sedimentos não possui vínculo direto com o rejeito proveniente da Barragem B1, podendo estar vinculado às características litológicas e à contribuição do parque industrial da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

Figura 6.19 - Gráfico *box-plot* das concentrações de alumínio total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada amarela representa o limite previsto por Costa, 2015.

Figura 6.20 - Gráfico *box-plot* das concentrações de alumínio total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lânticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



Legenda: Linha tracejada amarela representa o limite previsto por Costa, 2015.

6.1.2.3 Carbono Orgânico Total (COT)

Por meio do COT é possível estimar a fração de matéria orgânica na água e no solo. Esse parâmetro pode estar associado à poluição por compostos orgânicos, como é o caso dos efluentes domésticos e à biomassa dos organismos aquáticos. Por meio das análises das Figuras 6.21 e 6.22 observa-se que os menores teores de COT no sedimento foram observados no ecossistemas lânticos, no PT-51 e no PT-55, embora esses pontos não tenham apresentado diferença significativa entre as medianas verificadas nos períodos seco e chuvoso. Analisando os resultados do teste de *Mann-Whitney* observa-se que as diferenças significativas ocorreram, predominantemente, no reservatório da UHE Três Marias.

Figura 6.21 - Gráfico *box-plot* das concentrações de carbono orgânico total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lóticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).

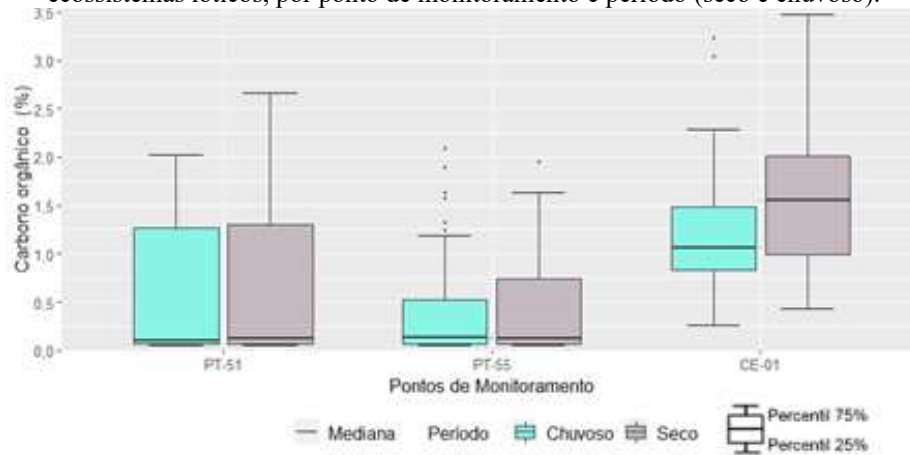
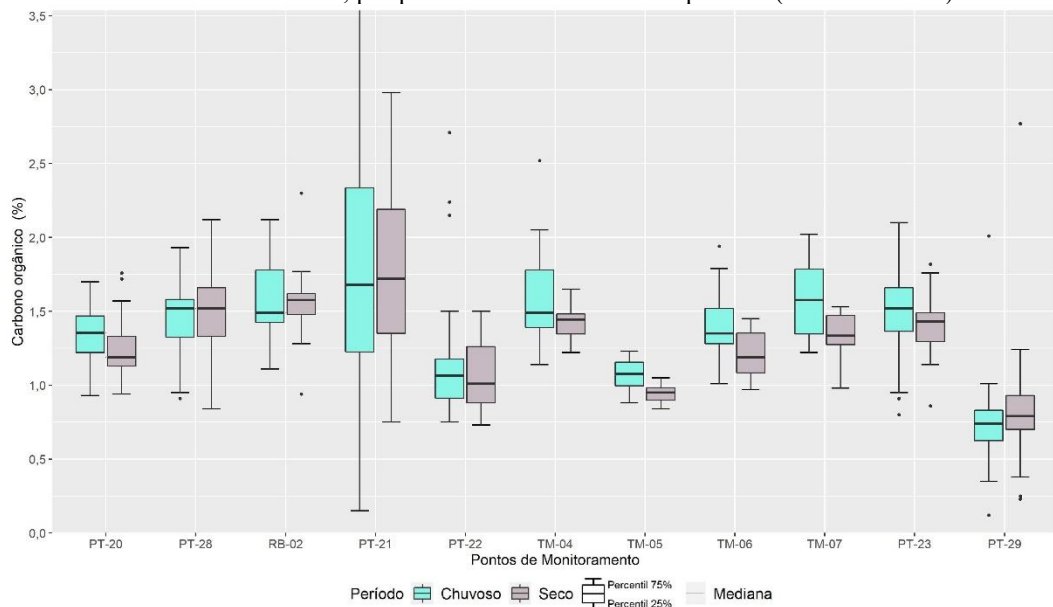


Figura 6.22 - Gráfico *box-plot* das concentrações de carbono orgânico total (%) nos sedimentos, em ecossistemas lênticos, por ponto de monitoramento e período (seco e chuvoso).



6.2 Análise de conformidade aos padrões legais de qualidade das águas e comparação com valores de referência para sedimentos

6.2.1 Análise de conformidade aos padrões legais de qualidade das águas

Por meio da comparação dos resultados dos valores de referência previstos pela DN COPAM/CERH nº 01/2008, para água Classe 2 (Apêndice III), foi possível obter os percentuais das médias das violações dos parâmetros, por ecossistema (lêntico e lótico) e período (seco e chuvoso) - Tabela 6.1.

Destaca-se que no cálculo das médias dos percentuais apresentados na Tabela 6.1, nos ambientes lóticos, foi considerado apenas os pontos PT-51 e PT-55. O CE-01 não foi considerado pelo fato ser um afluente do rio Paraopeba e estar situado a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo.

Tabela 6.1 - Valores médios dos percentuais de violação dos parâmetros de qualidade da água, por ecossistema do ambiente aquático, conforme os limites previstos pela DN COPAM-CERH nº 01/20018, para águas Classe 2, com destaque para os valores médios que foram superiores no período seco, quando comparado ao período chuvoso.

Parâmetros	Lótico		Lêntico UHE Retiro Baixo		Lêntico UHE Três Marias	
	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP
Alumínio dissolvido (mg/L)	34,97%	60,93%	18,62%	48,69%	1,20%	21,20%
Clorofila a (mg/L)	0,00%	0,00%	0,34%	0,30%	0,00%	0,00%
Ferro dissolvido (mg/L)	30,46%	35,06%	9,71%	42,69%	0,10%	18,70%
Fósforo total (mg/L)	13,01%	13,65%	13,38%	36,57%	5,30%	21,40%
Manganês total (mg/L)	39,39%	66,51%	5,22%	15,89%	0,10%	3,80%
Nitrato (como N) (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Oxigênio dissolvido (mg/L)	1,12%	1,41%	10,09%	14,23%	25,20%	7,40%
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Sólidos suspensos (mg/L)	12,34%	31,45%	0,00%	4,39%	0,10%	2,40%
Cor verdadeira (mg Pt/L)	23,31%	62,36%	2,17%	39,65%	0,10%	5,60%
pH (em campo)	0,16%	0,00%	0,24%	1,21%	1,00%	1,80%
Temperatura da amostra (°C)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Turbidez (NTU)	24,45%	60,71%	0,24%	21,76%	0,00%	8,10%

Legenda: Células em azul correspondem aos percentuais de desconformidade no período chuvoso e em cinza, no período seco. Valores em vermelho correspondem aos percentuais que são maiores no período seco, quando comparado com o resultado obtido para o período chuvoso. SUP = Superfície.

Por meio análise dos resultados observa-se que, predominantemente, os valores observados no período chuvoso são superiores aos obtidos no período seco. Esse comportamento foi observado para todos os parâmetros, tanto nos ambientes lóticos, quanto nos lênticos (nas diferentes profundidades).

Os elevados valores no período chuvoso podem estar atrelados ao escoamento superficial, lixiviação do solo e relacionado ao uso e ocupação do solo do entorno das bacias hidrográficas em estudo (SF3 e SF4), com o predomínio das atividades agropecuárias – destaque para a pastagem. Além disso, a influência do rejeito pode contribuir para os altos valores observados para alguns dos parâmetros analisados, como é o caso do manganês total, ferro total, sólidos suspensos, turbidez e cor.

Os parâmetros que não ultrapassam os limites previstos pela legislação ambiental, para águas Classe 2, em superfície, são: sólidos dissolvidos totais, cujo limite é de 500 mg/L; o nitrato com 10 mg/L e a temperatura, em que valor máximo é de 40 °C (Tabela 6.1). Os parâmetros que apresentaram elevados percentuais de violação na água, em superfície, em ambos os ecossistemas (lóticos e lênticos) foram, respectivamente: alumínio dissolvido, ferro dissolvido, cor verdadeira, o manganês total, a turbidez, o fósforo total e o oxigênio dissolvido.

Sabe-se que as concentrações de ferro e alumínio dissolvidos e manganês total no ambiente aquático podem estar atreladas as características geoquímicas locais, mas atividades antrópicas também têm potencial para contribuir para a disponibilização dos mesmos para o ecossistema aquático. Isso pode ser proveniente, por exemplo, da retirada da vegetação que, conseqüentemente, aumenta o escoamento superficial; pelas atividades minerárias; pela própria contribuição direta ou indireta do rejeito proveniente do rompimento da barragem B1.

As violações dos parâmetros fósforo total e oxigênio dissolvido foram observadas nas camadas mais profundas dos reservatórios. Embora os distintos ecossistemas possuam características próprias, observou-se que as desconformidades dos parâmetros sólidos suspensos, cor verdadeira e turbidez, para um mesmo período, em superfície, foram maiores nos ecossistemas lóticos - sendo o PT-51 e PT-55 impactados pelo rompimento.

6.2.2 Comparação dos parâmetros medidos no sedimento com valores de referência para sedimentos

A análise da violação dos valores previstos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 e dos valores de referência propostos por Costa (2015) é apresentada nas tabelas presentes no Apêndice III. Analisando de forma separada os parâmetros alumínio e manganês, verifica-se que os valores de referência são ultrapassados, tanto no período chuvoso, quanto no seco, em ambos os ecossistemas estudados.

Na Tabela 6.2 apresenta-se uma síntese dos resultados da violação por ecossistema. No cálculo dos ambientes lóticos (Tabela 6.2) foi considerado apenas os pontos PT-51 e PT-55, já que o CE-01 não foi impactado pelo rompimento. Não foi efetuada uma análise tendo em vista o

período, já que não foi observada diferença significativa entre a maioria das medianas dos parâmetros monitorados nos sedimentos, em função da sazonalidade.

Verificou-se que os parâmetros que apresentaram o maior percentual de violação dos Níveis 1 (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota) e 2 (limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota) foram: arsênio, cromo e níquel. Esses metais são indícios de contaminação por substância tóxica e foram observados, predominantemente, nos reservatórios.

Tabela 6.2 - Valores médios dos percentuais de violação geral dos parâmetros de qualidade de sedimento, por ecossistema do ambiente aquático, conforme os limites previstos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 (Nível 1 e Nível 2).

Parâmetro	Ecossistemas Lóticos		Ecossistemas Lênticos			
	Nível 1	Nível 2	UHE Retiro Baixo		UHE Três Marias	
			Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
Arsênio total	31,10%	0,00%	96,87%	22,20%	80,76%	0,16%
Chumbo Total	0,00%	0,00%	10,74%	3,21%	17,96%	4,27%
Cobre Total	20,90%	0,00%	31,05%	0,51%	33,99%	0,15%
Cromo Total	61,67%	11,31%	56,56%	0,00%	15,87%	0,00%
Mercúrio Total	0,00%	0,00%	97,85%	12,39%	80,12%	0,31%
Níquel Total	40,26%	2,86%	0,71%	0,00%	0,13%	0,00%
Zinco Total	0,00%	0,00%	87,17%	11,12%	46,64%	1,90%

Legenda: Nível 1 - limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota. Nível 2 - limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

Os metais alumínio, ferro e manganês podem ser provenientes tanto de fontes naturais, como é o caso das características geoquímicas locais, quanto de atividades antrópicas. O alumínio “não é encontrado livre na natureza, mas nos minerais silicatados combinado com ferro, metais alcalinos e alca-lino-terrosos”(VIGLIO, 2018). Conforme já abordado nesse estudo, o alumínio não necessariamente está vinculado ao evento do rompimento, diferentemente do ferro e do manganês, que são os metais abundantes no rejeito proveniente da barragem B1.

Por meio da Tabela 6.3 verifica-se que não houve ultrapassagem ao valor de referência proposto para o parâmetro ferro, diferentemente dos parâmetros manganês e alumínio. O maior quantitativo para o parâmetro alumínio total foi evidenciado no reservatório da UHE Retiro Baixo, enquanto o de manganês se deu nos sedimentos dos ecossistemas lóticos.

Tabela 6.3 - Valores médios dos percentuais de ultrapassagem aos valores de referência propostos por Costa (2015), para sedimentos, por ecossistema.

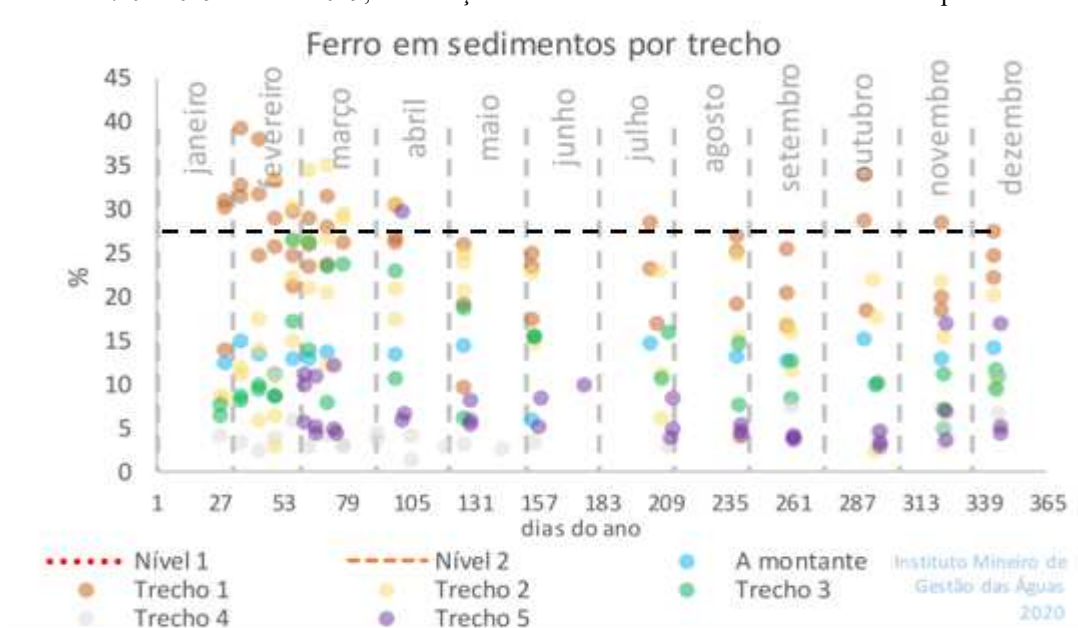
Parâmetros	Ecossistemas Lóticos	Ecossistemas Lênticos	
		UHE Retiro Baixo	UHE Três Marias
Alumínio	15,65%	60,36%	29,2%
Ferro	0,00%	0,00%	0,0%
Manganês	13,26%	0,51%	0,0%

As maiores medianas de ferro no sedimento foram observadas nos pontos situados na UHE Retiro Baixo, conforme evidenciado no Apêndice III, nas Tabelas III.6 e III.7. Fato interessante é que a fração dissolvida do ferro na água apresentou elevados percentuais de violação, enquanto o teor de ferro no sedimento não ultrapassou o valor de referência proposto por Costa (2015), de 28,1%, nos distintos ecossistemas em estudo. Pelo fato de o ferro ser o metal em abundância no rejeito, eram esperados elevados percentuais de violação desse parâmetro, entretanto, os resultados obtidos não ultrapassaram o valor de referência.

Conforme IGAM (2020a), os valores elevados de ferro nos sedimentos foram observados de janeiro a março/2019, com destaque para os primeiros 123 km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão, localizados entre a termelétrica de Igarapé e Esmeraldas. Por meio da análise dos dados de 26 de janeiro de 2019 e 30 de dezembro de 2019 observou-se que os valores de ferro nos sedimentos, próximo ao reservatório da UHE Retiro Baixo, foram similares aos encontrados a montante da Barragem B1 e que o impacto nesse ponto se deu, principalmente, pelas partículas suspensas que foram transportadas pelas águas (IGAM,2020). Analisando os trechos cujo ferro foi avaliado nos sedimentos pelo IGAM (2020a), a área alvo desse estudo estaria compreendida do trecho 3 em diante (Figura 6.23). Por meio da análise da Figura 6.23 observa-se que de abril/2019 a dezembro/2019, do trecho 3 em diante, não foi observada ultrapassaram os valores de referência proposto por Costa (2015).

A distância entre o local do evento do rompimento e a área em estudo é de, no mínimo, cerca de 267 km (no primeiro ponto em ambiente lótico situado a jusante do evento - PT-51). Essa distância atrelada ao tempo decorrido para o início das análises do PMQS-TM (abril/2019) pode ter influenciado nos resultados obtidos.

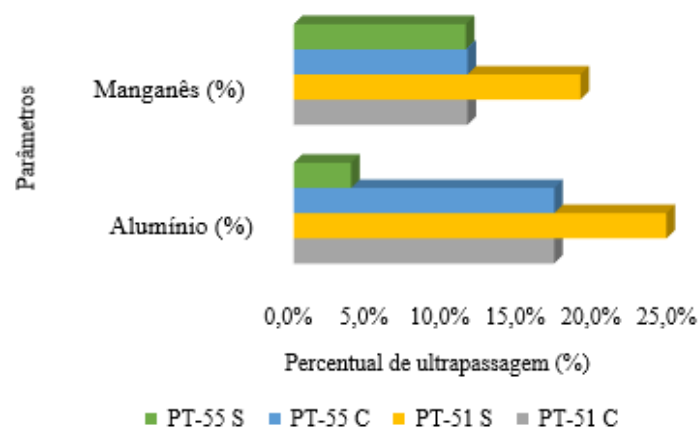
Figura 6.23 - Dispersão dos valores máximos de ferro em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 12/12/2019, nas estações de monitoramento da calha do rio Paraopeba.



Linha tracejada em preto refere-se ao valor de referência proposto por Costa (2015). Fonte: IGAM, 2020a – adaptado.

O manganês nos sedimentos se comportou de forma similar ao ferro, o que já era esperado, visto que são os metais abundantes nos rejeitos (IGAM, 2020a). Entretanto, diferente do ferro, o manganês ultrapassou os valores de referência propostos por Costa (2015) – Tabela 6.3 e Figura 6.24. Conforme o IGAM (2020a) o alumínio se comportou de forma inconsistente, se comparado com o ferro e o manganês totais.

Figura 6.24 - Gráfico dos percentuais de ultrapassagem aos valores de referência propostos por Costa (2015), para os parâmetros manganês e alumínio nos sedimentos.



6.3 Comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos nos pontos de monitoramento – período chuvoso

Pelo fato dos ecossistemas lóticos e lênticos possuírem características distintas, os resultados obtidos na comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos foram discutidos separadamente. Nesse item serão analisados os resultados obtidos para o período chuvoso. No item 6.4 serão analisados os resultados obtidos para o período seco.

6.3.1 Ecossistemas lênticos

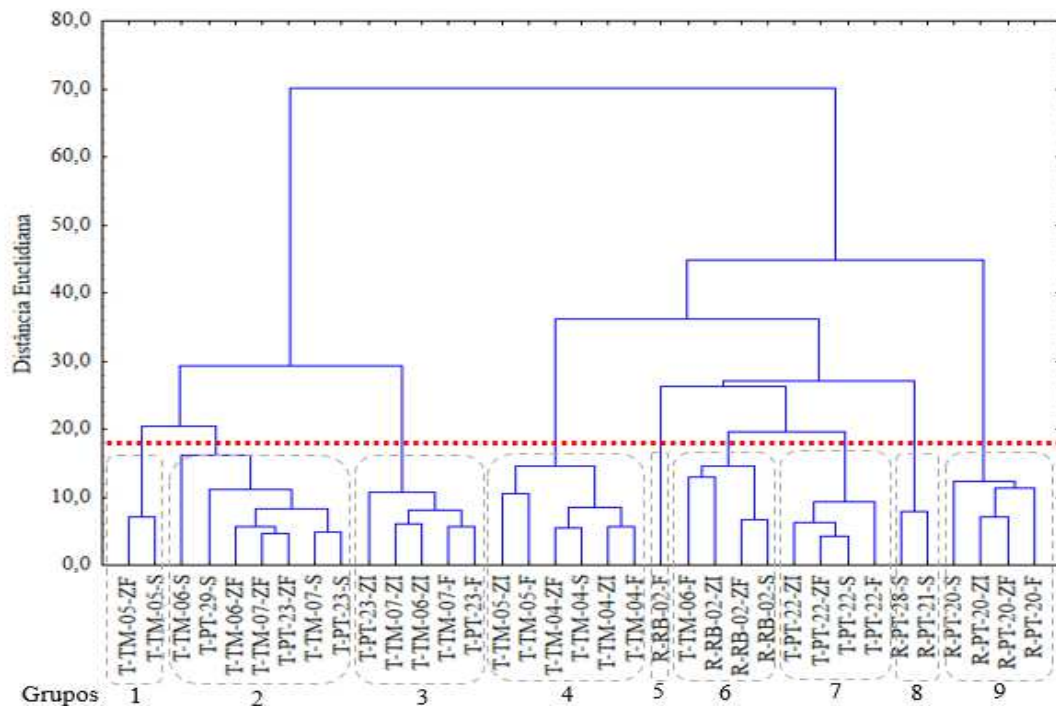
Foram analisados 8 pontos de monitoramento nos ecossistemas lênticos, em diferentes profundidades (superfície, zona fótica, zona intermediária e fundo) e 3 pontos com amostragens apenas em superfície. Na análise multivariada foi considerado cada profundidade como um ponto de análise distinto. Portanto, ao todo foram considerados 35 locais de monitoramento.

6.3.1.1 Análise da qualidade da água

A AC foi aplicada aos dados de qualidade da água, obtidos para o ecossistema lêntico, no período chuvoso. A construção dos clusters levou em consideração os resultados dos 17 parâmetros de qualidade da água padronizados, sendo eles: alumínio total, carbono orgânico total, clorofila a, ferro total nitrato, NTK, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos, condutividade elétrica, cor verdadeira, pH, oxirredução, temperatura e turbidez.

A altura da linha de corte foi definida a partir da distância de ligação e da localização geográfica dos pontos de monitoramento, nos dois reservatórios. A distância Euclidiana empregada foi de 17,95 (Figura 6.25). De forma geral, observa-se que os pontos de monitoramento do reservatório da UHE Três Marias formaram grupos distintos, assim como os pontos do reservatório de Retiro Baixo. Esse resultado reflete as características distintas desses dois ambientes.

Figura 6.25 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lênticos, no período chuvoso.



Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias; S = Superfície; ZF = Zona Fótica; ZI = Zona Intermediária e F = Fundo.

Tabela 6.4 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade da água, dos ecossistemas lênticos, no período chuvoso (LeC).

Grupos	Pontos de Monitoramento e profundidades
1	T-TM-05-S, T-TM-05-ZF
2	T-TM-06-S, T-TM-06-ZF, T-TM-07-S, T-TM-07-ZF, T-PT-23-S, T-PT-23-ZF, T-PT-29-S
3	T-TM-06-ZI, T-TM-07-ZI, T-TM-07-F, T-PT-23-ZI, T-PT-23-F
4	T-TM-04-S, T-TM-04-ZF, T-TM-04-ZI, T-TM-04-F, T-TM-05-ZI, T-TM-05-F
5	R-RB-02-F
6	R-RB-02-S, R-RB-02-ZF, R-RB-02-ZI, T-TM-06-F
7	T-PT-22-S, T-PT-22-ZF, T-PT-22-ZI, T-PT-22-F
8	R-PT-28-S, R-PT-21-S
9	R-PT-20-S, R-PT-20-ZF, R-PT-20-ZI, R-PT-20-F

Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias; S = Superfície; ZF = Zona Fótica; ZI = Zona Intermediária e F = Fundo.

Observa-se que o ponto de monitoramento que permaneceu isolado foi o R-RB-02-F (grupo 5) – Figura 6.25 e Tabela 6.4. Esse ponto está situado no fundo do ponto de monitoramento RB-02, no corpo do reservatório da UHE Retiro Baixo, a cerca de 312,40 km do evento, nos municípios de Pompéu e Curvelo.

Por meio do teste de KW aplicado aos grupos provenientes da AC, para o período chuvoso, observou-se que dos 17 parâmetros em estudo, para 10 desses (alumínio total, COT, ferro total, fósforo total, NTK, sólidos suspensos, condutividade elétrica, cor verdadeira, potencial de oxirredução e turbidez) o ponto R-RB-02-F não apresentou diferença significativa dos demais grupos analisados. Provavelmente, esse foi o motivo pelo qual esse ponto e profundidade ficou isolado dos demais.

A seguir serão apresentados alguns argumentos que subsidiam a compreensão dos agrupamentos formados - Figura 6.25 e Tabela 6.4.

- Observa-se que as profundidades zona fótica e superfície dos pontos TM-06, TM-07 e PT-23 foram agrupadas no mesmo cluster e, provavelmente, isso deve-se ao fato desses pontos de monitoramento estarem localizados no corpo central do reservatório da UHE Três Marias e assim, possuir as características similares na região eufótica da coluna d'água. O ponto PT-29 está situado a montante do barramento da UHE Três Marias.
- A região do reservatório da UHE Três Marias onde os pontos de monitoramento TM-04 e TM-05 estão localizados sofre influência direta da contribuição do rio São Francisco, sendo esse, provavelmente, o motivo pelo qual os mesmos foram separados dos demais pontos/profundidades.
- O grupo 7 foi formado pelas profundidades do ponto de monitoramento PT-22, único ponto de monitoramento do reservatório da UHE Três Marias localizado na área de influência do rio Paraopeba, no remanso desse ecossistema.
- Os pontos R-PT-21-S e R-PT-28-S possivelmente foram agrupados no mesmo cluster pelo fato de estarem situados no reservatório da UHE Retiro Baixo e serem monitorados apenas na superfície. Destaca-se que o PT-21 está situado no vertedouro desse reservatório, entretanto, foi considerado como ambiente lântico nas análises desenvolvidas nesse trabalho.

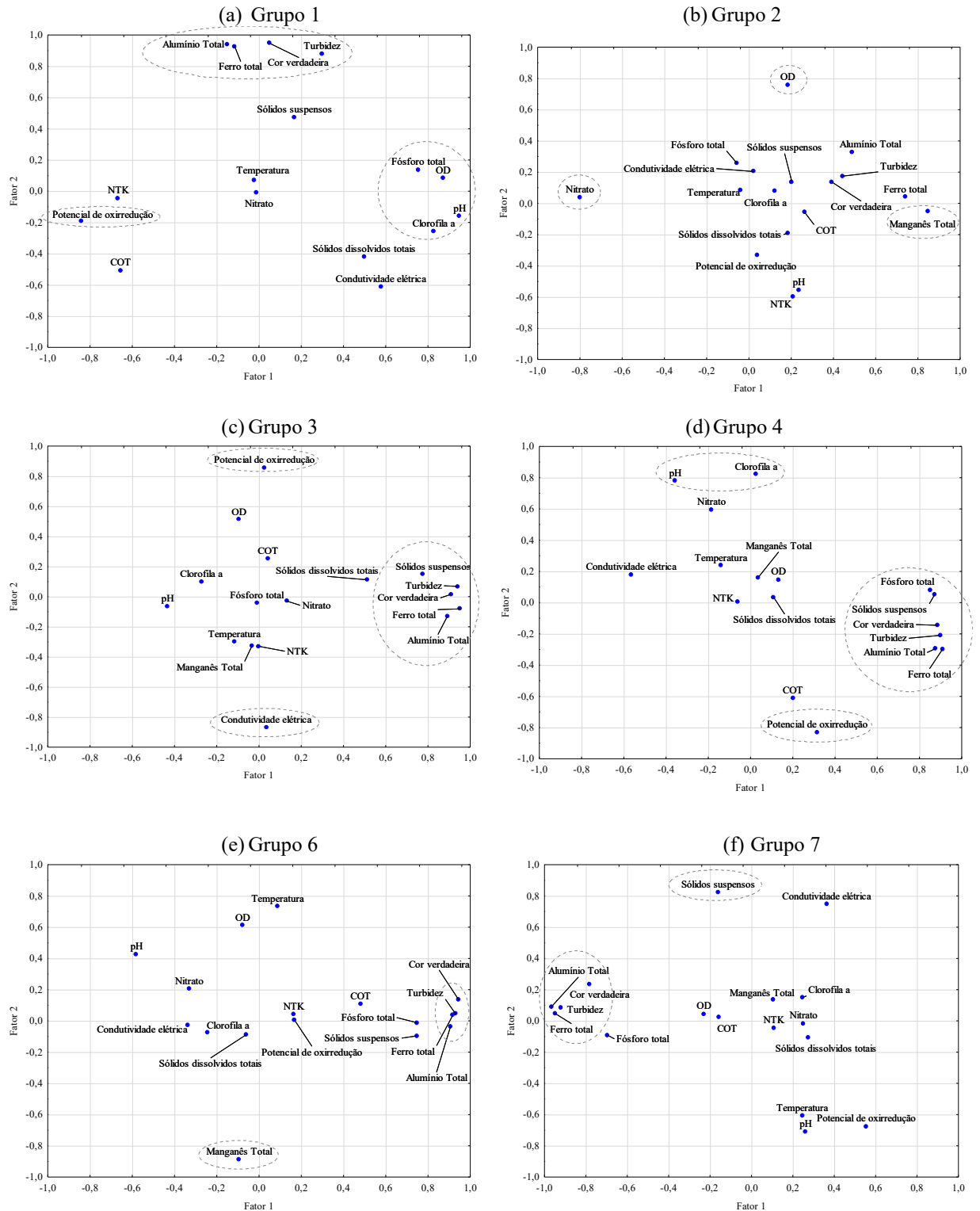
Na Tabela 6.5 apresenta-se o resultado da AF, ou seja, as cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada fator, após rotação *varimax raw*, referentes aos grupos formados pela AC, para os ecossistemas lânticos, no período chuvoso. O gráfico das cargas dos dois primeiros fatores é ilustrado na Figura 6.26.

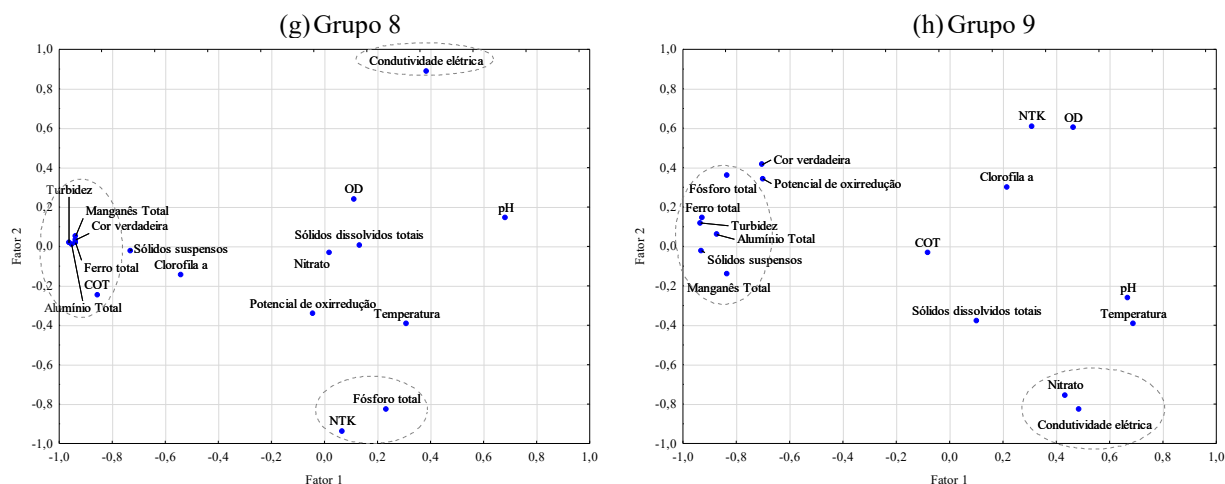
Tabela 6.5 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação *varimax raw da AF*, referentes ao grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período chuvoso.

Grupos	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3			Grupo 4			Grupo 6			Grupo 7			Grupo 8			Grupo 9		
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Alumínio Total	-0,15	0,94	0,12	0,49	0,33	0,15	0,89	-0,13	-0,04	0,87	-0,30	-0,15	0,91	-0,04	0,15	-0,97	0,09	-0,06	-0,95	0,01	0,02	-0,87	0,06	0,11
COT	-0,65	-0,51	0,16	0,26	-0,06	-0,07	0,04	0,25	0,24	0,20	-0,61	0,24	0,48	0,11	-0,54	-0,16	0,02	0,16	-0,86	-0,25	0,06	-0,08	-0,03	0,82
Clorofila <i>a</i>	0,83	-0,26	-0,11	0,12	0,08	0,07	-0,27	0,10	0,27	0,03	0,82	0,33	-0,24	-0,07	0,04	0,25	0,15	0,53	-0,54	-0,14	-0,33	0,21	0,30	-0,81
Ferro total	-0,12	0,93	0,26	0,74	0,04	0,12	0,95	-0,08	-0,14	0,91	-0,30	-0,11	0,92	0,04	0,04	-0,95	0,05	-0,04	-0,94	0,02	0,11	-0,93	0,15	0,24
Fósforo total	0,75	0,14	-0,38	-0,06	0,26	0,79	-0,01	-0,04	0,09	0,85	0,08	-0,05	0,75	-0,01	-0,01	-0,70	-0,09	-0,05	0,24	-0,83	0,42	-0,83	0,36	0,22
Manganês Total	0,00	0,00	0,00	0,85	-0,05	0,00	-0,03	-0,33	-0,72	0,04	0,16	-0,79	-0,09	-0,89	0,13	0,11	0,14	-0,87	-0,94	0,05	0,12	-0,83	-0,14	0,07
Nitrato	-0,01	-0,01	-0,95	-0,80	0,04	0,20	0,13	-0,03	-0,07	-0,18	0,60	-0,18	-0,33	0,21	0,08	0,25	-0,02	0,08	0,02	-0,03	0,26	0,44	-0,76	-0,09
NTK	-0,67	-0,05	-0,30	0,21	-0,60	-0,15	0,00	-0,33	-0,01	-0,06	0,00	-0,09	0,16	0,04	0,87	0,11	-0,05	0,05	0,07	-0,94	-0,05	0,31	0,61	-0,07
OD	0,87	0,08	0,17	0,18	0,76	-0,15	-0,09	0,51	0,61	0,13	0,15	0,79	-0,08	0,61	0,08	-0,23	0,05	0,57	0,11	0,24	0,06	0,47	0,60	-0,23
Sólidos dissolvidos totais	0,50	-0,42	-0,48	0,18	-0,19	0,11	0,51	0,11	-0,16	0,11	0,03	0,06	-0,06	-0,09	-0,12	0,27	-0,11	0,04	0,13	0,01	0,05	0,10	-0,38	-0,79
Sólidos suspensos	0,17	0,47	-0,29	0,20	0,14	0,02	0,78	0,15	-0,01	0,87	0,05	-0,03	0,75	-0,10	0,07	-0,16	0,83	0,16	-0,73	-0,02	0,10	-0,93	-0,02	-0,02
Condutividade elétrica	0,58	-0,61	0,36	0,02	0,20	-0,80	0,04	-0,87	0,15	-0,56	0,18	0,00	-0,34	-0,03	0,24	0,36	0,75	0,13	0,38	0,89	0,02	0,49	-0,83	0,01
Cor verdadeira	0,05	0,95	-0,08	0,39	0,14	-0,12	0,91	0,02	-0,05	0,89	-0,15	0,27	0,95	0,13	-0,09	-0,78	0,23	0,26	-0,94	0,03	-0,18	-0,70	0,42	0,21
pH	0,95	-0,16	0,06	0,24	-0,55	0,05	-0,43	-0,07	0,74	-0,36	0,78	0,08	-0,58	0,43	-0,15	0,26	-0,71	0,38	0,68	0,15	-0,21	0,67	-0,26	-0,09
Potencial de oxirredução	-0,84	-0,19	0,26	0,04	-0,33	0,61	0,03	0,86	0,12	0,32	-0,83	0,08	0,17	0,01	-0,19	0,56	-0,68	0,30	-0,04	-0,34	0,88	-0,70	0,34	-0,16
Temperatura	-0,02	0,07	0,16	-0,04	0,08	-0,17	-0,12	-0,30	0,79	-0,14	0,24	0,67	0,09	0,73	0,26	0,25	-0,61	0,47	0,31	-0,39	-0,70	0,69	-0,39	-0,03
Turbidez	0,30	0,88	-0,24	0,44	0,17	0,11	0,94	0,07	-0,11	0,90	-0,21	0,14	0,93	0,05	-0,06	-0,92	0,08	0,07	-0,96	0,02	0,05	-0,93	0,12	0,17
Variabilidade (%)	33,20	29,69	12,05	20,80	12,86	11,66	29,87	15,06	10,34	37,13	14,77	12,04	35,89	14,61	9,42	35,50	15,79	11,88	41,79	18,13	13,62	48,60	14,87	10,69
% Acumulada	33,20	62,88	74,93	20,80	33,66	45,32	29,87	44,93	55,28	37,13	51,89	63,93	35,89	50,51	59,93	35,50	51,29	63,18	41,79	59,91	73,53	48,60	63,47	74,16

Vermelho - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75).

Figura 6.26 - Gráficos das cargas dos dois primeiros fatores, na água, extraídos dos dados de qualidade da água após rotação *varimax raw da AF*, referentes à análise dos Grupos formados na AC, para os ecossistemas lânticos, no período chuvoso.





De forma geral as possíveis causas dos resultados obtidos na AF em todos os grupos em estudo (grupos 1 a 9), para os parâmetros alumínio, ferro, fósforo e manganês totais, sólidos (dissolvidos e suspensos), cor e turbidez estão vinculadas: ao escoamento superficial, ao processo de lixiviação do solo, às características geoquímicas locais (no caso do Fe, Al e Mn), às atividades minerárias desenvolvidas nas bacias em estudo, além da própria contribuição direta ou indireta do rejeito proveniente da barragem de rejeitos B1.

O uso do solo no entorno da área de estudo contribui para a alteração da qualidade do ambiente aquático, sendo predominante a agropecuária, com ênfase na pastagem. A retirada da vegetação contribui para que o solo fique exposto, favorecendo assim, o escoamento superficial, com conseqüente carregamento de compostos para os cursos d'água. Portanto, ao longo das justificativas desse item será empregado o termo “causas gerais” em referência aos motivos elencados acima.

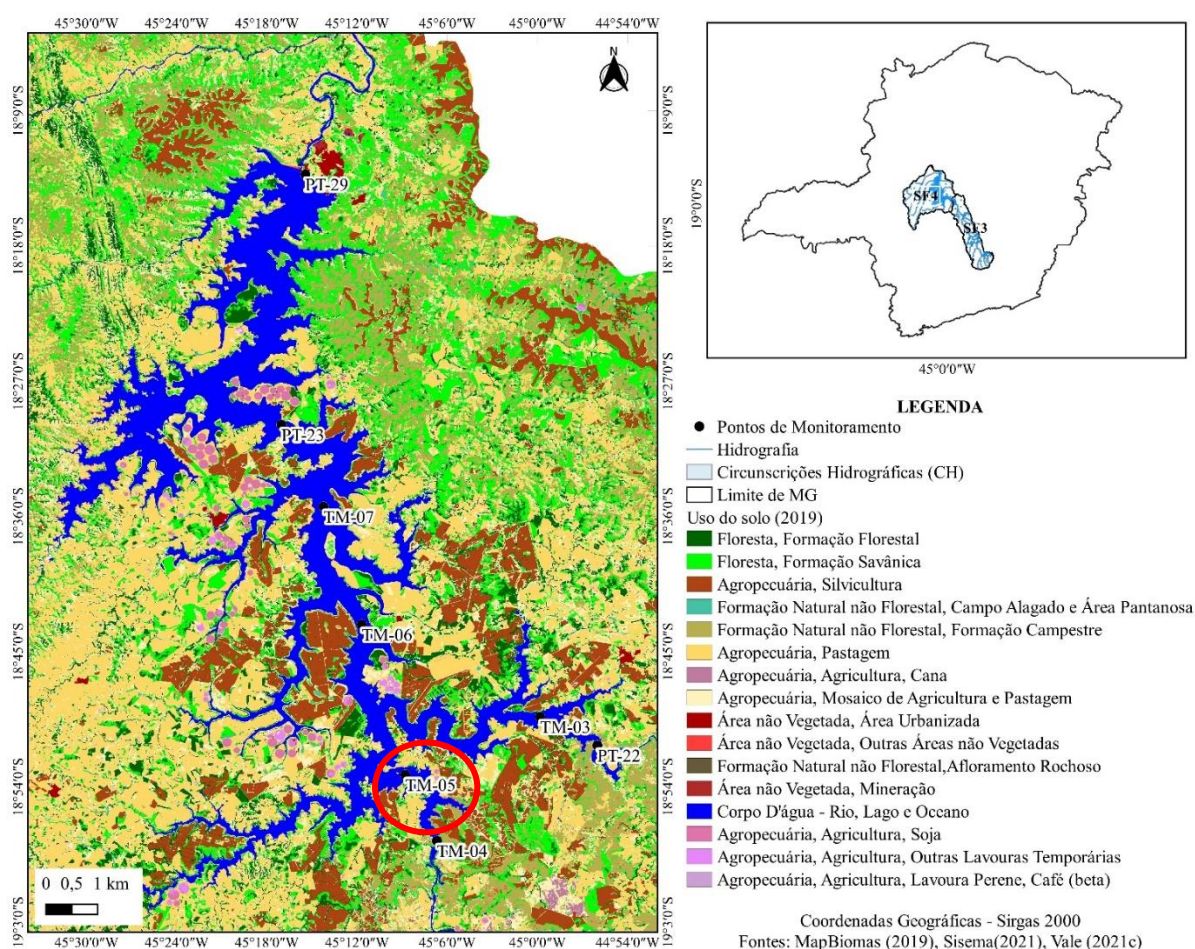
- Grupo 1

O grupo 1 é formado pelo ponto de monitoramento T-TM-05, na profundidade superfície e zona fótica (T-TM-05-S e T-TM-05-ZF). Esse ponto está situado no ponto do reservatório da UHE Três Marias sob influência do rio São Francisco, nos municípios de Pompéu e Abaeté, a 390,8 km de distância do local do rompimento.

Os parâmetros relacionados ao Fator 1 (Tabela 6.5 e Figura 6.26 (a)) são indícios de enriquecimento orgânico. Isso pode estar relacionado à influência do uso e ocupação a montante e do lançamento de efluentes domésticos. Observa-se que o potencial de oxirredução é

negativamente correlacionado aos demais parâmetros fortemente correlacionados ao Fator 1. O escoamento superficial sobre as áreas cujo uso predominante é a agropecuária (Figura 6.27) é uma possível causa da alteração da qualidade das águas pelos parâmetros do Fator 1. As “causas gerais” apresentadas nesse trabalho podem estar associadas aos parâmetros fortemente correlacionados ao Fator 2.

Figura 6.27 - Uso do solo no entorno do ponto de monitoramento TM-05, no interior do reservatório da UHE Três Marias.



Fonte: MapBiomias, 2019; SISEMA, 2021; Vale S.A, 2021a.

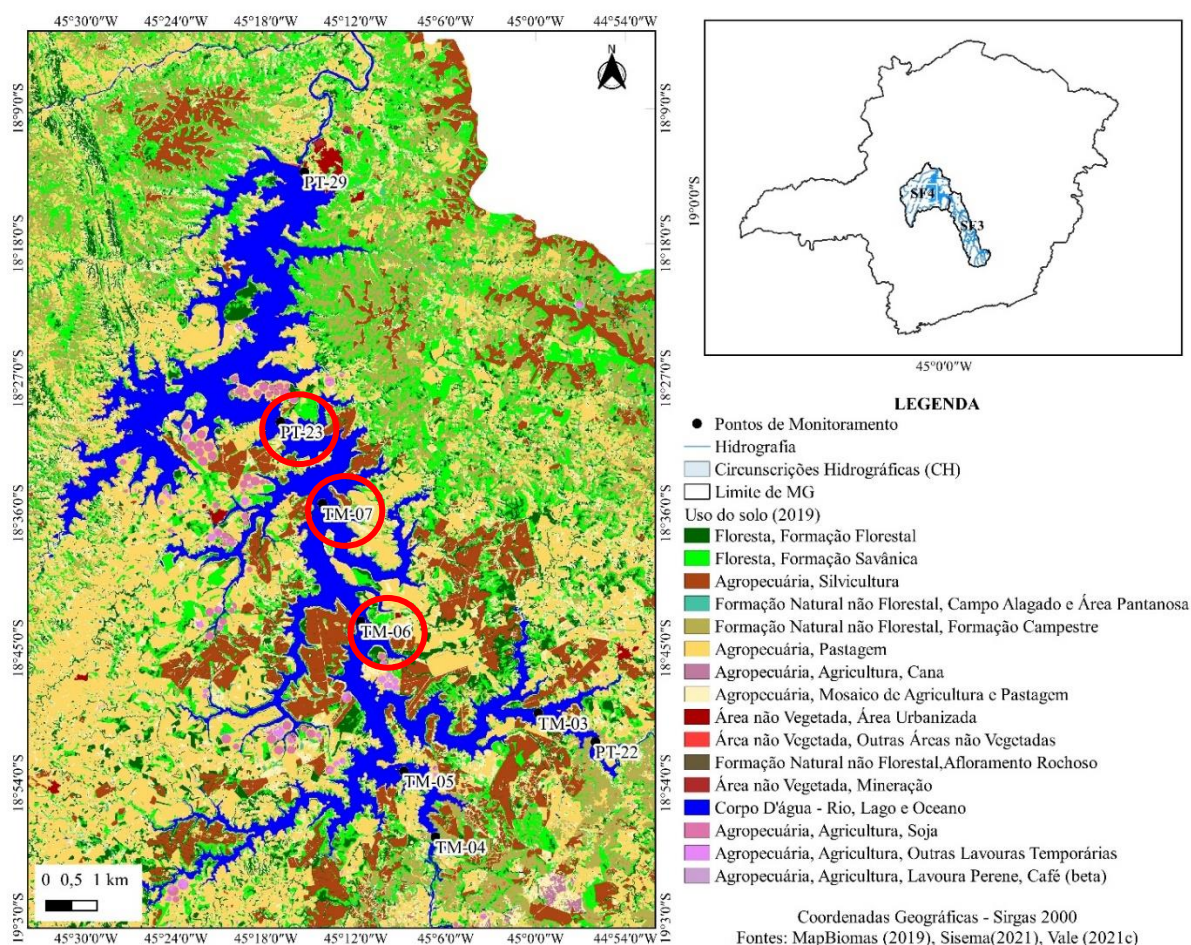
- Grupo 2

O grupo 2 é formado pelos pontos de monitoramento T-TM-06-S, T-TM-06-ZF, T-TM-07-S, T-TM-07-ZF, T-PT-23-S, T-PT-23-ZF e T-PT-29-S. Esses pontos estão situados, majoritariamente, no corpo central do reservatório da UHE Três Marias e as profundidades representadas são superfície ou zona fótica. O ponto de monitoramento T-PT-29-S está situado

dentro do reservatório da UHE Três Marias, mas antes do barramento dessa usina. As distâncias do evento e os municípios abrangidos podem ser evidenciados no Anexo II.

A AF resultou em seis Fatores que explicam cerca de 68% da variabilidade dos dados. Aproximadamente 34% da variabilidade dos dados é explicada pelos Fatores 1 e 2 (Tabela 6.5, Figura 6.26 (b)), dos quais 21% é explicado pelo primeiro Fator e 13% pelo segundo. Os parâmetros manganês total e nitrato apresentaram forte correlação negativa com o Fator 1. O manganês pode estar associado às características geoquímicas locais, ao escoamento superficial, principalmente sobre as áreas de desenvolvimento de atividades agropecuárias (Figura 6.28), e aos processos de lixiviação do solo. O nitrato e o oxigênio dissolvido nas camadas superficiais da porção central do reservatório estão, muito provavelmente, relacionados ao metabolismo do reservatório, principalmente, no que se refere à produção primária e secundária nesse ambiente.

Figura 6.28 - Uso do solo no entorno dos pontos de monitoramento TM-06, TM-07 e PT-23, no interior do reservatório da UHE Três Marias.



- Grupo 3

O grupo 3 é formado pelos pontos de monitoramento T-TM-06-ZI, T-TM-07-ZI, T-TM-07-F, T-PT-23-ZI e T-PT-23-F, cujos dados de localização e distância do evento podem ser evidenciados no Anexo II. O agrupamento pode ser proveniente do fato de estarem situados em regiões mais profundas do reservatório da UHE Três Marias. A AF resultou em seis Fatores, que explicam cerca de 77,5% da variabilidade dos dados, sendo, aproximadamente, 45% provenientes dos fatores 1 e 2 (Tabela 6.5). O gráfico das cargas é ilustrado na Figura 6.26 (c). Os parâmetros fortemente correlacionados ao Fator 1 podem estar vinculados às “causas gerais” já foram elencadas nesse estudo. A condutividade elétrica e o ORP estão correlacionados ao Fator 2 e refletem as condições de fundo do reservatório.

- Grupo 4

O grupo 4 é formado pelos pontos de monitoramento T-TM-04-S, T-TM-04-ZF, T-TM-04-ZI, T-TM-04-F, T-TM-05-ZI e T-TM-05-F. Tanto o ponto TM-04, quanto o TM-05 estão situados no braço do reservatório da UHE Três Marias, sobre influência do rio São Francisco, assim como ocorreu para o grupo 1, que é composto pelo ponto TM-05, nas profundidades superfície e zona fótica. O fato das profundidades superfície e zona fótica do ponto TM-05 ficarem isoladas no dendrograma pode estar vinculado aos menores valores de cor, turbidez e sólidos suspensos. A AF resultou em cinco Fatores, sendo que o 1 e o 2 explicam cerca de 52 % da variabilidade dos dados (Tabela 6.5 e Figura 6.26 (d)).

- Grupo 6

O grupo 6 é formado pelos pontos de monitoramento R-RB-02-S, R-RB-02-ZF, R-RB-02-ZI e T-TM-06-F. Observa-se que nesse grupo existem as profundidades do ponto R-RB-02, no reservatório da UHE Retiro Baixo e a profundidade do fundo do TM-06 do reservatório da UHE Três Marias, cujo detalhamento dos pontos é apresentado no Anexo I. A AF resultou em seis Fatores, que explicam cerca de 83% da variabilidade dos dados, sendo que o Fator 1 e 2 são responsáveis por cerca de 50,5% dos dados (Tabela 6.5 e Figura 6.26 (e)). Tanto os fatores correlacionados ao Fator 1 e 2 podem ser resultantes das “causas gerais” já apresentadas nesse estudo.

- Grupo 7

O grupo 7 é formado pelo ponto de monitoramento PT-22, mas em distintas profundidades: T-PT-22-S, T-PT-22-ZF, T-PT-22-ZI e T-PT-22-F. Destaca-se que esse ponto está situado no remanso da UHE Três Marias. A AF resultou em um total de seis Fatores, que explicam 87% da variabilidade dos dados, dos quais cerca de 51% são explicados pelos Fatores 1 e 2 (Tabela 6.5 e Figura 6.26 (f)). Diferente dos demais resultados apresentados para os grupos anteriores, todos os parâmetros fortemente vinculados ao Fator 1 são correlacionados negativamente. Esses parâmetros estão associados às “causas gerais” já apresentadas nesse trabalho.

- Grupo 8

O grupo 8 é formado pelos pontos de monitoramento R-PT-28-S e R-PT-21-S. Esses dois pontos estão situados no reservatório da UHE Retiro Baixo e foram efetuadas análises apenas na camada superficial. Maiores detalhamentos sobre esses pontos são apresentados no Anexo I. A AF resultou em um total de cinco Fatores, que explicam cerca de 89% da variabilidade dos dados, sendo que os Fatores 1 e 2 explicam, cerca de 60% dos dados (Tabela 6.5 e Figura 6.26 (g)). Os parâmetros fortemente correlacionados ao Fator 1 podem estar associados às “causas gerais”, já os associados ao Fator 2 podem ser indícios de enriquecimento orgânico.

- Grupo 9

O grupo 9 é formado pelos pontos de monitoramento R-PT-20-S, R-PT-20-ZF, R-PT-20-ZI e R-PT-20-F. Observa-se que todas as profundidades do PT-20 estão presentes no mesmo agrupamento. Conforme já abordado anteriormente, esse ponto de monitoramento é o primeiro a jusante do rompimento, em ecossistema lântico. A AF resultou em três Fatores que explicam cerca de 74 % da variabilidade dos dados, sendo que, aproximadamente, 63% são explicados pelos Fatores 1 e 2 (Tabela 6.5 e Figura 6.26 (h)). Os parâmetros fortemente correlacionados ao Fator 1 podem estar vinculados às “causas gerais”, em contrapartida os associados ao Fator 2 são indícios de enriquecimento orgânico provenientes, por exemplo, pelo lançamento de efluentes sanitários.

A seguir apresenta-se o resultado do teste não-paramétrico aplicado a todos os 17 parâmetros de qualidade em estudo, entre os grupos obtidos na AF. De forma geral, os parâmetros que apresentaram a maior ocorrência de diferença significativa (independentemente de ser em virtude de altas ou baixas concentrações) na água, no período chuvoso foram: manganês total, nitrato, OD, pH, sólidos dissolvidos totais e temperatura.

Sabe-se que desses parâmetros, o manganês total pode estar relacionado com o impacto do rejeito e das características geoquímicas. O nitrato, OD, pH e temperatura podem estar relacionados ao metabolismo do ambiente e respondendo às contribuições alóctones. Os sólidos dissolvidos podem estar vinculados a uma série de fatores, como o metabolismo do ambiente (respiração, fotossíntese, dentre outros), o lançamento de efluentes domésticos, o escoamento

superficial e a influência do rejeito proveniente da barragem de rejeitos B1. A seguir será efetuado um breve detalhamento desses parâmetros.

- Manganês total

Por meio da Figura 6.29 observa-se que o agrupamento que apresentou os maiores valores de mediana foi o grupo 5, possuindo concentração mediana significativamente maior que os grupos 1, 2, 3, 6 e 8 (Tabela 6.6 e Figura 6.29), para o parâmetro manganês total. Esse grupo é composto pelo ponto R-RB-02-F, ou seja, pela profundidade de fundo do ponto RB-02, no reservatório da UHE Retiro Baixo. Além disso, o valor da mediana para esse ponto e profundidade foi de 0,5853 mg/L (Figura 6.29), sendo que o limite para manganês total para águas classe 2 é de 0,10 mg/L. Ressalta-se que o limite para águas Classe 2 está sendo utilizado apenas para comparação, uma vez que se trata do hipolímnio do reservatório.

Tabela 6.6 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro manganês total na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lânticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

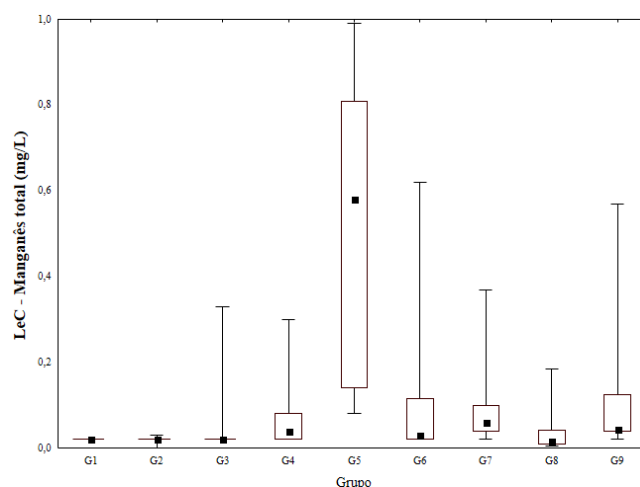
Manganês total	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	=								
3	=	=							
4	↓	↓	↓						
5	↓	↓	↓	=					
6	=	↓	=	=	↑				
7	↓	↓	↓	=	=	=			
8	=	=	=	↑	↑	=	↑		
9	↓	↓	↓	=	=	=	=	↓	

Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- Nitrato

Através do teste de comparações múltiplas de *Dunn* (Tabela 6.7) verifica-se que a mediana das concentrações de nitrato dos grupos de 5 até 9, em sua maioria, é significativamente superior aos grupos de 1 a 4. O limite previsto para nitrato para águas Classe 2 é de 10 mg/L e observa-

Figura 6.29 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lântico, na água, no período chuvoso.



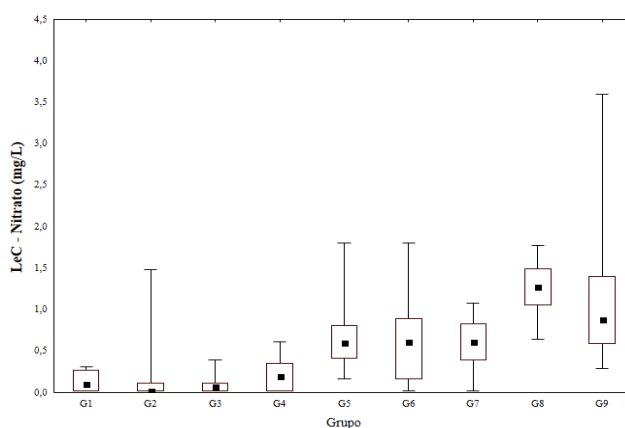
se que nenhum dos grupos evidenciados na Figura 6.30 está fora do limite previsto pela DN COPAM CERH 01/2008, para águas Classe 2.

As maiores medianas observadas foram para o grupo 8 (R-PT-28-S, R-PT-21-S) - 1,24 mg/L, seguido pelo grupo 9 (R-PT-20-S, R-PT-20-ZF, R-PT-20-ZI, R-PT-20-F) - 0,82 mg/L. Observa-se que o grupo 8 é constituído por pontos cujas medições foram realizadas apenas em superfície e o grupo 9 composto por um mesmo ponto de monitoramento em profundidade distintas.

Tabela 6.7 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro nitrato, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Nitrato	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	=								
3	=	=							
4	=	=	=						
5	=	↓	↓	=					
6	↓	↓	↓	↓	=				
7	↓	↓	↓	↓	=	=			
8	↓	↓	↓	↓	=	=	=		
9	↓	↓	↓	↓	=	=	=	=	

Figura 6.30 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro nitrato que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, na água, no período chuvoso.



Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- Oxigênio Dissolvido (OD)

A análise do teste de comparações múltiplas de *Dunn* (Tabela 6.8) revela que a maioria dos grupos apresentou diferença significativa para o parâmetro oxigênio dissolvido. A maior ocorrência de diferença foi verificada para os grupos 1, 2 e 8. Observa-se que esses grupos foram os que apresentaram as maiores concentrações de OD no meio: grupo 1 - 7,55 mg/L; grupo 2 - 7,37 mg/L e grupo 8 - 6,8 mg/L (Figura 6.31). Vale destacar que para águas Classe 2 espera-se que a concentração de OD seja superior a 5 mg/L, entretanto, é sabido que a concentração desse parâmetro é reduzida nas camadas mais profundas dos reservatórios.

As menores medianas dos valores foram verificadas para o grupos 5 (2,56 mg/L - R-RB-02-F), situado no hipolímnio do reservatório de Retiro Baixo; grupo 3 (3,89 mg/L - pontos T-TM-06-ZI, T-TM-07-ZI, T-TM-07-F, T-PT-23-ZI, T-PT-23-F), também formado por pontos que representam as maiores profundidades dos reservatórios; e grupo 6 (4 mg/L - pontos R-RB-02-S, R-RB-02-ZF, R-RB-02-ZI, T-TM-06-F). Esse resultado reforça a questão da redução do OD no meio com o aumento da profundidade, já que nesses grupos existem pontos situados no fundo dos reservatórios.

Tabela 6.8 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro OD, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lânticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	=								
3	↑	↑							
4	↑	↑	=						
5	↑	↑	=	=					
6	↑	↑	=	=	=				
7	↑	↑	=	=	=	=			
8	=	=	↓	↓	↓	↓	↓		
9	↑	↑	=	=	=	=	=	↑	

Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- pH e temperatura

A análise do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro pH (Tabela 6.9) revelou que a maior ocorrência de diferença significativa se deu nos Grupos 1 e o 2. Observando os valores de medianas obtidos para todos os grupos em estudo (Figura 6.32) observa-se que todos os resultados estão dentro do limite proposto pela DN COPAM CERH 01/2008, cuja faixa indicada é de 6 até 9. Situação análoga foi observada para o parâmetro temperatura (Tabela 6.10 e Figura 6.33), cuja faixa prevista na legislação é de 20 a 40 °C. A maior temperatura foi observada no grupo 2 (T-TM-06-S, T-TM-06-ZF, T-TM-07-S, T-TM-07-ZF, T-PT-23-S, T-PT-23-ZF, T-PT-29-S) - 28,5 °C e a menor no grupo 5 (R-RB-02-F) - 25,6°C, podendo isso estar vinculado à localização desse ponto no fundo do reservatório da UHE Retiro Baixo.

Figura 6.31 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro OD na água, que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lântico, na água, no período chuvoso.

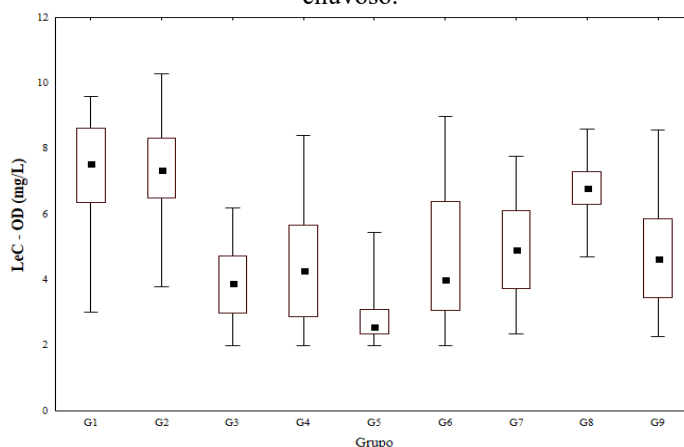


Tabela 6.9 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro pH na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

pH	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	=								
3	=	↑							
4	↑	↑	=						
5	↑	↑	↑	=					
6	↑	↑	=	=	=				
7	↑	↑	=	=	=	=			
8	=	=	=	=	↓	↓	=		
9	↑	↑	=	=	=	=	=	↑	

Tabela 6.10 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro temperatura, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Temperatura	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	=								
3	↑	↑							
4	=	↑	=						
5	↑	↑	=	↑					
6	↑	↑	=	=	=				
7	=	↑	=	=	↓	=			
8	=	=	↓	=	↓	↓	=		
9	=	↑	=	=	=	=	=	=	

Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Por meio da Tabela 6.11 observa-se que os grupos 2 (T-TM-06-S, T-TM-06-ZF, T-TM-07-S, T-TM-07-ZF, T-PT-23-S, T-PT-23-ZF, T-PT-29-S) e 3 (T-TM-06-ZI, T-TM-07-ZI, T-TM-07-F, T-PT-23-ZI, T-PT-23-F) foram os que apresentaram diferença significativa dos demais em estudo. Por meio da Figura 6.34 verifica-se que tais grupos possuem concentração mediana

Figura 6.32 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro pH que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, na água, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.

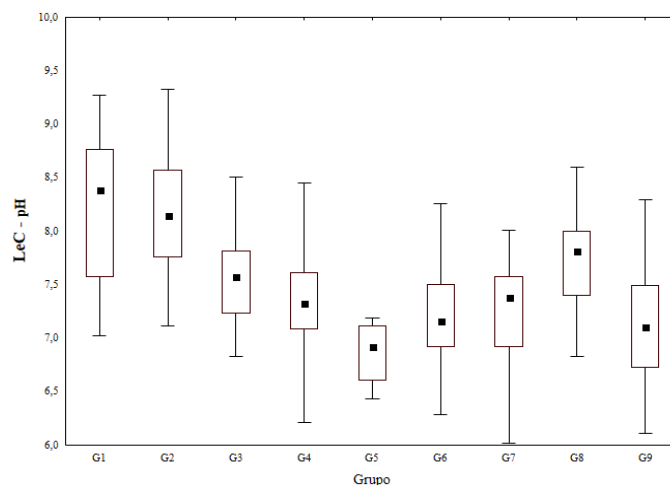
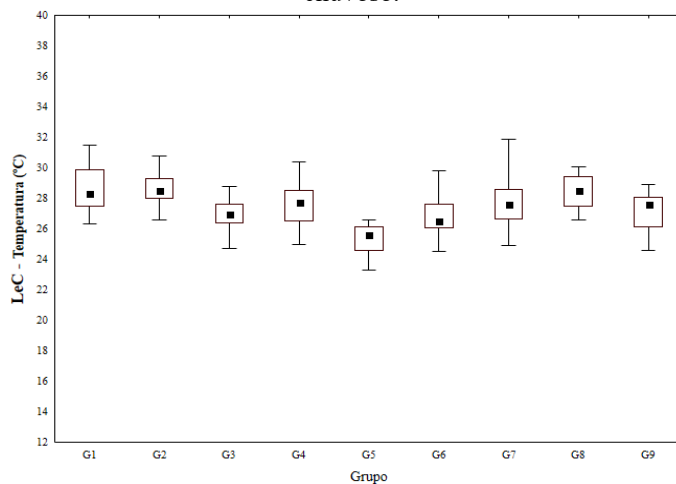


Figura 6.33 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro temperatura que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, na água, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.

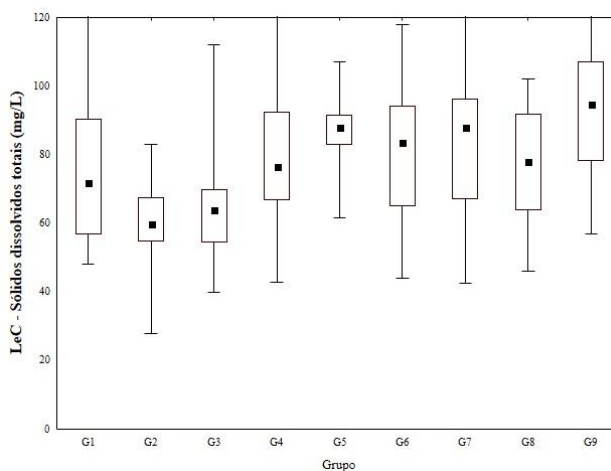


significativamente inferior e estão situados no corpo central do reservatório de Três Marias. Na Figura 6.34 verifica-se que as maiores medianas são observadas no grupo 5 ao 9 e esses pontos de monitoramento, predominantemente, estão situados no reservatório da UHE Retiro Baixo, que contribuiu para a retenção dos rejeitos provenientes da barragem B1.

Tabela 6.11 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro sólidos dissolvidos totais, na água,, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lânticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

SDT	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2	=								
3	=	=							
4	=	↓	↓						
5	=	↓	↓	=					
6	=	↓	↓	=	=				
7	=	↓	↓	=	=	=			
8	=	↓	=	=	=	=	=		
9	=	↓	↓	=	=	=	=	=	

Figura 6.34 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro sólidos dissolvidos totais que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, na água, no ecossistema lântico, no período chuvoso.

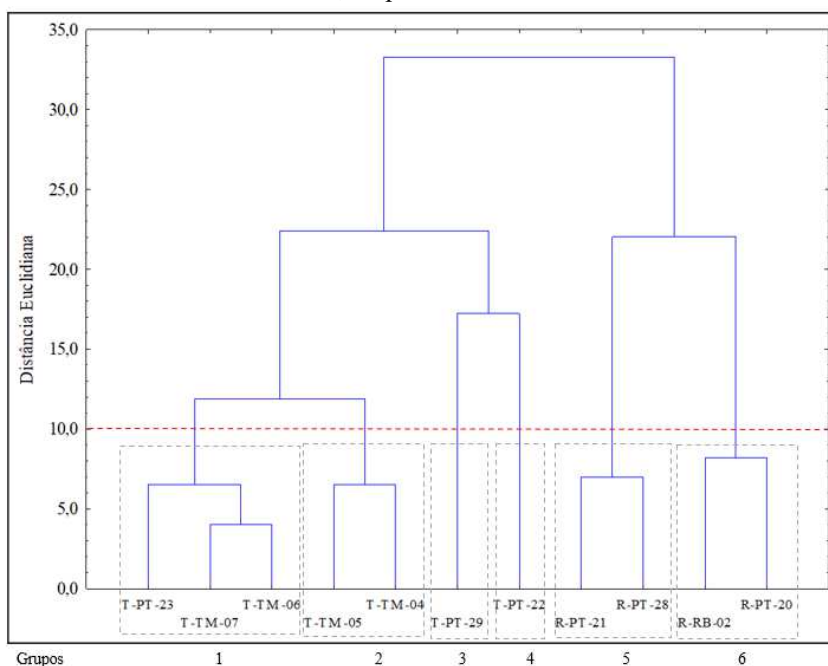


Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

6.3.1.2 Análise da qualidade dos sedimentos

A AC foi aplicada aos 13 parâmetros de qualidade do sedimento, no período chuvoso, sendo eles: alumínio, arsênio, bário, chumbo, cobre, ferro, fósforo, manganês, mercúrio, níquel e zinco e COT. O resultado do agrupamento é apresentado na Figura 6.35. A altura de corte foi definida a partir da distância de ligação (10,05) e da localização geográfica dos pontos de monitoramento, o que resultou em um total de 6 grupos.

Figura 6.35 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lânticos, no período chuvoso.



Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias.

Tabela 6.12 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade do sedimento, dos ecossistemas lânticos, no período chuvoso (LeC).

Grupo	Pontos de Monitoramento
1	T-TM-06, T-TM-07, T-PT-23
2	T-TM-04, T-TM-05
3	T-PT-29
4	T-PT-22
5	R-PT-28, R-PT-21
6	R-PT-20, R-RB-02

Legenda: T – ponto situado no reservatório da UHE Três Marias; R – ponto situado no reservatório da UHE Retiro Baixo.

Os resultados a AC demonstram a formação de grupos de acordo com a similaridade das regiões de cada reservatório, refletindo assim as condições limnológicas dessas regiões, como profundidade da coluna d'água, dinâmica de estratificação, dentre outras. Por meio Tabela 6.12 observa-se que os pontos PT-29 e PT-22 ficaram isolados dos demais grupos e ambos estão situados no reservatório da UHE Três Marias. O PT-22 também ficou isolado no agrupamento apresentado para os parâmetros de qualidade da água e vale destacar que ele está situado no remanso do reservatório da UHE Três Marias. O PT-29 está situado a montante do barramento dessa Usina e isso também pode ter contribuído para que esse ponto ficasse isolado dos demais.

Isso pode estar relacionado ao fato de que os valores das medianas obtidas para a maioria dos parâmetros avaliados nesses pontos de monitoramento são inferiores aos demais, entretanto, não foi verificado se essa diferença é significativa. Além disso, o fato de estarem situados geograficamente nas extremidades do reservatório pode ter contribuído para o agrupamento obtido.

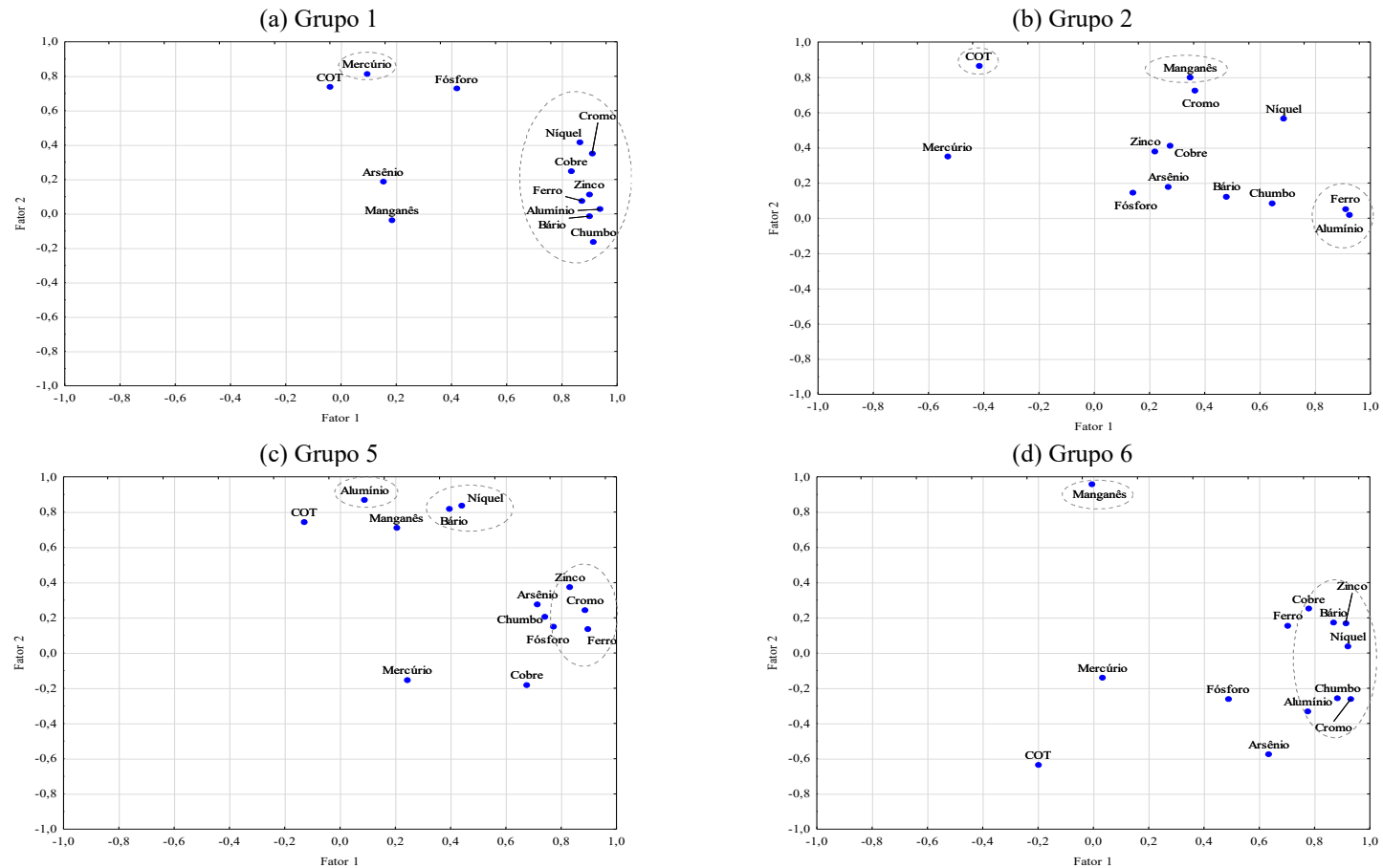
A Tabela 6.13 apresenta as cargas fatoriais dos parâmetros de sedimento para cada Fator após rotação *varimax raw* da AF, referentes aos grupos formados pela AC e a Figura 6.36 mostra o gráfico das cargas dos dois primeiros fatores, no sedimento, em ecossistemas lênticos, no período chuvoso.

Tabela 6.13 - Cargas fatoriais dos parâmetros de sedimento para cada Fator após rotação *varimax raw da* AF, referentes ao grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período chuvoso.

Parâmetros	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 5			Grupo 6		
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Alumínio	0,94	0,03	0,09	0,93	0,02	0,19	0,09	0,87	-0,21	0,78	-0,33	-0,08
Arsênio	0,15	0,19	0,62	0,27	0,18	-0,82	0,72	0,28	0,22	0,64	-0,58	0,41
Bário	0,90	-0,01	0,34	0,48	0,12	0,83	0,40	0,82	0,10	0,87	0,17	0,38
COT	-0,04	0,74	-0,54	-0,42	0,86	0,04	-0,13	0,74	0,32	-0,20	-0,64	-0,57
Chumbo	0,92	-0,16	0,19	0,65	0,09	0,53	0,74	0,21	0,46	0,88	-0,25	0,24
Cobre	0,83	0,25	0,03	0,27	0,41	0,71	0,68	-0,18	-0,56	0,78	0,25	0,31
Cromo	0,91	0,35	-0,01	0,37	0,72	0,28	0,89	0,25	0,11	0,93	-0,26	0,05
Ferro	0,87	0,08	0,00	0,91	0,05	0,03	0,90	0,14	0,09	0,70	0,16	-0,18
Fósforo	0,42	0,73	0,11	0,14	0,14	-0,08	0,77	0,15	0,28	0,49	-0,26	0,33
Manganês	0,19	-0,04	0,83	0,35	0,80	-0,03	0,20	0,71	0,05	0,00	0,96	0,14
Mercúrio	0,09	0,81	0,14	-0,53	0,35	-0,18	0,24	-0,15	0,86	0,03	-0,14	-0,91
Níquel	0,86	0,42	-0,01	0,69	0,57	0,11	0,44	0,84	-0,11	0,92	0,04	-0,20
Zinco	0,90	0,11	0,15	0,22	0,38	0,49	0,83	0,38	-0,25	0,91	0,17	-0,02
Variabilidade (%)	54,81	15,84	9,03	39,86	18,94	13,82	47,56	18,19	12,18	51,44	18,18	10,53
% Acumulada	54,81	70,66	79,69	39,86	58,80	72,62	47,56	65,75	77,93	51,44	69,62	80,16

Vermelho - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75).

Figura 6.36 - Gráficos das cargas dos dois primeiros fatores, nos sedimentos, extraídos após rotação *varimax raw da AF*, referentes à análise dos grupos formados na AC, para os ecossistemas lânticos, no período chuvoso.



A seguir apresenta-se o resultado do teste não-paramétrico aplicado a todos os 13 parâmetros avaliados nos sedimentos, entre os grupos obtidos na AF. De forma geral, os parâmetros que apresentaram a maior ocorrência de diferença significativa (independentemente de ser em virtude de altas ou baixas concentrações) no sedimento, no período chuvoso foram: manganês total e cromo.

- Manganês

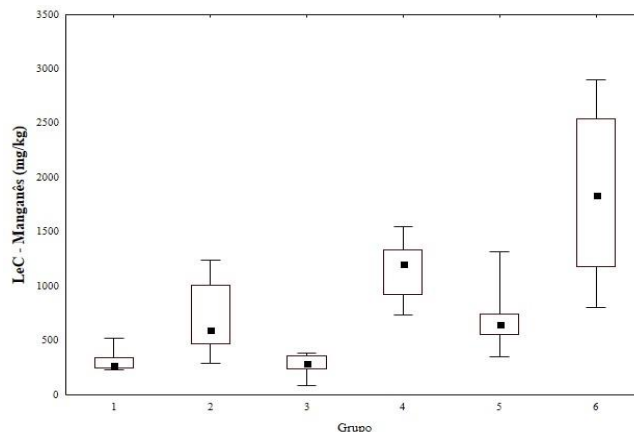
Por meio da Tabela 6.14 observa-se que o maior quantitativo de diferença significativa foi verificado para os grupos 1 e 3. Através da Figura 6.37 é possível evidenciar que esses grupos apresentaram concentrações medianas inferiores aos demais grupos, para o parâmetro em questão. O grupo 6 foi o que apresentou a maior mediana (R-PT-20, R-RB-02 - na UHE Retiro Baixo), seguido pelo grupo 4 (T-PT-22 - no remanso da UHE Três Marias).

Por meio da análise dos valores de referência para as amostras de sedimentos (Apêndice III) observa-se que os valores superiores ao limite de referência para o parâmetro manganês, dentre os ambientes lênticos, foram observados no reservatório da UHE Retiro Baixo, que contribuiu para a retenção dos rejeitos provenientes do rompimento. Vale destacar que os ecossistemas lênticos são propícios à sedimentação e que as características geoquímicas contribuem para a presença de manganês nesse compartimento. Pelo resultado da AF é possível inferir que o sedimento no reservatório da UHE Retiro Baixo apresenta maiores concentração de metais do que em Três Marias.

Tabela 6.14 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro manganês, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Manganês	1	2	3	4	5	6
1						
2	↓					
3	=	=				
4	↓	=	↓			
5	↓	=	↓	=		
6	↓	↓	↓	=	↓	

Figura 6.37 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro manganês que apresentou diferença significativa no sedimento, entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, no período chuvoso.



Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- Cromo

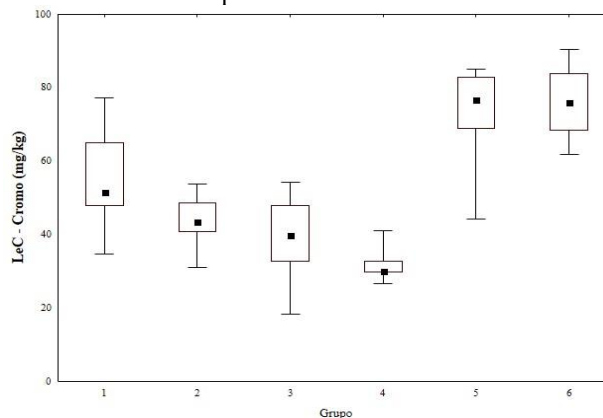
O resultado do teste de comparações múltiplas de *Dunn* revela que os grupos que se destacaram em termos de diferenças significativas foram os grupos 5 (R-PT-28, R-PT-21) e 6 (R-PT-20, R-RB-02) - Tabela 6.15, estando os pontos de monitoramento desse grupo no reservatório da UHE Retiro Baixo. Através da Figura 6.38 é possível evidenciar as elevadas medianas desses grupos.

Conforme apresentado no item 6.2.2 e no Apêndice III, verifica-se que os percentuais de desconformidades ao Nível 2 são maiores nos sedimentos do reservatório da UHE Retiro Baixo, quando comparado com os da UHE Três Marias. Situação análoga foi observada para o arsênio e níquel. Vale destacar que o cromo e o arsênio são indicativos da presença de substâncias tóxicas no meio.

Tabela 6.15 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro cromo, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período chuvoso, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Cromo	1	2	3	4	5	6
1						
2	=					
3	=	=				
4	↑	=	=			
5	↓	↓	↓	↓		
6	↓	↓	↓	↓	=	

Figura 6.38 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro cromo que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, no sedimento, no período chuvoso.



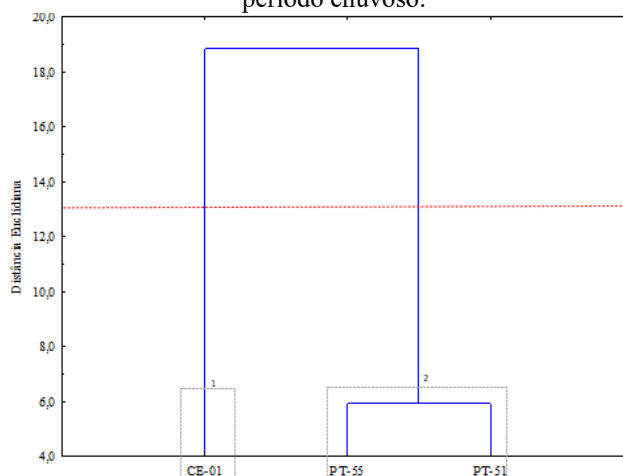
Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

6.3.2 Ecossistemas lóticos

6.3.2.1 Análise da qualidade da água

Toda a análise efetuada para os ecossistemas lênticos também foi aplicada nessa etapa do estudo. A AC aplicada aos dados de qualidade da água do ecossistema lótico, no período chuvoso, resultou no dendrograma ilustrado na Figura 6.39. O corte foi realizado tendo em vista a distância entre os grupos (12,91). Conforme pode-se observar na Figura 6.39, foram formados dois grupos. Esse agrupamento foi observado para todos os dendrogramas apresentados nesse estudo, para os ecossistemas lóticos.

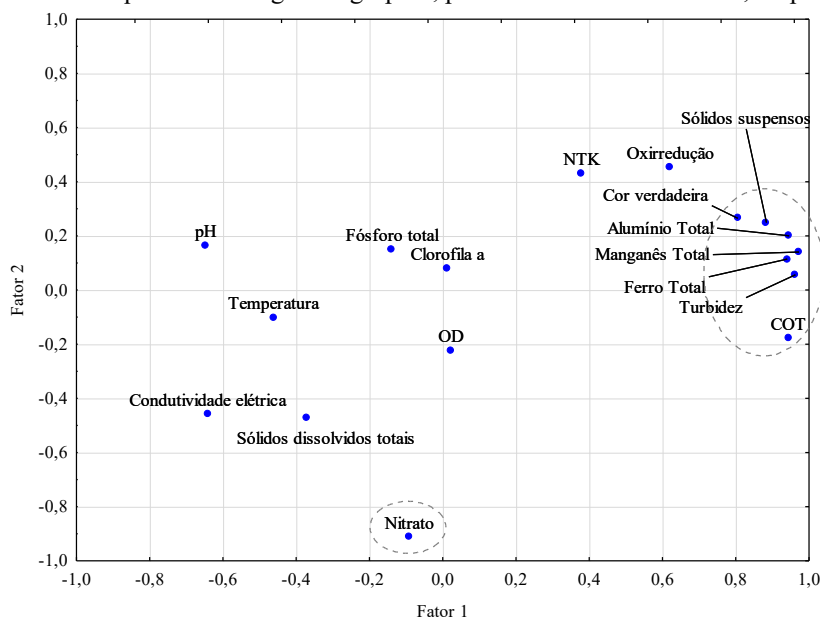
Figura 6.39 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lóticos, no período chuvoso.



Uma vez que apenas esses três pontos de monitoramento desse trecho da bacia hidrográfica do rio Paraopeba foram considerados, o resultado da AC reflete a similaridade dos pontos de monitoramento localizados no rio Paraopeba (PT-51 e PT-55), enquanto o ponto localizado no ribeirão dos Gomes (CE-01), afluente do rio Paraopeba, permaneceu isolado. Os resultados obtidos por meio da AF explicam cerca de 90 % da variabilidade da qualidade das águas, resultando num total de cinco Fatores. Observa-se que apenas os Fatores 1 e 2 explicam cerca de 66 % da variabilidade dos dados.

O gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores é apresentado na Figura 6.40, para o grupo 2, que mostra que os parâmetros correlacionados ao Fator 1 são: alumínio, ferro, manganês totais; COT, sólidos suspensos, cor verdadeira e turbidez. Já ao Fator 2 apenas o nitrato (correlação negativa).

Figura 6.40 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores extraídos após rotação *varimax raw da AF*, referentes às análises de qualidade da água do grupo 2, para os ecossistemas lóticos, no período chuvoso.



Os parâmetros correlacionados ao Fator 1 podem estar associados ao escoamento superficial das áreas do entorno, já que o uso do solo predominante no entorno é a atividade agropecuária, com destaque para a pastagem. Além disso, as características geoquímicas locais contribuem para a disponibilização de compostos como alumínio, ferro e manganês para o ambiente aquático, principalmente, no período chuvoso, mediante o escoamento e aos processos de lixiviação do solo.

O ferro é elemento mais abundante e característico da presença do rejeito nos ambientes impactados (IGAM, 2020a). Os pontos de monitoramento pertencentes ao grupo 2 estão mais perto do local do rompimento. A contribuição do próprio rejeito proveniente da barragem B1, do carreamento desse material mediante a ocorrência de chuvas sobre as áreas diretamente afetadas pela lama, com conseqüente revolvimento do material depositado, podem contribuir para as fortes correlações observadas entre os parâmetros do Fator 1.

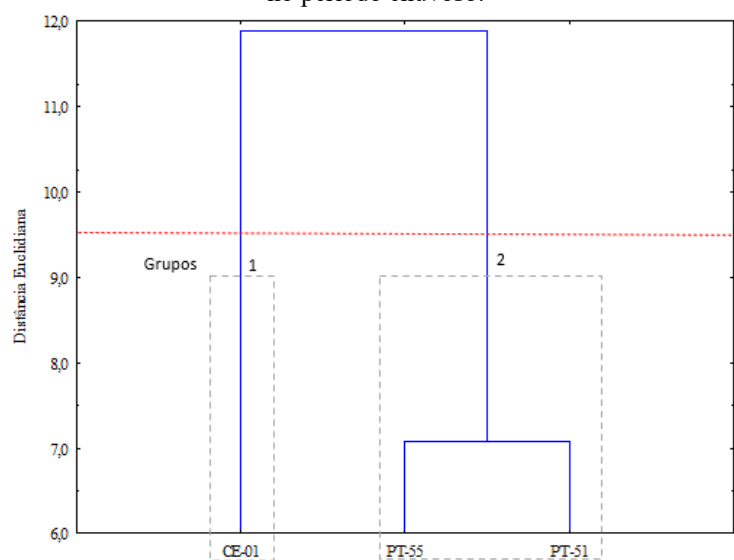
Já o nitrato associado ao Fator 2 também pode estar relacionado às atividades agropecuárias desenvolvidas no entorno, além dos lançamentos de efluentes sanitários. Vale destacar que os pontos PT-51 e PT-55 estão situados nos municípios de Pompéu e Curvelo. Conforme consulta no Sisema (2021), a sede urbana de Curvelo está mais próxima ao PT-51. Em se tratando de esgotamento sanitário, o município de Curvelo apresenta percentual acima de 83% de

atendimento com coleta de efluentes domésticos na área urbana e 93% de tratamento do volume de esgoto coletado em área urbana. Existe um aglomerado rural nas proximidades do PT-55, no município de Curvelo, denominado Cachoeira do Choro (SISEMA, 2021). Destaca-se que esse aglomerado pode contribuir, por exemplo, com o nitrato proveniente das áreas agropecuárias e para os lançamentos de efluentes no ambiente aquático.

6.3.2.2 Análise da qualidade dos sedimentos

O resultado do agrupamento obtido por meio da AC é ilustrado na Figura 6.41. Para a definição da altura de corte, levou-se em consideração os valores das distâncias de ligação (9,48). Portanto, assim como observado anteriormente, foram gerados dois grupos, sendo um contendo apenas o ponto CE-01 e outro contendo os pontos de monitoramento situados mais próximo ao local do rompimento da barragem B1 (Figura 6.41).

Figura 6.41 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lóticos, no período chuvoso.



Observou-se que a AF resultou em apenas um Fator, que explica cerca de 92,5 % da variabilidade da qualidade dos sedimentos. Isso pode ser justificado pelo fato de que todos os parâmetros estão fortemente correlacionados e, nesse caso, negativamente. Pelo fato de a AF resultar em um único Fator, não foi possível elaborar o gráfico das cargas fatoriais.

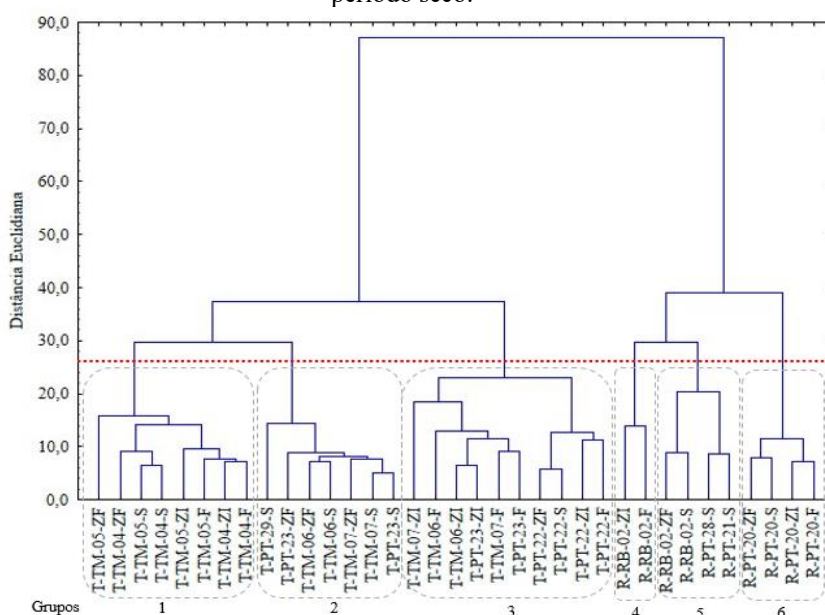
6.4 Comparação entre a qualidade da água e dos sedimentos nos pontos de monitoramento – período seco

6.4.1 Ecossistemas lênticos

6.4.1.1 Análise da qualidade da água

A AC aplicada aos dados de qualidade da água do ecossistema lêntico, no período seco, resultou no dendrograma ilustrado na Figura 6.42. A altura de corte foi definida a partir da distância de ligação e da localização geográfica dos pontos de monitoramento (26,31). Adotando-se esse critério, obteve-se um total de 6 grupos (Figura 6.42), cujo detalhamento é apresentado na Tabela 6.16.

Figura 6.42 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lênticos, no período seco.



Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias; S = Superfície; ZF = Zona Fótica; ZI = Zona Intermediária e F = Fundo.

Tabela 6.16 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade da água, dos ambientes lêntico, no período seco (LeS).

Grupos	Pontos de Monitoramento e profundidades
1	T-TM-04-S, T-TM-04-ZF, T-TM-04-ZI, T-TM-04-F, T-TM-05-S, T-TM-05-ZF, T-TM-05-ZI, T-TM-05-F
2	T-TM-06-S, T-TM-06-ZF, T-TM-07-S, T-TM-07-ZF, T-PT-23-S, T-PT-23-ZF, T-PT-29-S
3	T-PT-22-S, T-PT-22-ZF, T-PT-22-ZI, T-PT-22-F, T-TM-06-ZI, T-TM-06-F, T-TM-07-ZI, T-TM-07-F, T-PT-23-ZI, T-PT-23-F
4	R-RB-02-ZI, R-RB-02-F
5	R-PT-28-S, R-RB-02-S, R-RB-02-ZF, R-PT-21-S
6	R-PT-20-S, R-PT-20-ZF, R-PT-20-ZI, R-PT-20-F

Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias; S = Superfície; ZF = Zona Fótica; ZI = Zona Intermediária e F = Fundo.

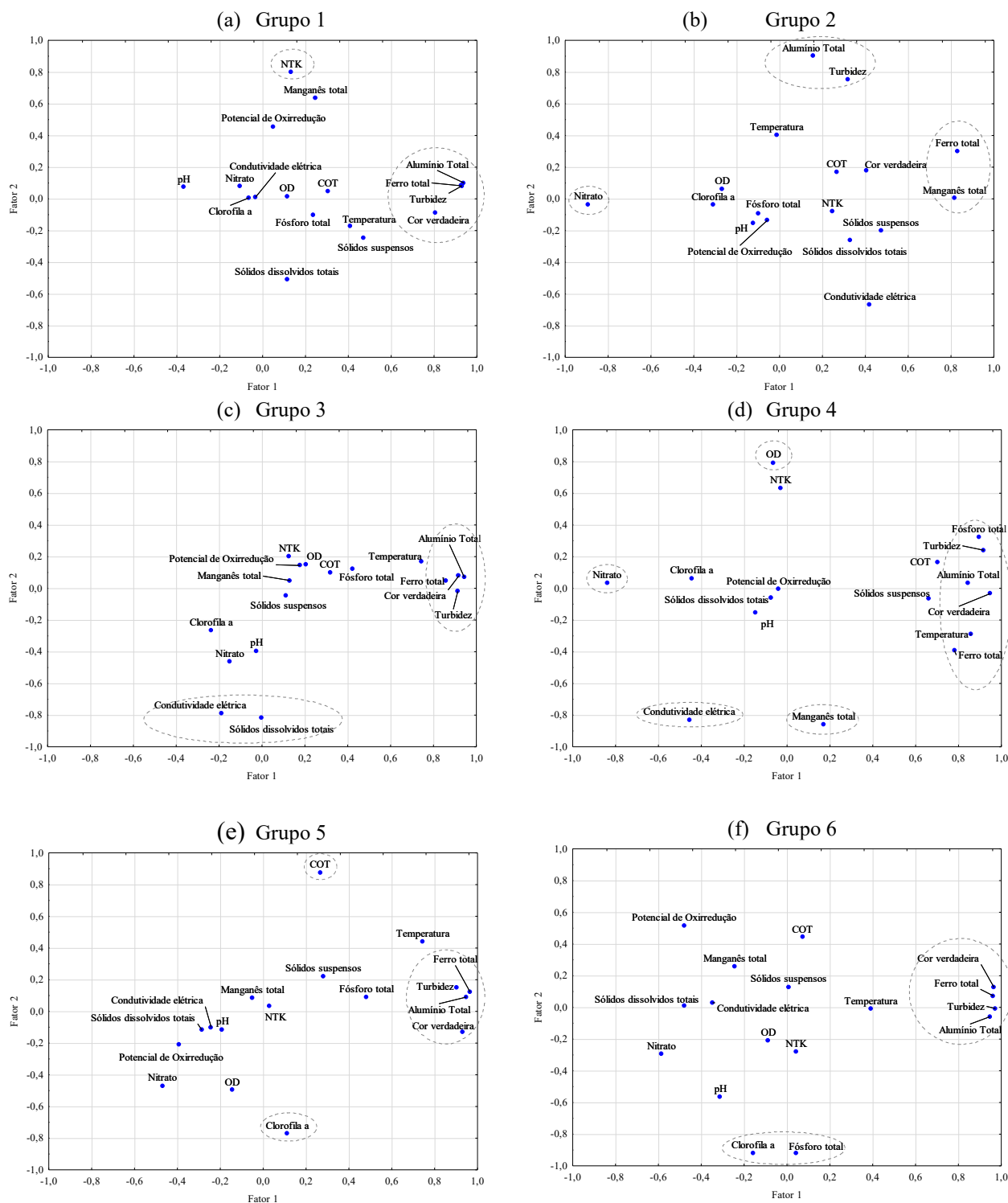
Na Tabela 6.17 apresenta-se as cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação *varimax raw* da AF, referentes aos grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período seco. O percentual da variabilidade dos dados que os dois primeiros fatores explicam é apresentado na Tabela 6.17. Assim como apresentado no período chuvoso, os parâmetros que se destacaram nos dois primeiros fatores foram alumínio e ferro totais, cor e turbidez, podendo isso ser evidenciado por meio da Figura 6.43.

Tabela 6.17 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação *varimax raw da AF*, referentes aos Grupos formados pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lênticos, no período seco.

Grupos	Grupo 1			Grupo 2			Grupo 3			Grupo 4			Grupo 5			Grupo 6		
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Alumínio Total	0,94	0,10	0,03	0,16	0,90	0,01	0,94	0,07	-0,07	0,84	0,04	-0,08	0,95	0,09	0,09	0,95	-0,06	0,02
COT	0,31	0,05	0,38	0,27	0,17	-0,10	0,32	0,10	0,36	0,70	0,17	0,31	0,27	0,87	0,02	0,07	0,44	-0,31
Clorofila <i>a</i>	-0,06	0,01	-0,84	-0,31	-0,04	-0,04	-0,24	-0,27	0,04	-0,45	0,06	0,04	0,11	-0,77	0,01	-0,16	-0,92	0,08
Ferro total	0,93	0,08	0,11	0,83	0,30	-0,19	0,86	0,05	0,12	0,78	-0,39	-0,27	0,97	0,12	0,02	0,96	0,07	0,10
Fósforo total	0,24	-0,10	0,08	-0,10	-0,10	0,04	0,42	0,12	0,08	0,90	0,32	0,14	0,48	0,09	-0,17	0,04	-0,92	0,15
Manganês total	0,25	0,64	-0,01	0,82	0,00	0,29	0,13	0,05	0,48	0,17	-0,86	-0,22	-0,05	0,08	-0,91	-0,24	0,26	0,00
Nitrato	-0,11	0,08	-0,22	-0,89	-0,04	0,01	-0,15	-0,47	-0,27	-0,84	0,03	0,24	-0,47	-0,47	0,44	-0,59	-0,30	-0,38
NTK	0,13	0,80	-0,06	0,25	-0,08	-0,58	0,13	0,20	0,19	-0,03	0,63	-0,33	0,03	0,03	0,04	0,04	-0,28	0,41
OD	0,11	0,01	-0,50	-0,27	0,06	-0,54	0,21	0,15	-0,10	-0,06	0,79	-0,04	-0,14	-0,50	0,12	-0,09	-0,21	0,85
Sólidos dissolvidos totais	0,11	-0,51	-0,05	0,33	-0,26	-0,10	0,00	-0,82	0,04	-0,08	-0,06	0,82	-0,29	-0,12	-0,70	-0,48	0,01	-0,13
Sólidos suspensos	0,47	-0,25	0,04	0,48	-0,20	0,60	0,11	-0,05	0,08	0,66	-0,07	0,29	0,28	0,22	-0,14	0,01	0,13	0,22
Condutividade elétrica	-0,03	0,01	0,08	0,42	-0,67	0,14	-0,19	-0,79	0,14	-0,46	-0,83	0,19	-0,24	-0,10	-0,09	-0,35	0,03	-0,87
Cor verdadeira	0,81	-0,09	0,01	0,41	0,18	-0,56	0,92	0,08	-0,22	0,95	-0,03	-0,15	0,93	-0,13	0,07	0,97	0,13	-0,04
pH	-0,37	0,07	-0,67	-0,12	-0,16	-0,14	-0,03	-0,40	0,10	-0,15	-0,16	0,13	-0,19	-0,12	0,25	-0,31	-0,57	-0,19
Potencial de Oxirredução	0,05	0,46	0,47	-0,06	-0,14	-0,78	0,18	0,14	-0,85	-0,04	-0,01	0,91	-0,39	-0,21	-0,49	-0,48	0,51	-0,57
Temperatura	0,41	-0,17	0,20	-0,01	0,40	0,27	0,75	0,17	0,32	0,86	-0,29	0,03	0,75	0,44	0,06	0,39	-0,01	-0,68
Turbidez	0,93	0,08	0,11	0,32	0,75	0,06	0,91	-0,02	-0,05	0,92	0,24	0,02	0,90	0,15	0,07	0,97	-0,01	0,04
Variabilidade (%)	26,93	13,63	9,66	21,35	16,72	12,56	27,05	11,49	10,34	39,65	17,18	12,25	34,33	16,41	10,38	32,07	21,39	17,16
% Acumulada	26,93	40,56	50,22	21,35	38,08	50,64	27,05	38,54	48,88	39,65	56,83	69,08	34,33	50,74	61,12	32,07	53,46	70,62

Vermelho - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75).

Figura 6.43 - Gráfico das cargas dos dois primeiros fatores, na água, extraídos dos dados de qualidade da água após rotação *varimax raw da AF*, referentes à análise dos Grupos formados na AC, para os ecossistemas lênticos, no período seco.



No período seco observou-se uma maior ocorrência de diferença significativa (independentemente de ser em virtude de altas ou baixas concentrações e valores) para os seguintes parâmetros, entre os grupos obtidos na AF: OD, sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica e pH. De forma geral e indireta, esses parâmetros podem estar associados à presença de substâncias orgânicas na água. Vale destacar que os resultados detalhados a seguir são referentes ao período seco, portanto, o escoamento superficial não é tão contribuinte para a qualidade das águas. Maiores detalhamentos sobre esses parâmetros são apresentados em seguida.

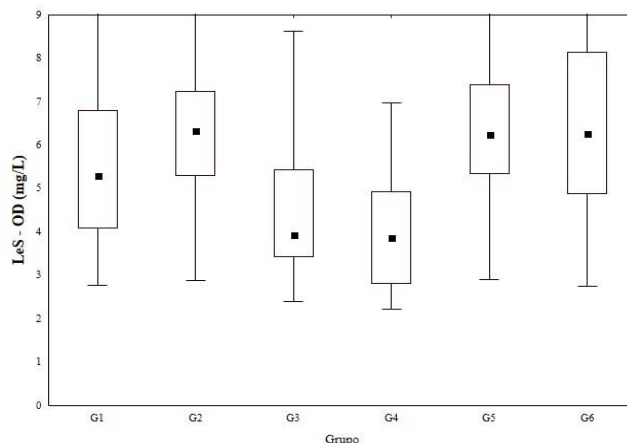
- Oxigênio Dissolvido (OD)

O resultado do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro OD (Tabela 6.18), no período seco, indica que os grupos 3 (T-PT-22-S, T-PT-22-ZF, T-PT-22-ZI, T-PT-22-F, T-TM-06-ZI, T-TM-06-F, T-TM-07-ZI, T-TM-07-F, T-PT-23-ZI, T-PT-23-F) e 4 (R-RB-02-ZI, R-RB-02-F) são significativamente inferiores frente aos demais grupos em estudo. Além disso, os valores das medianas não atendem ao limite previsto pela DN COPAM/CERH nº 01/2008, de superior a 5 mg/L, conforme pode-se observar na Figura 6.44. O fato desses grupos serem constituídos de amostragens efetuadas no fundo de alguns pontos, pode ter contribuído para o valor de mediana obtida, já que nessa profundidade, geralmente, os níveis de oxigênio dissolvido são reduzidos. Os grupos 1 (T-TM-04-S, T-TM-04-ZF, T-TM-04-ZI, T-TM-04-F, T-TM-05-S, T-TM-05-ZF, T-TM-05-ZI, T-TM-05-F) e 2 (T-TM-06-S, T-TM-06-ZF, T-TM-07-S, T-TM-07-ZF, T-PT-23-S, T-PT-23-ZF, T-PT-29-S) apresentaram medianas significativamente superiores aos grupos 3 e 4 e atendem ao limite mínimo de 5 mg/L previsto pela legislação vigente.

Tabela 6.18 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro OD, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lânticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

OD	1	2	3	4	5	6
1						
2	=					
3	↑	↑				
4	↑	↑	=			
5	=	=	↓	↓		
6	=	=	↓	↓	=	

Figura 6.44 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro OD que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lântico, na água, no período seco.



Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- Sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica

Por meio do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro sólidos dissolvidos totais (SDT) (Tabela 6.19), observa-se que, majoritariamente, os grupos 1, 2 e 3 apresentaram medianas significativamente inferiores quando comparado aos grupos 4, 5 e 6. Vale destacar que com o rompimento da barragem de rejeitos B1, os pontos de monitoramento mais próximos ao evento foram os mais diretamente afetados em termos de qualidade da água. O resultado observado na Figura 6.45 reforça isso, já que os pontos pertencentes aos grupos 4, 5 e 6 estão no reservatório da UHE Retiro Baixo, que contribuiu para a retenção dos rejeitos provenientes da B1. Os sólidos dissolvidos totais na água apresentaram comportamento análogo à condutividade (Tabela 6.20 e Figura 6.46).

Tabela 6.19 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro SDT, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

SDT	1	2	3	4	5	6
1						
2	=					
3	=	↓				
4	↓	↓	↓			
5	↓	↓	↓	=		
6	↓	↓	↓	=	=	

Tabela 6.20 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro condutividade elétrica, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Condutividade	1	2	3	4	5	6
1						
2	↑					
3	=	↓				
4	↓	↓	↓			
5	↓	↓	↓	=		
6	↓	↓	↓	=	=	

Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- pH

A análise do teste de comparação múltipla de *Dunn* para o parâmetro pH (Tabela 6.21 e Figura 6.47) revela que os grupos 1 e 6 apresentaram diferenças significativas perante os demais grupos. Por meio da Figura 6.47 observa-se que os valores de pH obtidos para o período seco estão dentro do limite previsto pela DN COPAM/CERH nº 01/2008.

Figura 6.45 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro SDT que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, na água, no período seco.

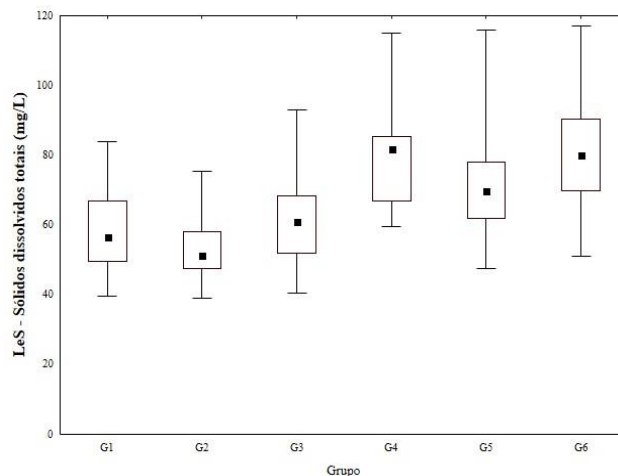


Figura 6.46 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro condutividade elétrica que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, na água, no período seco.

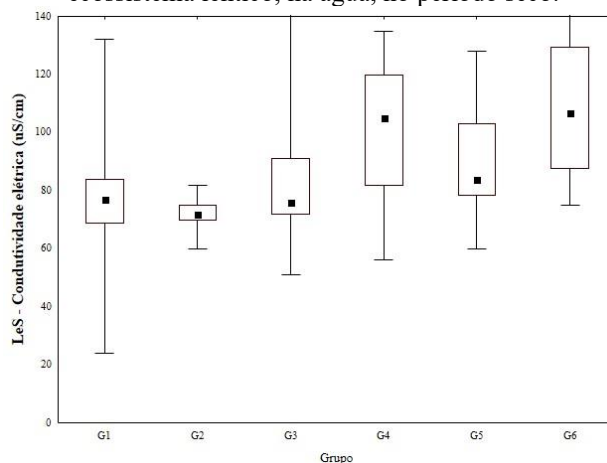
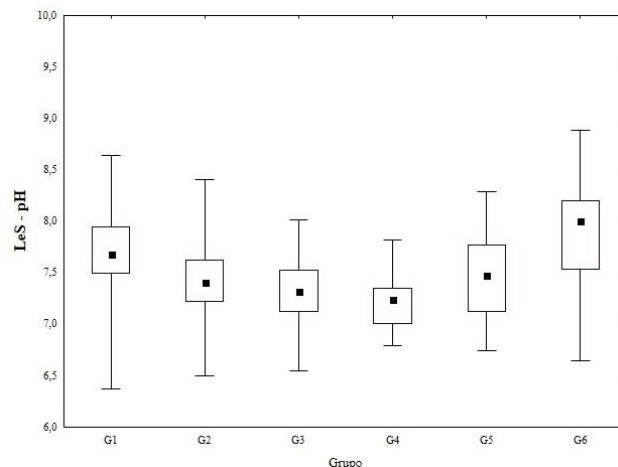


Tabela 6.21 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro pH, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lânticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

pH	1	2	3	4	5	6
1						
2	↑					
3	↑	=				
4	↑	=	=			
5	↑	=	=	=		
6	=	↓	↓	↓	↓	

Figura 6.47 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro pH que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lântico, na água, no período seco.

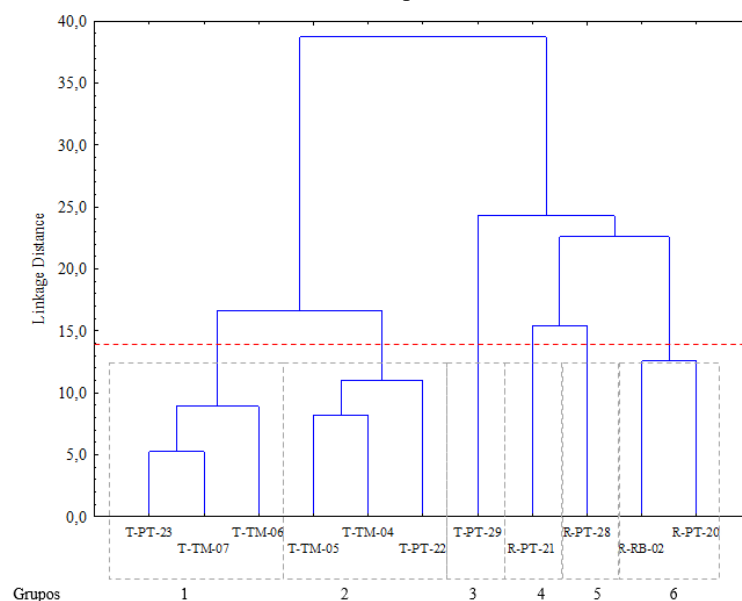


Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

6.4.1.2 Análise da qualidade dos sedimentos

O dendrograma gerado por meio dos agrupamentos é ilustrado na Figura 6.48. A altura de corte foi definida conforme metodologias já apresentadas nesse estudo, ou seja, a partir da distância de ligação e da localização geográfica dos pontos de monitoramento. A distância Euclidiana empregada foi de 14,00. Adotando-se esse critério, obteve-se um total de 6 grupos (Figura 6.48 e Tabela 6.22).

Figura 6.48 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lânticos, no período seco.



Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias.

Tabela 6.22 - Agrupamentos dos pontos de monitoramento conforme o resultado obtido por meio da AC aplicada aos dados de qualidade do sedimento, dos ecossistemas lânticos, no período seco (LeS).

Grupo	Pontos de Monitoramento
1	T-TM-06, T-TM-07, T-PT-23
2	T-PT-22, T-TM-04, T-TM-05
3	T-PT-29
4	R-PT-21
5	R-PT-28
6	R-PT-20, R-RB-02

Legenda: R = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Retiro Baixo; T = Ponto de monitoramento situado no reservatório da UHE Três Marias.

O maior número de diferença significativa, no período seco foi evidenciado para os parâmetros arsênio e mercúrio. Os mesmos serão detalhados a seguir.

- Arsênio

Por meio da Tabela 6.22 e da Figura 6.49 observa-se a que os grupos 5 (R-PT-28) e 6 (R-PT-20, R-RB-02) apresentam diferença significativa superior quando comparado aos demais grupos, para o parâmetro arsênio – sendo esse um possível indício da presença de substâncias tóxicas, além de poder ser proveniente das características geoquímicas locais. Observa-se que

todos esses pontos estão situados no reservatório da UHE Retiro Baixo, que contribuiu para a retenção dos rejeitos provenientes da B1.

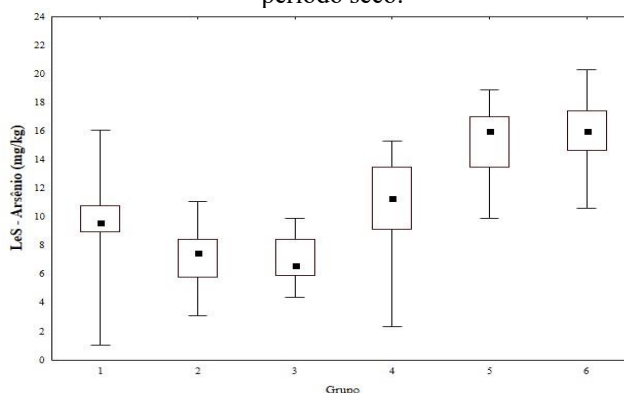
Estudo realizado pelo IGAM (2020a), com dados de 27 de janeiro de 2019 a 12 de dezembro de 2019 revelou que o arsênio nos sedimentos pode estar vinculado ao material presente no leito do rio Paraopeba, antes mesmo do evento do rompimento da barragem B1. Isso está vinculado ao fato de que esse parâmetro foi excedido (Nível 1) a montante do córrego Ferro Carvão.

A grande massa de rejeitos além de ter carreado o que foi encontrado ao longo do seu caminho, promoveu o revolvimento do sedimento, sendo esse um compartimento propício ao acúmulo de contaminantes. Entretanto, os resultados obtidos podem ou não possuir vínculo com o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Tabela 6.23 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro arsênio, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lânticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Arsênio	1	2	3	4	5	6
1						
2	↑					
3	=	=				
4	=	↓	=			
5	↓	↓	↓	=		
6	↓	↓	↓	↓	=	

Figura 6.49 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro arsênio que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lântico, no sedimento, no período seco.



Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

- Mercúrio

Já para o parâmetro mercúrio (Tabela 6.24 e Figura 6.50), observa-se que as diferenças significativas ocorrem principalmente nos grupos 3,4,5 e 6. Vale destacar que desses grupos, apenas o grupo 3 possui ponto no reservatório da UHE Três Marias (T-PT-29), sendo os demais no reservatório da UHE Retiro Baixo: grupo 4 (R-PT-21), grupo 5 (R-PT-28) e grupo 6 (R-PT-20, R-RB-02). Observa-se que dentro do reservatório da UHE Retiro Baixo existem pontos com

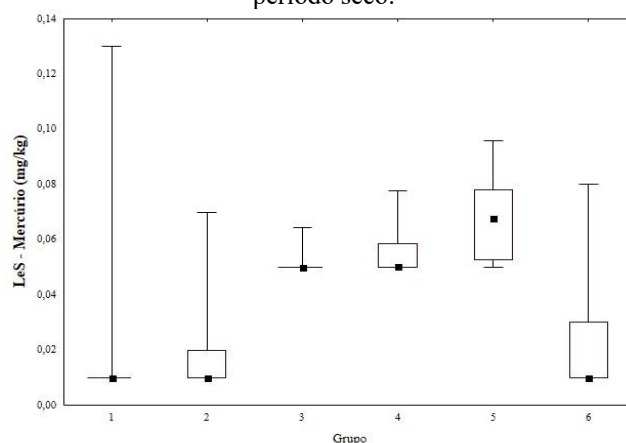
maiores teores de mercúrio, visto que os grupos 4 e 5 são significativamente superiores ao grupo 6.

Resultados obtidos pelo IGAM (2020a), baseando-se nos resultados observados de 27 de janeiro de 2019 a 12 de dezembro de 2019, indicaram que o mercúrio nos sedimentos pode estar vinculado ao evento, já que corroboram com os resultados apresentados para os parâmetros ferro e manganês. Entretanto, as análises nesse período, para os trechos a partir do remanso da UHE Retiro Baixo, “não se observa alterações dos valores de mercúrio que possam indicar interferência do material proveniente da barragem B1 nos sedimentos” (IGAM, 2020a). Portanto, assim como o arsênio, os resultados obtidos para esse parâmetro na área em estudo podem ou não possuir vínculo direto ou indireto com rompimento da barragem de rejeitos B1.

Tabela 6.24 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro mercúrio, no sedimento, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ecossistemas lênticos e período seco, por grupo formado, ao nível de significância de 5%.

Mercúrio	1	2	3	4	5	6
1						
2	=					
3	↓	↓				
4	↓	↓	=			
5	↓	↓	=	=		
6	=	=	=	↓	↓	

Figura 6.50 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro mercúrio que apresentou diferença significativa entre os grupos do dendrograma, no ecossistema lêntico, no sedimento, no período seco.



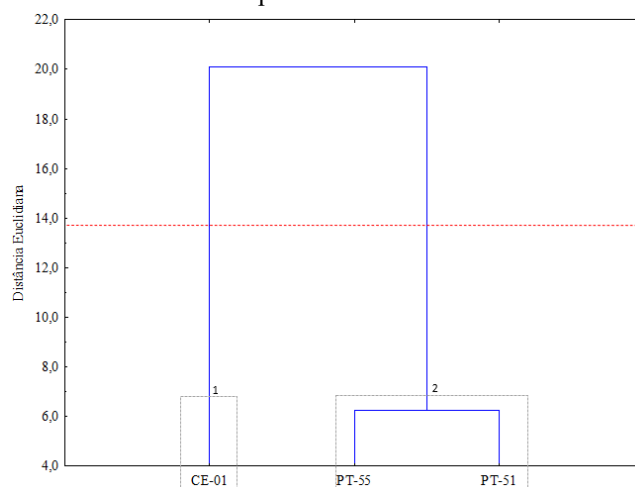
Legenda: (↑) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente maiores do que no grupo apresentado na linha. (↓) Valores no grupo apresentado na coluna são significativamente inferiores do que no grupo apresentado na linha. (=) Valores entre os grupos em questão não se diferem significativamente.

6.4.2 Ecossistemas lóticos

6.4.2.1 Análise da qualidade da água

O agrupamento obtido pela AC para os ecossistemas lóticos, no período seco, é composto pelos mesmos pontos de monitoramento no período chuvoso - Figura 6.51. A distância Euclidiana empregada foi de 13,86.

Figura 6.51 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade da água, nos ecossistemas lóticos, no período seco.



A AF resultou em três Fatores, que juntos explicam 81,4% da variabilidade dos dados, sendo que apenas os Fatores 1 e 2 explicam cerca de 71% dos dados (Tabela 6.25). Os parâmetros que são correlacionados positivamente ao Fator 1 são: alumínio, ferro, fósforo e manganês totais, COT, sólidos suspensos, temperatura e turbidez. Já os parâmetros sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica estão correlacionados negativamente ao Fator 2 (Tabela 6.25). O gráfico das carga dos dois primeiros fatores é apresentado na Figura 6.52.

Vale destacar que os resultados são referentes ao período seco, portanto, diferente do período chuvoso, o escoamento superficial não é tão contribuinte para a qualidade das águas. Os resultados obtidos podem ser indícios das características geoquímicas locais e estarem vinculados ao avanço da pluma de rejeitos provenientes da barragem B1.

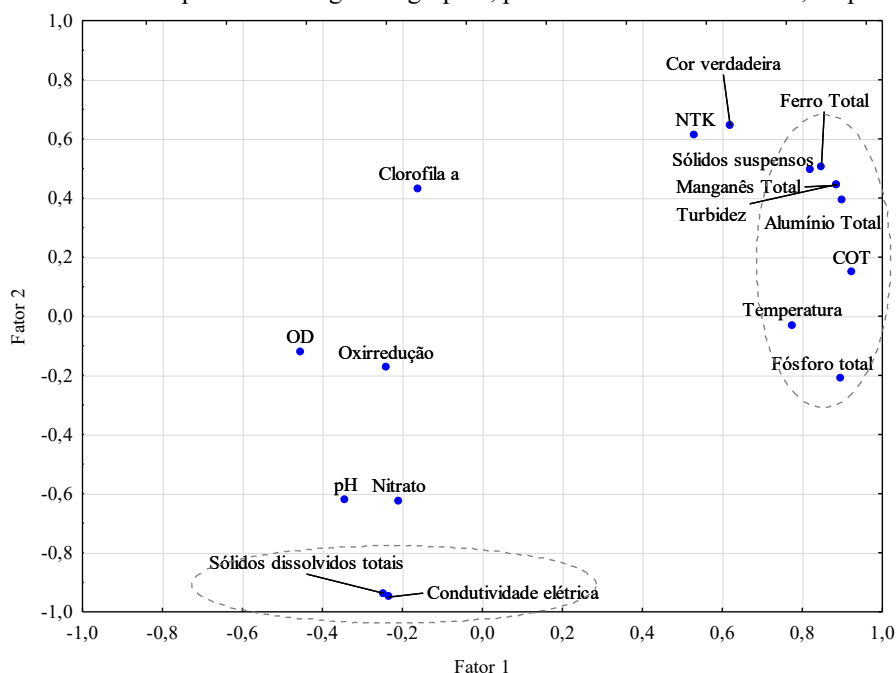
Sabe-se que o teor de sólidos dissolvidos influencia tanto na cor, quanto na condutividade da água. Esses parâmetros podem estar vinculados as causas listadas para o Fator 1, além dos lançamentos de efluentes sanitários.

Tabela 6.25 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para cada Fator após rotação *varimax raw* da AF, referentes ao grupo 2 formado pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lóticos, no período seco.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Alumínio Total	0,90	0,39	0,00
COT	0,92	0,15	0,05
Clorofila <i>a</i>	-0,16	0,43	-0,68
Ferro Total	0,85	0,51	0,01
Fósforo total	0,90	-0,21	0,08
Manganês Total	0,89	0,44	-0,01
Nitrato	-0,21	-0,63	0,02
NTK	0,53	0,61	-0,29
OD	-0,46	-0,12	0,74
Sólidos dissolvidos totais	-0,25	-0,94	-0,02
Sólidos suspensos	0,82	0,50	0,03
Condutividade elétrica	-0,24	-0,95	0,06
Cor verdadeira	0,62	0,65	0,05
pH	-0,34	-0,62	0,08
Oxirredução	-0,24	-0,17	-0,87
Temperatura	0,78	-0,03	-0,16
Turbidez	0,89	0,45	0,02
Variabilidade (%)	56,95	14,38	10,10
% Acumulada	56,95	71,33	81,44

Vermelho - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75).

Figura 6.52 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores extraídos após rotação *varimax raw da AF*, referentes às análises de qualidade da água do grupo 2, para os ecossistemas lóticos, no período seco.



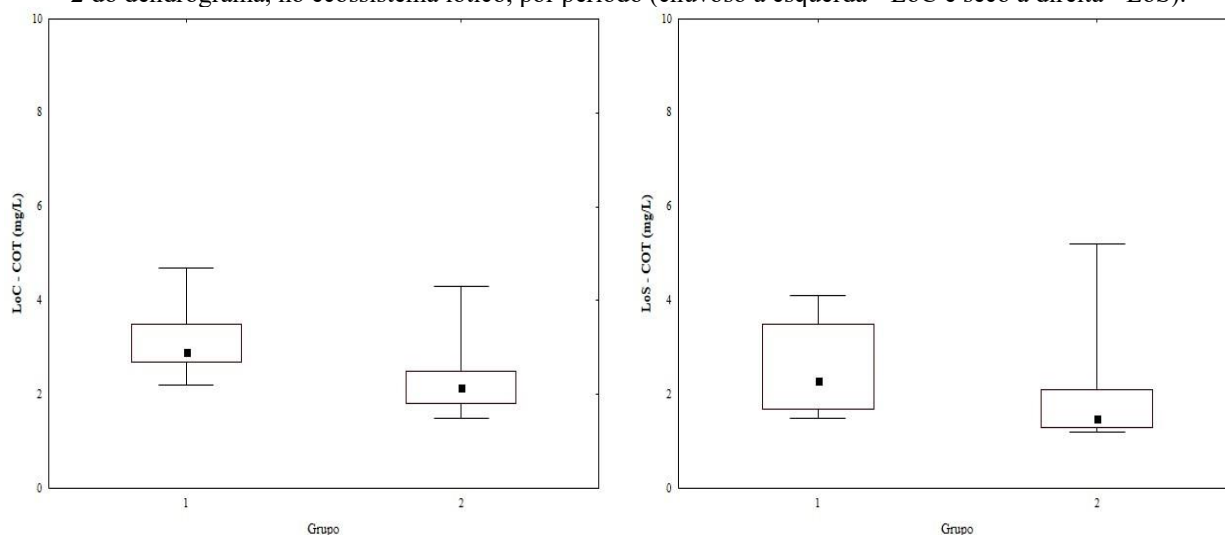
Dentre os parâmetros que apresentaram diferença significativa no teste não-paramétrico U de *Mann-Whitney*, nos ecossistemas lóticos, verificou-se que o COT foi o único que apresentou maior mediana para o grupo 1 (CE-01), em contrapartida nitrato, sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica e temperatura possuíram maiores valores no grupo 2 (PT-51 e PT-55).

O resultado obtido para o grupo 2 para os parâmetros sólidos dissolvidos totais e condutividade elétrica pode estar vinculado ao uso e ocupação a montante, no rio Paraopeba; ao escoamento superficial sobre as áreas desprovidas de cobertura vegetal e das áreas diretamente afetadas pelo rompimento da barragem B1, que apresentam acúmulo de rejeitos; além da dispersão do próprio rejeito no ambiente aquático. Além disso, esses parâmetros juntamente com o nitrato e a temperatura podem estar associados aos lançamentos de efluentes sanitários. O nitrato pode ser advindo do escoamento superficial, principalmente, proveniente de áreas onde são desenvolvidas atividades agropecuárias.

Para a análise da dinâmica água-sedimento foram apresentados os gráficos *box-plots* dos parâmetros que apresentaram diferença significativa e que são comuns à água e aos sedimentos, nesse caso, representado pelo parâmetro COT. Para esse parâmetro observou-se que de forma geral as medianas foram superiores no período chuvoso e isso pode estar vinculado ao

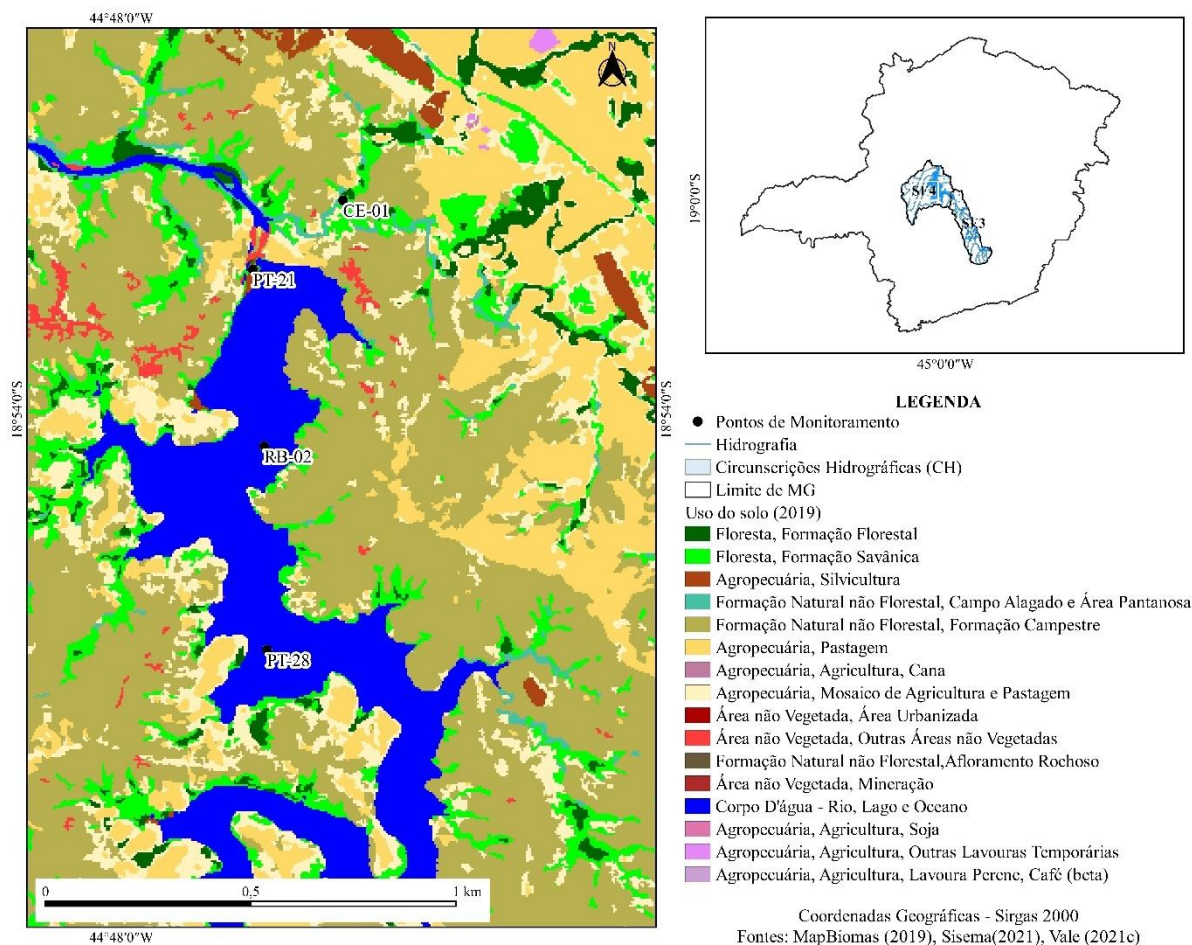
escoamento superficial. Além disso, tanto no período seco, quanto no chuvoso, as medianas foram maiores para o grupo 1 (Figura 6.53), ou seja, para o afluente do rio Paraopeba.

Figura 6.53 - Gráficos *box-plots* para o parâmetro COT que apresentou diferença significativa entre os grupos 1 e 2 do dendrograma, no ecossistema lótico, por período (chuvoso à esquerda - LoC e seco à direita - LoS).



O COT é um indicador de poluição e pode ter sua origem da biomassa das comunidades aquáticas, efluentes e resíduos de forma geral. No caso do ponto CE-01, sua concentração na água pode estar associada ao uso do solo do entorno. Observa-se na Figura 6.54, no entorno desse ponto existem formações campestres e savânicas, além de áreas de pastagem, que podem ter contribuído para o aumento de COT no período chuvoso, mediante ao escoamento superficial.

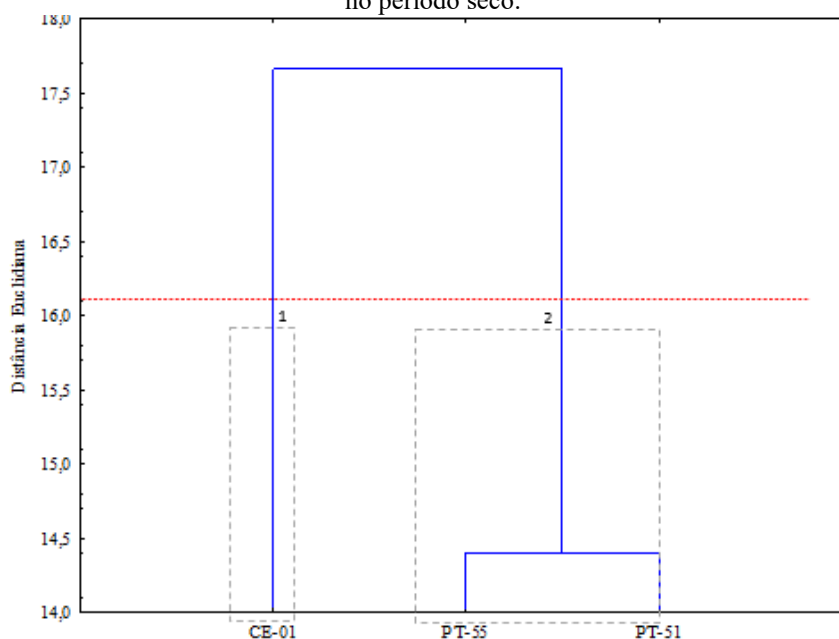
Figura 6.54 - Uso do solo no entorno do ponto de monitoramento CE-01, situado no afluente do rio Paraopeba.



6.4.2.2 Análise da qualidade dos sedimentos

Os agrupamentos dos pontos de monitoramento, em função da qualidade do sedimento, no período seco são apresentados na Figura 6.55. O corte foi efetuado na distância Euclidiana de 16,03.

Figura 6.55 - Dendrograma da AC para o banco de dados de qualidade do sedimento, nos ecossistemas lóticos, no período seco.



A AF dos dados resultou em dois Fatores, que juntos explicam cerca de 92,6% da variabilidade dos dados. A maioria dos parâmetros estão associados ao Fator 1 que explica de 80% da variabilidade dos dados, exceto para os parâmetros cromo e níquel. Levando-se em consideração que esse grupo é formado por apenas dois fatores, o teste U de *Mann-Whitney* revelou que o cromo e o níquel apresentaram diferença significativa entre os valores das medianas apenas no ponto PT- 55 (Anexo I).

Os parâmetros que são correlacionados positivamente ao Fator 1 são: alumínio, ferro, fósforo e manganês totais, COT, sólidos suspensos, temperatura e turbidez. O gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores é apresentado na Figura 6.56.

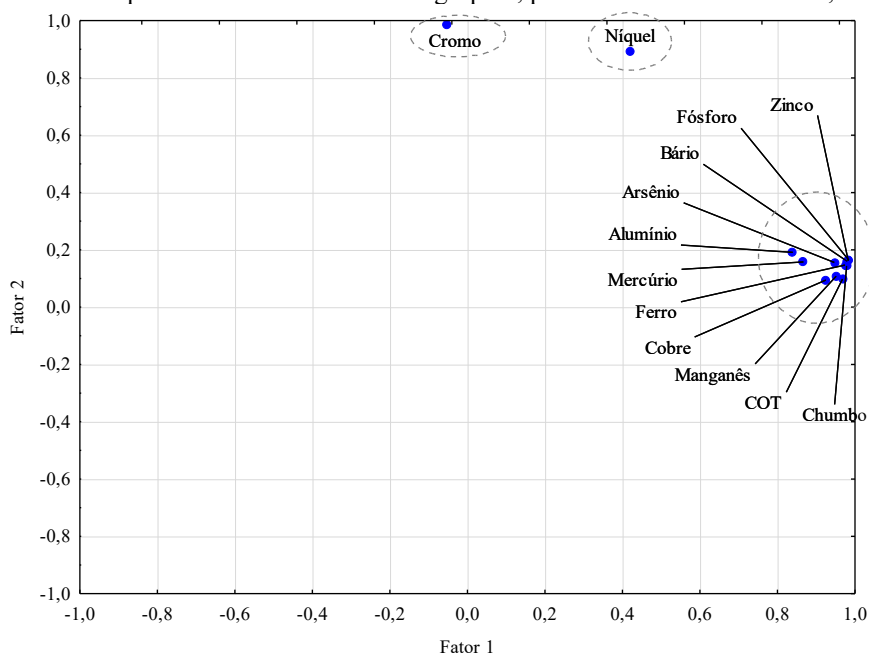
Observa-se que o resultado obtido para o período seco difere do período chuvoso, uma vez que a AF resultou em dois Fatores, enquanto no período chuvoso obteve-se um único fator. Além disso, no período chuvoso observou-se que todos os parâmetros estavam negativamente correlacionados, enquanto no período seco, os que possuíam correlação forte foram positivamente correlacionados.

Tabela 6.26 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade do sedimento para cada Fator após rotação *varimax raw* da AF, referentes ao grupo 2 formado pela Análise de Cluster, para os ecossistemas lóticos, no período seco.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2
Alumínio	0,84	0,19
Arsênio	0,95	0,16
Bário	0,98	0,16
COT	0,97	0,10
Chumbo	0,98	0,14
Cobre	0,93	0,09
Cromo	-0,05	0,99
Ferro	0,97	0,15
Fósforo	0,98	0,16
Manganês	0,95	0,11
Mercúrio	0,87	0,16
Níquel	0,42	0,89
Zinco	0,98	0,16
Variabilidade (%)	80,16	12,44
% Acumulada	80,16	92,61

Vermelho - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75).

Figura 6.56 - Gráfico das cargas dos dois primeiros Fatores extraídos após rotação *varimax raw* da AF, referentes às análises de qualidade dos sedimentos do grupo 2, para os ecossistemas lóticos, no período seco.



Por meio da Figura 6.57 e da Figura 6.58 verifica-se que as medianas dos valores de alumínio (Figura 6.57), bário e COT (Figura 6.58), no período seco, foram superiores no grupo 1, enquanto cromo e níquel foram maiores no grupo 2. Embora o rompimento, inevitavelmente,

tenha causado um impacto negativo imensurável no ambiente aquático, as elevadas concentrações de alumínio e COT foram observadas no grupo 1, cujo ponto está situado em um afluente do rio Paraopeba, ou seja, no trecho não impactado pelo rompimento.

Em relação ao cromo e baseando na análise de violação, que levou em consideração todo o banco de dados, observa-se que, diferente do ponto CE-01, os pontos PT-51 e PT-55 ultrapassaram o limite proposto para o Nível 2, pela CONAMA 454/2012. Entretanto, avaliando-se os valores das medianas dos valores empregados nas análises multivariadas, observou-se que grupo 2 ultrapassou o limite previsto para o nível 1 (37,3 mg/Kg), mas não para o nível 2 (90 mg/Kg). Segundo IGAM (2020a), baseando-se nos dados de 27 de janeiro de 2019 a 12 de dezembro de 2019, as alterações de cromo nos sedimentos podem ser provenientes de fontes externas ao evento do rompimento.

Figura 6.57 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro alumínio no sedimento que apresentou diferença significativa entre os grupos 1 e 2 do dendrograma, no ecossistema lótico, no período seco.

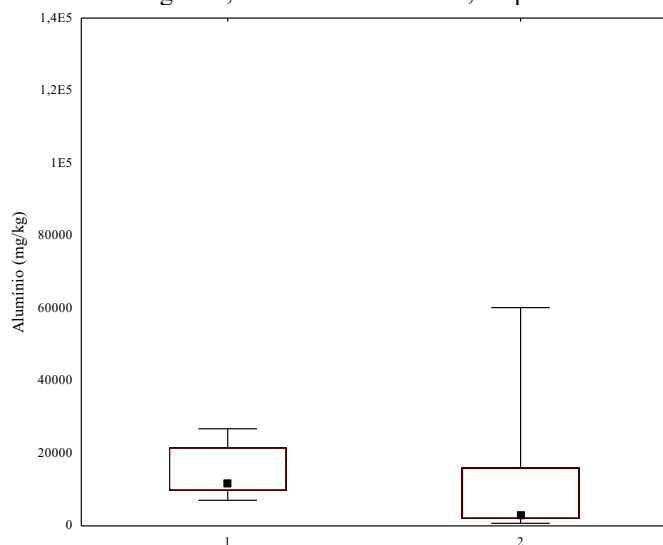
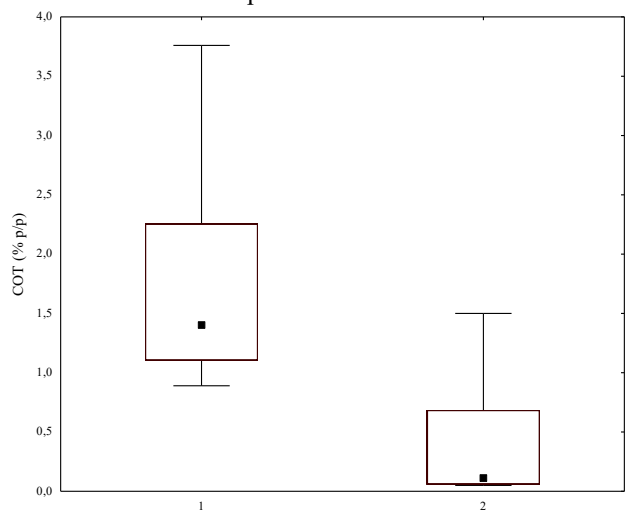


Figura 6.58 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro COT no sedimento que apresentou diferença significativa entre os grupos 1 e 2 do dendrograma, no ecossistema lótico, no período seco.



6.5 Comparação entre a qualidade da água antes e após o rompimento

Foi efetuada a comparação entre os dados dos pontos de monitoramento que existiam previamente ao rompimento, pertencentes à Rede Básica do IGAM (2021). A síntese do resultado do teste U de *Mann-Whitney* é apresentada na Tabela 6.27, sendo evidenciados em vermelho os resultados que apresentaram medianas significativamente superiores para os dados após o rompimento.

Tabela 6.27 - Resultado do teste U de *Mann-Whitney* para os dados de qualidade da água antes e pós-rompimento, para os pontos de monitoramento situados em ecossistemas lóticos, antes e após o reservatório da UHE Retiro Baixo, por período em estudo.

Parâmetros	Antes de Retiro Baixo (BP078/PT-19)		Depois de Retiro Baixo (BP099/JRB-01)	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
Ferro dissolvido	X	X	-	X
Manganês total	X	X	-	-

Legenda: X - Diferença significativa entre as medianas dos valores. Em **vermelho** os resultados que apresentaram medianas significativamente superiores no pós-rompimento.

Observa-se por meio dos resultados obtidos na Tabela 6.27, que as diferenças significativas antes e após o rompimento se deram, predominantemente, no ponto de monitoramento situado a montante da UHE Retiro Baixo. Maiores detalhamentos dos resultados obtidos serão apresentados a seguir.

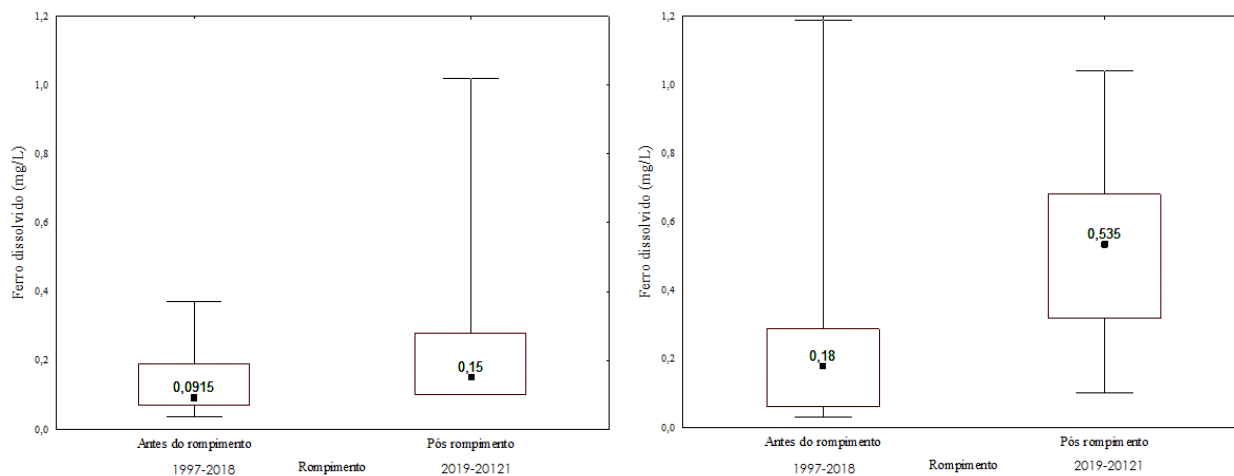
6.5.1 Ferro dissolvido

Por meio da análise da Figura 6.59 observa-se que no ponto de monitoramento situado antes do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP078/PT-19) as medianas foram significativamente superiores após o rompimento, tanto no período seco, quando no chuvoso. Isso pode estar vinculado à contribuição do material alóctone proveniente do rejeito, visto que a estação em questão está situada no rio Paraopeba, impactado pelo rompimento, e situado a cerca de 249,80 km de distância do evento.

Dentre os parâmetros que confirmaram a alteração na qualidade da água na bacia do rio Paraopeba, em virtude do rompimento da Barragem B1 está o ferro dissolvido (SOARES, 2021). O resultado obtido nesse trabalho reforça o observado por Soares (2021).

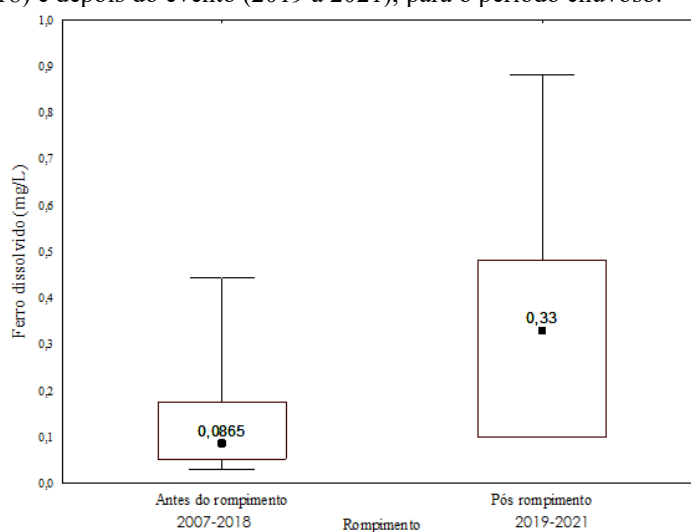
Destaca-se que no período chuvoso as características geoquímicas locais, juntamente com a intensificação dos processos de escoamento superficial e lixiviação do solo, podem contribuir para a elevação dos valores de ferro dissolvido na água. Nos locais diretamente afetados, cujo rejeito encontra-se acumulado, esse material pode ser carregado pelas chuvas, contribuindo assim, para a alteração da qualidade das águas a jusante.

Figura 6.59 - Gráficos *box-plots* para o parâmetro ferro dissolvido que apresentou diferença significativa para o ponto de monitoramento situado a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP078/PT-19) antes do rompimento (1997-2018) e depois do evento (2019 a 2021), sendo à esquerda para o período seco e à direita para o chuvoso.



No ponto de monitoramento situado depois da UHE Retiro Baixo, no período chuvoso (Figura 6.60), observa-se a elevação dos valores da mediana. Destaca-se que esse ponto está situado após a confluência do Ribeirão dos Gomes, que contribui para a qualidade das águas do rio Paraopeba a jusante da UHE Retiro Baixo.

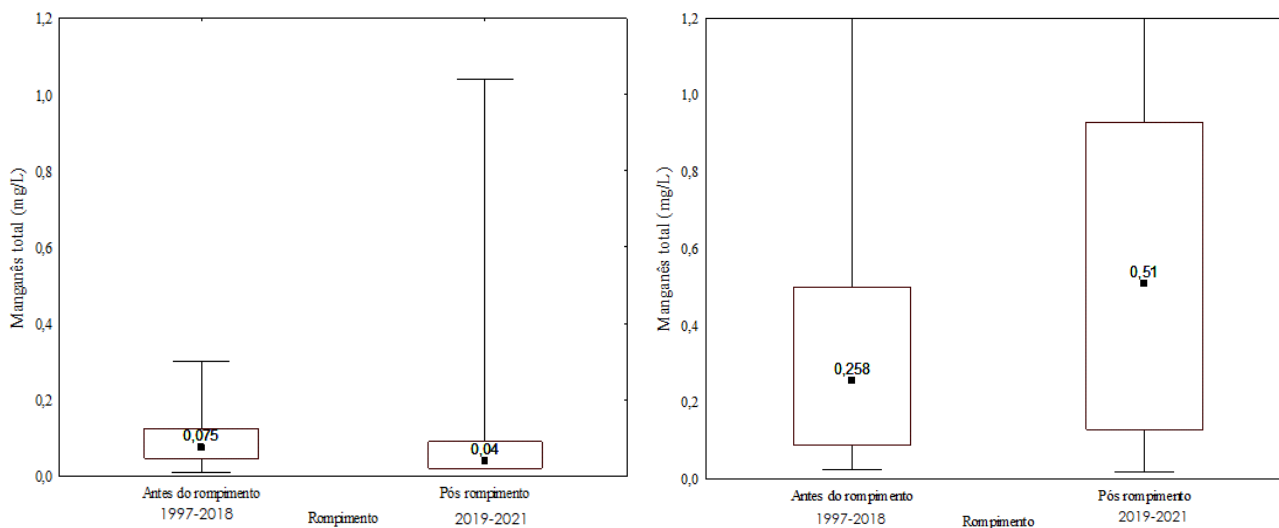
Figura 6.60 - Gráficos *box-plots* para o parâmetro ferro dissolvido que apresentou diferença significativa para o ponto de monitoramento situado a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP099/JRB-01), antes do rompimento (2007-2018) e depois do evento (2019 a 2021), para o período chuvoso.



6.5.2 Manganês total

Através da Tabela 6.26 observa-se que apenas o ponto de monitoramento situado antes do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP078/PT-19) apresentou diferença significativa entre os valores observados, para ambos os períodos em estudo. Por meio da Figura 6.61 observa-se que no período seco houve uma redução da mediana pós-rompimento, em contrapartida, no período chuvoso houve um aumento. Dentre as causas da alteração da qualidade da água está a contribuição do rejeito, que intensificou os valores desse parâmetro no ambiente aquático pelo fato de ser um metal abundante no sedimento.

Figura 6.61 - Gráficos *box-plots* para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa para o ponto de monitoramento situado a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP078/PT-19), antes do rompimento (1997-2018) e depois do evento (2019 a 2021), sendo à esquerda para o período seco e à direita para o chuvoso.



6.6 Comparação entre a qualidade da água após o rompimento antes e após a UHE Retiro Baixo

As características geoquímicas locais do Quadrilátero Ferrífero contribuem com os teores de ferro e manganês nos ambientes aquáticos, de forma natural, entretanto, existe a possibilidade de a bacia ser impactada por empreendimentos adjacentes. Os metais ferro e manganês totais são diretamente relacionados ao rejeito de minério ferro (IGAM, 2020a).

O rompimento se deu no dia 25 de janeiro de 2019 e, em 18 de fevereiro de 2019 foi confirmada a chegada da pluma de rejeitos no reservatório da UHE Retiro Baixo (BARROS, 2019). Embora o evento tenha ocorrido em janeiro, as análises do PMQS-TM apenas se iniciaram em abril/2019. No mês de abril, segundo IGAM (2020a), as chuvas ocorreram acima da média. Vale destacar que as chuvas contribuem para a alteração da qualidade das águas, tendo em vista que favorece o carreamento de compostos diversos para o ambiente aquático

Por meio da Figura 6.62, Tabela 6.28, Figura 6.63 e da Tabela 6.29, observa-se que tanto no período seco, quanto no chuvoso houve diferença significativa entre a maioria dos pontos de monitoramento para o parâmetro ferro total. Analisando-se os pontos PT-55 (antes da UHE Retiro Baixo) e PT-57 (depois da UHE Retiro Baixo) nos distintos períodos, observa-se que houve uma redução da mediana das concentrações após esse reservatório, entretanto, isso já era

esperado pelo fato dos reservatórios serem propícios a deposição desse material alóctone, devido à redução drástica de velocidade.

Embora o ferro e o manganês possuam comportamento similares, observou-se que não houve diferença significativa para o manganês total entre os pontos de monitoramento PT-55 e a PT-57, no período seco (Tabela 6.30 e Figura 6.64). Já no período chuvoso verificou-se que a mediana no PT-57 foi significativamente inferior ao observado no PT-55 (Tabela 6.31 e Figura 6.65).

Tabela 6.28 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro ferro total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período seco, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.

Pontos	PT-19	PT-51	PT-55	PT-57	CE-01	JRB-01
PT-19						
PT-51	↑					
PT-55	=	=				
PT-57	↑	↑	↑			
CE-01	↑	=	=	↓		
JRB-01	↑	↑	↑	*	=	

Figura 6.62 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro ferro total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período seco.

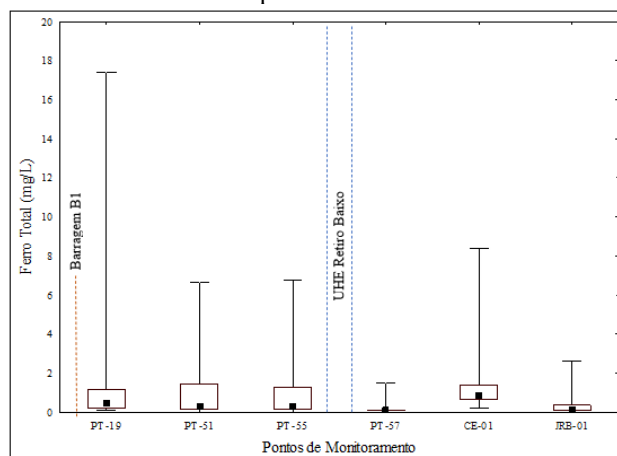


Tabela 6.29 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro ferro total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período chuvoso, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.

Pontos	PT-19	PT-51	PT-55	PT-57	CE-01	JRB-01
PT-19						
PT-51	↑					
PT-55	=	=				
PT-57	↑	↑	↑			
CE-01	↑	=	=	↓		
JRB-01	↑	↑	↑	=	↑	

Tabela 6.30 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro manganês total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período seco, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.

Pontos	PT-19	PT-51	PT-55	PT-57	CE-01	JRB-01
PT-19						
PT-51	↑					
PT-55	↑	=				
PT-57	↑	=	=			
CE-01	=	↓	↓	=		
JRB-01	=	↓	↓	=	=	

Figura 6.63 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro ferro total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período chuvoso.

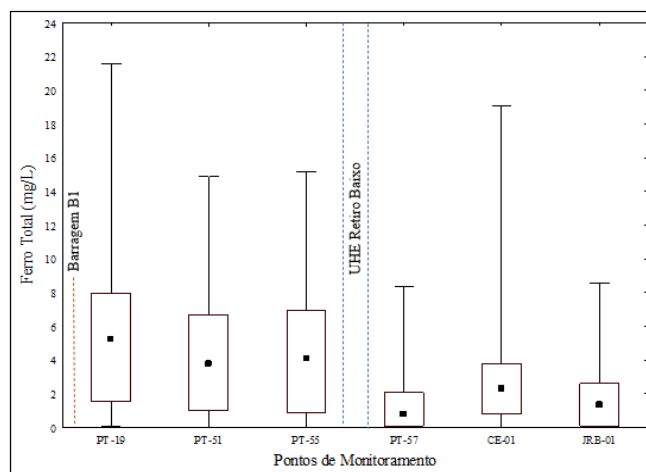


Figura 6.64 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período seco.

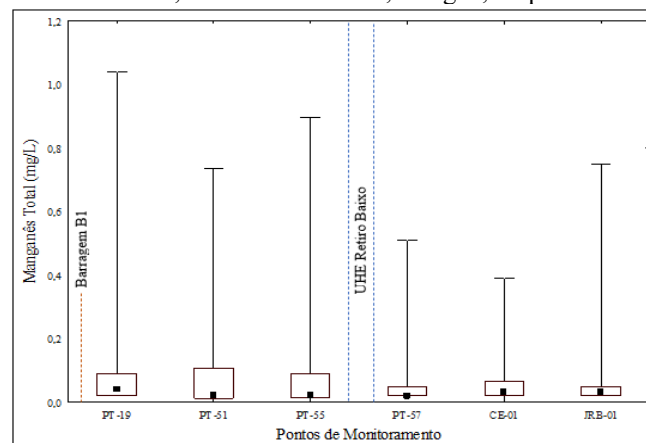
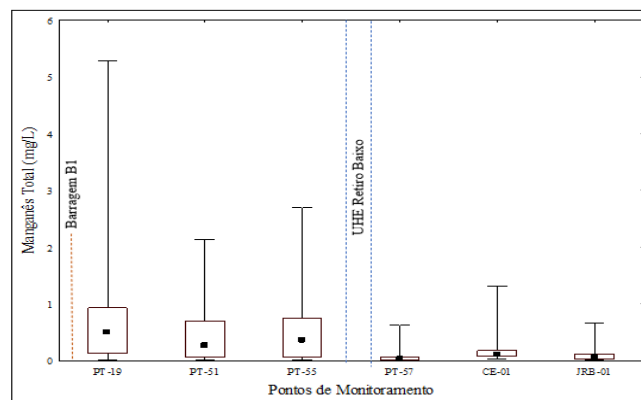


Tabela 6.31 - Resultados do teste de comparações múltiplas de *Dunn* para o parâmetro manganês total, na água, após diferença indicada pelo teste de KW ($p < 0,05$), nos ambientes lóticos e período chuvoso, por ponto de monitoramento, ao nível de significância de 5%.

Pontos	PT-19	PT-51	PT-55	PT-57	CE-01	JRB-01
PT-19						
PT-51	↑					
PT-55	↑	=				
PT-57	↑	↑	↑			
CE-01	↑	↑	↑	↓		
JRB-01	↑	↑	↑	↓	↑	

Figura 6.65 - Gráfico *box-plot* para o parâmetro manganês total que apresentou diferença significativa entre os pontos de monitoramento, no ambiente lótico, na água, no período chuvoso.



7 CONCLUSÕES

Como já enfatizado, o rompimento da barragem B1, na mina Córrego do Feijão, provocou grandes alterações nos ecossistemas aquáticos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba. A escolha da área de estudo do presente trabalho visou analisar os parâmetros de qualidade da água e sedimentos na região da bacia hidrográfica onde estão localizados os reservatórios de Retiro Baixo e Três Marias. As principais conclusões do presente estudo são:

- verifica-se que os parâmetros de qualidade da água que apresentaram diferença significativa entre as medianas para o período seco e chuvoso, ou seja, mais influenciados pela sazonalidade, foram: temperatura, NTK, turbidez, cor, ferro total, manganês e alumínio totais;
- os parâmetros ferro, manganês, cor e a turbidez possuíram um comportamento similar, com as maiores medianas observadas nos pontos situados mais próximo ao local do rompimento (PT-51 - a 267 km e PT-55 - a 282 km de distância do rompimento) no período chuvoso. Vale destacar que o impacto do acúmulo de rejeito proveniente da barragem B1 pode estar relacionado ao aumento da concentração desses parâmetros no período chuvoso, devido ao escoamento superficial;
- as maiores medianas de ferro total, no período chuvoso, estão presentes nos pontos de monitoramento mais próximos ao local do rompimento (PT-51 - 3,77 mg/L e PT-55 - 4,05 mg/L) e há uma redução do valor no interior do reservatório da UHE Retiro Baixo;
- ainda na comparação entre os períodos seco e chuvoso, foram observadas diferenças significativas entre as medianas dos valores de potencial de oxirredução, alumínio e COT monitorados nos sedimentos, para os pontos de monitoramento do rio Paraopeba;
- as medianas dos teores de alumínio nos sedimentos geralmente são mais elevadas nos ecossistemas lânticos, quando comparado aos lóticos, com destaque para os valores observados no reservatório da UHE Retiro Baixo - que contribuiu para a retenção dos rejeitos provenientes da barragem B1;
- os parâmetros que apresentaram elevados percentuais de violação na água, medidos na superfície dos ambientes lóticos e lânticos foram: alumínio dissolvido, ferro dissolvido, cor

verdadeira, manganês total e turbidez. Essas violações podem ser consequência do impacto do rejeito proveniente do rompimento da barragem B1;

- a ocorrência de não conformidades foi observada para os parâmetros sólidos suspensos, cor verdadeira e turbidez, na superfície dos ecossistemas lóticos - sendo o PT-51 e PT-55 impactados pelo rompimento;
- nos sedimentos, os valores dos parâmetros alumínio, ferro e manganês, foram superiores aos valores de referência, tanto nos períodos chuvosos, quanto nos secos, em ambos os ecossistemas, lótico e lêntico;
- pela análise dos valores de referência é possível inferir que o sedimento do reservatório da UHE Retiro Baixo apresenta maiores concentração de metais do que o sedimento do reservatório da UHE Três Marias, com destaque para os valores de arsênio, níquel e cromo;
- observou-se que as maiores concentrações ou valores medianos dos parâmetros de qualidade da água se deram nos ambientes lóticos, enquanto as maiores medianas dos parâmetros de qualidade dos sedimentos se deram nos ecossistemas lênticos, o que pode indicar a maior sedimentação dos poluentes nos reservatórios;
- os agrupamentos formados nas Análises de Cluster refletiram as similaridades entre as diferentes profundidades monitoradas nos reservatórios, assim como a influência dos tributários;
- a AF, considerando os resultados obtidos para os ambientes lênticos, indicou os parâmetros de qualidade da água alumínio, ferro, fósforo e manganês totais, cor e turbidez como os que mais contribuíram para a variabilidade dos dados. Esses são parâmetros que podem estar diretamente ligados ao impacto do rejeito após o rompimento;
- pela comparação entre os dados dos pontos de monitoramento que existiam previamente ao rompimento da barragem B1, confirma-se a alteração da qualidade da água na bacia do rio Paraopeba, principalmente quando são avaliados os valores de ferro.

8 RECOMENDAÇÕES

Aos futuros trabalhos a serem desenvolvidos empregando o banco de dados do PMQS-TM, recomenda-se que as seguintes questões sejam abordadas e/ou aprofundadas:

- Realizar a análise integrada dos resultados das análises químico-físicas e biológicas, com os ensaios de ecotoxicidade e os de biomonitoramento, caso existente.
- Analisar o ambiente aquático considerando um quantitativo maior de dados de qualidade da água e de sedimentos e avaliar a se houve ou não uma tendência de redução das medianas das concentrações dos parâmetros avaliados ao longo do espaço.
- Comparar a qualidade da água nos reservatórios em diferentes profundidades entre os pontos de monitoramento (superfície, zona fótica, zona intermediária e fundo), com o intuito de compreender melhor a dinâmica da coluna d'água nesses ambientes, sendo possível efetuar comparações entre eles.
- Empregar dados de estações pluviométricas para aprofundar a discussão entre os resultados obtidos em função da sazonalidade e das estações do ano.
- Explorar a correlação entre os parâmetros de qualidade que forem comuns ao banco de dados de água e de sedimentos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Cuidando das Águas: soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos**/Agência Nacional de Águas, Agência Nacional de Águas, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2. ed. Brasília: ANA, 2013, 157 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA; COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS - COPASA; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo nº1 - Informativo diário 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 de Brumadinho - Minas Gerais**. Belo Horizonte: 2019a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA; COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS - COPASA; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo nº61 - Informativo trimestral da qualidade das águas 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**. Belo Horizonte: 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA; COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS - COPASA; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo Mensal da qualidade das águas 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**. Belo Horizonte: 2019b.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. **Nota à Imprensa**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/2019/nota-a-imprensa-2>. Acesso em: 21 abr. 2021.

AGUILAR, D. C. .; COUTINHO DE PAULA, E. Avaliação da sazonalidade na qualidade da água do rio Paraopeba. In: **III Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - SBHRSF**. Belo Horizonte/MG, p. 1-8, 2020.

ALMEIDA, D F; MARTINS, A H; TUNDISI, J G. Weight-of-evidence on environmental impact assessment of metal contaminated sediments in the São Francisco River (Três Marias-Minas Gerais-Brazil): a case study. **Brazilian Journal of Biology**, 71: 961-973, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000500016>.

ALMEIDA, K. C. de B. **Avaliação da rede de monitoramento de qualidade das águas superficiais da Bacia do rio das Velhas utilizando o método da entropia**. 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

AMPLO ENGENHARIA E GESTÃO DE PROJETOS LTDA. **EIA: Estudo de Impacto Ambiental**. Volume I. Licenciamento Ambiental Corretivo das Obras Emergenciais decorrentes da ruptura da barragem da Mina Córrego do Feijão e recuperação ambiental de sua área de influência. Empreendedor: VALE S.A. 2019a.

AMPLO ENGENHARIA E GESTÃO DE PROJETOS LTDA. **RIMA: Relatório de Impacto Ambiental**. Licenciamento Ambiental Corretivo das Obras Emergenciais decorrentes da ruptura da barragem da Mina Córrego do Feijão e recuperação ambiental de sua área de influência. Empreendedor: Vale S.A. 2019b.

ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; DISNEY, W.; ALVES, A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.3, p.683-690, 2007.

ARMSTRONG, M.; PETTER, R.; PETTER, C. Why have so many tailings dams failed in recent years? **Resources Policy**, v. 63, p. 101412, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>.

BARROS, D. **Pluma de rejeitos chega a Retiro Baixo**. 2019. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/comites-afluentes/pluma-de-rejeitos-chega-a-retiro-baixo/>. Acesso em: 9 jun. 2021.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. **Numerical Ecology with R**. Baltimore: Springer, 2011, 306p.

CALAZANS, G M. **Avaliação e proposta de adequação da rede de monitoramento da qualidade das águas superficiais das sub-bacias do rio das Velhas e do rio Paraopeba, utilizando técnicas estatísticas multivariadas**. 2015. 196 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CALAZANS, G. M.; PINTO, C. C.; COSTA, E. P. da; PERINI, A. F.; OLIVEIRA, S. C. The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 8, 1 ago. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6873-2>.

CARR, G.M.; NEARY, J.P. **Water Quality for Ecosystem and Human Health**. UNEP/Earthprint, 2008.

CARVALHO, G. de. **Vídeo mostra o momento exato em que barragem da Vale se rompe em Brumadinho**. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/01/video-mostra-o-momento-exato-em-que-barragem-da-vale-rompe-em-brumadinho.ghtml>. Acesso em: 16 abr. 2021.

CHRISTOFARO, C. **Avaliação probabilística de risco ecológico de metais nas águas superficiais da Bacia do rio das Velhas - MG**. 2009. 274 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2009.

CIENIAWSKI, S. **A Guidance Manual to Support the Assessment of Contaminated Sediments in Freshwater Ecosystems**. Volume III – Interpretation of the Results of Sediment Quality Investigations. 2002.

COMEX STAT. **Minério de ferro e seus concentrados**. 2020. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. Acesso em: 8 abr. 2021.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ENTORNO DA REPRESA DE TRÊS MARIAS (SF4) – CBH SF4. **CBH do Entorno da Represa de Três Marias (SF4) – MINAS GERAIS**.

Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-entorno-da-represa-de-tres-marias-sf4-minas-gerais/>. Acesso em: 9 jun. 2021.

COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS - COBRAPE. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba** / Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. São Paulo: COBRAPE, 2020.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM. **Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995**. Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. 1995.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. **Deliberação Normativa COPAM nº 217, de 06 de dezembro de 2017**. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locacionais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL - COPAM; CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CERH-MG. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH 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, e dá outras providências. 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução 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, e dá outras providências. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução Nº 454, de 01 de novembro de 2012**. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. 2012.

COSTA, E. P. da; MELO, L. D. V.; SOARES, A. L. C.; PINTO, C. C.; BARROSO, G. R.; SOUZA, G. A.; OLIVEIRA, J. C. de; CARVALHO, D. M. de; OLIVEIRA, S. M. A. C.de. **Evolução temporal da qualidade das águas na sub-bacia hidrográfica da represa da Pampulha entre os anos de 2006 e 2016**. In: 3º Congresso Internacional RESAG, 2017. Belo Horizonte, p. 1–15, 2017.

COSTA, P. da. **Avaliação da qualidade das águas superficiais de reservatórios e seus tributários por meio de abordagens quali-quantitativas : estudo de caso dos reservatórios de Emborcação e Nova Ponte**. 2021. 176 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

COSTA, R. de V. F. da. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. Programa de Pós- Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, 2015.

COTTA, J. A. O.; REZENDE, M. O. O.; PIOVANI, M. R. Avaliação do teor de metais em sedimento do Rio Betari no parque estadual turístico do Alto Ribeira - PETAR, São Paulo, Brasil. **Química Nova**, v. 29, n. 1, p. 40–45, 2006. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000100009>.

COURA, M. R. **Análise da alteração da qualidade das águas superficiais impactadas por usinas hidrelétricas recém implantadas na Amazônia**. 2020. 228 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Monitoramento Especial da Bacia Do Rio Paraopeba - Relatório I: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil, 2019.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Monitoramento Especial da Bacia Do Rio Paraopeba - Relatório V: Monitoramento Geoquímico Primeira Campanha**. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil, 2020.

CRUZ, D. G. da.; NOGUEIRA, F. C.; ROSSI, D. Q.; PEREIRA, T. M.; FERREIRA, R. F. Análise fatorial multivariada aplicada na caracterização de contaminantes de um depósito de minério de ferro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 248–252, 2018.

DANTAS, M. S. **Análise integrada do tratamento de esgotos domésticos e da qualidade das águas superficiais nas bacias do rio das Velhas e dos rios Jequitai e Pacuí - MG**. 2020. 228 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

DAVIS, C. **Bacia do ribeirão Ferro-Carvão**. 2020a. Disponível em: http://ide.projetoalumadinho.ufmg.br/layers/geonode:bacia_ferro_carvao/metadata_detail. Acesso em: 26 jan. 2021a.

DAVIS, C. **Hidrografia da bacia do ribeirão Ferro-Carvão**. 2020b. Disponível em: http://ide.projetoalumadinho.ufmg.br/layers/geonode_data:geonode:rib_ferro_carvao. Acesso em: 26 jan. 2021b.

DE ALMEIDA, C. A.; ROCHA, O. Estudo comparativo da qualidade dos sedimentos dos reservatórios do rio Tietê (SP). **J. Braz. Ecotoxicol**, v. 1, n. 2, p. 141-145, 2006. Disponível em: 10.5132/jbse.2006.02.010.

EGGLETON, J.; THOMAS, K. V. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. **Environment International**, v. 30, n. 7, p. 973–980, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001>.

ESTEVES, F. de A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FERNANDES, T. de S.; GOMES, L. N. L. Avaliação do comportamento de parâmetros limnológicos de qualidade da água na região mais profunda do Lago Paranoá/DF. In: **XIV ENEEAmb**. Brasília/DF, p. 924-930, 2016. ISSN 2357-7592, DOI 10.5151/engpro-eneeamb2016-rh-009-4938.

FERREIRA, D. B. F.; BARROSO, G. R.; CODOVA, J. E.; DANTAS, M.S.; OLIVEIRA, S.M.A.C. Análise de séries temporais pluviométricas na porção mineira da bacia hidrográfica

do Rio São Francisco. In: **III Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Anais. Belo Horizonte: 2020.

GAMA ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa Três Marias: R5 - Relatório Final, Fase A - Diagnóstico Estratégico e Cenários de Desenvolvimento Volume I - Meio Físico-Biótico e Disponibilidades Hídricas**. Maceió, 2015, 267 p.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GUIMARÃES, J. I. **O Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais. Estudo de caso: Bacia do rio Doce**. 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

GUIMARÃES, J. I.; SOARES, A. L. C.; PINTO, C. C.; OLIVEIRA, E. P. da C.; MELO, L. D. V.; OLIVEIRA, J. C. de; ALKIMIM, A. R.; CARVALHO, D. M.de; SOUZA, G. A.; DANTAS, M. S.; BARROSO, G. R.; OLIVEIRA, S.C. O Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais. Estudo de caso: Bacia do rio Doce. In: **XXII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos** - ABRH. Florianópolis: 2017.

HAIR JR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009, 688 p.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M.A.; REZENDE, C. E. de; SCHETTINI, C. A. França; SOUZA, G.C. de; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P.C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **História**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/historico>. Acesso em: 15 fev. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: 2016.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Avaliação da qualidade da águas e sedimentos do Rio Paraopeba: acompanhamento da qualidade das águas do Rio Paraopeba após 1 ano do rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA - Brumadinho/MG**. Caderno Especial. Belo Horizonte: IGAM, 2020a.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Boletim Anual da Qualidade das Águas na Bacia Hidrográfica do Entorno da Represa de Três Marias**. Belo Horizonte: Igam, 2018a.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Boletim Anual de Qualidade das Águas na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba**. Belo Horizonte: Igam, 2018b.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Dados de Qualidade das Águas – Série Histórica de Parâmetros de Qualidade das Águas e do Índice de Qualidade de Água (IQA) do ano de 1997 a 2019**. 2021. Disponível em:

<http://www.igam.mg.gov.br/component/content/article/16-duvidas/2438--acessar-dados-e-boletins-de-qualidade-das-aguas-em-minas-gerais-temporario>. Acesso em: 15 jan. 2022.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Identificação de municípios com condição crítica para a qualidade de água na bacia do rio Paraopeba**. Belo Horizonte: 2013.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo Especial Avaliação da série histórica entre 2000 e 2018 : Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale**. Belo Horizonte: 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Shapefile da Hidrografia Monitorada do rio Paraopeba**. 2020b.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA; COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS - COPASA. **Informativo nº57 - Informativo diário 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 De Brumadinho- Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM, n.57, 2020, 281 p.

LIMA, G. F. C. **Análise Geoquímica de Metais Pesados em Sedimentos de Corrente na Represa da Cemig - Três Marias/MG: distribuição e influência dos processos naturais e antropogênicos**. 2020. 137 f. Dissertação (Mestrado) – IGC – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

LIU, C. W.; LIN, K. H.; KUO, Y. M. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. **Science of The Total Environment**, v. 313, n. 1–3, p. 77–89, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6).

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. A situação do monitoramento das águas no Brasil – instituições e iniciativas. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 113–135, jul. 2000. Disponível em: [10.21168/rbrh.v5n3.p113-135](https://doi.org/10.21168/rbrh.v5n3.p113-135).

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomias – Coleção 6.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. 2019. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 3 maio 2021.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005, 297 p.

OLIVEIRA, J. C. de; SOARES, A. L. C.; DANTAS, M. S. ; MELO, D. V.; PINTO, C.C.; GUIMARÃES, J. I.; ALKIMIM, A. R.; CARVALHO, D. M. de; SOUZA, G. A.; SENA, V. H. de; BARROSO, G. R.; OLIVEIRA, S. A. C. Análise da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Pará - MG. In: **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - ABRH**. Florianópolis, p. 1–8, 2017.

OLIVEIRA, J.C. de; MAIA, K.P.; CASTRO, N. L.B. de; OLIVEIRA, S. M. A. C. Spatial-temporal analysis of the surface water quality of the Pará River Basin through statistical

techniques. **Revista Ambiente e Água**, v. 14, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2322>.

PARRON, L. M.; DAPHNE, H. de F. M.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/921050/1/Doc232ultimaversao.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2021.

PINTO, C. C. **Monitoramento de qualidade de água baseado em análise por componentes principais: uma abordagem local**. 2021. 151 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2021.

PINTO, C. C.; CALAZANS, G. M.; OLIVEIRA, S. C. Assessment of spatial variations in the surface water quality of the Velhas River Basin, Brazil, using multivariate statistical analysis and nonparametric statistics. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 3, p. 1–13, 2019. Disponível em: 10.1007/s10661-019-7281-y.

PINTO, C. C.; PERINI, A.F. A.; MARCONDES, F. S.; OLIVEIRA, S. C. Análise de tendência da qualidade das águas superficiais da sub - bacia do entorno do reservatório de Furnas. In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - SBRH**. Brasília: p. 1–8, 2015.

PINTO, I.; RODRIGUES, S.; LAGE, O. M.; ANTUNES, S. C. Assessment of water quality in Agueira reservoir: Ecotoxicological tools in addition to the Water Framework Directive. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111583, 2021.

POMPÊO, M.; KAWAMURA, P.; MOSCHINI-CARLOS, V.; SILVA, S. C. da; LOBO, F. de L.; MEIRINHO, P. do A.; BITENCOURT, M. D.; MEIRELLES, S.T. Capítulo 6: Heterogeneidade Espacial horizontal da qualidade da água no reservatório Rio Grande, Complexo Billings, São Paulo, Brasil. **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015, 460 p.

QUADRA, G. R.; ROLAND, F.; BARROS, N.; MALM, O.; LINO, A. S.; AZEVEDO, G. M.; THOMAZ, J. R.; ANDRADE-VIEIRA, L. F.; PRAÇA-FONTES, M. M.; ALMEIDA, R.M.; MENDONÇA, R. F.; CARDOSO, S.J.; GUIDA, Y. S.; CAMPOS, J.M. S. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. **Chemosphere**, v. 215, p. 753–757, 2019. Disponível em: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.104.

REZENDE, P. S. de. **Avaliação da Distribuição e Mobilidade de Elementos Traço em Sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SABINO, C. V. S.; LAGE, L. V.; ALMEIDA, K. C. DE B. Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambientais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 87–94, 2014.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - SEMAD; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM; INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Caderno 1 ano - Rompimento das barragens da Vale em Brumadinho: Bacia do Rio Paraopeba**. 2020. Disponível em: <http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba>. Acesso em: 23 abr.2021.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - SEMAD; FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM; INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Caderno de 2 anos: Recuperação da bacia do rio Paraopeba após o rompimento das barragens da Vale.** 2021. Disponível em: <http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba>. Acesso em: 18 fev.2021.

SIMEONOV, V.; EINAX, J. W.; STANIMIROVA, I.; KRAFT, J. **Environmetric modeling and interpretation of river water monitoring data.** *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 374, n. 5, p. 898-905, 2002.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.** Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2021. Disponível em: idesisema.meioambiente.mg.gov.br. Acesso em: 22 jan. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS – *SNISB*. **Painel de Informações do SNISB.** 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYjk1NjE3ZjQtNmIzNi00YzIxLWE5Y2UtMTZlZDZjZDc0MTJlIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGItNDY5YS04YjRkLTUyN2ZjZDFiYWY4OCJ9>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SOARES, A. F. S. S.; SOARES, F. S. Avaliação da qualidade da água do Rio Paraopeba em Brumadinho, após rompimento da barragem B1 e considerações técnicas acerca da alteração do ponto de captação nesse manancial para abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 1160, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n1-091>.

SOARES, A. L. C.; DUARTE, S. F.; GOMES, L. N. L.; OLIVEIRA, S.C.; Impacto do rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro da Mina do Feijão, em Brumadinho, quanto ao uso e à cobertura do solo e à qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 27, n. 2, p. 356–381, 2021. Disponível em: 10.35699/2316-770X.2020.20557.

SOARES, A. L. C.; PINTO, C. C.; OLIVEIRA, S. C. Impacts of anthropogenic activities and calculation of the relative risk of violating surface water quality standards established by environmental legislation: a case study from the Piracicaba and Paraopeba river basins, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 12, p. 14085–14099, 2020. Disponível em: 10.1007/s11356-020-07647-1.

SOARES, A. L.C. **Identificação dos corpos d'água mais impactados das bacias dos rios Piracicaba e Paraopeba e cálculo do risco relativo de violação aos limites preconizados pela legislação ambiental.** 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SOARES, A.L.C **Bacia hidrográfica do rio Paraopeba: análise integrada dos diferentes impactos antrópicos.** 2021. 384 f. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

- SOUZA, T. da S.; BARONE, L. da S. F.; LACERDA, D.; VERGILIO, C. dos S.; OLIVEIRA, B. C. V. de; ALMEIDA, M. G. de; THOMPSON, F.; REZENDE, C. E. de. Cytogenotoxicity of the water and sediment of the Paraopeba River immediately after the iron ore mining dam disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 775, p. 145193, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145193>.
- TERAMOTO, E. H.; GEMEINER, H.; ZANATTA, M. B. T.; MENEGÁRIO, A. A.; CHANG, H. K. Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure. **Science of the Total Environment**, v. 757, p. 143917, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143917>.
- THOMPSON, F.; OLIVEIRA, B. C. de; CORDEIRO, M. C.; MASI, B. P.; RANGEL, T. P.; PAZ, P.; FREITAS, T.; LOPES, G.; SILVA, B. S.; CABRAL, A. S.; SOARES, M.; LACERDA, D.; VERGILIO, C. dos S.; LOPES-FERREIRA, M.; LIMA, C.; THOMPSON, C.; REZENDE, C. E. de. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, v. 705, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>.
- TRINDADE, A. L. C. **Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do Rio São Francisco**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- TRINDADE, A. L. C.; ALMEIDA, K. C. de B.; BARBOSA, P. E.; OLIVEIRA, S. Maria A. C. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 13–24, 2017.
- TUNDISI, J. G. (Coord.). **Recursos Hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014.
- VALE S.A. **Base de dados do PMQS-TM - água e sedimentos**, 2021d.
- VALE S.A. **Dados de Reparação: resultado das buscas**. Disponível em: <http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/Brumadinho.aspx>. Acesso em: 21 abr. 2021b.
- VALE S.A. **Monitoramento da Qualidade da Água do rio Paraopeba**. 2021c. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualiza-coes_brumadinho/SiteAssets/reparacao/docs/agua/VAL2650-7_MAR21_cartilha_monitoramento_agua_rio_paraopeba_cartilha_a5_v10REV.pdf. Acesso em 29 dez. 2021.
- VALE S.A. **Programa Especial De Monitoramento da Qualidade da Água e dos Sedimentos do Reservatório de Três Marias e Entorno (PMQS-Três Marias): Atendimento ao Ofício nº 65/2019/AA-CD-ANA. Versão 04C-Errata-21/01/2021**. 2021a.
- VERGILIO, S.; LACERDA, D.; OLIVEIRA, B. C. V. de; SARTORI, E.; CAMPOS, G. M.; PEREIRA, A. L. de S.; AGUIAR, D. B. de; SOUZA, T. da S.; ALMEIDA, M. G. de; THOMPSON, F.; REZENDE, C. E. de. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, 2020. Disponível em: [10.1038/s41598-020-62700-w](https://doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w).

VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco**. Belo Horizonte: 2018.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014, 472 p.

VON SPERLING, M.; VERBYLA, M. E.; OLIVEIRA, S. M. A. C. **Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners**. London: 2020.

WISE URANIUM PROJECT. **Chronology of major tailings dam failures**. 2021. Disponível em: <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>. Acesso em: 16 abr. 2021.

ZHANG, X.; WANG, Q.; LIU, Y.; WU, J.; YU, M. Application of multivariate statistical techniques in the assessment of water quality in the Southwest New Territories and Kowloon, Hong Kong. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 173, p. 17–27, 2011. Disponível em: 10.1007/s10661-010-1366-y.

APÊNDICE I

Tabela I.1 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade da água, por ponto de monitoramento, no ecossistema lótico, no período seco (em cinza) e no chuvoso (em azul), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-51	Alumínio total (mg/L)	0,0666	0,5350	0,1420	2,7500	0,5600	5,0500
PT-55	Alumínio total (mg/L)	0,0744	0,4895	0,1330	2,8800	0,4650	5,2550
CE-01	Alumínio total (mg/L)	0,0607	0,1080	0,1010	0,7220	0,1760	2,4800
PT-51	Carbono orgânico total (mg/L)	1,4000	2,2000	1,6000	2,7000	2,0000	3,4000
PT-55	Carbono orgânico total (mg/L)	1,4000	2,2000	1,6000	2,7000	2,1000	3,5500
CE-01	Carbono orgânico total (mg/L)	1,6000	3,0000	2,1000	3,6500	2,7000	4,3000
PT-51	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0010	0,0010	0,0010	0,0015	0,0012	0,0033
PT-55	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0010	0,0010	0,0010	0,0015	0,0010	0,0040
CE-01	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0032
PT-51	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	109,0000	73,0000	124,0000	93,0000	143,0000	126,0000
PT-55	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	108,0000	70,5000	123,0000	93,0000	143,0000	126,5000
CE-01	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	32,7000	28,5000	36,2500	39,1000	42,0000	66,0000
PT-51	Cor verdadeira (mg Pt/L)	8,9000	37,9000	18,1000	93,2000	32,9000	170,0000
PT-55	Cor verdadeira (mg Pt/L)	7,7000	41,3500	15,9000	95,5500	32,6000	183,5000
CE-01	Cor verdadeira (mg Pt/L)	22,1000	43,1000	37,5500	83,0500	50,5000	123,5000
PT-51	Ferro total (mg/L)	0,1260	1,0000	0,2955	3,7700	1,4500	6,6900
PT-55	Ferro total (mg/L)	0,1310	0,8560	0,3025	4,0500	1,2800	6,9200
CE-01	Ferro total (mg/L)	0,6540	0,7780	0,8850	2,3250	1,4000	3,7700
PT-51	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0245	0,0314	0,0645	0,0708
PT-55	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0221	0,0329	0,0590	0,0770
CE-01	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0121	0,0131
PT-51	Manganês total (mg/L)	0,0124	0,0619	0,0215	0,2765	0,1080	0,7055
PT-55	Manganês total (mg/L)	0,0142	0,0629	0,0204	0,3620	0,0908	0,7410
CE-01	Manganês total (mg/L)	0,0219	0,0834	0,0314	0,1090	0,0654	0,1785
PT-51	Nitrato (como N) (mg/L)	1,3000	1,2700	2,0000	1,6500	2,6500	2,0400
PT-55	Nitrato (como N) (mg/L)	1,2000	1,2350	1,8900	1,6700	2,5800	2,0950
CE-01	Nitrato (como N) (mg/L)	0,5000	0,5000	0,5000	0,7050	0,5600	1,2450
PT-51	Nitrogênio <i>Kjedahl</i> total (mg/L)	0,3700	0,5000	0,4100	0,5900	0,5000	0,7800
PT-55	Nitrogênio <i>Kjedahl</i> total (mg/L)	0,3700	0,5000	0,4200	0,5900	0,5000	0,7800
CE-01	Nitrogênio <i>Kjedahl</i> total (mg/L)	0,4200	0,5000	0,5000	0,5850	0,5000	0,7350
PT-51	Oxigênio dissolvido (mg/L)	7,1000	6,3000	7,5000	6,6000	7,9000	6,9000
PT-55	Oxigênio dissolvido (mg/L)	7,3000	6,9000	7,7000	7,1000	8,0000	7,4000
CE-01	Oxigênio dissolvido (mg/L)	5,7000	4,2500	7,0000	6,1000	8,0000	7,5000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-51	pH (em campo)	7,4000	6,8400	7,7000	7,0700	7,8100	7,3800
PT-55	pH (em campo)	7,5700	6,7900	7,8000	7,1200	7,9500	7,4400
CE-01	pH (em campo)	7,1300	7,0900	7,4250	7,3500	7,6900	7,6200
PT-51	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	178,0000	201,6000	208,3000	240,3000	236,1000	272,9000
PT-55	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	178,3000	187,2000	209,9000	217,2000	234,8000	249,1500
CE-01	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	170,1000	160,1000	204,4500	192,1000	239,5000	213,6000
PT-51	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	80,0000	56,0000	88,0000	72,0000	100,0000	96,0000
PT-55	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	78,0000	56,0000	88,0000	74,0000	100,0000	96,0000
CE-01	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	26,0000	22,0000	30,0000	30,0000	38,0000	80,0000
PT-51	Sólidos suspensos (mg/L)	5,0000	13,5000	7,0000	56,5000	18,0000	126,5000
PT-55	Sólidos suspensos (mg/L)	5,0000	13,0000	5,0000	67,0000	16,0000	143,0000
CE-01	Sólidos suspensos (mg/L)	5,0000	5,0000	5,0000	15,5000	10,0000	64,0000
PT-51	Temperatura da amostra (°C)	20,5000	25,6000	22,6000	26,2000	25,1000	27,2000
PT-55	Temperatura da amostra (°C)	20,7000	25,5000	22,8000	26,3000	25,1000	27,2500
CE-01	Temperatura da amostra (°C)	17,9000	23,7000	19,8000	24,4000	22,2000	25,4000
PT-51	Turbidez (in Situ) (NTU)	4,2300	28,9000	9,5250	162,0000	46,0000	301,0000
PT-55	Turbidez (in Situ) (NTU)	4,5000	31,8000	8,7450	187,0000	44,5000	361,0000
CE-01	Turbidez (in Situ) (NTU)	5,9900	7,5100	10,6000	57,0000	19,6000	199,5000

Legenda: S: período seco; C: período chuvoso.

Tabela I.2 - Estatística descritiva os parâmetros de qualidade da água, por ponto de monitoramento, no ecossistema lântico, no período seco (em cinza) e no chuvoso (em azul), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-20	Alumínio total (mg/L)	0,0400	0,2400	0,0700	1,1400	0,1800	2,5250
PT-28	Alumínio total (mg/L)	0,0251	0,0278	0,0445	0,5060	0,1405	1,5800
RB-02	Alumínio total (mg/L)	0,0200	0,0400	0,0400	0,7050	0,1700	1,7800
PT-21	Alumínio total (mg/L)	0,0159	0,0195	0,0348	0,1530	0,1500	1,3500
PT-22	Alumínio total (mg/L)	0,0300	0,1500	0,0600	0,7500	0,0900	1,5700
TM-04	Alumínio total (mg/L)	0,0200	0,3800	0,0400	0,9750	0,0700	2,2250
TM-05	Alumínio total (mg/L)	0,0200	0,0700	0,0300	0,2050	0,0450	0,4800
TM-06	Alumínio total (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0500	0,0450	0,2200
TM-07	Alumínio total (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0400	0,0400	0,1150
PT-23	Alumínio total (mg/L)	0,0400	0,0500	0,0200	0,0200	0,0200	0,0250
PT-29	Alumínio total (mg/L)	0,0015	0,0042	0,0127	0,0129	0,0259	0,0258
PT-20	Carbono orgânico total (mg/L)	2,0000	3,0000	2,0000	4,0000	3,0000	4,5000
PT-28	Carbono orgânico total (mg/L)	1,7000	1,9000	1,9000	2,3000	2,2000	2,9000
RB-02	Carbono orgânico total (mg/L)	2,0000	3,0000	2,3000	3,0000	3,0000	4,0000
PT-21	Carbono orgânico total (mg/L)	1,6000	1,8000	1,8500	2,2000	2,2000	2,9000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-22	Carbono orgânico total (mg/L)	2,2000	3,0000	3,0000	3,3000	3,4000	4,0000
TM-04	Carbono orgânico total (mg/L)	2,6000	3,0000	3,0000	4,0000	4,0000	5,0000
TM-05	Carbono orgânico total (mg/L)	2,6000	3,0000	3,0000	3,0000	4,0000	4,0000
TM-06	Carbono orgânico total (mg/L)	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	4,0000	4,0000
TM-07	Carbono orgânico total (mg/L)	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	4,0000	4,0000
PT-23	Carbono orgânico total (mg/L)	4,0000	4,0000	3,0000	3,0000	3,0000	4,0000
PT-29	Carbono orgânico total (mg/L)	1,9000	1,8000	2,0000	2,0000	2,2000	2,3000
PT-20	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011	0,0021	0,0021
PT-28	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0023	0,0023	0,0039	0,0040	0,0054	0,0064
RB-02	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011
PT-21	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0015	0,0017	0,0023	0,0028	0,0034	0,0041
PT-22	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011	0,0021	0,0011
TM-04	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011	0,0021	0,0021
TM-05	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0011	0,0014	0,0011	0,0043
TM-06	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011	0,0011	0,0032
TM-07	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0008	0,0008	0,0010	0,0011	0,0011	0,0021
PT-23	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0011	0,0021	0,0008	0,0008	0,0011	0,0011
PT-29	Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0010	0,0010	0,0011	0,0015	0,0016	0,0021
PT-20	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	104,0000	73,0000	129,0000	88,0000	146,0000	132,0000
PT-28	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	83,2000	65,7000	89,5000	78,0000	98,0000	101,0000
RB-02	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	97,0000	72,0000	115,0000	95,0000	130,0000	128,0000
PT-21	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	81,0000	67,9000	88,0000	78,0000	96,1000	104,0000
PT-22	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	90,0000	66,0000	103,0000	95,0000	109,0000	116,0000
TM-04	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	77,0000	59,0000	86,0000	75,0000	88,0000	93,0000
TM-05	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	75,0000	69,0000	82,0000	81,5000	86,0000	91,0000
TM-06	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	73,0000	68,0000	75,0000	76,0000	77,0000	83,0000
TM-07	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	72,0000	67,0000	74,0000	74,5000	75,0000	79,0000
PT-23	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	75,0000	78,0000	71,0000	72,0000	72,0000	75,0000
PT-29	Condutividade elétrica (em campo) (uS/cm)	66,7000	69,0000	69,0000	73,0000	71,7000	82,0000
PT-20	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	19,0000	10,0000	63,0000	11,0000	85,0000
PT-28	Cor verdadeira (mg Pt/L)	6,5000	8,3000	12,9500	62,5000	31,7000	157,0000
RB-02	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	10,0000	10,0000	49,0000	15,0000	81,0000
PT-21	Cor verdadeira (mg Pt/L)	5,9000	6,4000	12,6000	38,8000	30,2000	148,0000
PT-22	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	10,0000	10,0000	53,0000	10,0000	77,5000
TM-04	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	25,5000	10,0000	52,0000	10,0000	64,5000
TM-05	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	10,0000	10,0000	21,0000	10,0000	36,0000
TM-06	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	19,0000
TM-07	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000	15,0000
PT-23	Cor verdadeira (mg Pt/L)	10,0000	12,0000	10,0000	10,0000	10,0000	10,0000
PT-29	Cor verdadeira (mg Pt/L)	5,0000	5,0000	6,6000	5,0000	14,3500	16,3000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-20	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,2500	0,1000	1,8050	0,3400	2,9650
PT-28	Ferro total (mg/L)	0,0416	0,0369	0,0692	0,5685	0,2980	1,7250
RB-02	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,1000	0,1000	0,7700	0,3450	1,9650
PT-21	Ferro total (mg/L)	0,0304	0,0297	0,0580	0,2020	0,2560	1,5400
PT-22	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,1500	0,1000	0,8900	0,1100	1,8100
TM-04	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,7500	0,1000	1,6900	0,1400	2,9000
TM-05	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,1400	0,1000	0,2900	0,1000	0,6800
TM-06	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,2400
TM-07	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1500
PT-23	Ferro total (mg/L)	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
PT-29	Ferro total (mg/L)	0,0090	0,0122	0,0208	0,0202	0,0558	0,0322
PT-20	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0600	0,0200	0,1200
PT-28	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0183	0,0151
RB-02	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0800
PT-21	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0136	0,0140
PT-22	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0580
TM-04	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0150	0,0100	0,0500	0,0100	0,1000
TM-05	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0300
TM-06	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100
TM-07	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100
PT-23	Fósforo total (mg/L)	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100
PT-29	Fósforo total (mg/L)	0,0050	0,0100	0,0100	0,0100	0,0240	0,0107
PT-20	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0400	0,0300	0,0800	0,0400	0,1500
PT-28	Manganês total (mg/L)	0,0078	0,0095	0,0104	0,0159	0,0173	0,0711
RB-02	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0300	0,0300	0,1100	0,1000	0,3500
PT-21	Manganês total (mg/L)	0,0084	0,0099	0,0108	0,0148	0,0186	0,0578
PT-22	Manganês total (mg/L)	0,0250	0,0500	0,0370	0,0700	0,0450	0,1100
TM-04	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0300	0,0200	0,0500	0,0300	0,0800
TM-05	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
TM-06	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
TM-07	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
PT-23	Manganês total (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
PT-29	Manganês total (mg/L)	0,0038	0,0043	0,0058	0,0056	0,0122	0,0069
PT-20	Nitrato (como N) (mg/L)	0,9500	0,3600	1,1500	0,7050	1,6700	1,2150
PT-28	Nitrato (como N) (mg/L)	0,7800	1,1200	1,0400	1,3600	1,3400	1,6400
RB-02	Nitrato (como N) (mg/L)	0,5200	0,3100	0,7600	0,5900	1,0000	0,8800
PT-21	Nitrato (como N) (mg/L)	0,7200	1,0600	0,9300	1,2500	1,1700	1,5000
PT-22	Nitrato (como N) (mg/L)	0,2000	0,3400	0,3100	0,5300	0,4200	0,7300
TM-04	Nitrato (como N) (mg/L)	0,0200	0,0800	0,0400	0,1800	0,1500	0,3800
TM-05	Nitrato (como N) (mg/L)	0,0200	0,0500	0,0200	0,1300	0,1100	0,2400

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
TM-06	Nitrato (como N) (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0400	0,0800	0,1200	0,1400
TM-07	Nitrato (como N) (mg/L)	0,0200	0,0200	0,0200	0,0300	0,1200	0,1100
PT-23	Nitrato (como N) (mg/L)	0,1100	0,1100	0,0200	0,0200	0,0200	0,0300
PT-29	Nitrato (como N) (mg/L)	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,6000
PT-20	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3100	0,5600	0,4000	0,7100	0,5400	1,0200
PT-28	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,4400	0,5000	0,5000	0,5300	0,5000	0,6100
RB-02	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3050	0,5400	0,4000	0,6650	0,5700	0,9100
PT-21	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,4300	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5800
PT-22	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3200	0,5600	0,4000	0,6800	0,5600	0,9500
TM-04	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3400	0,6000	0,4700	0,7200	0,6100	1,0150
TM-05	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3500	0,5300	0,4600	0,6400	0,5800	0,9000
TM-06	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3200	0,5000	0,4600	0,6000	0,5800	0,8200
TM-07	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3300	0,5000	0,4600	0,6000	0,5900	0,8350
PT-23	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,5700	0,7800	0,3300	0,5000	0,4500	0,5800
PT-29	Nitrogênio <i>Kjeldahl</i> total (mg/L)	0,3100	0,2000	0,3400	0,5000	0,3900	0,5000
PT-20	Oxigênio dissolvido (mg/L)	4,5300	3,6900	5,7500	4,7100	7,5200	5,9000
PT-28	Oxigênio dissolvido (mg/L)	6,0000	6,1000	6,7000	6,7000	7,7000	7,2000
RB-02	Oxigênio dissolvido (mg/L)	3,4000	2,7600	4,7100	3,6000	6,7000	5,8800
PT-21	Oxigênio dissolvido (mg/L)	5,7000	5,9000	6,3000	6,4000	7,1000	6,9000
PT-22	Oxigênio dissolvido (mg/L)	3,6200	4,1300	4,8000	5,2300	6,5400	6,1700
TM-04	Oxigênio dissolvido (mg/L)	4,3100	4,1200	5,1500	5,1200	6,4600	5,8100
TM-05	Oxigênio dissolvido (mg/L)	3,9600	3,6800	4,8000	5,1400	6,3200	7,0300
TM-06	Oxigênio dissolvido (mg/L)	3,8500	3,9000	4,5600	5,6700	5,9600	7,2500
TM-07	Oxigênio dissolvido (mg/L)	3,7600	3,7700	4,5300	5,9150	6,0800	6,9700
PT-23	Oxigênio dissolvido (mg/L)	6,3200	7,7000	3,7900	4,7200	4,9100	6,8000
PT-29	Oxigênio dissolvido (mg/L)	5,5000	5,8000	6,3000	6,7000	6,8000	7,2000
PT-20	pH (em campo)	7,2700	6,6000	7,7050	6,9600	8,0800	7,3700
PT-28	pH (em campo)	7,3000	7,2300	7,6200	7,6300	7,9800	7,9000
RB-02	pH (em campo)	7,0900	6,5900	7,4150	7,0100	7,7300	7,4100
PT-21	pH (em campo)	7,1400	7,1600	7,4300	7,4500	7,6800	7,7400
PT-22	pH (em campo)	7,3100	6,9500	7,5000	7,2200	7,7100	7,4200
TM-04	pH (em campo)	7,6400	6,8000	7,8300	7,1800	7,9700	7,4350
TM-05	pH (em campo)	7,5000	7,2600	7,6550	7,5800	7,8400	8,1400
TM-06	pH (em campo)	7,2300	7,2200	7,3700	7,6500	7,5200	8,2300
TM-07	pH (em campo)	7,2500	7,3200	7,3900	7,7050	7,5600	8,1300
PT-23	pH (em campo)	7,5500	8,0700	7,2200	7,2100	7,3800	7,6600
PT-29	pH (em campo)	7,3700	7,1300	7,6000	7,3900	7,8500	7,6100
PT-20	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	92,1000	126,0000	151,0000	205,0000	191,0000	312,0000
PT-28	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	179,2000	154,9000	215,0000	193,7000	244,7000	229,7000
RB-02	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	74,9000	125,5000	154,0000	227,0000	198,0000	311,5000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-21	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	175,6000	156,4000	210,1500	184,1000	247,2000	221,7000
PT-22	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	161,0000	53,2000	185,5000	137,5000	237,0000	215,0000
TM-04	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	71,7000	99,6000	122,5000	147,0000	192,5000	218,5000
TM-05	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	71,7500	76,3000	128,0000	141,0000	202,0000	201,0000
TM-06	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	173,5000	133,0000	204,0000	175,0000	231,0000	215,0000
TM-07	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	189,5000	136,0000	215,0000	179,0000	235,0000	220,5000
PT-23	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	239,0000	210,0000	179,5000	129,0000	210,0000	168,0000
PT-29	Potencial de oxirredução (ORP) (mV)	168,3000	130,7000	188,3000	160,5500	220,3000	185,5000
PT-20	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	72,0000	84,0000	83,5000	97,7500	94,0000	110,0000
PT-28	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	62,0000	56,0000	68,0000	74,0000	76,0000	90,0000
RB-02	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	68,5000	81,5000	77,5000	91,5000	87,0000	104,0000
PT-21	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	60,0000	56,0000	68,0000	73,5000	74,0000	86,0000
PT-22	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	60,0000	73,5000	69,2500	86,0000	79,0000	98,5000
TM-04	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	53,5000	67,5000	59,5000	77,5000	69,0000	91,5000
TM-05	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	51,0000	58,0000	58,0000	69,0000	66,5000	78,5000
TM-06	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	50,0000	54,0000	58,0000	63,0000	65,5000	73,0000
TM-07	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	51,0000	52,5000	57,0000	62,7500	65,0000	71,0000
PT-23	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	64,0000	70,0000	49,5000	53,0000	56,0000	62,0000
PT-29	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	46,0000	48,0000	50,0000	52,0000	54,0000	56,0000
PT-20	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	13,0000	7,5000	33,0000	15,5000	68,5000
PT-28	Sólidos suspensos (mg/L)	5,0000	5,0000	5,0000	7,0000	10,0000	19,0000
RB-02	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	7,0000	7,0000	17,5000	13,5000	30,2500
PT-21	Sólidos suspensos (mg/L)	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	10,0000	15,0000
PT-22	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	11,0000	7,0000	21,0000	12,0000	35,0000
TM-04	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	18,5000	7,0000	39,0000	13,0000	81,0000
TM-05	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	7,0000	7,0000	11,2500	12,0000	24,0000
TM-06	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	11,0000	12,5000
TM-07	Sólidos suspensos (mg/L)	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	11,0000	11,7500
PT-23	Sólidos suspensos (mg/L)	11,0000	11,5000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000
PT-29	Sólidos suspensos (mg/L)	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	10,0000	7,0000
PT-20	Temperatura da amostra (°C)	22,2000	26,0000	23,7000	27,1000	25,6000	27,9000
PT-28	Temperatura da amostra (°C)	22,5000	26,8000	23,7500	27,6000	25,9000	28,5000
RB-02	Temperatura da amostra (°C)	22,3000	25,5000	23,5000	26,6750	25,3000	27,5000
PT-21	Temperatura da amostra (°C)	22,3000	26,5000	23,6000	27,3000	25,7000	27,9000
PT-22	Temperatura da amostra (°C)	23,3000	26,3000	24,3000	27,1000	26,2000	28,2000
TM-04	Temperatura da amostra (°C)	22,6000	25,7000	23,3000	26,7500	24,5000	28,1000
TM-05	Temperatura da amostra (°C)	22,3000	26,3000	23,3000	27,7000	24,4000	28,5000
TM-06	Temperatura da amostra (°C)	22,7000	26,6000	23,3000	27,7000	24,4000	28,4000
TM-07	Temperatura da amostra (°C)	23,2000	26,9000	23,7000	27,7000	24,9000	28,7000
PT-23	Temperatura da amostra (°C)	26,0000	28,9000	23,7500	27,2000	24,7000	28,0000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-29	Temperatura da amostra (°C)	24,2000	27,5000	25,3000	28,0000	27,2000	28,6000
PT-20	Turbidez (in Situ) (NTU)	4,3300	21,1000	6,3700	84,8000	12,0000	148,0000
PT-28	Turbidez (in Situ) (NTU)	1,6400	2,1900	3,2300	17,0000	8,7700	74,1000
RB-02	Turbidez (in Situ) (NTU)	1,9350	2,8250	3,5850	38,3000	9,3300	94,7500
PT-21	Turbidez (in Situ) (NTU)	0,8200	1,9600	2,4850	8,5000	7,9400	70,1000
PT-22	Turbidez (in Situ) (NTU)	3,8000	11,7000	4,9400	46,7000	6,8000	97,8500
TM-04	Turbidez (in Situ) (NTU)	4,2300	44,8500	5,6300	90,2500	8,1900	147,5000
TM-05	Turbidez (in Situ) (NTU)	2,9500	8,8200	4,0850	20,4000	6,0000	42,5000
TM-06	Turbidez (in Situ) (NTU)	2,2400	4,0100	2,9200	6,9600	4,4800	18,2000
TM-07	Turbidez (in Situ) (NTU)	2,1500	3,2900	2,7050	4,7950	4,1000	13,7500
PT-23	Turbidez (in Situ) (NTU)	3,4300	6,9200	2,1000	3,3450	2,6000	4,5050
PT-29	Turbidez (in Situ) (NTU)	1,1100	1,3400	1,9700	2,0050	3,2500	3,4400

Legenda: S: período seco; C: período chuvoso.

Tabela I.3 - Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade do sedimento, por ponto de monitoramento, no ecossistema lótico, no período seco (em cinza) e no chuvoso (em azul), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-51	Alumínio (mg/Kg)	1860,000	950,000	3060,000	1340,000	41100,000	36800,000
PT-55	Alumínio (mg/Kg)	1700,000	992,000	2720,000	1745,000	20700,000	4410,000
CE-01	Alumínio (mg/Kg)	11000,000	7330,000	12600,000	9460,000	18900,000	15400,000
PT-51	Arsênio (mg/Kg)	1,390	1,670	2,800	2,370	13,000	11,000
PT-55	Arsênio (mg/Kg)	1,135	1,400	2,780	2,295	6,930	2,960
CE-01	Arsênio (mg/Kg)	2,330	2,200	3,200	3,050	3,960	3,880
PT-51	Bário (mg/Kg)	12,700	7,570	22,300	9,900	145,000	130,000
PT-55	Bário (mg/Kg)	13,350	9,390	17,400	13,100	74,800	25,300
CE-01	Bário (mg/Kg)	46,400	35,300	56,600	44,000	75,200	68,700
PT-51	Carbono orgânico total (% p/p)	0,060	0,060	0,120	0,100	1,300	1,280
PT-55	Carbono orgânico total (% p/p)	0,060	0,060	0,120	0,130	0,740	0,540
CE-01	Carbono orgânico total (% p/p)	0,990	0,770	1,550	1,060	2,010	1,530
PT-51	Chumbo (mg/Kg)	2,380	2,060	3,400	3,025	27,200	22,700
PT-55	Chumbo (mg/Kg)	2,235	2,600	3,615	3,615	14,500	6,770
CE-01	Chumbo (mg/Kg)	10,100	9,260	11,100	10,300	12,600	11,900
PT-51	Cobre (mg/Kg)	3,060	1,590	18,200	13,750	40,800	32,100
PT-55	Cobre (mg/Kg)	3,180	1,980	15,000	5,040	27,150	20,200
CE-01	Cobre (mg/Kg)	12,100	9,170	15,900	12,000	23,200	21,600
PT-51	Cromo (mg/Kg)	25,800	15,100	63,600	56,850	85,300	71,200
PT-55	Cromo (mg/Kg)	37,500	10,800	57,000	20,100	77,200	63,800
CE-01	Cromo (mg/Kg)	20,800	18,400	25,200	22,100	28,400	25,500
PT-51	Ferro (mg/Kg)	4870,000	4390,000	9720,000	5240,000	97000,000	78200,000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-55	Ferro (mg/Kg)	4900,000	4210,000	8090,000	6715,000	62600,000	13700,000
CE-01	Ferro (mg/Kg)	16400,000	13800,000	19700,000	17000,000	22200,000	19700,000
PT-51	Fósforo (mg/Kg)	49,700	45,700	90,900	54,800	729,000	576,000
PT-55	Fósforo (mg/Kg)	41,550	47,600	67,150	55,800	358,500	111,000
CE-01	Fósforo (mg/Kg)	118,000	90,800	135,000	121,000	153,000	155,000
PT-51	Manganês (mg/Kg)	187,000	105,000	321,000	152,500	2560,000	2150,000
PT-55	Manganês (mg/Kg)	187,000	138,000	268,000	163,000	1575,000	350,000
CE-01	Manganês (mg/Kg)	263,000	242,000	334,000	305,000	434,000	475,000
PT-51	Mercúrio (mg/Kg)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,067	0,062
PT-55	Mercúrio (mg/Kg)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
CE-01	Mercúrio (mg/Kg)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
PT-51	Níquel (mg/Kg)	6,080	3,400	17,600	15,050	30,200	26,100
PT-55	Níquel (mg/Kg)	7,955	2,990	13,950	5,420	23,650	23,400
CE-01	Níquel (mg/Kg)	5,970	5,180	8,500	7,460	10,300	9,080
PT-51	Zinco (mg/Kg)	6,400	6,100	13,100	12,100	59,300	50,200
PT-55	Zinco (mg/Kg)	6,385	6,900	13,650	10,900	31,400	40,500
CE-01	Zinco (mg/Kg)	15,100	13,300	16,700	15,400	19,300	17,800

Legenda: S: período seco; C: período chuvoso.

Tabela I.4 - Estatística descritiva parâmetros de qualidade do sedimento, por ponto de monitoramento, no ecossistema lêntico, no período seco (em cinza) e no chuvoso (em azul), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-20	Alumínio (mg/Kg)	38298,000	26478,000	42789,000	42732,000	48139,000	57006,000
PT-28	Alumínio (mg/Kg)	50700,000	42700,000	69900,000	47400,000	102000,000	83000,000
RB-02	Alumínio (mg/Kg)	45129,000	29983,000	50164,000	45722,000	56096,000	72685,000
PT-21	Alumínio (mg/Kg)	47000,000	33900,000	64700,000	42800,000	81200,000	74900,000
PT-22	Alumínio (mg/Kg)	16677,000	12328,000	19644,000	17907,000	24137,000	22128,000
TM-04	Alumínio (mg/Kg)	25687,500	20360,500	28977,000	27188,000	32731,000	33723,500
TM-05	Alumínio (mg/Kg)	29872,500	18798,000	30581,000	29341,000	35032,000	38233,000
TM-06	Alumínio (mg/Kg)	36738,500	26958,000	45525,000	43188,000	52061,000	56652,000
TM-07	Alumínio (mg/Kg)	41439,500	31077,000	48153,000	50500,000	53358,500	64487,000
PT-23	Alumínio (mg/Kg)	43591,500	28868,000	48459,500	47640,500	54178,500	58960,000
PT-29	Alumínio (mg/Kg)	26000,000	16100,000	32800,000	19900,000	49100,000	46900,000
PT-20	Arsênio (mg/Kg)	13,200	13,100	15,200	14,300	16,300	15,900
PT-28	Arsênio (mg/Kg)	13,600	12,600	15,800	15,100	16,800	17,000
RB-02	Arsênio (mg/Kg)	14,100	13,700	15,500	17,400	17,600	18,500
PT-21	Arsênio (mg/Kg)	10,100	10,600	11,600	11,700	13,800	13,000
PT-22	Arsênio (mg/Kg)	4,120	5,050	5,480	5,930	6,530	6,980
TM-04	Arsênio (mg/Kg)	7,485	8,320	8,335	8,730	9,150	10,035

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
TM-05	Arsênio (mg/Kg)	7,385	8,380	7,895	9,010	8,865	9,140
TM-06	Arsênio (mg/Kg)	9,255	9,690	9,870	11,100	12,100	11,600
TM-07	Arsênio (mg/Kg)	8,895	9,280	9,720	10,200	11,150	10,700
PT-23	Arsênio (mg/Kg)	7,875	8,920	9,420	9,970	10,850	10,900
PT-29	Arsênio (mg/Kg)	5,200	5,200	6,570	6,630	7,600	7,460
PT-20	Bário (mg/Kg)	125,000	117,000	137,000	132,000	145,000	149,000
PT-28	Bário (mg/Kg)	115,000	96,900	124,000	124,000	162,000	139,000
RB-02	Bário (mg/Kg)	105,950	104,000	127,000	128,000	146,500	152,000
PT-21	Bário (mg/Kg)	128,000	120,000	145,000	134,000	178,000	158,000
PT-22	Bário (mg/Kg)	67,800	64,700	79,600	76,100	88,600	88,500
TM-04	Bário (mg/Kg)	85,100	86,450	93,750	94,200	100,200	106,500
TM-05	Bário (mg/Kg)	86,600	83,000	91,250	98,100	98,600	106,000
TM-06	Bário (mg/Kg)	93,450	96,900	103,500	101,000	119,000	121,000
TM-07	Bário (mg/Kg)	96,400	93,800	105,500	100,000	113,500	108,000
PT-23	Bário (mg/Kg)	84,500	79,400	94,100	95,900	102,500	105,000
PT-29	Bário (mg/Kg)	105,000	81,400	125,000	98,100	174,000	159,000
PT-20	Carbono orgânico total (% p/p)	1,130	1,220	1,190	1,355	1,330	1,470
PT-28	Carbono orgânico total (% p/p)	1,330	1,320	1,520	1,520	1,660	1,590
RB-02	Carbono orgânico total (% p/p)	1,435	1,380	1,575	1,490	1,640	1,830
PT-21	Carbono orgânico total (% p/p)	1,350	1,220	1,720	1,680	2,190	2,340
PT-22	Carbono orgânico total (% p/p)	0,880	0,910	1,010	1,065	1,260	1,180
TM-04	Carbono orgânico total (% p/p)	1,335	1,350	1,445	1,490	1,485	1,840
TM-05	Carbono orgânico total (% p/p)	0,885	0,980	0,950	1,075	0,985	1,170
TM-06	Carbono orgânico total (% p/p)	1,075	1,270	1,190	1,350	1,355	1,530
TM-07	Carbono orgânico total (% p/p)	1,270	1,335	1,335	1,575	1,485	1,810
PT-23	Carbono orgânico total (% p/p)	1,290	1,360	1,430	1,520	1,490	1,660
PT-29	Carbono orgânico total (% p/p)	0,700	0,610	0,790	0,740	0,930	0,840
PT-20	Chumbo (mg/Kg)	26,800	24,600	30,800	27,900	52,400	52,300
PT-28	Chumbo (mg/Kg)	27,300	27,500	30,200	30,700	33,500	34,700
RB-02	Chumbo (mg/Kg)	29,650	26,200	32,350	51,300	64,500	59,400
PT-21	Chumbo (mg/Kg)	26,000	25,100	29,000	29,300	32,300	32,200
PT-22	Chumbo (mg/Kg)	15,700	13,800	17,900	15,900	30,100	28,800
TM-04	Chumbo (mg/Kg)	21,350	21,500	25,950	22,750	37,850	38,350
TM-05	Chumbo (mg/Kg)	19,400	20,800	22,750	31,200	46,100	37,600
TM-06	Chumbo (mg/Kg)	25,950	26,300	35,750	41,900	49,450	47,000
TM-07	Chumbo (mg/Kg)	29,700	27,300	45,800	40,300	56,650	50,000
PT-23	Chumbo (mg/Kg)	25,650	25,000	30,000	29,050	46,300	46,900
PT-29	Chumbo (mg/Kg)	18,700	18,300	20,200	20,100	22,600	22,700
PT-20	Cobre (mg/Kg)	31,700	29,200	34,800	34,800	38,700	37,300
PT-28	Cobre (mg/Kg)	41,700	40,100	46,800	43,800	53,300	51,800

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
RB-02	Cobre (mg/Kg)	25,150	27,000	29,050	30,550	33,000	34,300
PT-21	Cobre (mg/Kg)	40,600	36,500	44,400	41,100	51,700	48,300
PT-22	Cobre (mg/Kg)	14,400	13,500	16,200	15,500	18,600	17,800
TM-04	Cobre (mg/Kg)	22,850	25,200	24,950	28,700	27,450	38,700
TM-05	Cobre (mg/Kg)	21,050	23,900	23,250	26,500	27,150	28,700
TM-06	Cobre (mg/Kg)	24,050	24,550	28,450	29,900	30,650	38,550
TM-07	Cobre (mg/Kg)	26,150	26,950	31,750	30,300	33,800	38,600
PT-23	Cobre (mg/Kg)	24,950	25,100	27,750	29,050	30,150	32,500
PT-29	Cobre (mg/Kg)	28,800	25,900	32,100	28,600	40,000	32,500
PT-20	Cromo (mg/Kg)	67,500	62,900	74,600	69,000	80,700	77,900
PT-28	Cromo (mg/Kg)	75,800	76,500	85,800	83,900	95,700	90,700
RB-02	Cromo (mg/Kg)	61,550	64,800	71,750	73,600	75,950	84,000
PT-21	Cromo (mg/Kg)	67,800	67,000	75,700	74,400	84,900	82,000
PT-22	Cromo (mg/Kg)	32,300	29,800	35,600	32,700	38,600	37,700
TM-04	Cromo (mg/Kg)	43,450	43,700	48,050	47,350	49,200	51,550
TM-05	Cromo (mg/Kg)	36,950	37,900	38,400	41,100	46,350	44,900
TM-06	Cromo (mg/Kg)	43,200	47,900	51,200	51,400	59,100	65,400
TM-07	Cromo (mg/Kg)	46,200	45,600	56,650	50,200	60,550	58,000
PT-23	Cromo (mg/Kg)	49,000	47,700	53,450	53,600	58,000	62,600
PT-29	Cromo (mg/Kg)	38,700	33,000	46,100	42,700	57,000	50,500
PT-20	Ferro (mg/Kg)	59756,000	58479,000	69554,000	66739,000	74473,000	74831,000
PT-28	Ferro (mg/Kg)	61700,000	60900,000	74300,000	64700,000	81500,000	75400,000
RB-02	Ferro (mg/Kg)	49688,000	51997,000	63195,500	62563,000	70815,500	70020,000
PT-21	Ferro (mg/Kg)	54100,000	53600,000	61500,000	57900,000	67200,000	65200,000
PT-22	Ferro (mg/Kg)	32817,000	29892,000	37068,000	33942,000	40940,000	39739,000
TM-04	Ferro (mg/Kg)	36797,500	38223,500	39973,500	43507,500	43167,500	47308,500
TM-05	Ferro (mg/Kg)	38405,000	40396,000	42091,000	44532,000	44941,000	49813,000
TM-06	Ferro (mg/Kg)	43934,500	44738,000	52450,000	52556,000	55559,500	58342,000
TM-07	Ferro (mg/Kg)	47724,000	48589,000	53844,500	56787,000	57379,000	61099,000
PT-23	Ferro (mg/Kg)	50472,000	46166,000	55158,000	52514,000	60052,000	58381,000
PT-29	Ferro (mg/Kg)	40200,000	36100,000	43600,000	42100,000	50500,000	47300,000
PT-20	Fósforo (mg/Kg)	646,000	672,000	741,000	729,000	814,000	794,000
PT-28	Fósforo (mg/Kg)	793,000	736,000	912,000	862,000	1050,000	1040,000
RB-02	Fósforo (mg/Kg)	645,500	710,000	830,000	789,000	912,000	834,000
PT-21	Fósforo (mg/Kg)	672,000	654,000	816,000	781,000	924,000	863,000
PT-22	Fósforo (mg/Kg)	248,000	259,000	290,000	282,000	319,000	301,000
TM-04	Fósforo (mg/Kg)	481,000	542,500	518,000	564,000	568,000	595,500
TM-05	Fósforo (mg/Kg)	436,500	494,000	496,500	522,000	530,000	573,000
TM-06	Fósforo (mg/Kg)	561,000	621,000	630,500	670,000	744,000	690,000
TM-07	Fósforo (mg/Kg)	568,500	614,000	641,500	639,000	710,500	719,000

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
PT-23	Fósforo (mg/Kg)	516,500	551,000	605,500	628,000	670,000	684,000
PT-29	Fósforo (mg/Kg)	361,000	317,000	432,000	388,000	522,000	452,000
PT-20	Manganês (mg/Kg)	1412,000	1913,000	2018,000	2334,000	2916,000	2715,000
PT-28	Manganês (mg/Kg)	554,000	472,000	666,000	614,000	817,000	746,000
RB-02	Manganês (mg/Kg)	897,000	1035,000	1030,000	1177,000	1782,500	1431,000
PT-21	Manganês (mg/Kg)	582,000	632,000	822,000	868,000	1150,000	1250,000
PT-22	Manganês (mg/Kg)	857,000	989,000	1187,000	1252,000	1339,000	1362,000
TM-04	Manganês (mg/Kg)	715,000	830,000	826,500	965,500	972,500	1087,000
TM-05	Manganês (mg/Kg)	398,000	397,000	439,500	472,000	495,000	494,000
TM-06	Manganês (mg/Kg)	300,500	334,000	377,500	350,000	511,500	439,000
TM-07	Manganês (mg/Kg)	242,000	254,000	291,000	262,000	313,000	290,000
PT-23	Manganês (mg/Kg)	209,500	231,000	232,500	249,000	254,500	278,000
PT-29	Manganês (mg/Kg)	235,000	275,000	311,000	311,000	386,000	381,000
PT-20	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,010	0,010	0,010	0,060	0,039
PT-28	Mercúrio (mg/Kg)	0,050	0,050	0,065	0,058	0,076	0,071
RB-02	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,003	0,010	0,010	0,010	0,060
PT-21	Mercúrio (mg/Kg)	0,050	0,050	0,055	0,053	0,073	0,066
PT-22	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,010	0,010	0,010	0,020	0,010
TM-04	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,003	0,010	0,010	0,010	0,040
TM-05	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,006	0,010	0,010	0,020	0,010
TM-06	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,006	0,010	0,010	0,030	0,030
TM-07	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,030
PT-23	Mercúrio (mg/Kg)	0,010	0,003	0,010	0,010	0,010	0,010
PT-29	Mercúrio (mg/Kg)	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
PT-20	Níquel (mg/Kg)	23,000	20,100	24,800	22,300	27,500	25,400
PT-28	Níquel (mg/Kg)	24,600	23,100	28,600	26,100	37,600	32,400
RB-02	Níquel (mg/Kg)	20,050	16,600	22,800	18,900	24,800	26,800
PT-21	Níquel (mg/Kg)	23,300	22,300	28,200	23,600	35,600	32,700
PT-22	Níquel (mg/Kg)	10,000	10,000	11,600	10,800	12,600	12,400
TM-04	Níquel (mg/Kg)	17,800	18,700	19,400	21,050	21,950	24,450
TM-05	Níquel (mg/Kg)	15,150	16,400	17,200	17,500	18,550	21,100
TM-06	Níquel (mg/Kg)	15,200	16,500	18,900	17,800	21,000	24,800
TM-07	Níquel (mg/Kg)	16,300	16,800	19,400	17,500	26,200	22,300
PT-23	Níquel (mg/Kg)	16,300	15,000	18,100	17,450	20,200	22,500
PT-29	Níquel (mg/Kg)	15,700	12,600	19,700	16,600	25,200	21,800
PT-20	Zinco (mg/Kg)	55,700	47,700	63,600	58,300	69,000	65,700
PT-28	Zinco (mg/Kg)	54,400	51,800	57,900	56,800	63,800	63,400
RB-02	Zinco (mg/Kg)	48,200	36,000	51,250	54,800	56,850	60,300
PT-21	Zinco (mg/Kg)	50,800	48,400	55,300	53,200	61,600	58,200
PT-22	Zinco (mg/Kg)	25,400	21,100	29,700	26,600	36,100	35,100

Pontos	Parâmetros	Percentil 25%		Mediana		Percentil 75%	
		S	C	S	C	S	C
TM-04	Zinco (mg/Kg)	46,850	44,550	50,050	53,450	58,950	63,350
TM-05	Zinco (mg/Kg)	40,700	38,900	43,800	47,800	52,700	56,900
TM-06	Zinco (mg/Kg)	40,500	37,400	51,850	43,700	58,000	54,800
TM-07	Zinco (mg/Kg)	39,000	33,000	53,200	43,200	57,900	57,200
PT-23	Zinco (mg/Kg)	41,350	37,500	44,750	44,800	51,150	49,400
PT-29	Zinco (mg/Kg)	96,600	90,000	105,000	101,000	120,000	118,000

Legenda: S: período seco; C: período chuvoso.

APÊNDICE II

Tabela II.1 - Resultados dos testes estatísticos de *Mann-Whitney* que indicaram diferenças significativas dos parâmetros de qualidade da água, por ponto de monitoramento, após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1, nos ecossistemas em estudo (destaque para o coluna “ponto”, em que em cinza estão identificados os pontos de monitoramento situados nos ecossistemas lóticos; em laranja os situados na UHE Retiro Baixo e em azul, os situados na UHE Três Marias) ao nível de significância de 5%.

Pontos	Profundidade	Parâmetros																
		Alumínio total	COT	Clorofila <i>a</i>	Condutividade elétrica	Cor verdadeira	Ferro total	Fósforo total	Manganês total	Nitrato	NTK	OD	pH	ORP	SDT	SST	Temperatura	Turbidez
PT-51	SUP	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-55	SUP	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
CE-01	SUP	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠
PT-20	SUP	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-20	ZF	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-20	ZI	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-20	F	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-28	SUP	≠	≠		≠	≠	≠	≠		≠			≠	≠	≠	≠	≠	≠
RB-02	SUP	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
RB-02	ZF	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
RB-02	ZI	≠	≠		≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
RB-02	F	≠	≠		≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-21	SUP	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠			≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-22	SUP	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-22	ZF	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-22	ZI	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-22	F	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-04	SUP	≠	≠			≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-04	ZF	≠	≠			≠	≠	≠	≠	≠		≠		≠	≠	≠	≠	≠
TM-04	ZI	≠	≠			≠	≠	≠	≠	≠		≠		≠	≠	≠	≠	≠
TM-04	F	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠
TM-05	SUP	≠		≠		≠	≠	≠		≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠
TM-05	ZF	≠		≠		≠	≠	≠		≠	≠			≠	≠	≠	≠	≠
TM-05	ZI	≠	≠	≠		≠	≠	≠		≠	≠			≠	≠	≠	≠	≠
TM-05	F	≠	≠	≠		≠	≠	≠		≠	≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠
TM-06	SUP	≠				≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠
TM-06	ZF	≠		≠		≠	≠		≠	≠	≠	≠	≠	≠		≠	≠	≠

Pontos	Parâmetros																	
	Profundidade	Alumínio total	COT	Clorofila <i>a</i>	Condutividade elétrica	Cor verdadeira	Ferro total	Fósforo total	Manganês total	Nitrato	NTK	OD	pH	ORP	SDT	SST	Temperatura	Turbidez
TM-06	ZI	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-06	F	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-07	SUP	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-07	ZF	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-07	ZI	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-07	F	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-23	SUP	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-23	ZF	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-23	ZI	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-23	F	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-29	SUP	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠

Legenda: ≠: Diferença significativa entre as medianas dos valores obtidos ($p < 0,05$); SUP: Superfície; ZF: Zona Fótica; ZI: Zona Intermediária; F: Fundo.

Tabela II.2 - Resultados dos testes estatísticos *de Mann-Whitney* que indicaram diferenças significativas dos parâmetros de qualidade dos sedimentos, após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1, nos ecossistemas em estudo (destaque para o coluna “ponto”, em que em cinza estão identificados os pontos de monitoramento situados em ecossistemas lóticos; em laranja os situados na UHE Retiro Baixo e em azul, os situados na UHE Três Marias), ao nível de significância de 5%.

Pontos	Parâmetros												
	Alumínio	Arsênio	Bário	COT	Chumbo	Cobre	Cromo	Ferro	Fósforo	Manganês	Mercurio	Níquel	Zinco
PT-51	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-55	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
CE-01	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-20	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-28	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
RB-02	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-21	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-22	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-04	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-05	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-06	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
TM-07	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-23	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
PT-29	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠

Legenda: ≠: Diferença significativa entre as medianas dos valores obtidos ($p < 0,05$).

APÊNDICE III

Tabela III.1 – Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade da água preconizados pela Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 01/2008, para águas doces de Classe 2, para os ecossistemas lóticos em estudo, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	PT-51		PT-55		CE-01	
	C	S	C	S	C	S
Alumínio dissolvido	63,8%	21,1%	58,0%	25,8%	57,3%	16,4%
Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Ferro dissolvido (mg/L)	35,7%	28,7%	34,4%	28,2%	63,7%	77,6%
Fósforo total (mg/L)	12,7%	12,0%	14,6%	12,4%	4,4%	4,1%
Manganês total (mg/L)	66,0%	27,8%	67,0%	23,4%	57,7%	11,5%
Nitrato (como N) (mg/L)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Oxigênio dissolvido (mg/L)	2,8%	2,4%	0,0%	1,0%	31,5%	14,0%
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sólidos suspensos (mg/L)	29,2%	2,9%	33,6%	0,5%	16,1%	1,9%
Cor verdadeira (mg Pt/L)	60,6%	1,9%	64,2%	3,8%	55,6%	6,0%
pH (em campo)	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	0,0%	0,3%
Temperatura da amostra (C)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Turbidez (NTU)	60,6%	6,3%	60,8%	6,3%	39,1%	4,1%

Legenda: S: Seco; C: Chuvoso.

Tabela III.2 - Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade da água preconizados pela Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 01/2008, para águas doces de Classe 2, no ecossistema lântico - reservatório da UHE Retiro Baixo, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	PT-20		PT-28		RB-02		PT-21	
	S	C	S	C	S	C	S	C
	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP
Alumínio dissolvido (mg/L)	13,00%	65,50%	18,90%	47,00%	22,70%	41,00%	19,90%	41,30%
Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,00%	0,00%	1,40%	1,20%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ferro dissolvido (mg/L)	11,50%	65,50%	11,70%	31,20%	4,30%	50,30%	11,20%	23,90%
Fósforo total (mg/L)	11,10%	68,40%	19,40%	18,20%	3,90%	40,20%	19,10%	19,40%
Manganês total (mg/L)	2,90%	34,40%	0,30%	11,50%	9,20%	9,90%	8,50%	7,80%
Nitrato (como N) (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Oxigênio dissolvido (mg/L)	13,50%	23,40%	1,90%	2,00%	18,00%	28,20%	6,80%	3,20%
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Sólidos suspensos (mg/L)	0,00%	14,60%	0,00%	0,80%	0,00%	0,50%	0,00%	1,60%
Cor verdadeira (mg Pt/L)	0,50%	32,00%	4,60%	47,00%	0,00%	35,90%	3,60%	43,70%
pH (em campo)	0,50%	3,30%	0,00%	0,00%	0,50%	1,60%	0,00%	0,00%
Temperatura da amostra (C)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Turbidez (NTU)	1,00%	43,90%	0,00%	15,80%	0,00%	16,40%	0,00%	10,90%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco; SUP: Superfície.

Tabela III.3 - Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade da água preconizados pela Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 01/2008, para águas doces de Classe 2, no ecossistema lântico - reservatório da UHE Três Marias, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	PT-22		TM-04		TM-05		TM-06		TM-07		PT-23		PT-29	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP	SUP
Alumínio dissolvido (mg/L)	2,90%	54,20%	1,00%	49,00%	2,00%	20,00%	1,00%	18,10%	1,00%	4,90%	0,60%	2,00%	0,00%	0,00%
Clorofila <i>a</i> (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ferro dissolvido (mg/L)	0,50%	51,60%	0,00%	69,40%	0,00%	10,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Fósforo total (mg/L)	5,80%	38,60%	4,00%	64,60%	2,00%	10,20%	1,00%	6,20%	1,00%	4,90%	1,70%	4,10%	21,50%	21,30%
Manganês total (mg/L)	0,50%	10,50%	0,00%	14,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%
Nitrato (como N) (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Oxigênio dissolvido (mg/L)	26,60%	14,70%	23,00%	17,00%	30,00%	4,10%	28,70%	6,10%	29,00%	2,50%	28,40%	0,00%	10,50%	7,70%
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Sólidos suspensos (mg/L)	0,00%	2,30%	0,00%	14,30%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,60%	0,00%	0,00%	0,00%
Cor verdadeira (mg Pt/L)	0,00%	20,30%	0,00%	12,20%	0,00%	2,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,50%	4,40%
pH (em campo)	0,50%	0,30%	0,00%	4,30%	2,00%	2,00%	0,00%	4,90%	0,00%	0,00%	4,50%	1,20%	0,00%	0,00%
Temperatura da amostra (C)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Turbidez (NTU)	0,00%	19,00%	0,00%	37,80%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco; SUP: Superfície.

Tabela III.4 - Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade dos sedimentos previstos na Resolução CONAMA nº 454/2012, para os ecossistemas lóticos em estudo, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2	
	PT-20		PT-20		PT-28		PT-28		RB-02		RB-02		PT-21		PT-21	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Arsênio total (mg/Kg)	87,8%	95,7%	18,4%	14,9%	98,1%	100,0%	22,6%	22,9%	100,0%	100,0%	33,3%	63,6%	96,2%	97,1%	1,9%	0,0%
Chumbo Total (mg/Kg)	42,9%	46,8%	4,1%	0,0%	18,9%	20,0%	0,0%	0,0%	41,7%	54,5%	0,0%	0,0%	15,1%	8,6%	0,0%	0,0%
Cobre Total (mg/Kg)	42,9%	36,2%	0,0%	0,0%	92,5%	88,6%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%	0,0%	0,0%	92,5%	80,0%	0,0%	0,0%
Cromo Total (mg/Kg)	95,9%	97,9%	4,1%	4,3%	100,0%	100,0%	32,1%	25,7%	100,0%	90,9%	8,3%	0,0%	98,1%	100,0%	13,2%	11,4%
Mercúrio Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%
Níquel Total (mg/Kg)	91,8%	85,1%	6,1%	4,3%	96,2%	97,1%	30,2%	14,3%	83,3%	63,6%	0,0%	0,0%	94,3%	85,7%	22,6%	11,4%
Zinco Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

Tabela III.5 - Percentual de não atendimentos aos percentuais de referência para sedimentos, propostos por Costa (2015), para os ecossistemas lóticos em estudo, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	PT-20		PT-28		RB-02		PT-21	
	S	C	S	C	S	C	S	C
Alumínio Total (%)	36,7%	44,7%	86,8%	65,7%	75,0%	50,0%	81,1%	42,9%
Ferro Total (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Manganês Total (%)	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

Tabela III.6 - Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade dos sedimentos previstos na Resolução CONAMA nº 454/2012, para o ecossistema lêntico - reservatório da UHE Retiro Baixo, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2	
	PT-20		PT-20		PT-28		PT-28		RB-02		RB-02		PT-21		PT-21	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Arsênio total (mg/Kg)	87,8%	95,7%	18,4%	14,9%	98,1%	100,0%	22,6%	22,9%	100,0%	100,0%	33,3%	63,6%	96,2%	97,1%	1,9%	0,0%
Chumbo Total (mg/Kg)	42,9%	46,8%	4,1%	0,0%	18,9%	20,0%	0,0%	0,0%	41,7%	54,5%	0,0%	0,0%	15,1%	8,6%	0,0%	0,0%
Cobre Total (mg/Kg)	42,9%	36,2%	0,0%	0,0%	92,5%	88,6%	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%	0,0%	0,0%	92,5%	80,0%	0,0%	0,0%
Cromo Total (mg/Kg)	95,9%	97,9%	4,1%	4,3%	100,0%	100,0%	32,1%	25,7%	100,0%	90,9%	8,3%	0,0%	98,1%	100,0%	13,2%	11,4%
Mercúrio Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%
Níquel Total (mg/Kg)	91,8%	85,1%	6,1%	4,3%	96,2%	97,1%	30,2%	14,3%	83,3%	63,6%	0,0%	0,0%	94,3%	85,7%	22,6%	11,4%
Zinco Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

Tabela III.7 - Percentual de não atendimentos aos percentuais de referência para sedimentos, propostos por Costa (2015), para o ecossistema lêntico - reservatório da UHE Retiro Baixo, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	PT-20		PT-28		RB-02		PT-21	
	S	C	S	C	S	C	S	C
Alumínio Total (%)	36,7%	44,7%	86,8%	65,7%	75,0%	50,0%	81,1%	42,9%
Ferro Total (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Manganês Total (%)	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

Tabela III.8 - Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade dos sedimentos previstos na Resolução CONAMA nº 454/2012, para o ecossistema lêntico - reservatório da UHE Três Marias (parte 1), por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2	
	PT-22		PT-22		TM-04		TM-04		TM-05		TM-05		TM-06		TM-06	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Arsênio total (mg/Kg)	38,8%	53,2%	0,0%	0,0%	91,7%	91,7%	0,0%	0,0%	83,3%	92,3%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%
Chumbo Total (mg/Kg)	12,2%	2,1%	2,0%	0,0%	33,3%	41,7%	0,0%	0,0%	33,3%	46,2%	0,0%	0,0%	50,0%	53,8%	0,0%	0,0%
Cobre Total (mg/Kg)	2,0%	2,1%	0,0%	0,0%	0,0%	27,3%	0,0%	0,0%	0,0%	16,7%	0,0%	0,0%	8,3%	41,7%	0,0%	0,0%
Cromo Total (mg/Kg)	32,7%	25,5%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	58,3%	84,6%	0,0%	0,0%	100,0%	92,3%	0,0%	0,0%
Mercúrio Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Níquel Total (mg/Kg)	10,2%	10,6%	0,0%	2,1%	66,7%	83,3%	0,0%	8,3%	33,3%	38,5%	0,0%	7,7%	66,7%	46,2%	0,0%	0,0%
Zinco Total (mg/Kg)	4,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

Tabela III.9 - Percentual de não atendimentos aos padrões de qualidade dos sedimentos previstos na Resolução CONAMA nº 454/2012, para o ecossistema lêntico - reservatório da UHE Três Marias (parte 2), por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2		Nível 1		Nível 2	
	TM-07		TM-07		PT-23		PT-23		PT-29		PT-29	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Arsênio total (mg/Kg)	91,7%	92,3%	0,0%	0,0%	90,9%	91,1%	2,3%	0,0%	56,6%	57,1%	0,0%	0,0%
Chumbo Total (mg/Kg)	58,3%	53,8%	0,0%	0,0%	43,2%	47,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Cobre Total (mg/Kg)	16,7%	33,3%	0,0%	0,0%	4,5%	10,9%	0,0%	0,0%	47,2%	11,4%	0,0%	0,0%
Cromo Total (mg/Kg)	100,0%	92,3%	0,0%	0,0%	100,0%	95,7%	0,0%	4,3%	77,4%	62,9%	0,0%	0,0%
Mercúrio Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%
Níquel Total (mg/Kg)	66,7%	46,2%	0,0%	0,0%	50,0%	45,7%	2,3%	4,3%	54,7%	34,3%	1,9%	0,0%
Zinco Total (mg/Kg)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	20,8%	20,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

Tabela III.10 - Percentual de não atendimentos aos percentuais de referência para sedimentos, propostos por Costa (2015), para o ecossistema lântico - reservatório da UHE Três Marias, por período (seco e chuvoso), após o rompimento da barragem de contenção de rejeitos B1.

Parâmetros	PT-22		TM-04		TM-05		TM-06		TM-07		PT-23		PT-29	
	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	C
Alumínio Total (%)	0,0%	2,1%	0,0%	0,0%	0,0%	7,7%	58,3%	46,2%	58,3%	53,8%	68,2%	55,3%	30,2%	28,6%
Ferro Total (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Manganês Total (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Legenda: C: Chuvoso; S: Seco.

ANEXO I

Figura I.1 - Diagrama unifilar da localização dos pontos contemplados, por trecho.



Fonte: Vale S.A., 2021a.

ANEXO II

Tabela II.1 - Detalhamento sobre a localização dos pontos de monitoramento do PMQS-TM.

Trecho	Pontos de Monitoramento PMQS-Três Marias ¹	Pontos do Programa de Monitoramento Emergencial Vale ²	Pontos de Monitoramento IGAM e ANA	Descrição da Localização dos Pontos de Monitoramento	Distância do Evento (km)	Município
I	MRB-01	PT-19	BP078	Rio Paraopeba, a montante de Retiro Baixo, na ponte da MG-420 sobre o rio Paraopeba	249,80	Pompéu / Curvelo
I		PT-51		Rio Paraopeba confluência do córrego da Morada	267,00	Pompéu / Curvelo
I		PT-55		Rio Paraopeba a montante do rio Velho (Cachoeira do Choro)	282,00	Pompéu / Curvelo
II	RB-01	PT-20	BPE5	Reservatório da UHE Retiro Baixo	297,90	Pompéu / Curvelo
II		PT-28		Reservatório da UHE Retiro Baixo	309,00	Pompéu / Curvelo
II	RB-02			Reservatório da UHE Retiro Baixo	312,40	Pompéu / Curvelo
II		PT-21		Vertedouro Barragem de Retiro Baixo	315,20	Curvelo / Felixlândia / Pompéu
III		PT-57		Jusante do vertedouro da Barragem de Retiro Baixo	315,60	Curvelo / Felixlândia / Pompéu
Tributário		CE-01		Ribeirão dos Gomes, tributário do rio Paraopeba	315,70	Curvelo / Felixlândia
III		CE-02		Rio Paraopeba a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo	319,30	Pompéu / Felixlândia
III	JRB-01		BP099	Rio Paraopeba a jusante do reservatório da UHE Retiro Baixo	317,1	Pompéu / Felixlândia
III	JRB-02			Rio Paraopeba a montante da área de remanso do reservatório da UHE Três Marias	329,6	Pompéu / Felixlândia
IVa	TM-01	PT-22		Início da área de remanso do reservatório da UHE Três Marias	341,6	Pompéu / Felixlândia
IVa	TM-02			Reservatório da UHE Três Marias	345,4	Pompéu / Felixlândia
IVa	TM-03			Reservatório da UHE Três Marias	349,6	Pompéu / Felixlândia

Trecho	Pontos de Monitoramento PMQS-Três Marias ¹	Pontos do Programa de Monitoramento Emergencial Vale ²	Pontos de Monitoramento IGAM e ANA	Descrição da Localização dos Pontos de Monitoramento	Distância do Evento (km)	Município
IVa	TM-10			Reservatório da UHE Três Marias. A montante da confluência do Ribeirão do Peixe	353,2	Felixlândia
IVa	TM-11			Reservatório da UHE Três Marias. A jusante da confluência do Ribeirão do Peixe	362,1	Felixlândia
IVb	TM-04			Reservatório da UHE Três Marias	402,8	Pompéu / Abaeté
IVb	TM-05			Reservatório da UHE Três Marias	390,8	Pompéu / Abaeté
IVc	TM-12			Reservatório da UHE Três Marias. A jusante da confluência do rio Paraopeba e rio São Francisco	383,6	Felixlândia
IVc	TM-06			Reservatório da UHE Três Marias	390,1	Morada Nova de Minas / Felixlândia
IVc	TM-07			Reservatório da UHE Três Marias	406,3	Três Marias / Morada Nova de Minas
IVc	TM-08	PT-23	BPE8	Reservatório da UHE Três Marias	423,0	Três Marias / Morada Nova de Minas
IVc	TM-09			Reservatório da UHE Três Marias	462,2	Três Marias / Morada Nova de Minas
IVc		PT-29		Reservatório da UHE Três Marias a montante do barramento da UHE Três Marias	465,9	Três Marias / São Gonçalo do Abaeté / Morada Nova de Minas
V	JTM-01	PT-25	SF054	Rio São Francisco sob a ponte na BR 040	469,4	Três Marias / São Gonçalo do Abaeté
V		PT-30		Rio São Francisco, em frente ao antigo depósito da indústria metalúrgica	470,0	Três Marias / São Gonçalo do Abaeté

Trecho	Pontos de Monitoramento PMQS-Três Marias ¹	Pontos do Programa de Monitoramento Emergencial Vale ²	Pontos de Monitoramento IGAM e ANA	Descrição da Localização dos Pontos de Monitoramento	Distância do Evento (km)	Município
V		PT-27		Rio São Francisco, bairro Aldeia dos Dourados	474,2	Três Marias / São Gonçalo do Abaeté
V	JTM-02			Rio São Francisco a montante da foz do rio Abaeté, próximo a localizada de Porto do Pontal	500,8	Três Marias / São Gonçalo do Abaeté
VI	MTM-01		SF006	Rio São Francisco a jusante da foz do rio Pará sob a ponte da MG-060	431,5	Pompéu / Abaeté

Notas: (1) Pontos solicitados no Ofício nº 65/2019/AA-CD-ANA com exceção do ponto JRB-02, adicionado em 25/07/2019, e dos pontos TM-10, TM-11 e TM-12, adicionados em 08/02/2020. (2) De acordo com a Análise Crítica contida no Relatório Mensal da Qualidade da Água e Sedimentos - Fechamento de ciclo (janeiro a junho/2019) e considerando a integração de parâmetros de monitoramento com o PME, os pontos de monitoramento PT-50, PT-24, PT-26 e PT-31 foram excluídos da malha amostral.

Fonte: Vale S.A, 2021a - adaptado.