

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**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**

**Jéssyca Irene Guimarães**

**Belo Horizonte**

**2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,**  
**MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**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**

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

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Avaliação e gerenciamento de impactos e de riscos ambientais

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2018

G963i	<p>Guimarães, Jéssyca Irene. Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais. Estudo de caso [manuscrito] : Bacia do rio Doce / Jéssyca Irene Guimarães. – 2018. 172 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 139-172.</p> <p>Bibliografia: f. 123-138.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Água - Qualidade - Teses. 4. Águas superficiais - Teses. 5. Análise multivariada - Teses. 6. Estatística não paramétrica - Teses. 7. Doce, Rio, Bacia (MG e ES) I. Oliveira, Sílvia Maria Alves Corrêa. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 628(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - [posgrad@desa.ufmg.br](mailto:posgrad@desa.ufmg.br)

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

## FOLHA DE APROVAÇÃO

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

**JÉSSYCA IRENE GUIMARÃES**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profª SILVIA MARIA ALVES CORREA OLIVEIRA

Profª MIRIAM CRISTINA SANTOS AMARAL MORAVIA

Profª MARILIA CARVALHO DE MELO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Prof. Nilo de Oliveira Nascimento  
Coordenador

Versão Final aprovada por

Profª. Silvia Maria Alves Corrêa Oliveira  
Orientadora

Belo Horizonte, 15 de março de 2018.

*"Mestre, aprendi que confiar nas palavras é ilusório; e diante das palavras, o verdadeiro sentido surge através do silêncio. Mas vejo que os Sutas e as recitações são feitas de palavras; que o ensinamento é transmitido pela voz. Se o Dharma está além dos termos, porque os termos são usados para defini-lo?"*

*O velho sábio respondeu: "As palavras são como um dedo apontando para a Lua; cuida de saber olhar para a Lua, não se preocupe com o dedo que a aponta."*

*O monge replicou: "Mas eu não poderia olhar a Lua, sem precisar que algum dedo alheio a indique?"*

*"Poderia," confirmou o mestre, "e assim tu o farás, pois ninguém mais pode olhar a lua por ti. As palavras são como bolhas de sabão: frágeis e inconsistentes, desaparecem quando em contato prolongado com o ar. A Lua está e sempre esteve à vista. O Dharma é eterno e completamente revelado. As palavras não podem revelar o que já está revelado desde o Primeiro Princípio."*

*"Então," o monge perguntou, "por que os homens precisam que lhes seja revelado o que já é de seu conhecimento?"*

*"Porque," completou o sábio, "da mesma forma que ver a Lua todas as noites faz com que os homens se esqueçam dela pelo simples costume de aceitar sua existência como fato consumado, assim também os homens não confiam na verdade já revelada pelo simples fato dela se manifestar em todas as coisas, sem distinção. Desta forma, as palavras são um subterfúgio, um adorno para embelezar e atrair nossa atenção. E como qualquer adorno, pode ser valorizado mais do que é necessário."*

*O mestre ficou em silêncio durante muito tempo. Então, de súbito, simplesmente apontou para a lua.*

*Conto Zen Budista*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço também

À professora e orientadora Sílvia Oliveira pelo grande esforço, pela paciência e pela confiança depositada em mim.

Ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas pela disponibilização dos dados de monitoramento.

Ao meu pai Cesar, a minha mãe Isabel e ao minha irmão Julio pelo amor e apoio em todos os momentos da minha vida; sem os quais não chegaria até aqui.

Ao meu amor Rapha por seu imenso carinho e amor e também por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, nunca desistindo de mim.

À WayCarbon quanto empresa e quanto família que me deu suporte e fez ser possível concretizar esse mestrado. Principalmente ao Felipe Bittencourt pelo entusiasmo e por ter sido um dos primeiros idealizadores dessa conquista.

Aos meus colegas de mestrado e, em especial, a Aninha, a Carol e a Livia que sempre me apoiaram tecnicamente e até mesmo psicologicamente.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SMARH).

A todos os amigos e familiares que sempre me incentivaram e estiveram do meu lado.

## RESUMO

Devido ao grande impacto associado ao rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração e por existirem poucos trabalhos analisando o impacto resultante, este trabalho tem grande relevância por analisar o impacto do rompimento na qualidade das águas superficiais e a capacidade de recuperação dos corpos de água diretamente atingidos. Como objeto de estudo, foi analisada a qualidade das águas superficiais de antes e após o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro no Estado de Minas Gerais em 05/11/2015.

O desenvolvimento deste estudo consistiu na utilização dos dados de qualidade das águas do IGAM em dois períodos: entre outubro de 2008 e outubro de 2015, caracterizando o período do pré-rompimento; e entre novembro de 2015 e março de 2017, caracterizando o período do pós-rompimento. Foram realizadas análises da qualidade das águas para o período (i) anterior e (ii) posterior ao rompimento nos trechos impactados; e ainda (iii) uma comparação entre os dois períodos. Foram utilizadas as seguintes técnicas estatísticas multivariadas: Análise de Cluster (AC), Análise de Componentes Principais (ACP), Análise Fatorial (AF) e as análises não-paramétricas de *Kruskal-Wallis* (KW), seguida pelas comparações múltiplas de *Dunn* e ainda a tendência temporal de *Mann-Kendall* (MK). Como resultado foi obtido que, mesmo antes do rompimento, o trecho estudado já estava fortemente impactado pelas atividades econômicas e pelo lançamento de esgotos domésticos nos rios. Principalmente o trecho do município de Belo Oriente-MG que continuou um dos mais impactados mesmo após o rompimento, principalmente devido à confluência do rio Piracicaba a montante deste município. Após o rompimento, tem-se que as maiores concentrações foram medidas imediatamente após a passagem da pluma de rejeitos pela estação de monitoramento. Contudo, os metais cromo total, mercúrio total e cádmio total voltaram a ser monitorados abaixo do LD um ou dois dias após a passagem da pluma de rejeitos; ademais, todos os parâmetros, em quase todas as estações, apresentaram tendência de redução com o passar do tempo, exceto o oxigênio dissolvido, que como o esperado, apresentou tendência de aumento com o tempo. Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo e tendência de redução foram monitorados pela estação em Aimorés-MG que, por ser o último município mineiro na rota da pluma de rejeitos, foi o município onde a onda chegou com menor velocidade e menor volume. O trecho menos impactados após o rompimento é o mais a jusante, entre Resplendor-MG e Aimorés-MG; e o trecho mais impactado é o mais a montante, entre Barra Mansa-MG e Belo Oriente-MG. Tem-se, portanto, que os trechos de rio analisados apresentaram uma tendência de recuperação da qualidade das águas superficiais com o passar do tempo e tem-se, ainda, que quanto maior a distância entre o ponto de rompimento da barragem e o ponto de monitoramento, menor é o impacto na qualidade das águas superficiais.

Palavras-chaves: Qualidade das águas superficiais, rompimento de barragem de rejeitos de mineração, estatística multivariada e não-paramétrica, bacia do rio Doce.

## ABSTRACT

Due to the great impact associated to the failure of a mine tailings dam and due to the fact that there are few studies analyzing the resulting impact, this work has great relevance for analyzing the impact of the dam failure in the surface water quality and the ability to recover of the water bodies directly affected. As a study object, the quality of surface water was analyzed before and after the rupture of an iron ore tailings dam in the State of Minas Gerais on November 5, 2015.

The development of this study consists on the use of the water quality data from IGAM in two periods: between October 2008 and October 2015, characterizing the pre-failure period; and between November 2015 and March 2017, characterizing the post-failure period. Water quality analyzes were carried out for the period (i) above and (ii) after the rupture in the impacted stretches; and (iii) a comparison between the both periods. The following multivariate statistical techniques were used: Cluster Analysis (CA), Principal Component Analysis (PCA), Factor Analysis (FA) and non-parametric *Kruskal-Wallis* (KW) analyzes, followed by Dunn's multiple comparisons and the non-parametric *Mann-Kendall* (MK) trend test. As a result, it was found that even before the failure, the studied watercourses have already been strongly impacted by economic activities and the discharge of domestic sewage into the rivers. Above all, the stretch of Belo Oriente-MG that has continued to be one of the most impacted even after the disruption, especially due to the confluence of the Piracicaba river upstream of this municipality. After the disruption, it is observed that the highest concentrations were measured immediately after the passage of the tailing wave by the monitoring station. However, the chromium, mercury and cadmium metals were again monitored below the LD one or two days after the passage of the tailing wave; in addition, all the parameters in almost all the stations presented downward trend with the time, except the dissolved oxygen that, as expected, presented tendency of increase with the time. The parameters that did not correlate with the time and either present a downward trend with the time were monitored by the station located in Aimorés-MG, which, being the last municipality from Minas Gerais in the route of the tailing wave, it was the site where the wave presented a lower speed and lower volume. The less impacted stretch after the failure is downstream, between Resplendor-MG and Aimorés-MG; and the most impacted stretch is upstream, between Barra Mansa-MG and Belo Oriente-MG. Therefore, the river sections in analyzes showed a tendency to recover the quality of the surface water with the time and that the greater the distance between the point of the dam failure and the point of monitoring, the lower is the impact on the surface water quality.

Keywords: Surface water quality, iron ore tailings dam failure, multivariate and non-parametric statistics, River Doce basin.



# SUMÁRIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT .....	8
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE QUADROS .....	12
LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS .....	14
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
3.1 OS IMPACTOS NOS CORPOS D'ÁGUA POR AÇÃO ANTRÓPICA .....	19
3.2 CAUSAS E IMPACTOS DO ROMPIMENTO DAS BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO NO MUNDO, NO BRASIL E EM MINAS GERAIS .....	20
3.3 LEGISLAÇÃO NO MUNDO, NO BRASIL E EM MINAS GERAIS .....	24
3.4 IMPACTOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM MARIANA-MG .....	26
3.5 CARACTERÍSTICAS DO REJEITO E OS IMPACTOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS NO TRECHO DIRETAMENTE AFETADO PELO ROMPIMENTO .....	28
3.5.1 <i>Impactos econômicos e sociais decorrentes do rompimento.....</i>	<i>31</i>
3.6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
3.7 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS .....	36
3.7.1 <i>Monitoramento tradicional das águas em Minas Gerais e na bacia do rio Doce.....</i>	<i>36</i>
3.7.2 <i>Monitoramento da água do trecho impactado após o rompimento da barragem.....</i>	<i>38</i>
3.8 TÉCNICAS ESTATÍSTICAS COMO FERRAMENTA PARA ANÁLISE DOS DADOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS ...	39
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>49</b>
4.1 ESTRUTURA ADOTADA NO TRABALHO .....	49
4.2 DESCRIÇÃO GERAL DOS BANCOS DE DADOS ADOTADOS .....	49
4.3 ANÁLISE DESCRITIVA DO BANCO DE DADOS.....	54
4.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA .....	54
4.4.1 <i>Técnicas estatísticas multivariadas para análises dos dados: (i) antes e do (ii) depois do rompimento.....</i>	<i>54</i>
4.4.2 <i>Comparação dos dados monitorados com os limites de referência da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG/2008.....</i>	<i>55</i>
4.4.3 <i>Uso e ocupação do solo na região de estudo.....</i>	<i>56</i>
4.4.4 <i>Organização do banco de dados para as análises do período anterior ao rompimento da barragem</i>	<i>59</i>
4.4.5 <i>Organização do banco de dados para as análises do período posterior ao rompimento da barragem</i>	<i>60</i>
4.4.6 <i>Análise de tendência temporal das concentrações dos parâmetros após o rompimento .....</i>	<i>62</i>
4.4.7 <i>Organização do banco de dados para comparação entre o período anterior e posterior ao rompimento.....</i>	<i>63</i>
4.4.8 <i>Avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia .....</i>	<i>63</i>
<b>5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA PORÇÃO MINEIRA DO RIO DOCE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO.....</b>	<b>65</b>
5.1 RESULTADO AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DO PERÍODO ANTERIOR AO ROMPIMENTO .....	65
5.1.1 <i>Análise de Cluster e Análise Fatorial.....</i>	<i>65</i>
5.1.2 <i>Conclusões.....</i>	<i>75</i>
5.2 RESULTADO AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DO PERÍODO POSTERIOR AO ROMPIMENTO .....	77
5.2.1 <i>Análise de Cluster e Análise Fatorial.....</i>	<i>77</i>

5.2.2	<i>Teste de tendência temporal de Mann-Kendall</i> .....	85
5.2.3	<i>Conclusões</i> .....	94
<b>6</b>	<b>COMPARAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERCIAIS DA PORÇÃO MINEIRA DO RIO DOCE NO ENTRE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM MARIANA-MG</b> .....	<b>95</b>
6.1	TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE KRUSKAL-WALLIS E COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS DE DUNN .....	95
6.1.1	<i>Turbidez</i> .....	97
6.1.2	<i>Oxigênio dissolvido</i> .....	100
6.1.3	<i>Ferro dissolvido</i> .....	104
6.1.4	<i>Manganês total</i> .....	108
6.1.5	<i>Arsênio total</i> .....	114
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>118</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>122</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>123</b>
	<b>APÊNDICE I</b> .....	<b>139</b>
	<b>APÊNDICE II</b> .....	<b>153</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Estações de monitoramento do IGAM na bacia do rio Doce - Minas Gerais.....	34
Figura 4-1 – Mapa de localização das estações de monitoramento do IGAM no trecho impactado pelo rompimento da barragem.....	51
Figura 4-2 - Perfil longitudinal do curso d’água afetado pelo rompimento da barragem de Fundão.....	58
Figura 5-1 - Dendograma de Cluster para os dados de outubro de 2008 a outubro de 2015 das estações de monitoramento.....	65
Figura 5-2 - Dendograma de Cluster para os dados de 25/11/2015 a 15/03/2017 das estações de monitoramento.....	77
Figura 5-3 – Análise de tendência temporal da turbidez por meio da aplicação do teste de <i>Mann-Kendall</i> .....	86
Figura 5-4 – Análise de tendência temporal do oxigênio dissolvido por meio da aplicação do teste de <i>Mann-Kendall</i> .....	88
Figura 5-5 – Análise de tendência temporal do ferro dissolvido por meio da aplicação do teste de <i>Mann-Kendall</i> .....	90
Figura 5-6 – Análise de tendência temporal do manganês total por meio da aplicação do teste de <i>Mann-Kendall</i> .....	91
Figura 5-7 – Análise de tendência temporal arsênio total por meio da aplicação do teste de <i>Mann-Kendall</i> .....	93
Figura 6-1 - Box-whisker do parâmetro turbidez medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.....	98
Figura 6-2 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro turbidez das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.....	98
Figura 6-3 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro turbidez (UNT) por estação de monitoramento. As estações estão ordenadas de montante para jusante.....	99
Figura 6-4 - Box-whisker do parâmetro oxigênio dissolvido medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.....	101
Figura 6-5 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro oxigênio dissolvido das estações considerando apenas o antes (A) do rompimento.....	101
Figura 6-6 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro oxigênio dissolvido das estações considerando apenas o depois (D) do rompimento.....	102
Figura 6-7 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro oxigênio dissolvido das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.....	102
Figura 6-8 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro oxigênio dissolvido (mg/L) por estação de monitoramento. As estações estão ordenadas de montante para jusante.....	103
Figura 6-9 - Box-whisker do parâmetro ferro dissolvido medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.....	105
Figura 6-10 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro ferro dissolvido das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.....	106

Figura 6-11 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro ferro dissolvido por estação de monitoramento.....	107
Figura 6-12 - Box-whisker do parâmetro manganês total medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento. ....	109
Figura 6-13 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro manganês total das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.....	109
Figura 6-14 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro manganês total das estações considerando apenas depois (D) do rompimento.....	110
Figura 6-15 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro manganês total por estação de monitoramento.....	111
Figura 6-16 - Evolução da concentração do arsênio e dos metais considerando (a) imediatamente o pós-rompimento e (b) 20 dias após o rompimento.....	113
Figura 6-17 - Box-whisker do parâmetro arsênio total medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.....	115
Figura 6-18 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro arsênio total das estações considerando apenas o antes (A) do rompimento.....	115
Figura 6-19 - Análise de comparações múltiplas de <i>Dunn</i> como complemento do teste de <i>Kruskal-Wallis</i> para o parâmetro arsênio total das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.....	116
Figura 6-20 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro arsênio total por estação de monitoramento.....	117

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1 - Desastres em barragens de mineração em Minas Gerais.....	23
Quadro 3-2- Alteração da frequência da coleta das amostras de água e de sedimentos do monitoramento especial do rio Doce.....	38
Quadro 3-3 – Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.....	41
Quadro 4-1 – Limite dos parâmetros de qualidade das águas superficiais analisados neste estudo para rios classe 2 de acordo com a DN COPAM CERH-MG 01/08.....	56
Quadro 4-2 – Municípios mineiros diretamente impactados pelo rompimento da barragem de rejeito em Mariana-MG.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Número de estações de monitoramento da qualidade das água por UPGRH e por sub-bacia da bacia do rio Doce.....	33
Tabela 4-1 - Descrição detalhada da localização das estações de monitoramento do IGAM no trecho impactado pelo rompimento da barragem, na porção mineira da Bacia do rio Doce. ....	50
Tabela 4-2- Estações de monitoramento, nome, símbolo/notação de referência e unidade dos parâmetros selecionados para análise do trecho impactado. ....	53
Tabela 5-1 - Comparação da mediana dos parâmetros para os dados do pré-rompimento por agrupamento do dendograma de Cluster e por estação com os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. Estão destacadas com cor as medianas que superaram o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. ....	67
Tabela 5-2 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pré-rompimento para cada fator após rotação <i>varimax</i> da análise fatorial, referentes ao grupo 3 formado pela Análise de Cluster.....	72
Tabela 5-3 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pré-rompimento para cada fator após rotação <i>varimax</i> da análise fatorial, referentes ao grupo 5 formado pela Análise de Cluster.....	74
Tabela 5-4 - Comparação da mediana dos parâmetros para os dados do pós-rompimento por agrupamento do dendograma de Cluster e por estação com os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. Estão destacadas com cor as medianas que superaram o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. ....	79
Tabela 5-5 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pós-rompimento, desconsiderando os vinte primeiros dias após o desastre, para cada fator após rotação <i>varimax</i> da análise fatorial, referentes ao grupo 3 formado pela Análise de Cluster. ....	81
Tabela 5-6 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pós-rompimento, desconsiderando os vinte primeiros dias após o desastre, para cada fator após rotação <i>varimax</i> da análise fatorial, referentes ao grupo 6 formado pela Análise de Cluster. ....	82
Tabela 5-7 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pós-rompimento, desconsiderando os vinte primeiros dias após o desastre, para cada fator após rotação <i>varimax</i> da análise fatorial, referentes ao grupo 5 formado pela Análise de Cluster. ....	84
Tabela 6-1 – Percentual de medianas de concentrações medidas após o rompimento significativamente superiores às demais medianas do período anterior. ....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS

AAF	Autorização Ambiental de Funcionamento
AC	Análise de Cluster
AD	Análise Discriminante
ACP	Análise de Componentes Principais
AF	Análise Fatorial
AGERH	Agência Estadual de Recursos Hídricos
AIQ	Método da Amplitude Interquartis
ANA	Agência Nacional das Águas
CBH	Comitês de Bacias Hidrográfica
CENAD	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
CERH-MG	Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
CEXBARRA	Comissão Externa de Rompimento de Barragem na Região de Mariana-MG
CBH-Doce	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce
CSB	Comissão de Segurança de Barragens
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
FUNAI	Fundação Nacional do Índio
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IDAF	Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IEMA	Instituto Estadual do Meio Ambiente do Espírito Santo
INAG	Instituto Nacional da Água
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LD	Limite de Detecção
LDM	Limite de Detecção dos Métodos
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LO	Licença de Operação
LOC	Licença de Operação Corretiva

MK	Teste de <i>Mann Kendall</i>
SMK	Teste Sazonal de <i>Mann Kendall</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PMQQS Sedimentos	Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos
PNLA	Portal Nacional do Licenciamento Ambiental
RSB	Regulamento de Segurança de Barragens
SEMAD	Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais
SINIMA	Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SOSMA	SOS Mata Atlântica
TTAC	Termo de Transação de Ajustamento de Conduta
UHE	Usinas Hidrelétricas de Energia

# 1 INTRODUÇÃO

O Estado de Minas Gerais é fortemente impactado pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais, o que frequentemente ocasiona eutrofização dos cursos d'água (MMA, 2009), além de ser muito impactado pelas atividades minerárias (BORBA, 2000; CHRISTOFARO E LEÃO, 2009; CALAZANS, 2015), pecuária, agricultura e aporte de cargas difusas de origem urbana ou rural (IGAM, 2016). Além desses impactos de características contínuas, há registros de desastres ambientais que resultam em impactos negativos intensos e extensos tanto no tempo quanto no espaço.

No século XX e, mais intensamente nos últimos 50 anos, a exposição das pessoas aos riscos de desastres vem crescendo no Brasil e no mundo mais rapidamente do que as capacidades de redução da vulnerabilidade (FREITAS *et al.*, 2016). Os impactos ambientais e os riscos mais significativos associados à indústria da mineração são relativos às barragens de rejeitos e aos depósitos de estéril e, em alguns casos, são causados por problemas de gestão de segurança.

A frequência de incidentes de rompimento de barragem de rejeitos mudou recentemente no espaço; já que, anteriormente, acontecia nos países desenvolvidos e passou, gradualmente, a ocorrer nos países em desenvolvimento (AZAM, 2010). Além disso, esse mesmo estudo feito por Azam (2010) afirma que barragens construídas há cerca de 50 anos são altamente propensas ao rompimento, particularmente em países que não possuem monitoramento adequado.

A bacia do rio Doce é marcada por importantes reservas minerárias (ANA, 2016), fato este que atraiu grandes indústrias do setor de mineração. Segundo dados do DNPM, existem 366 áreas de concessão de lavra na bacia do rio Doce (ANA, 2016). Devido à intensa atividade minerária existente na região da bacia do rio Doce (ANA, 2015), há ocorrências de acidentes envolvendo barragens ou pilhas de rejeitos de mineração na região da bacia. Um dos mais impactantes foi o rompimento da barragem de Fundão da Samarco Mineração SA ocorrido em Mariana-MG em 05/11/2015.

O rompimento da barragem de Fundão causou o rompimento da barragem de Santarém de acúmulo de água a jusante. O rejeito diluído da barragem de Fundão ganhou velocidade e percorreu cerca de 650 km até a foz do rio Doce em Linhares-ES, causando impactos negativos nos rios e margens, além do assoreamento dos rios e barragens de geração de energia elétrica, e ainda deixou muitas comunidades sem acesso à água potável.



Contudo, estudos recentes feitos por Santolin e colaboradores (2015), na bacia do rio Doce indicaram uma violação total de 41% em relação à Diretriz de Qualidade do Sedimento para os sedimentos da bacia do rio Doce para análises referente ao período anterior ao rompimento. Caracterizando uma degradação existente na bacia já há muitos anos. Confirmando essa degradação já existente, um estudo feito imediatamente a jusante da barragem de Fundão seis dias após o rompimento, detectou que a concentração média de Pb, Cr, Ba e Al em solos profundos era maior que as concentrações em amostras de lama de superfície formada com o rompimento da barragem (SEGURA *et al.*, 2016).

Além disso, a alteração da concentração de metais traços em sedimentos existentes em cursos de água não necessariamente indica contaminação de origem externa, mas também pode estar associada a composição mineralógica da região (SILVA *et al.*, 2012). É difícil estabelecer padrões adequados de metais nos sedimentos, já que são diversas as condições hidrodinâmicas e geomorfológicas existentes (QI *et al.*, 2010). Tem-se também que a diferença entre os valores padronizados de metais nos sedimentos e os valores encontrados quando há contaminação antrópica pode ser definida de acordo com as especificidades de cada ecossistema (PASTORINHO *et al.* 2012; MIL-HOMENS *et al.* 2013).

Algumas semanas após o rompimento da barragem de Fundão, o CPRM relatou níveis baixos de metais dissolvidos e metais pesados dissolvidos na água e nos sedimentos (CPRM, 2015). As concentrações dos contaminantes dissolvidos arsênio, cromo, cobre, chumbo, zinco e mercúrio nas amostras de água coletadas pela CPRM estão próximas aos limites de detecção do método analítico utilizado. Essas concentrações reproduzem os valores encontrados pela CPRM em 2010 (CPRM, 2015). De forma complementar, os resultados da pré-avaliação dos rejeitos de minério de ferro da Samarco estão em concordância com os baixos níveis encontrados no trabalho de Segura e colaboradores (2016) na região após o rompimento (SEGURA *et al.*, 2016).

A pesquisa tem grande relevância, já que existem poucos trabalhos analisando a qualidade de águas superficiais após o impacto resultante do rompimento de barragens de rejeito de mineração. A utilização de diversas técnicas estatísticas permitiu verificar e quantificar o grande impacto do rompimento na qualidade das águas superficiais e a capacidade de recuperação dos trechos de rios afetados, considerando a concentração dos constituintes analisados.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 *Objetivo geral***

O objetivo geral é:

- Efetuar uma análise espaço-temporal da qualidade das águas superficiais da porção mineira da bacia do rio Doce considerando o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro.

### **2.2 *Objetivos específicos***

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a qualidade das águas dos rios da bacia do rio Doce antes e após o rompimento da barragem de rejeitos de minério por meio de técnicas estatísticas multivariadas.
- Determinar os parâmetros mais significativos para a degradação observada na qualidade das águas da bacia do rio Doce.
- Determinar os trechos dos cursos de água mais impactados através da determinação da estação de monitoramento mais impactada.
- Calcular as tendências temporais das concentrações dos parâmetros analisados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 *Os impactos nos corpos d'água por ação antrópica*

A água é indispensável à existência da vida e ainda é extremamente importante para a manutenção e controle do clima na Terra (TUNDISI, 2003). Ao longo da história, o ser humano estabelece uma complexa relação com os rios, que varia devido ao dinamismo e à natural sazonalidade dos corpos d'água e também devido ao crescimento das necessidades e expectativas humanas (BAPTISTA, 2016). Devido à toda essa variação temporal e espacial, a qualidade da água também varia no tempo e em função de sua localização e da gestão dos recursos hídricos no local. Contudo, o desafio está em garantir a qualidade das águas nos rios, lagos e represas naturais ou não, já que não é apenas importante para o equilíbrio ambiental, mas também é essencial para o desenvolvimento econômico, garantia da saúde e da qualidade de vida da população.

A variação da qualidade da água está intrinsecamente relacionada com a proteção das nascentes, recebimento de cargas poluidoras difusas naturais e antrópicas, degradação das áreas no entorno, preservação das matas ciliares, gestão do uso dos recursos hídricos, conservação do solo e monitoramento da qualidade da água (BAPTISTA, 2016). Existem diversas fontes de cargas poluidoras que reduzem a qualidade da água, como por exemplo esgotos domésticos e outros efluentes urbanos, efluentes e rejeitos industriais e poluição difusa em áreas rurais por aditivos químicos, adubos orgânicos e químicos etc. Dentre estas fontes, a depender do uso e ocupação do solo, as atividades agropecuárias e os efluentes urbanos e industriais podem ser destacados como os principais responsáveis pelo decréscimo da qualidade das águas superficiais. Juntos provocam um efeito deletério, através do desmatamento das matas ciliares; assoreamento dos rios; aumento de turbidez; aumento da concentração de nutrientes, organismos patogênicos, metais e agroquímicos; alteração do equilíbrio iônico d'água e incremento no consumo de oxigênio dissolvido (ARAUJO *et al.*, 2007; LOPES, 2007; MERTEN *et al.*, 2002; RODRIGUES, 2006). Portanto, é de grande importância realizar o monitoramento da qualidade das águas superficiais, possibilitando melhor conhecimento da situação existente, permitindo detectar tendências espaciais e temporais (TRINDADE, 2013; COSTA, 2014; CALAZANS, 2015).

### **3.2 Causas e impactos do rompimento das barragens de rejeito de mineração no mundo, no Brasil e em Minas Gerais**

As barragens de rejeito de mineração começaram a ser construídas a partir da década de 1930 com o objetivo de evitar que os rejeitos oriundos da mineração de minério fossem lançados diretamente nos cursos de água (CBDB, 2011). A atividade de mineração inclui a exploração de ferro, alumínio, berilo, crisoberilo, mica e feldspato. Além disso, há atividades de mineração de ouro em pequena escala, chamadas "garimpos". Essas atividades usam Hg para melhorar a eficiência de extração de ouro. O amálgama Au-Hg pode ser facilmente separado dos outros componentes minerais do sedimento, após o qual é aquecido para liberar Hg e obter o ouro. Em geral, essas atividades são ilegais e Hg é liberado para os sistemas de água e diretamente para a atmosfera (SANTOLIN *et al.*, 2015).

Os resíduos de mineração diferem-se dos resíduos produzidos em outros setores por serem diferenciados entre estéril (sólidos resultantes da extração) e rejeitos (polpa resultante do beneficiamento). Os rejeitos de mineração são compreendidos como subprodutos de origem mineral sem valor agregado que são, portanto, separados do mineral de valor econômico e descartados. A maior parte desses rejeitos produzidos pelo mundo são dispostos em reservatórios denominados barragens de rejeitos (IBRAM, 2016). Estimativas ainda apontam que existam cerca de 3.500 barragens em todo o mundo (FEBRABAN, 2016).

Os impactos ambientais e os riscos mais significativos para a indústria da mineração estão associados às barragens de rejeitos e depósitos de estéril. E, ao longo da história, os acidentes com ruptura de barragens de rejeito não são raros e, em alguns casos, são causados por problemas de gestão de segurança. Alguns trabalhos analisando o rompimento de barragens de rejeito de mineração já foram feitos pelo mundo. Contudo, no geral, eles retratam apenas os motivos da ocorrência de um rompimento e não o impacto causado pelo rompimento.

De acordo com Rico e colaboradores (2008), milhares de barragens de rejeitos em todo o mundo contêm bilhões de toneladas de resíduos de atividades de mineração. Uma série de características particulares das barragens de rejeitos faz com que estas sejam mais vulneráveis ao rompimento do que as barragens de armazenamento de água, devido a (i) aterros formados por enchimentos de origem local (solo, resíduos grosseiros, sobrecarga das operações de mineração e rejeitos); (ii) várias fases de elevação de barragem para lidar com o aumento do material sólido armazenado e do efluente (mais escoamento oriundo de precipitação) lançado;

(iii) falta de regulamento sobre critérios específicos de projeto; (iv) estabilidade das barragens que exigem monitoramento e controle contínuos durante a implantação, construção e operação da barragem e (v) altos custos dos trabalhos de remediação após o fechamento das atividades de mineração.

Na Europa, Rico e colaboradores (2008) analisaram 147 incidentes em barragens de rejeito pelo mundo e afirmam que mais de um terço dos rompimentos de barragens de rejeitos ocorreram em barragens com alturas entre 10 e 20 m. Para estes acidentes, as causas mais comuns de um rompimento estão relacionadas com a deficiente manutenção das estruturas de drenagem; monitoramento descontínuo; inexistência de controle durante as fases de construção e operação; aumento do número de barragens com procedimentos de segurança inadequados; sobrecarga imposta pelos rejeitos de mineração e ainda, falta de regulamentação para critérios específicos de projetos. Além disso, mais de 90% dos incidentes ocorreram em barragens ativas e apenas 10% referem-se a barragens abandonadas.

De acordo com Azam (2010), os principais motivos para os rompimentos de barragens são má gestão por parte dos responsáveis e chuva incomuns (em geral, valores de precipitação acima das médias históricas para a região). AZAM (2010) ainda traz como resultado de seus estudos que os rompimentos de barragens de rejeitos no mundo ocorrem predominantemente em barragens com até 30 m de altura (classificadas como pequenas a médias) e contendo um volume de rejeitos máximo de 5 milhões de m<sup>3</sup>. No âmbito mundial, tais incidentes podem ser minimizados empregando padrões de engenharia apropriados. Este autor ressalta a importância de se considerar os efeitos das mudanças climáticas, elaborar um completo planejamento de manutenção da barragem e implementar um programa de monitoramento desde a concepção inicial.

Um estudo feito por Bowker e Chambers (2015) avaliou os rompimentos de barragens ocorridos entre 1910 e 2010. Nesse estudo foi identificado um crescimento da ocorrência de rompimentos no mundo, sendo mais de 30 rompimentos graves e muito graves após a década de 1990. Essa tendência é melhor justificada pela moderna implantação de megaminas, construídas para extrair minérios a partir de reservas caracterizadas por concentrações minerais cada vez menores. Dessa forma, com a redução da qualidade dos minérios, há um aumento da quantidade de rejeitos e, conseqüentemente, do tamanho das barragens. No mesmo estudo, há uma previsão de que, entre 2010 e 2019, o rompimento de grandes barragens resultará em altos custos para a

sociedade (cerca de US\$6 bilhões) e há um destaque para a necessidade de mudanças nos sistemas regulatórios para que se adequem a essa projeção.

No Brasil, esses fatores citados ainda podem ser combinados com o estabelecimento de políticas frágeis e desestruturadas instituições públicas de controle e prevenção de desastres (FREITAS *et al.*, 2016). De forma complementar ao apontado por Freitas e colaboradores (2016), essa relação estaria associada à aceleração dos processos de licenciamento ambiental e à pressão sobre os órgãos licenciadores na fase de valoração do minério de ferro, bem como à intensificação da produção e pressão por redução de custos em períodos onde ocorre redução dos preços (MILANEZ *et al.*, 2016).

No Brasil, o rompimento da barragem do Fundão da Samarco S.A em 2015 foi um marco para o fim do megaciclo das *commodities* (MILANEZ *et al.*, 2016). De acordo com ITC (2015), este ciclo pode ser associado ao período entre 2003 e 2013, quando as importações globais de minérios tiveram um aumento de 630%. Ainda, M. Davies e Martin (2009) afirmam que há um aumento da ocorrência dos rompimentos de barragens de rejeitos durante o processo recessivo dos ciclos de preços dos minérios.

De acordo com o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (ANA, 2015), há algumas ocorrências de acidentes envolvendo barragens ou pilhas de rejeitos de mineração no Brasil, sendo que o mesmo cenário se repete no Estado de Minas Gerais. No Quadro 3-1, a título de exemplo, são apresentados alguns acidentes históricos relativos ao rompimento de barragens de rejeito de mineração.

Quadro 3-1 - Desastres em barragens de mineração em Minas Gerais.

Ano	Empresa	Município	Breve descrição
1986	Grupo Itaminas	Itabirito	Rompimento de barragem de rejeitos da Mina Fernandinho causando a morte de sete pessoas na região central.
2001	Mineração Rio Verde	Nova Lima	Rompimento da barragem no distrito de São Sebastião das Águas Claras, em Nova Lima, causando assoreamento de 6,4 km do córrego Taquaras e ainda a morte de cinco pessoas. A onda de lama atingiu 43 hectares de Mata Atlântica e também assoreou o córrego Fechos.
2006	Mineradora Rio Pomba Cataguases	Mirai	Vazamento de 1.200.000 de m <sup>3</sup> de rejeitos contaminando córregos, causando mortandade de peixes e interrompendo fornecimento de água.
2007	Mineradora Rio Pomba Cataguases	Mirai	Rompimento de barragem com 2.280.000 de m <sup>3</sup> de material inundando as cidades de Mirai e Muriaé desalojando mais de 4.000 pessoas.
2008	Companhia Siderúrgica Nacional	Congonhas	Rompimento da estrutura que ligava o vertedouro à represa da Mina Casa de Pedra, causando aumento do volume do Rio Maranhão e desalojando 40 famílias.
2014	Herculano Mineração	Itabirito	Rompimento de barragem de rejeitos, ferindo uma pessoa e causando a morte de três funcionários da mineradora que trabalhavam na manutenção da barragem.

Fonte: adaptado IBAMA (2009), N. Oliveira (2015) e GUIMARAES *et al.* (2017).

### **3.3 Legislação no mundo, no Brasil e em Minas Gerais**

Na França, em 1966, criou-se um regulamento de segurança, reforçado por um decreto em 1968, tornando obrigatória a preparação de planos de emergência e de resgate das populações a jusante da barragem de Malpasset (BRASIL, 2005). Esse regulamento foi motivado pela ruptura da barragem de Malpasset em 1959, onde começaram a compreender a possibilidade de existência de falhas associadas a uma barragem e risco às populações a jusante. Além disso, segundo Benoist (1989), passou a ser obrigatória a elaboração de planos de emergência para todas as barragens com mais de 20 metros de altura e reservatório com capacidade superior a 15 hm<sup>3</sup>. Tornou-se obrigatória também a elaboração de mapas de inundação indicando as áreas potencialmente inundáveis por uma eventual onda de ruptura.

Nos Estados Unidos, no ano de 2002, a legislação passou a considerar ataques terroristas contra as barragens. Segundo FEMA (2004), os governos estaduais dos EUA regulam 95% das cerca de 79.500 barragens listadas no Inventário Nacional de Barragens. As autoridades são muito envolvidas no desenvolvimento e aprovação dos planos, assim como as comunidades em risco.

Em Portugal, no ano de 1990, foi publicado o decreto de lei nº 11/90 criando um Regulamento de Segurança de Barragens (RSB). Esse regulamento define critérios para o controle de segurança e estipula medidas de proteção civil para a população localizada a jusante de uma barragem. Esse mesmo decreto criou a Comissão de Segurança de Barragens (CSB), na qual estão presentes entidades e órgãos responsáveis pela regulamentação e controle de barragens (PORTUGAL, 1990).

Na Espanha, o “*Reglamento tecnico sobre seguridad de presas y embalses*” (ESPANHA, 1996) está sendo revisto pelo Ministério do Meio Ambiente, que exerce a função de Autoridade e é responsável pela fiscalização da segurança das barragens, pela aprovação das Normas de Exploração e dos Planos de Emergência, mas atualmente se aplica apenas em barragens de propriedade do Estado. Além disso, ainda foi iniciado um programa para implantação dos sistemas de alerta e aviso à população, já previsto nos planos de emergência.

No Brasil, a Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010), estabelece que a responsabilidade pela fiscalização dos barramentos de rejeitos de mineração é do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), do Ministério de Minas e Energia. Além disso, essa política também criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de



Barragens (SNISB). De acordo com a Política Nacional de Segurança de Barragens, a ANA deve organizar, implantar e gerir o SNISB e fiscalizar a segurança das barragens por ela outorgadas.

Em Minas Gerais, a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) é o órgão responsável pela publicação do Inventário de Barragens do Estado. Já a fiscalização do plano de segurança da barragem e a revisão periódica da segurança das barragens de mineração é feita pelo DNPM. A barragem de Fundão era destinada ao acúmulo de rejeitos de mineração, portanto, a fiscalização cabia ao DNPM. Como o empreendimento estava localizado no rio Galaxo, afluente do rio Doce de gestão estadual, a outorga de direito de uso de água do rio para a atividade de mineração foi concedida pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e a licença ambiental pela FEAM. De acordo com o Cadastro de Barragens de Minérios do DNPM, a barragem de Fundão foi classificada como categoria de baixo risco e alto dano potencial associado.

A publicação anual do Inventário de Barragens pela FEAM faz parte do Programa de Gestão de Barragens de Rejeitos e Resíduos e tem como objetivo divulgar informações referentes a barragens no estado (FEAM, 2014). Para a realização desses inventários, a FEAM leva em consideração dados fornecidos pelas empresas e auditorias *in loco*. Neles são listadas as barragens de empreendimentos minerais ou industriais construídos para a contenção de resíduos e rejeitos ou para o armazenamento de água.

De acordo com a FEAM, as barragens são divididas em três classes:

- classe I: de baixo potencial de dano ambiental, devem ser auditadas a cada três anos;
- classe II: de médio potencial de dano ambiental, devem ser auditadas a cada dois anos;
- classe III: de alto potencial de dano ambiental, devem ser auditadas anualmente.

Dentre as barragens listadas no relatório de 2014 da FEAM, a situação mais crítica está relacionada às barragens que os auditores não garantiram estabilidade (Classe III).

O Relatório de Segurança de Barragens (RSB) da ANA de 2014 (ANA, 2014) listava 14.966 barragens em todo o país, sendo 663 dedicadas a rejeitos de mineração, das quais 317 estariam localizadas no estado de Minas Gerais. Tal informação não estava de acordo com o inventário da FEAM, que listava um total de 450 barragens. É interessante ressaltar que próprio relatório

explicita suas limitações, sendo que a ANA afirma desconhecer a altura e o volume de 81% do total de barragens cadastradas.

Ainda no que diz respeito à atuação do Governo Federal, a avaliação das condições de operação das barragens é limitada, o que demonstra fragilidade na garantia da segurança dos empreendimentos. Um bom exemplo é que, assim como as avaliações apresentadas pela FEAM, as três barragens da Samarco foram consideradas de baixo risco apesar de apresentarem um alto valor de dano potencial (DNPM, 2015).

Analisando ainda o RSB, em 2014, apenas 165 barragens possuíam Planos de Ações de Emergência (PAE), ou seja, 1,1 % do total existente (ANA, 2015). Isso reforça o argumento de que a ANA desconhece as condições reais das barragens existentes no Brasil. Portanto, não há garantia de desenvolvimento dos PAE pelos empreendimentos que possuem barragem.

É plausível concluir que dado o alto grau de vulnerabilidade dessas barragens, as comunidades próximas estão expostas a grandes riscos. Esse risco é ainda amplificado quando muitas dessas comunidades estão nos mesmos municípios ou até mesmo na mesma microbacia, como no caso das barragem de Fundão.

### **3.4 Impactos do rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG**

Um dos eventos mais impactantes no quesito ambiental, econômico e social associado à mineração foi o rompimento da barragem de Fundão da Samarco Mineração SA ocorrido em Mariana-MG, em 05/11/2015. Esse fato resultou em uma onda de cheia que destruiu a localidade de Bento Rodrigues em Mariana-MG e percorreu mais de 650 km até a foz do Rio Doce, em Linhares - ES. O rompimento da barragem de Fundão impactou e impacta, por tempo ainda indefinido, os rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce (ANA, 2015).

O rompimento da barragem de Fundão levou também ao galgamento da barragem de Santarém, localizada a jusante da barragem de Fundão, que acumulava água. O efluente resultante do rompimento foi diluído com a água da barragem de Santarém e ganhou velocidade, o que intensificou a rapidez e a magnitude da destruição ambiental e social causada pelo rompimento (FEAM, 2016).

De acordo com o IBAMA, a barragem de Fundão continha cerca de 50 de m<sup>3</sup> de rejeitos, nos quais pelo menos 34 milhões de m<sup>3</sup> foram lançados no meio ambiente (IBAMA, 2017), sendo considerado não-perigoso e não-inerte para ferro e manganês conforme a NBR 10.004 (IBAMA, 2015). No mesmo laudo técnico, até o final de novembro de 2015, 16 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos atingiram o Estado do Espírito Santo (IBAMA, 2015).

O impacto do rompimento da barragem afetou áreas de influência preestabelecidas tecnicamente (três barragens e o povoado de Bento Rodrigues), e ainda, afetou também 17 distritos e 36 municípios de Minas Gerais (MPMG, 2017).

Muitos impactos imediatos foram apontados no estudo feito IBAMA (IBAMA, 2015): morte e desaparecimento de pessoas dentre trabalhadores subcontratados da Samarco e moradores de Bento Rodrigues; desalojamento de populações e impacto direto de 1.469 hectares de terras ao longo de 77 km de cursos d'água, incluindo APPs. Dados preliminares ainda indicam que os sedimentos em suspensão podem se espalhar por até 200 km no oceano (ICMBio, 2016).

No âmbito regional, os efeitos da lama e da falta de água afetaram residências e prejudicaram atividades econômicas, de geração de energia e industriais (IBAMA, 2015). Além de impactar diretamente pescadores e populações tradicionais, como a tribo Krenak. De forma complementar, de acordo com o relatório da ANA (2016), o rompimento da barragem de Fundão causou prejuízos para outras indústrias na região e para atividades relacionadas à pesca e ao lazer. Em estudos feitos por Freitas e colaboradores (2016), diversos danos humanos e ambientais podem permanecer por um longo prazo, e ainda diversos efeitos podem ser irreversíveis e de difícil gestão. Tem-se, portanto, que o Brasil pode fortalecer a legislação através de melhores práticas de governança, programas de monitoramento melhor estruturados, licenciamento ambiental mais rigoroso etc (FERNANDES *et al.*, 2016; NEVES *et al.*, 2016).

Em decorrência do rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues em Mariana-MG, com consequências em toda a extensão do rio Doce, o IGAM intensificou o monitoramento já executado na bacia, referente ao Programa Águas de Minas, por meio da elaboração de um plano de monitoramento emergencial da qualidade das águas dos principais corpos de água afetados pelo desastre. O objetivo principal era avaliar o grau de interferência nos recursos hídricos, os níveis de poluição e de degradação ambiental. Desta forma, tornou-se possível comparar a qualidade das águas antes e após o rompimento da barragem na Bacia.

### **3.5 Características do rejeito e os impactos na qualidade das águas superficiais no trecho diretamente afetado pelo rompimento**

Apesar do armazenamento da polpa liquefeita de rejeitos de mineração poder representar um risco socioeconômico e ambiental quando não bem gerenciado, um estudo feito em 2003 por Pires e colaboradores (PIRES *et al.*, 2003) na barragem de Germano da Samarco revelou que o rejeito da barragem, por ser rico em goethita, possui grande capacidade de adsorver o cromo.

O material beneficiado na usina da Samarco é o itabirito que contém um teor médio de cromo de 71 µg/ml (ppm) (Muller, 1991). Por apresentar carga negativa e devido ao pH do meio, o itabirito adsorve Cr<sup>3+</sup> sobre sua superfície cristalina. Dessa forma, os testes de lixiviação realizados por Pires e colaboradores (2003) mostraram baixas concentrações do cromo no liquor, o que significa que este metal não é disponibilizado nem para a barragem de rejeitos e nem para o sistema hídrico (PIRES *et al.*, 2003). Fato este confirmado por um estudo feito em 1999 por Matsumura que mediu que a fração líquida da lama que é lançada para a barragem de Germano apresenta um teor de cromo de 600 ppb (Matsumura, 1999). Outro estudo afirma ainda que a grande capacidade de adsorção do cromo e de outros metais pesados está associada a presença de goethita no resíduo (van Geen *et al.*, 1994). Por fim, Pires e colaboradores (2003), concluíram que a barragem de Germano da Samarco possui grande capacidade de retenção de metais pesados, o que diminui a dispersão de poluentes.

Com relação aos sedimentos existentes em cursos de água, a alteração da concentração de metais traços não necessariamente indica contaminação de origem externa, mas também pode estar associada a composição mineralógica da região (SILVA *et al.*, 2012). Além disso, é difícil estabelecer padrões adequados de metais nos sedimentos, já que são diversas as condições hidrodinâmicas e geomorfológicas existentes (QI *et al.*, 2010). Por fim, tem-se também que a diferença entre os valores padronizados de metais nos sedimentos e os valores encontrados quando há contaminação antrópica pode ser definida de acordo com as especificidades de cada ecossistema (PASTORINHO *et al.* 2012; MIL-HOMENS *et al.* 2013).

A qualidade da água na bacia do rio Doce é monitorada desde 1997, porém, não há registros históricos dos parâmetros nos sedimentos da bacia. Um estudo publicado em 2015 (SANTOLIN *et al.*, 2015), anterior ao rompimento da barragem de Fundão, quantificou os níveis de Al, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn e de parâmetros físico-químicos no sedimento da bacia do rio

Doce e discutiu os resultados utilizando o índice de geoacumulação (Igeo) e o fator de enriquecimento (EF) que contribuem para o conhecimento da geoquímica metálica da bacia. Para ambos os índices, o estabelecimento dos valores padrões de metais traços para cada ambiente em estudo é fundamental para discernir se o metal é de origem antropogênica ou natural (SANTOLIN *et al.*, 2015).

Os resultados dos estudos de Santolin e colaboradores (2015) na bacia do rio Doce para análises referente ao período anterior ao rompimento, indicaram, através de análises dos sedimentos, que 15% das amostras estavam acima do limite de efeito de limiar (TEL - *threshold effect limit*) para Hg, 100% para Cr, 53% para Cu, 21% para Zn e 21% para Pb, o que constitui uma violação dos valores da Diretriz de Qualidade do Sedimento (SQG – *sediment quality guideline*). Juntos, esses resultados equivalem a uma violação total de 41% em relação à Diretriz de Qualidade do Sedimento para os sedimentos da bacia do rio Doce.

De acordo com Santolin e colaboradores (2015), as Análises de Componentes Principais (ACP) e de Cluster (AC) realizadas nas amostras de sedimentos revelaram correlação entre Pb, Zn, Hg, Fe, Mn e matéria orgânica. Essa correlação indica a tendência do Pb, Zn e Hg em interagir com óxidos de Fe-Mn e matéria orgânica, e podem estar associados a descargas domésticas e industriais nas águas da bacia do rio Doce (SANTOLIN *et al.*, 2015). A ACP também indicou que o Cr é provavelmente oriundo de atividades industriais que ocorrem na bacia devido ao comportamento anômalo observado na estação RD034 localizada em Coronel Fabriciano-MG (SANTOLIN *et al.*, 2015).

A classificação utilizando os padrões geoquímicos de qualidade dos pontos de coleta da bacia do rio Doce quanto à origem dos metais analisados revelou que as estações RD001, RD009, RD025, RD029, RD031, RD034 e RD035 foram consideradas contaminadas por causa dos valores de Igeo e EF (SANTOLIN *et al.*, 2015).

Quando comparado aos resultados obtidos pela análise do SQG e conforme indicado pela ACP e AC, pode-se concluir que estas estações são as mais impactadas na bacia do rio Doce, provavelmente por causa da atividade antropogênica (SANTOLIN *et al.*, 2015). Portanto, Santolin e colaboradores (2015), afirmam que um novo monitoramento e estudos de especiação e mobilidade desses metais são muito relevantes e devem ser realizados.

De forma complementar à análise de Santolin e colaboradores (2015), um outro estudo feito com amostras de lama, solo e água em Bento Rodrigues-MG, seis dias após o rompimento da barragem de Fundão, detectou que a concentração média de Pb em solos profundos foi cerca de 3,5 vezes maior que em amostras de lama (SEGURA *et al.*, 2016). Além disso, Cr, Ba e Al também foram medidos em maior concentração em solos mais profundos. Por outro lado, Fe e Mn foram encontrados em altas concentrações tanto nas amostras de lama quanto nas amostras de solo mais profundo (SEGURA *et al.*, 2016).

Já as análises realizadas nas amostras de água potável e de superfície do rio por Segura e colaboradores (2016), coletadas em locais não atingidos pelo deslizamento de lama, apresentaram concentração de elementos químicos de acordo com as legislações ambientais brasileiras (Portaria MS 2914/2011, CONAMA 357/2005, CONAMA 430/2011). A única exceção ocorreu na concentração de prata em águas superficiais que variou de 1,5 a 1.087 mg/L. No entanto, ao comparar as concentrações de Fe e Mn em água residual (afetada pela lama) com os valores máximos de referência para corpos d'água, tem-se que as concentrações de Fe e Mn são, respectivamente, quase 4 e 1,5 vezes maior que os limites preconizados pela resolução CONAMA 430/2011 (SEGURA *et al.*, 2016).

As variações nos níveis de elementos químicos nos ambientes aquáticos são afetadas por vários fatores: pH, diluição devido à confluência com outros rios, mudanças sazonais (estações úmidas e secas), ressuspensão de sedimentos, entre outras variáveis físico-químicas (SEGURA *et al.*, 2016). De acordo com Takeno (2005), no intervalo de pH medido nos rios pelo monitoramento do IGAM, os óxidos de Fe são estáveis e o Fe pode existir na coluna de água como partículas em suspensão.

Os testes de lixiviação/extração sugeriram que Ba, Pb, As, Sr, Fe, Mn e Al possuem alto potencial de mobilização da lama para a água. Além de apresentar baixa diversidade microbiana em amostras de lama em comparação com amostras de solo mais profundos. Os bioensaios toxicológicos (HepG2 e *Allium cepa*) indicaram riscos potenciais de citotoxicidade e danos no DNA nas amostras de lama e solo utilizadas em ambos os ensaios (SEGURA *et al.*, 2016).

De acordo com Segura e colaboradores (2016), os elementos Pb, Co, Cu, Ni e Cr apresentaram recuperações aumentadas neste procedimento de extração simples (SE) baseados no uso de CH<sub>3</sub>COOH. Já o procedimento de extração simples baseado em EDTA, revelou que o Pb não é

um composto químico pouco estável (lábil) e, mesmo em sistemas aquáticos, o Pb e também outros elementos como o Se, As, Zn, Cu, Mn e Fe estiveram fortemente ligados ao  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ou seja, não foram facilmente dissociados. Essa dissociação pode ocorrer apenas em condições extremamente ácidas, associadas ao ambiente redutor e à atividade de bactérias anaeróbicas que dissolvem as partículas de hematita (Vu *et al.*, 2013), promovendo a contaminação por Pb, por exemplo (SEGURA *et al.*, 2016).

Na lama seca coletada em Bento Rodrigues-MG, seis dias após o rompimento,  $\text{SiO}_2$ , Fe, Mn, Cu, Ca e Cr foram os analitos mais abundantes (SEGURA *et al.*, 2016). Segura e colaboradores (2016) afirmam acreditar que o procedimento utilizado para produzir uma polpa de minério de ferro mais rica eliminou elementos tóxicos como Pb, As e Al e também elementos essenciais como Mo, Se, Zn, Cu e Co.

Algumas semanas depois do rompimento da barragem de Fundão, o CPRM relatou níveis baixos de metais dissolvidos e metais pesados dissolvidos na água e nos sedimentos (CPRM, 2015). As concentrações dos contaminantes dissolvidos arsênio, cromo, cobre, chumbo, zinco e mercúrio nas amostras de água coletadas pela CPRM estão próximas aos limites de detecção do método analítico utilizado. Essas concentrações reproduzem os valores encontrados pela CPRM em 2010 (CPRM, 2015). Os resultados da pré-avaliação dos rejeitos de minério de ferro da Samarco estão em concordância com os baixos níveis encontrados no trabalho de Segura e colaboradores (SEGURA *et al.*, 2016).

### **3.5.1 Impactos econômicos e sociais decorrentes do rompimento**

O rompimento da barragem do Fundão na cidade de Mariana-MG, evidencia um paradoxo no estado de Minas Gerais, pois é necessário melhor compreender e solucionar os impactos e riscos associados à mineração, enquanto economia do Estado é fortemente dependente dessa atividade. Sendo assim, como em diversas outras cidades brasileiras, é notório o desafio de conciliar o desenvolvimento econômico, a preservação ambiental e a integração social.

No trajeto da lama foi verificado o impacto em áreas agrícolas e da Mata Atlântica de preservação permanente. O IBAMA afirma que, em 2014, a Mata Atlântica já estava reduzida a 15% de sua cobertura original, o equivalente a 19.676.120 hectares (IBAMA, 2015). Com o rompimento da barragem de Fundão, houve uma destruição de 1.469 hectares ao longo de 77

quilômetros (IBAMA, 2015). Esse percentual equivale a 0,0075% do total em hectares ainda não destruídos desse bioma.

Segundo MOTTA (2016), aproximadamente 1,4 milhões habitantes residiam nos municípios diretamente impactados (Censo Demográfico do IBGE de 2010) e podem ter sofrido, mesmo que indiretamente, algum impacto econômico, social, ambiental e arquitetônico.

Mesmo antes do desastre provocado pela ruptura da barragem do Fundão, o rio Doce já era um dos mais poluídos do país (10º lugar, segundo o IBGE) e praticamente desprovido de mata ciliar. Entre Minas Gerais e o Espírito Santo, a área de pelo menos 67% de mata ciliar que deveria conter o leito do manancial do rio Doce, como prevê o Código Florestal, apresenta um valor inferior, sendo 14,9% de floresta em Minas Gerais, ou seja, 4,5 vezes menos vegetação e 21,3% de mata ciliar no Espírito Santo.

De acordo com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (CBH-Doce, 2016), as atividades agrícolas foram as principais responsáveis pela devastação das matas ciliares ao longo dos anos. A organização não governamental SOS Mata Atlântica fez um estudo em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para apurar a extensão da devastação da mata atlântica e constatou que o que ocorre nas margens do Rio Doce se repete em todo estado, uma vez que Minas Gerais é o maior devastador desse bioma (INPE, 2014).

Muitas atividades econômicas são extensivamente desenvolvidas na bacia do rio Doce, relacionadas principalmente à mineração, ao cultivo de animais e às indústrias alimentícias (SANTOLIN *et al.*, 2015). A indústria metalúrgica e as atividades florestais também estão presentes na bacia (IGAM 2010a, b). Essas atividades afetam a qualidade da água na bacia de diferentes maneiras. As principais formas de contaminação são os resíduos domésticos e industriais, o escoamento da agricultura e também as emissões atmosféricas das indústrias de mineração e metalurgia.

### **3.6 Caracterização da área de estudo**

A bacia hidrográfica do rio Doce situa-se na região Sudeste, mais especificamente na bacia do Atlântico Sudeste. Sua área de drenagem é igual a 86.715 km (CBHDOCE, 2014). Cerca de 86% da área de drenagem desta bacia está no estado de Minas Gerais, onde se localizam as cabeceiras do rio Piranga, principal formador do rio Doce, juntamente com o rio do Carmo



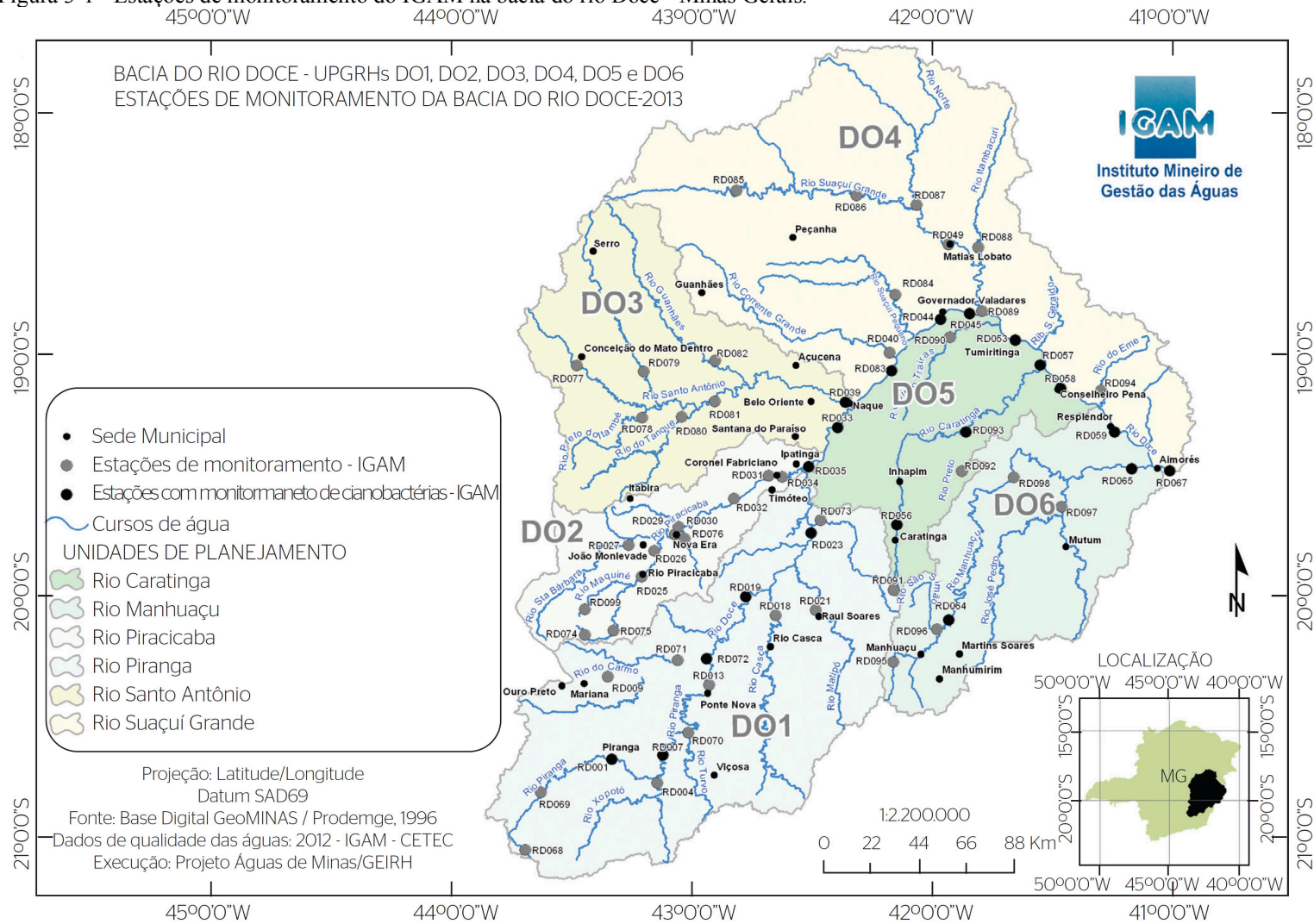
(IGAM, 2010a). O restante da área da bacia encontra-se no estado do Espírito Santo. A bacia limita-se ao sul com a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a sudoeste com a bacia do rio Grande, a oeste com a bacia do rio São Francisco, a norte e noroeste com a bacia do rio Jequitinhonha e bacias do litoral sul do Espírito Santo e a nordeste com as bacias do litoral norte do Espírito Santo (IGAM, 2010b).

O IGAM monitora a qualidade das águas superficiais em diversas estações na bacia hidrográfica do rio Doce desde 1997. Na Figura 3-1, é apresentada a porção mineira da bacia e os pontos de monitoramento de qualidade das águas de responsabilidade do IGAM. A Tabela 3-1 apresenta as sub-bacias da bacia do rio Doce e o número de estações de monitoramento por sub-bacia.

Tabela 3-1 - Número de estações de monitoramento da qualidade das água por UPGRH e por sub-bacia da bacia do rio Doce.

UPGRH	Sub-bacia	Estações
DO1	Rio Piranga	15
DO2	Rio Piracicaba	13
DO3	Rio Santo Antônio	7
DO4	Rio Suaçuí	13
DO5	Rio Caratinga	8
DO6	Rio Manhuaçu	8
Total		64

Figura 3-1 - Estações de monitoramento do IGAM na bacia do rio Doce - Minas Gerais.



Fonte: IGAM, 2013.

A precipitação média anual da bacia hidrográfica do rio Doce atinge 1500 mm nas nascentes do rio Doce e 900 mm na região mais central, ou seja, na divisa dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, e atinge valores médios de precipitação maiores na porção mais próxima ao litoral. O clima dessa região é caracterizado por duas estações bem definidas: a estação seca de maio até agosto/setembro e a estação chuvosa de outubro até março (MEDEIROS, 2012). O clima na bacia pode ser dividido em clima tropical de altitude, com chuvas de verão e verões mais amenos nas vertentes das Serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, presentes nas nascentes dos seus afluentes; e clima quente com chuvas de verão, presente nos trechos médio e baixo do rio Doce e seus afluentes (CPRM, 2014). No entanto, entre 2014 e 2015, o comportamento histórico dos eventos climáticos não foi verificado. Houve redução da precipitação média anual e registros de secas mais extremas, caracterizando este período como o evento mais crítico dos últimos 30 anos na bacia hidrográfica do rio Doce (LIMA, 2016).

A bacia do rio Doce é caracterizada pelo elevado contingente populacional, cerca de 3,1 milhões de habitantes, sendo que 68,7% dos habitantes possuem características de população urbana (BRASIL, 2010). A bacia apresenta também grande importância econômica e por possuir um amplo parque industrial (ANA, 2005). As principais atividades econômicas existentes na região da bacia são agricultura (café e cana-de-açúcar), pecuária (gado leiteiro, de corte e suinocultura), grandes empreendimentos mineradores, complexo siderúrgico de grande porte, monocultura de eucalipto, indústrias de celulose e de laticínios, setor terciário e geração de energia elétrica (CUPOLILLO *et al.*, 2008; CBH Doce, 2014).

Esse desenvolvimento econômico pode ser interpretado como um dos fatores responsáveis pelas maiores demandas hídricas do país e, associado ao fato de esta ser uma região com as menores disponibilidades relativas, existe um grande potencial de conflito de uso dos recursos hídricos. Além dos problemas relacionados à quantidade de água disponível, esta região ainda apresenta problemas sanitários devido à má gestão da coleta, transporte, tratamento e disposição final dos efluentes domésticos, industriais e dos resíduos sólidos (ANA, 2005).

A associação entre as atividades listadas e ineficientes ou inexistentes sistemas de tratamento de esgotos têm causado intensa degradação da bacia nas últimas décadas (MEDEIROS, 2012). As áreas da bacia ainda possuem um solo com elevada susceptibilidade à erosão, devido à

degradação pela agropecuária e mineração e ao desmatamento, elevando o aporte de sólidos aos cursos d'água e causando assoreamento (LIMA, 2015).

O setor produtivo de Minas Gerais manteve suas bases de agropecuária e de extração mineral, e ainda, um aumento expressivo, consolidando uma tendência, da participação do setor serviços no PIB estadual. De forma complementar, um outro pilar do setor industrial de Minas Gerais é a mineração. O minério é a principal base produtiva de Minas Gerais por fornecer os insumos do complexo metal-mecânico e pela sua presença marcante na pauta de exportações (IGAM, 2006).

Na relação entre Minas Gerais e Espírito Santo, os eixos estruturantes estão relacionados às atividades de papel, celulose e mineração, principalmente no tocante à exploração de minério de ferro e siderurgia. Portanto, atividades como extração, transporte, beneficiamento e exportação de minério de ferro fazem parte da definição dos impactos existentes na bacia do rio Doce. Assim, a geologia, o relevo e a cobertura vegetal, além da localização do Vale do Aço na bacia do rio Doce, apresenta uma clara divisão entre os espaços ocupados e os impactos nos recursos hídricos nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo.

Em Minas Gerais, o uso da água ocorre intensivamente em todas as etapas do processo produtivo da indústria mineiro-metalúrgica. Sendo, ainda, característica da mineração consumir água subterrânea, durante a lavra, e gerar água ao depositar volumes bombeados em barramentos ou em outros locais. Todavia, apesar da alta demanda hídrica, o fator limitante para a localização das indústrias de mineração ainda é a disponibilidade do insumo mineral e da mão-de-obra disponível. (IGAM, 2011). Tem-se que as principais alterações na qualidade das águas associadas à indústria mineiro-metalúrgica são (i) decorrentes de interferências nas nascentes e áreas de recarga, (ii) desvios de cursos d'água, (iii) impactos na qualidade e quantidade da água a jusante, (iv) assoreamento devido ao transporte de rejeitos sólidos para as calhas pluviais. (IGAM, 2011).

### **3.7 Monitoramento da qualidade das águas superficiais**

#### **3.7.1 Monitoramento tradicional das águas em Minas Gerais e na bacia do rio Doce**

Em virtude do desenvolvimento das atividades econômicas e do adensamento populacional desordenado, o poder público e as entidades civis criaram legislações e políticas específicas que

fundamentam a gestão participativa e descentralizada dos recursos hídricos. Para orientar o planejamento, a estruturação e a formação dos Comitês de Bacia Hidrográfica no Estado, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH-MG) padroniza, por meio da Deliberação Normativa DN Nº 36, de 23 de dezembro de 2010, 36 Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos de Minas Gerais – UPGRH. A classificação e as diretrizes ambientais para o enquadramento dos seus cursos d’água são baseadas na Resolução CONAMA 357/2005 e a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº1, publicada em maio de 2008.

Ademais, a realização do monitoramento da qualidade das águas em Minas Gerais, é realizada pelo IGAM (ANA, 2005). Mais especificamente no âmbito de planejar e promover ações direcionadas à preservação da quantidade e da qualidade das águas de Minas Gerais, tem-se como responsável o IGAM, criado em 1997 e vinculado a Secretaria de Meio Ambiente de Minas Gerais (SEMAD). Sob a responsabilidade do IGAM, o gerenciamento é feito por meio da outorga de direito de uso da água, do monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas do Estado, dos planos de recursos hídricos, bem como da consolidação de Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs) e Agências de Bacia.

O Programa Águas de Minas do IGAM foi criado também em 1997 para realizar o monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas de Minas Gerais e disponibiliza os dados da qualidade das águas, indispensáveis ao gerenciamento dos recursos hídricos. Os objetivos do Programa Águas de Minas com o monitoramento da qualidade das águas superficiais no Estado de Minas Gerais é (i) conhecer e avaliar a qualidade das águas superficiais, (ii) divulgar a situação da qualidade das águas para os usuários e apoiar o estabelecimento de metas de qualidade, (iii) fornecer subsídios para o planejamento da gestão dos recursos hídricos e verificar a efetividade de ações de controle ambiental implementadas e propor prioridades de atuação (IGAM, 2016a).

Com o rompimento da barragem em novembro de 2015, no distrito de Bento Rodrigues, município de Mariana-MG, o IGAM intensificou o monitoramento dos trechos mais impactados com um programa de monitoramento denominado emergencial para acompanhamento da evolução da qualidade das águas e dos sedimentos dos principais corpos de água afetados pelo desastre. As amostragens emergenciais foram realizadas em 14 estações de amostragem, sendo 12 localizadas na calha do rio Doce (RD072, RD019, RD023, RD035,

RD033, RD083, RD044, RD045, RD053, RD058, RD059 e RD067), 1 localizada no rio Gualaxo do Norte (RD011, único ponto criado após o rompimento) e 1 localizada no rio do Carmo (RD071), totalizando 14 estações de monitoramento. A seleção dos pontos de monitoramento objetivou facilitar a interpretação dos resultados, já que o IGAM possui uma série histórica de qualidade das águas superficiais nas estações mencionadas (IGAM, 2016b).

### 3.7.2 Monitoramento da água do trecho impactado após o rompimento da barragem

O IGAM-MG vem acompanhando e analisando a qualidade das águas e dos sedimentos dos rios atingidos desde a ocorrência do desastre do rompimento da barragem. Para a realização desse acompanhamento, foram selecionados parâmetros de qualidade das águas para avaliação das possíveis alterações dos corpos de água em função das características do rejeito e da capacidade de arraste e revolvimento de material de fundo com o deslocamento da pluma, quais sejam: condutividade elétrica *in loco*, oxigênio dissolvido, pH *in loco*, temperatura da água e do ar, sólidos totais, sólidos dissolvidos totais, sólidos em suspensão totais, turbidez e arsênio total, bem como os metais: alumínio dissolvido, ferro dissolvido, cobre dissolvido, cromo total, cádmio total, chumbo total, manganês total, mercúrio total e níquel total e zinco total (SEMAD, 2016).

Os pontos de monitoramento foram selecionados com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados, uma vez que já existe uma série histórica robusta e seria possível uma comparação com os dados de monitoramento já realizada pelo IGAM nos últimos anos. Já o monitoramento no rio do Carmo teve início somente a partir do dia 21 de novembro de 2015, devido ao volume de rejeitos e dificuldade de acesso nos pontos de monitoramento do rio. Além disso, houve uma tentativa de amostrar um ponto adicional, no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongá), que foi suspenso em virtude da quantidade de sedimentos e dejetos ali depositados.

As coletas de dados dos parâmetros de qualidade das águas e de sedimentos sofreram algumas variações ao longo do tempo conforme o Quadro 3-2.

Quadro 3-2- Alteração da frequência da coleta das amostras de água e de sedimentos do monitoramento especial do rio Doce.

Tipo de amostra	Data a partir da qual houve alteração da frequência de coleta				
	07/11/2015	03/12/2015	04/01/2015	10/10/2016	05/12/2016
Água	Diária	Semanal	Quinzenal	Mensal	Semanal
Sedimento	Semanal	Mensal	Mensal	Semestral	Semestral

O IGAM elaborou juntamente com Iema (Instituto Estadual do Meio Ambiente do Espírito Santo), FEAM (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e ANA, o Programa de investigação monitoramento da bacia do rio Doce, áreas estuarina, costeiras e marinha impactadas (reparatório e compensatório) – PMQQS – Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos. Além disso, também ajudou a elaborar também o Plano de Ação para o Período Chuvoso 2016/2017. As informações sobre o monitoramento emergencial iniciado no dia seguinte após o rompimento da barragem em 2015 foram disponibilizadas no Relatório Técnico do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimentos elaborado pela Fundação Renova em abril de 2017 (ANA, 2017).

### **3.8 Técnicas estatísticas como ferramenta para análise dos dados de qualidade das águas**

No Brasil, as diretrizes do Artigo 8º, Capítulo III, § 2º da CONAMA nº 357/2005 afirmam que os resultados obtidos com monitoramentos devem ser analisados estatisticamente e as incertezas das medições devem ser consideradas. Portanto, a aplicação de diferentes técnicas estatísticas multivariadas consegue contribuir para uma melhor interpretação das matrizes de dados e fornecer meios de compreensão das variações temporais e espaciais da qualidade da água, permitindo a identificação de possíveis fatores que influenciam os sistemas de água e oferece uma ferramenta valiosa para a gestão dos recursos hídricos (SIMEONOV *et al.*, 2003; SINGH *et al.*, 2004; ANDRADE *et al.*, 2007; ZHANG *et al.*, 2011; MOSTAFAEI, 2014; MOHAMED *et al.*, 2015; JUNG *et al.*, 2016).

Dentre as técnicas estatísticas multivariadas utilizadas em análises de qualidade da água, destacam-se a Análise de Cluster (AC), Análise Discriminante (AD), Análise de Componentes Principais (ACP) e a Análise Fatorial (AF), que simplificam a identificação das fontes de poluição e facilitam, portanto, o planejamento de redes de monitoramento para a gestão dos recursos hídricos. Ressalta-se que as estatísticas multivariadas são amplamente adotadas para compreender grandes e complexos conjuntos de dados e essas são exatamente as características dos dados ambientais de qualidade das águas. De forma complementar, as ferramentas multivariadas, consideradas exploratórias, podem ser acompanhadas de outras técnicas estatísticas, como testes não paramétricos e análises específicas de variáveis qualitativas ou categorizadas.

A utilização das técnicas estatística multivariadas na análise de conjuntos de dados de qualidade das águas já é algo conhecido e amplamente utilizado (Quadro 3-3), pois viabiliza o conhecimento das fontes de poluição e facilita o planejamento de redes de monitoramento para a gestão dos recursos hídricos. Tem-se, dessa forma, que o desenvolvimento de metodologias estatísticas baseadas em dados espaciais e temporais é uma ferramenta muito importante para a análise da qualidade das água superficiais de bacias hidrográficas (GONÇALVES, 2011).

A grande importância do monitoramento para a gestão da qualidade das águas enfrenta o desafio de ter seus dados organizados em planilhas extensas e complexas, devido ao grande número de parâmetros físico-químicos e microbiológicos que variam no tempo (muitos anos, sendo dados mensais, bimestrais, semestrais etc) e no espaço (várias estações ao longo do trecho monitorado). É sabido, portanto, que é necessário efetuar uma adequada interpretação e adequado tratamento do banco de dados (SANDERS *et al.*, 2003).



Quadro 3-3 – Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

Referência	Região de estudo	Dados analisados	Objetivo do estudo	Ferramentas multivariadas utilizadas
SANTOS-ROMÁN <i>et al.</i> , 2003	12 bacias hidrográficas de Porto Rico	18 parâmetros de qualidade da água; 22 anos de coletas trimestrais.	Analisar diferenças entre as bacias hidrográficas selecionadas usando técnicas multivariadas.	AF; AC; AD
SIMEONOV <i>et al.</i> , 2003	Diversos rios no norte da Grécia	27 parâmetros monitorados em 25 pontos de amostragem com frequência mensal.	Avaliação dos parâmetros de monitoramento da qualidade das águas superficiais de alguns rios situados na região norte da Grécia.	AC, ACP, regressão
SINGH <i>et al.</i> , 2004	Rio Gomti, Índia	8 estações de monitoramento; 24 parâmetros de qualidade de água 5 anos de monitoramento mensal 17.790 observações.	Avaliar as variações espaciais e temporais da qualidade da água	AC; AF/ACP; AD
OUYANG, 2005	Rio Saint Johns, Flórida (EUA)	22 estações de monitoramento; 42 parâmetros de qualidade da água 3 anos de monitoramento, com diferentes frequências de amostragem.	Avaliar a efetividade e a eficiência de redes de monitoramento da qualidade de águas superficiais a partir das técnicas ACP e AF; Identificar as estações menos importantes; Extrair os parâmetros mais importantes para avaliação da qualidade das águas.	ACP/AF
NONATO <i>et al.</i> , 2007	Alto curso do rio das Velhas	37 estações de monitoramento 39 parâmetros físico-químicos monitorados 2 anos de monitoramento.	Tratamento da base de dados de qualidade da água tendo em vista a necessidade de otimização da rede de monitoramento (frequência de amostragem e do número de parâmetros analisados).	AC; ACP

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

SHAH <i>et al.</i> , 2007	12 bacias hidrográficas, Austrália	12 estações de monitoramento; 37 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento mensal: outubro de 2004-junho de 2006.	Demonstrar que os locais com diferentes perfis de uso da terra teria um perfil característico de qualidade da água que reflete o uso da terra e contaminação fecal.	AA, AD
SHRESTHA; KAZAMA, 2007	Rio Fuji, Japão	13 estações de monitoramento; 12 parâmetros de qualidade da água 8 anos de monitoramento mensal.	Extraír informações sobre as similaridades e dissimilaridades entre pontos de amostragem; Identificar as variáveis de qualidade da água responsáveis pela variação espacial e temporal; Identificar os fatores que explicam a estrutura do banco de dados.	AC; AF/ACP; AD
WANG <i>et al.</i> , 2007	19 cursos d' água na bacia hidrográfica Taihu, China	19 estações de monitoramento; 11 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 2000– 2004	Avaliar os impactos das atividades humanas sobre as variações espaciais na qualidade da água.	AA, AF
JONES <i>et al.</i> , 2008	Rio Potomac, EUA	12 estações de monitoramento e 18 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 1984-1990.	Determinar os componentes importantes de variação espacial e temporal da qualidade da água para facilitar a compreensão dos impactos de gestão e permitir a utilização mais eficaz dos recursos futuros de monitoramento.	ACP
OMO-IRABOR <i>et al.</i> , 2008	Delta do Níger, Nigéria	12 estações de monitoramento; 18 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 2003-2007	Determinar a natureza e a distribuição espacial dos poluentes químicos em águas superficiais na região do Delta do Níger ocidental; Destacar as fontes de tais poluentes químicos.	AA, ACP/AF

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

FRANÇA <i>et al.</i> , 2009	Bacia do Alto Iguaçu, Curitiba, Paraná	8 pontos de monitoramento; 18 parâmetros de qualidade de água 19 campanhas quinzenais.	Indicar um conjunto representativo de parâmetros de qualidade de água (otimização do monitoramento); Identificar as estações de monitoramento mais relevantes para avaliação da qualidade da água.	AF
SALES <i>et al.</i> , 2009	Lagoa Messejana, Fortaleza	3 pontos de monitoramento; 16 parâmetros de qualidade da água 1 ano de coleta mensal.	Inferir sobre a qualidade das água da lagoa utilizando ferramentas de análise multivariada.	ACP
BU <i>et al.</i> , 2010	Rio Jinshui, China	12 estações de monitoramento; 25 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: outubro de 2006-agosto de 2008 (8 amostragens mensais).	Revelar as variabilidades espaciais e temporais da qualidade da água; Identificar os principais fatores e fontes de poluição.	AA, AF
NOORI <i>et al.</i> , 2010	Rio Karoon, Irã	17 estações de monitoramento; 12 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 1999-2002.	Identificar as estações mais informativas de monitoramento da qualidade da água; Determinar os parâmetros mais importantes da qualidade da água no rio; Explorar a relação entre os parâmetros físicos e químicos.	ACP, ACC
TABARI <i>et al.</i> , 2011	Rio Maroon, Irã	4 pontos de monitoramento; 16 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 1989-2008.	Testar a existência de tendência em médias anuais e sazonais dos parâmetros de qualidade da água.	MK, <i>Sen's Slope estimator</i> (ou estimador do coeficiente Sen), regressão linear

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

VIALLE <i>et al.</i> , 2011	Sudeste da França	50 amostras no período de um ano.	Avaliar a qualidade da água da chuva utilizada para descargas de vasos sanitários em uma casa particular no sudoeste da França.	ACP e AC
ZHANG <i>et al.</i> , 2011	Cinco cursos d'água em Hong Kong	16 estações de monitoramento; 48 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento mensal: 2000-2007	Extraír informação latente sobre as similaridades e dissimilaridades entre períodos e pontos de amostragem; Reconhecer os parâmetros responsáveis pelas variações temporais e espaciais; Identificar fatores que explicam as fontes de poluição.	AC; AF/ACP; AD
ZHAO <i>et al.</i> , 2011	Bacia Taihu, China	22 estações de monitoramento; 8 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento mensal: 2001-2002.	Identificar as características espaciais e temporais das variáveis físico-químicas de qualidade da água; Avaliar a qualidade das águas de superfície usando Avaliação Sintética Fuzzy (FSE); Determinar os fatores importantes e fontes que influenciam a qualidade da água.	ACP, AC,
JARDIM, 2011	Bacia do Rio das Velhas-MG	Dados de janeiro de 1998 a outubro de 2010; 16 estações de amostragem do rio das Velhas; 4 parâmetros físicos, 8 parâmetros químicos e 2 parâmetros bióticos.	Avaliar comparativamente as estações de amostragem monitoradas no rio das Velhas, associando-as com os usos do solo na área da bacia; Correlacionar as variações temporais da densidade de cianobactérias com os parâmetros físicos, químicos e biológicos em estudo;	AC, ACP, AF, KW
GATICA <i>et al.</i> , 2012	Rio Chocancharava, Argentina	6 estações de monitoramento; 23 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento mensal: 2007-2008 (6 campanhas).	Avaliar a dinâmica da qualidade da água, através da análise de parâmetros físicos e químicos; Avaliar as diferenças sazonais e índice de qualidade da água do curso d'água.	AA, ACP

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

XU <i>et al.</i> , 2012	Bacia do Rio Zhangweinan, China	19 estações de monitoramento; 11 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 2001-2009	Avaliar a qualidade da água do rio Zhangweinan e analisar a variação espaciotemporal da qualidade da água na bacia.	SMK, AA, Análise abrangente Fuzzy
GUEDES, 2012	Rio Pomba, MG	Duas campanhas no período de out/2008 a jan/2009 foram realizadas em nove pontos georreferenciados, localizados ao longo do médio Rio Pomba, compreendendo a análise de 15 variáveis de qualidade de água.	Pelo emprego da análise fatorial/ análise de componentes principais identificou-se que o melhor comportamento das variáveis de qualidade das águas do médio Rio Pomba foi aquele composto por três fatores, explicando 74,30% da variância total.	ACP/AF
AMARAL, 2012	Porção mineira do Médio São Francisco	Dados de monitoramento de 5 anos (2006 a 2010) para 4 estações, de 14 anos (1997 a 2010) para outras 4 estações e de 6 anos (2005 a 2010) para 1 estação. O estudo analisou 13 parâmetros físico-químicos de qualidade das águas.	Avaliar comparativamente as estações de amostragem monitoradas na porção mineira da região do Médio São Francisco; Verificar se os parâmetros físico-químicos e biológicos estão dentro dos padrões ambientais recomendados pela legislação; Estudar as tendências temporais e espaciais dos parâmetros de qualidade de água nos cursos de água da região.	AC, ACP, KW
TRINDADE, 2013	Bacia do rio São Francisco	Dez Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs) da bacia do rio São Francisco.	Comparar, em termos de qualidade da água, as dez UPGRHs da bacia do rio São Francisco; Identificar os principais fatores responsáveis pela poluição de cada uma das UPGRHs; Identificar a UPGRH (sub-bacia) mais impactada e os fatores responsáveis por esse impacto; Estudar as tendências temporais e espaciais dos parâmetros de qualidade de água associados à degradação ambiental na sub-bacia mais impactada.	AC, ACP, AF, KW

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

SOUZA, 2013	Rio Verde Grande e sub-bacia dos rios Jequitai e Pacuí em Minas Gerais	Dados do período entre 2005 e 2011, em 60 poços profundos e 22 parâmetros físico-químicos.	Caracterizar aspectos hidrodinâmicos e avaliar a qualidade das águas do aquífero Bambuí na porção mineira das sub-bacias do rio Verde Grande – UPGRH SF10 – e dos rios Jequitai Pacuí – UPGRH SF6.	AC, AF, KW
ALMEIDA, 2013	Rio das Velhas, Minas Gerais	Cinco parâmetros para estudo, considerando os maiores percentuais de violação à DN COPAM/CERH N°01/08 - Coliformes Termotolerantes, Arsênio Total, Fósforo Total, Turbidez e Oxigênio Dissolvido – e 19 estações de monitoramento localizadas na calha do rio das Velhas.	Identificar e selecionar os principais parâmetros responsáveis pela degradação da bacia do rio das Velhas para serem considerados no cálculo da entropia; Selecionar e agrupar as estações de monitoramento com características similares no rio das Velhas, por meio de técnicas multivariadas; Validar os agrupamentos das estações de monitoramento, por meio de ferramentas estatísticas não paramétricas.	AC, ACP, KW
BHAT <i>et al.</i> , 2014	Tributário do lago Wular, Índia	5 estações de monitoramento; 26 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: fevereiro de 2011 a janeiro de 2012.	Identificar os parâmetros responsáveis pela variação espaço-temporal na qualidade da água; Analisar o impacto de todas as fontes de poluição no córrego Sukhnag.	AA, ACP/AF
KISI e AY, 2014	Rio Kizilirmak, Turquia	5 estações de monitoramento; 11 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: períodos diferentes para cada estação de monitoramento.	Comparar os resultados de dois testes de tendência: o teste de MK e o método Sen, esse último aplicado pela primeira vez.	MK, método Sen
NIAZI <i>et al.</i> , 2014	Rio Ajichay, Irã	1 estação de monitoramento; 6 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento mensal: 1967-2007.	Analisar as mudanças e tendências na vazão e nos parâmetros de qualidade da água monitorados no rio Ajichay.	MK, SMK

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

MOHAMED <i>et al.</i> , 2015	Bacia hidrográfica do rio Klang, Malásia	20 estações de monitoramento; 7 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 2005-2007.	Identificar os potenciais fatores que contribuem para as variações na qualidade da água do rio Klang; Analisar os dados utilizando técnicas de estatística multivariada, com o foco na redução das dimensões de dados para a interpretação mais simples.	AF, ACP
MUANGTHONG e SHRESTHA, 2015	Rio Nampong e Rio Songkhram, Tailândia	18 estações de monitoramento; 16 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento mensal: 1996-2012.	Extraír informações sobre as semelhanças e diferenças entre locais de amostragem; Identificar as variáveis de qualidade da água responsáveis pelas variações espaciais e temporais na qualidade da água dos rios.	AA, AD, ACP/AF
OGWUELEKA, 2015	Rio Kaduna, Nigéria	8 estações de monitoramento; 17 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 2008- 2012.	Investigar as variações temporais e espaciais de grandes e complexos conjuntos de dados de qualidade da água coletadas do Rio Kaduna e interpretá-los.	AA, ACP/AF
BARBOSA, 2015	Sub-bacia do rio Paracatu	34 parâmetros de qualidade das águas em 27 estações de monitoramento controladas pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) entre o período de 2006 a 2013.	Avaliar espacialmente as estações de monitoramento da sub-bacia de acordo com os parâmetros de qualidade monitorados e o uso e ocupação do solo; • identificar os parâmetros com maiores porcentagens de violações em cada estação de monitoramento da bacia.	AC, ACP, KW
CALAZANS, 2015	Sub-bacias do rio das Velhas e do rio Paraopeba, Minas Gerais	Sub-bacia do rio das Velhas: período de 1997 a 2013, 71 parâmetros e 144 estações. Sub-bacia rio Paraopeba: período de 1997 a 2013, 62 parâmetros e 33 estações.	Avaliar a variação da qualidade da água entre os meses do ano, por meio de análises multivariadas. Avaliar a variação da qualidade da água entre as estações de monitoramento das sub-bacias selecionadas, por meio de análises multivariadas.	AC, ACP, AF, KW

Quadro 3-3 - Autores e suas pesquisas no âmbito da análise da qualidade das águas superficiais através do uso de técnicas estatísticas multivariadas.

GONÇALVES, 2016	Bacia do rio Paraíba do Sul nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro	Monitoramento entre 2012 e 2014 de 103 estações e 10 parâmetros de qualidade das águas.	Identificar os parâmetros mais relevantes para a qualidade da água da bacia, de acordo com os percentuais de não atendimento aos limites legais; Verificar o atendimento ao enquadramento da qualidade das águas da bacia do rio Paraíba do Sul, de acordo com os padrões exigidos.	AC, ACP, KW
SOARES, 2016	Bacia do rio Piracicaba e do rio Paraopeba	Monitoramento no rio Piracicaba conta com 13 (treze) estações e a bacia hidrográfica do rio Paraopeba conta com 37 (trinta e sete) estações.	Avaliar a qualidade da água das estações de monitoramento das bacias por meio de análises multivariadas em cada bacia; Avaliar as regiões mais impactadas das bacias do rio Piracicaba e Paraopeba.	AC, ACP, AF, RR, OR, KW
PINTO, 2016	Bacia do rio Verde	Dados do período entre julho de 2008 a novembro de 2014, sendo analisados 20 parâmetros físico-químicos de qualidade das águas. Foram analisadas 17 estações de tratamento.	Efetuar uma avaliação espacial da qualidade das águas de estações de monitoramento da bacia do rio Verde, em termos de carga e concentração, utilizando métodos multivariados.	AA, ACP, AF, KW; MK
LIMA, 2016	Porção mineira da Bacia do rio Doce	Dados de monitoramento de outubro de 2008 a abril de 2014; 16 parâmetros; 64 estações.	Avaliar as regiões mais críticas da bacia, no que tange aos valores de qualidade da água preconizados pela DN COPAM/CERH-MG 01/2008; Analisar e comparar a qualidade da água das sub-bacias da porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce.	AC, ACP, AF, KW
JUNG <i>et al.</i> , 2016	Rio Nakdong, Coréia	20 estações de monitoramento; 12 parâmetros de qualidade da água. Período de monitoramento: 2008-2012.	Avaliar a distribuição da qualidade da água e as características de cada rio.	ACP, AF, AC
WU <i>et al.</i> , 2016	Daya Bay, sul do mar da China	12 estações de monitoramento; Coleta trimestral; 9 parâmetros de qualidade da água.	Aplicar a abordagem de análise estatística multivariada, identificando as variações espaciais e temporais de qualidade de água em Daya Bay.	ACP, AC

Obs.: AA - Análise de Agrupamento; AC - Análise de Cluster; AF - Análise Fatorial; ACP - Análise de Componentes Principais; ACC - Análise de Correlação Canônica; AD - Análise Discriminante; RR - Risco Relativo; OR - Odds Ratio; SMK - Teste Sazonal de Mann-Kendall; MK - Teste de Mann-Kendall; KW - Kruskal-Wallis.



## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Estrutura adotada no trabalho**

O presente trabalho analisa os dados de monitoramento da qualidade das águas superficiais de alguns corpos d'água localizados na porção mineira da bacia hidrográfica do rio Doce, antes e após o rompimento da barragem de Fundão da Samarco Mineração S. A., ocorrido em Mariana-MG em 05/11/2015. Para melhor analisar os dados obtidos antes e após o rompimento e ainda fazer uma comparação da qualidade das águas entre os dois períodos, optou-se por dividir a análise em três etapas.

- 1ª etapa: Avaliação da qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio Doce no período anterior ao rompimento (período de 01/10/2008 a 19/10/2015).
- 2ª etapa: Avaliação da qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio Doce no período posterior ao rompimento (período de 07/11/2015 a 15/03/2017).
- 3ª etapa: Impacto do rompimento da barragem na qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio Doce (período de 01/10/2008 a 15/03/2017).

A metodologia será apresentada a seguir e, devido às especificidades de cada banco de dados, as diferenças metodológicas de cada etapa também serão destacadas.

### **4.2 Descrição geral dos bancos de dados adotados**

Na bacia hidrográfica do rio Doce o monitoramento de qualidade da água, efetuado pelo IGAM, contempla 64 estações de amostragem. Para essas estações, são realizadas coletas e análises trimestrais de, aproximadamente, 52 parâmetros físico-químicos e hidrobiológicos. Contudo, análises mensais, e não trimestrais, são realizadas em 12 estações de monitoramento localizadas na calha do rio Doce (IGAM, 2017). Além das estações localizadas na calha do rio, o IGAM ainda monitora, desde 1º de outubro de 2008, a estação RD071, localizada no rio do Carmo, próximo à confluência com o rio Piranga, no município de Barra Longa-MG e a estação RD072 localizada já no rio Doce, logo após sua formação, depois da confluência, entre o município de Rio Doce (MG) e Santa Cruz do Escalvado (MG).

Destaca-se que, dentre as estações de monitoramento do Programa Água de Minas do IGAM na bacia do rio Doce, foram selecionadas apenas aquelas localizadas em Minas Gerais e no trecho diretamente impactado pelo desastre em Mariana-MG, ou seja, aquelas incluídas no programa de monitoramento emergencial do IGAM criado após o rompimento em 2015,

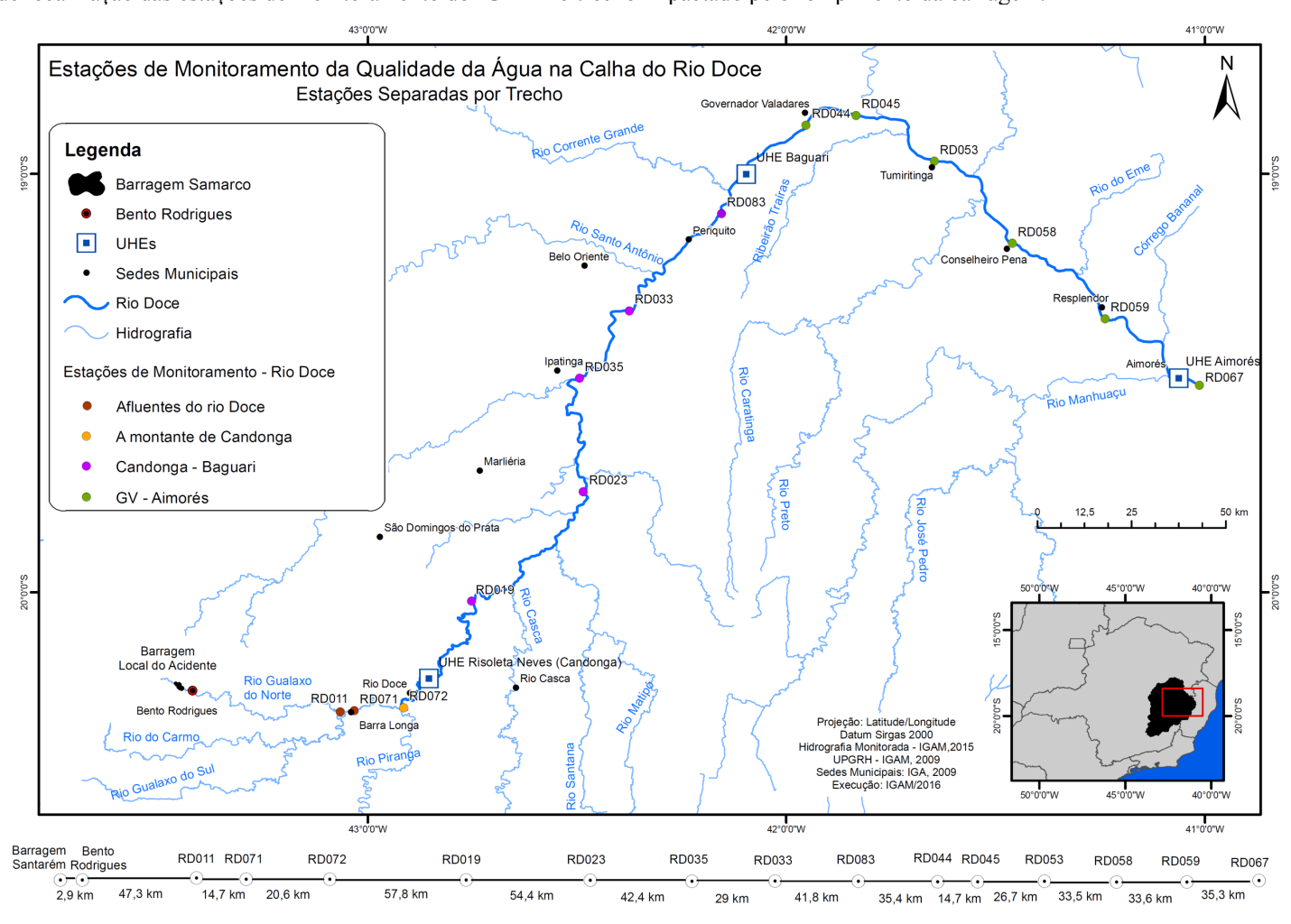
incluindo os rios do Carmo, Gualaxo do Norte e Doce. As estações de monitoramento localizadas no trecho de estudo são apresentadas na Tabela 4-1 e na Figura 4-1 .

Tabela 4-1 - Descrição detalhada da localização das estações de monitoramento do IGAM no trecho impactado pelo rompimento da barragem, na porção mineira da Bacia do rio Doce.

<b>Estação</b>	<b>Curso de água</b>	<b>Descrição</b>	<b>Lat</b>	<b>Long</b>	<b>Municípios</b>	<b>UPGRH</b>
<b>RD011</b>	rio Gualaxo do Norte	Rio Gualaxo do Norte próximo de sua foz no rio do Carmo	20° 17' 24" S	43° 5' 24" W	Barra Longa	DO1 - Rio Piranga
<b>RD071</b>	rio do Carmo	Rio do Carmo, próximo à sua confluência com o rio Piranga	20° 16' 48" S	43° 1' 48" W	Barra Longa	DO1 - Rio Piranga
<b>RD072</b>	rio Doce	Rio Doce, logo após sua formação, depois da confluência dos rios Piranga e do Carmo	20° 16' 12" S	42° 55' 12" W	Rio Doce, Santa Cruz Do Escalvado	DO1 - Rio Piranga
<b>RD019</b>	rio Doce	Rio Doce a montante da foz do rio Casca	20° 1' 12" S	42° 45' 0" W	Rio Casca, São Domingos Do Prata	DO1 - Rio Piranga
<b>RD023</b>	rio Doce	Rio Doce a montante da comunidade de Cachoeira dos Óculos	19° 45' 36" S	42° 28' 48" W	Marliéria, Pingo-D'água	DO1 - Rio Piranga
<b>RD035</b>	rio Doce	Rio Doce a jusante de Ipatinga	19° 29' 24" S	42° 29' 24" W	Ipatinga	DO2 - Rio Piracicaba
<b>RD033</b>	rio Doce	Rio Doce a jusante da cachoeira escura.	19° 19' 48" S	42° 22' 48" W	Belo Oriente, Bugre	DO5 - Rio Caratinga
<b>RD083</b>	rio Doce	Rio Doce, após a foz do rio Santo Antônio	19° 6' 0" S	42° 8' 60" W	Fernandes Tourinho, Periquito	DO4 - Rio Suaçuí Grande
<b>RD044</b>	rio Doce	Rio Doce na cidade de Governador Valadares	18° 52' 48" S	41° 57' 0" W	Governador Valadares	DO4 - Rio Suaçuí Grande
<b>RD045</b>	rio Doce	Rio Doce a jusante da cidade de Governador Valadares	18° 51' 36" S	41° 49' 48" W	Governador Valadares	DO4 - Rio Suaçuí Grande
<b>RD053</b>	rio Doce	Rio Doce a jusante do rio Suaçuí Grande, em Tumiritinga	18° 58' 12" S	41° 38' 60" W	Galileia, Tumiritinga	DO4 - Rio Suaçuí Grande
<b>RD058</b>	rio Doce	Rio Doce na cidade de Conselheiro Pena	19° 10' 12" S	41° 27' 36" W	Conselheiro Pena	DO5 - Rio Caratinga
<b>RD059</b>	rio Doce	Rio Doce a jusante de Resplendor	19° 21' 0" S	41° 14' 24" W	Resplendor	DO6 - Rio Manhuaçu
<b>RD067</b>	rio Doce	Rio Doce em Baixo Guandú - ES	19° 30' 36" S	41° 0' 36" W	Aimorés, Baixo Guandu	DO6 - Rio Manhuaçu

Fonte: Dados de monitoramento de qualidade das águas disponibilizados no Portal Info Hidro do IGAM.

Figura 4-1 – Mapa de localização das estações de monitoramento do IGAM no trecho impactado pelo rompimento da barragem.



Fonte: SEMAD, 2016.

Os dados do Programa Águas de Minas apresentam frequência de monitoramento semestral para os metais e bimestral para os demais parâmetros. Já os dados do PMQQS apresentam uma frequência maior não constante no tempo. Sendo que, no primeiro mês após o acidente, os dados eram coletados com uma frequência diária. Entretanto, para os meses seguintes, a frequência de coleta dos dados oscilou entre semanal (dezembro de 2015; novembro e dezembro de 2016), quinzenal (janeiro a setembro de 2016) e mensal (outubro de 2016).

Com relação à composição do banco de dados relativo aos parâmetros de qualidade das águas superficiais, a seleção foi feita considerando os mesmos parâmetros selecionados no monitoramento emergencial do IGAM, que por sua vez coincidem com os parâmetros do monitoramento tradicional do IGAM. O intuito dessa seleção foi facilitar a análise do impacto resultante do rompimento ao comparar o período anterior e posterior ao desastre.

Os parâmetros do monitoramento emergencial foram selecionados para a avaliação das possíveis alterações da qualidade das águas do trecho em estudo em função das características do rejeito e da capacidade de arraste e revolvimento de material de fundo com o deslocamento da pluma. Além deles, foram selecionados outros três parâmetros que caracterizam a contaminação por esgotos domésticos e ainda, efluentes industriais: demanda química de oxigênio, demanda bioquímica de oxigênio e indicador biológico.

O parâmetro indicador biológico é a sintetização dos coliformes termotolerantes (para dados até 2012) e da *Escherichia coli* (para dados a partir de 2013). O parâmetro *Escherichia coli* passou a ser avaliado em substituição aos coliformes termotolerantes a partir da primeira campanha de 2013. Isso se deve ao fato da espécie *E. coli* ser a única indicadora inequívoca de contaminação fecal, humana ou animal, uma vez que raramente é encontrada na água ou no solo que não tenham recebido contaminação fecal (CETESB, 2009; IGAM, 2016a).

Apesar dos parâmetros demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio e indicador biológico não terem sido incluídos no monitoramento emergencial, continuaram a ser monitorados no monitoramento tradicional do IGAM após o rompimento da barragem. Dessa forma, ainda foi possível obter dados relativos a esses parâmetros no período pós-rompimento, mesmo que com frequência de monitoramento menor que os demais parâmetros incluídos no monitoramento emergencial.

A seguir, na Tabela 4-2, são descritos detalhes sobre os parâmetros de monitoramento, nome, símbolo/notação de referência e unidade dos parâmetros selecionados para análise do trecho impactado.

Tabela 4-2- Estações de monitoramento, nome, símbolo/notação de referência e unidade dos parâmetros selecionados para análise do trecho impactado.

<b>Estações de monitoramento</b>	RD011, RD071, RD072, RD019, RD023, RD035, RD033, RD083, RD044, RD045, RD053, RD058, RD059, RD067			
<b>Parâmetros, símbolo/notação de referência e unidade</b>	Metais	Alumínio dissolvido	Al	mg/L Al
		Cádmio total	Cd	mg/L Cd
		Chumbo total	Pb	mg/L Pb
		Cobre dissolvido	Cu	mg/L Cu
		Cromo total	Cr	mg/L Cr
		Ferro dissolvido	Fe	mg/L Fe
		Manganês total	Mn	mg/L Mn
		Mercurio total	Hg	mg/LHg
		Níquel total	Ni	mg/L Ni
		Zinco total	Zn	mg/L Zn
		Não metais	Arsênio total	Ar
	Condutividade elétrica <i>in loco</i>		CE	µS/cm
	Demanda química de oxigênio		DQO	mg/L O <sub>2</sub>
	Demanda bioquímica de oxigênio		DBO	mg/L O <sub>2</sub>
	Indicador biológico		Ind. biol.	NMP/100 mL
	Oxigênio dissolvido		OD	mg/L O <sub>2</sub>
	pH <i>in loco</i>		pH	un de pH
	Sólidos dissolvidos totais		SDT	mg/L
	Sólidos em suspensão totais		SST	mg/L
	Sólidos sedimentáveis		SS	mg/L
	Sólidos totais		ST	mg/L
	Temperatura da água		T°C água	°C
	Temperatura do ar	T°C ar	°C	
Turbidez	Turbidez	UNT		

Os *outliers* são observações que se desviam significativamente dos outros elementos da amostra e foram determinados pelo método exploratório da amplitude interquartis (AIQ) (NAGUETTINI e PINTO, 2007).

Os valores censurados presentes na amostra, ou seja, observações menores ou maiores que o Limite de Detecção dos Métodos (LDM) analíticos, foram substituídos pelo próprio limite de detecção (LD) apresentado, sendo este o pior cenário possível. Os valores censurados por serem maiores que o LD também foram substituídos pelo valor do LD, uma vez que o valor máximo por si só já é de importância para a identificação do grau de degradação de uma bacia hidrográfica.

### **4.3 Análise descritiva do banco de dados**

A estatística descritiva foi calculada para os dados brutos (não padronizados) de cada parâmetro da qualidade da água, em cada estação de monitoramento. A estatística descritiva consiste em apresentar os valores mínimo e máximo, a média, o desvio padrão, a média geométrica, os percentis (25, 50 – mediana e 75) e os coeficientes de assimetria e curtose.

Os resultados da estatística descritiva estão disponibilizados no Apêndice I.

### **4.4 Avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia**

Diversas análises estatísticas foram empregadas para determinar as regiões mais impactadas da porção mineira da Bacia, como técnicas multivariadas e análises não paramétricas.

#### **4.4.1 Técnicas estatísticas multivariadas para análises dos dados: (i) antes e do (ii) depois do rompimento**

Uma condição necessária para a realização dos testes multivariados é a padronização dos dados em escala  $Z$ , ou seja, as observações serão padronizadas pela subtração da média e divisão pelo desvio-padrão de cada variável ( $Z = (X - \mu) / \sigma$ ), o que resulta em variáveis com média 0 e desvio padrão 1, com a mesma escala. A padronização dos dados na escala  $Z$  é importante para evitar classificações equivocadas associadas às diferenças na dimensão dos dados, eliminando a possível influência de diferentes unidades de medida, tornando os dados adimensionais (SIMEONOV *et al.*, 2003; SINGH *et al.*, 2004; VICINI, 2005, ZHANG *et al.*, 2011).

A Análise de Agrupamento ou de Cluster (AC) foi empregada com o objetivo de avaliar a similaridade das estações de monitoramento (variação espacial) em função das concentrações dos parâmetros de qualidade das águas mensurados. Dessa forma, foi utilizado o método aglomerativo hierárquico, de ligação completa, utilizando como medida de similaridade a distância euclidiana. Para identificar áreas cuja qualidade das águas é similar na bacia hidrográfica, foi analisada a localização geográfica dos grupos formados. Essa análise foi realizada para verificar as variações espaciais na bacia do rio Doce em função da qualidade da água das diferentes estações de monitoramento.

Para complementar a AA e justificar os agrupamentos encontrados, foi executada a Análise Fatorial (AF), com o objetivo de identificar os parâmetros mais importantes para a caracterização da qualidade das águas da bacia, ou seja, os parâmetros responsáveis por explicar a maior variabilidade da qualidade da água e as diferentes fontes de poluição atuantes em cada grupo formados pela AA. Destaca-se que na AF foi utilizado o método de extração por Componentes Principais e rotação varimax, sendo que este método reduz a complexidade do banco de dados de monitoramento, identificando os principais parâmetros responsáveis por explicar a maior variabilidade da qualidade da água e as diferentes fontes de poluição atuantes em cada grupo formado pela AC.

Para as análises, foi utilizado o *software* Statistica 10.0.

#### **4.4.2 Comparação dos dados monitorados com os limites de referência da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG/2008**

Além das análises estatísticas, os dados também foram comparados com os limites de referência para qualidade das águas de acordo com a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG, nº 01 de 2008.

A DN COPAM CERH-MG 01/08, dentre outras funções, determina os padrões de qualidade das águas de acordo com a classe do corpo hídrico através da definição do limite mínimo, máximo ou intervalo de referência para os parâmetros físicos, químicos e biológicos. A seguir, no Quadro 4-1, são apresentados os limites definidos para os parâmetros analisados neste estudo para os rios classe 2, enquadramento dos rios Doce, Gualaxo do Norte e do Carmo.

Quadro 4-1 – Limite dos parâmetros de qualidade das águas superficiais analisados neste estudo para rios classe 2 de acordo com a DN COPAM CERH-MG 01/08.

Parâmetro	Limite DN COPAM CERH-MG 01/08	Unidade de
	Classe 2	Medida
Alumínio dissolvido	< 0,1	mg / L Al
Arsênio total	< 0,01	mg / L As
Cádmio total	< 0,001	mg / L Cd
Chumbo total	< 0,01	mg / L Pb
Cobre dissolvido	< 0,009	mg / L Cu
Coliformes termotolerantes	< 1.000	NMP / 100 ml
Cromo total	< 0,05	mg / L Cr
DBO	< 5	mg / L
Ferro dissolvido	< 0,3	mg / L Fe
Manganês total	< 0,1	mg / L Mn
Mercúrio total	< 0,2	µg/L Hg
Níquel total	< 0,025	mg / L Ni
OD	> 5	mg / L
pH <i>in loco</i>	6 a 9	un de pH
SDT	< 500	mg / L
SST	< 100	mg / L
Turbidez	< 100	UNT
Zinco total	< 0,18	mg / L Zn

#### 4.4.3 Uso e ocupação do solo na região de estudo

O levantamento de informações sobre o uso e ocupação do solo dos municípios pertencentes à porção mineira da bacia do rio Doce, foi feita principalmente para analisar o impacto que o trecho em estudo vem sofrendo desde antes do rompimento. O levantamento dessas informações consistiu de duas etapas:

1. seleção dos municípios diretamente afetados pelo rompimento da barragem de rejeitos em Mariana-MG;
2. levantamento das principais atividades econômicas dos municípios em função dos empreendimentos licenciados ambientalmente na esfera estadual e federal.

A seleção dos municípios diretamente impactados pelo desastre foi feita com base nos dados disponibilizados no site da Fundação Renova. A Fundação Renova foi criada após a assinatura do Termo de Transação de Ajustamento de Conduta (TTAC) entre Samarco, com o apoio de suas acionistas, Vale e BHP Billiton, e o Governo Federal, os Estados de Minas Gerais e do Espírito Santo, o FEAM, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade



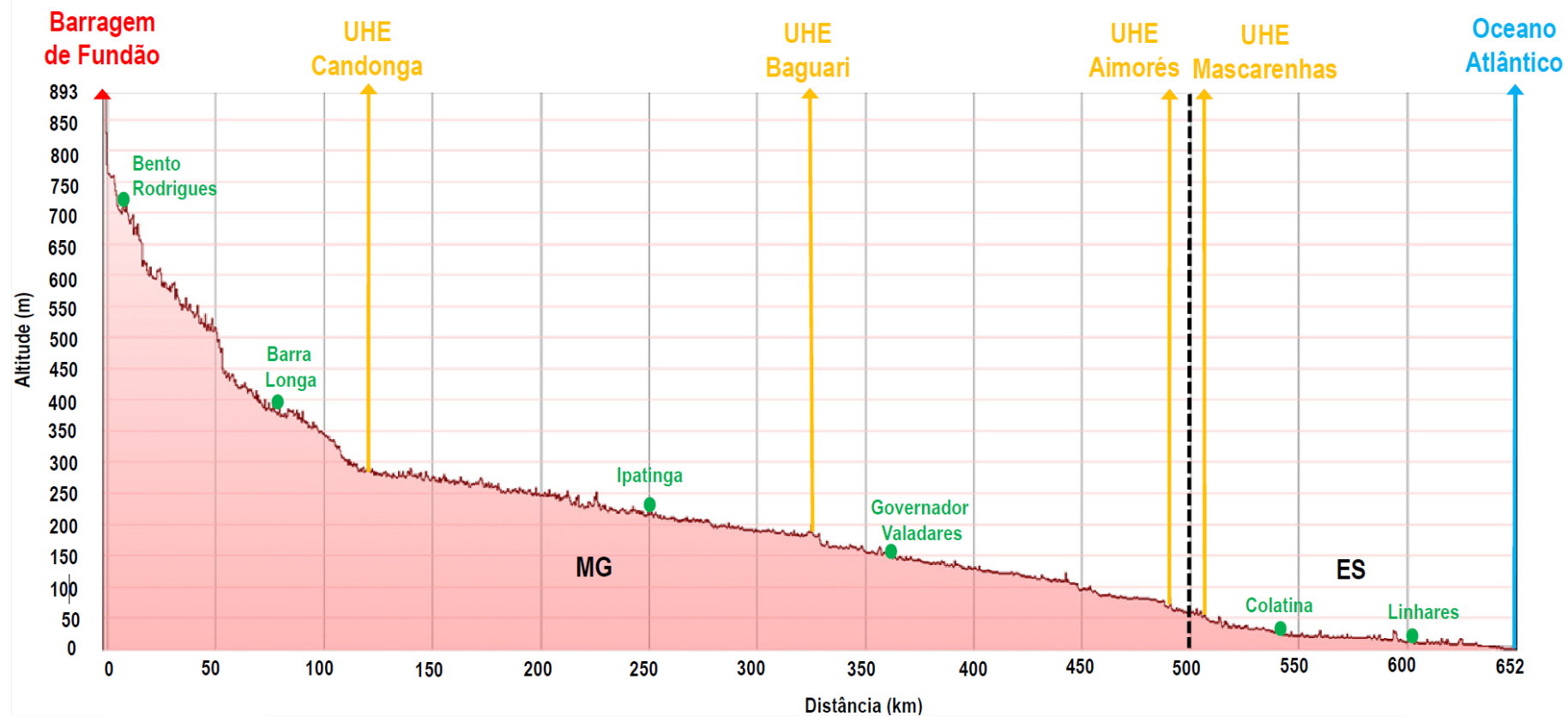
(ICMBio), a ANA, o DNPM, a Fundação Nacional do Índio (Funai), o Instituto Estadual de Florestas (IEF), o IGAM, a FEAM, o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), o Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo (IDAF) e a Agência Estadual de Recursos Hídricos (AGERH).

O Quadro 4-2 e a Figura 4-2 apresentam os trinta e seis municípios mineiros e as três Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE) que foram diretamente impactados pelo desastre. As informações foram disponibilizadas no site da Fundação Renova (RENOVA, 2017) e do Ministério Público de Minas Gerais (MPMG, 2017).

Quadro 4-2 – Municípios mineiros diretamente impactados pelo rompimento da barragem de rejeito em Mariana-MG.

<b>Municípios mineiros e UHEs diretamente atingidos (de montante para jusante)</b>		
Mariana - MG	Santana do Paraíso - MG	↓
Barra Longa - MG	Ipaba - MG	
Rio Doce - MG	Belo Oriente - MG	
UHE Risoleta Neves	Bugre - MG	
Santa Cruz do Escalvado - MG	Iapu – MG	
Sem-peixe - MG	Naque – MG	
Rio Casca - MG	Periquito – MG	
São Domingos do Prata - MG	Sobralia – MG	
São José do Goiabal - MG	Fernandes Tourinho – MG	
São Pedro dos Ferros - MG	Alpercata – MG	
Dionísio - MG	UHE Bagari	
Raul Soares - MG	Governador Valadares – MG	
Córrego Novo - MG	Tumiritinga – MG	
Pingo D'Água - MG	Galiléia – MG	
Marliéria - MG	Conselheiro Pena – MG	
Bom Jesus do Galho - MG	Resplendor – MG	
Timóteo - MG	Itueta – MG	
Piedade de Caratinga - MG	Aimorés - MG	
Caratinga - MG	UHE Aimorés	
Ipatinga - MG	↑	

Figura 4-2 - Perfil longitudinal do curso d'água afetado pelo rompimento da barragem de Fundão.



Fonte: ANA (2016)

Após o levantamento dos municípios diretamente impactados pelo rompimento, as principais atividades econômicas desenvolvidas em cada um deles foram pesquisadas no Portal Nacional do Licenciamento Ambiental – PNLA.

O PNLA é uma ferramenta disponibilizada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) para divulgar informações relacionadas aos procedimentos do licenciamento ambiental, possibilitar a transparência desses processos de gestão pública e fortalecer o controle social (PNLA, 2015).

O portal tem por objetivo atender à Lei nº 10.650, de 16 de abril de 2003, que dispõe sobre o acesso público aos dados e informações ambientais existentes nos órgãos e entidades do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA). Integrado ao Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA), o PNLA foi criado para agregar e sistematizar informações sobre o licenciamento ambiental e facilitar o acesso público gerado em todas as esferas de governo: federal, estadual e distrital (PNLA, 2015).

As buscas foram realizadas utilizando diversos filtros de pesquisa e de forma *online* (direto no banco de dados de todos os órgãos licenciadores), e consistiu primeiramente na escolha do estado e do órgão licenciador. Em seguida foi efetuada uma seleção do tipo da licença, optando-se pela seleção de licenças que sejam relativas à operação dos empreendimentos (Autorização Ambiental de Funcionamento - AAF, Licença de Operação - LO, Licença de Operação Corretiva - LOC). Ou seja, empreendimentos em funcionamento, onde posteriormente foi realizada a filtragem com relação à situação da licença, optando-se pelas licenças vigentes e com processo de obtenção concluído. (PNLA, 2015).

#### **4.4.4 Organização do banco de dados para as análises do período anterior ao rompimento da barragem**

Para análise do período anterior ao rompimento, foram utilizados os dados de monitoramento tradicional de qualidade das águas fornecidos pelo IGAM, referentes ao Programa Águas de Minas. A seleção foi feita considerando a data de início de monitoramento igual em todas as estações, a partir da implementação das estações RD071 e RD072, e os mesmos parâmetros de qualidade das águas selecionados para o monitoramento emergencial, além dos parâmetros DBO, DQO e indicador biológico, para que fosse possível caracterizar a contaminação de efluentes domésticos e industriais.

Nem todas as estações de monitoramento listadas na Tabela 4-1 tiveram seus dados analisados nesta etapa, já que a estação RD011 foi criada no dia 25/11/2015, ou seja, após o rompimento da barragem em Mariana, não possuindo, portanto, série histórica de dados anterior ao evento.

Desta forma, foram avaliadas 13 estações de monitoramento e 24 parâmetros (Tabela 4-2), no período de outubro de 2008 a fevereiro de 2017, totalizando 709 coletas e 12.457 dados válidos.

O cálculo do percentual de *outliers*, determinado pelo teste da amplitude interquartis (AIQ), é apresentado na Tabela I do Apêndice I. Todas as ocorrências de *outliers* foram analisadas individualmente para a decisão de manutenção ou retirada desses das análises. Contudo, não houve caso de inconsistência comprovada que justificasse a exclusão desses *outliers*, já que eles podem ocorrer naturalmente em dados ambientais. Principalmente ao analisar os dados monitorados após o rompimento, foi entendido que dada a situação são dados possíveis e, portanto, todos os *outliers* foram mantidos.

O teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, ao nível de significância de 5%, detectou que apenas os parâmetros pH e Temperatura do ar e da água, de algumas estações de monitoramento, tiveram bom ajuste à distribuição Normal. Esses resultados corroboram os encontrados em outras pesquisas efetuadas por TRINDADE (2013), COSTA (2014), CALAZANS (2015).

#### **4.4.5 Organização do banco de dados para as análises do período posterior ao rompimento da barragem**

Para análise da qualidade das águas superficiais no período posterior ao rompimento da barragem de rejeitos em Mariana-MG em 05/11/2015, foram utilizados os dados do programa monitoramento emergencial do IGAM. Os dados fornecidos pelo IGAM e adotados neste estudo estão compreendidos entre o período de 07/11/2015 a 15/03/2017 para as 12 estações localizadas na calha do rio Doce abrangidas pelo monitoramento emergencial. Já as estações RD011, localizada no rio do Gualaxo do Norte, e RD071, localizada no rio do Carmo, começaram a ser monitoradas apenas 20 e 16 dias, respectivamente, após o rompimento da barragem.

A frequência de monitoramento do monitoramento emergencial é maior, quando comparada à frequência do monitoramento tradicional do IGAM, e não constante no tempo, sendo que, no primeiro mês após o acidente, os dados eram coletados com uma frequência diária. Entretanto, para os meses seguintes, a frequência de coleta dos dados oscilou entre semanal (dezembro de

2015; novembro e dezembro de 2016), quinzenal (janeiro a setembro de 2016) e mensal (outubro de 2016).

Para as análises multivariadas, que é necessário garantir que a frequência dos dados seja a mesma para todos as estações ao se considerar todos os parâmetros, foi necessário excluir os 20 primeiros dias imediatamente após o rompimento para todas as 14 estações do monitoramento emergencial, já que a estação RD011 teve seu monitoramento iniciado apenas em 25/11/2015.

A AC foi aplicada e para complementá-la e justificar seus resultados, para cada agrupamento encontrado, foi aplicada a AF, conforme metodologia descrita no item 4.4.1. Para as análises foram utilizados os *softwares* Statistica 10.0 e XLStat 2014.5.

Para as análises de Cluster, de Componentes Principais e Fatorial, não foram incluídos os seguintes parâmetros de monitoramento de qualidade das águas:

- temperatura do ar e da água, por não trazer muita informação sobre o rompimento,
- cobre dissolvido, cádmio total, cromo total e mercúrio total, por apresentarem mais de 90% dos dados censurados.

Dessa forma foram analisados 12.312 dados válidos. Assim como para as análises de pré-rompimento, o cálculo do percentual de *outliers*, determinados pelo teste da AIQ, é apresentado na Tabela II do Apêndice I.

Para que fosse possível aplicar Análise de Cluster, considerando todas as quatorze estações existentes no trecho mais diretamente afetado pelo desastre, foi preciso incluir as estações RD011 e RD071, que iniciaram o monitoramento em 25 e 21 de novembro de 2015, respectivamente. Por isso, foi necessário desconsiderar os dados de 07/11/2015 a 24/11/2015 de todas as outras doze estações que são as localizadas na calha do rio Doce. Dessa forma, foi possível agrupar por similaridade todas as quatorze estações, sem contudo, considerar os dados imediatamente após o rompimento, ou seja, perdendo informações do real impacto da chegada da pluma nas estações.

Além disso, com os dados do pós rompimento, foi realizado o teste *Mann-Kendall* (MK). O teste de MK é um teste de tendência temporal dos parâmetros aplicado para cada estação em

busca de obter a tendência de cada parâmetro em cada ponto de monitoramento do trecho de estudo. O teste MK é um método robusto, sequencial e não paramétrico utilizado para determinar a tendência temporal de alteração estatisticamente significativa de uma série de dados. A metodologia para aplicação do teste MK será descrita a seguir.

#### **4.4.6 Análise de tendência temporal das concentrações dos parâmetros após o rompimento**

Para a realização deste teste de tendência temporal, foi utilizado apenas o banco de dados referente ao monitoramento emergencial do IGAM. Contudo, por ser este um teste não-paramétrico, não foi necessário remover os vinte primeiros dias do monitoramento emergencial, como feito para a aplicação das análises de Cluster e Fatorial. Dessa forma, foram utilizados os todos dados do monitoramento emergencial: entre 07/11/2015 e 15/03/2017. O objetivo deste teste foi verificar, para cada estação, quais os parâmetros que apresentaram tendência de elevação ou de redução das concentrações durante o período de análise.

Como os dados após o rompimento são referentes ao período de novembro de 2015 a março de 2017, ou seja, 1 ano e 5 meses, não foi possível verificar se existe correlação sazonal dos dados, já que não existem dados suficientes para aplicação do teste Sazonal de *Mann-Kendall* (SMK). Assim, foi empregado o teste de *Mann-Kendall* (MK), que não elimina o efeito natural da sazonalidade, como o efeito da diluição nas concentrações dos parâmetros durante o período chuvoso ou da concentração mais elevada no período seco. Vale ressaltar que a frequência de monitoramento dos dados do monitoramento emergencial do IGAM para o período de pós-rompimento não foi homogênea no tempo, apesar de homogênea entre as estações.

O valor da estatística S (Tau de *Kendall*) do teste indica se houve tendência positiva (aumento com o passar do tempo) ou negativa (redução com o passar do tempo) para o parâmetro.

Por fim, os resultados foram analisados para determinar a tendência de cada parâmetro para cada estação de acordo com possíveis interpretações de resultados. Através do teste de tendência temporal e da análise dos dados da série histórica plotados em função do tempo, foi possível melhor interpretar os resultados.

O teste de análise de tendência temporal foi executado utilizando o *software* XLStat 2014.5 e o Software Tableau 10.4. A metodologia adotada também é reportada por outros autores (GROPPO, 2005; CHRISTOFARO e LEÃO, 2009; TRINDADE, 2013; BARBOSA, 2015).

#### **4.4.7 Organização do banco de dados para comparação entre o período anterior e posterior ao rompimento**

Para análise da qualidade das águas superficiais entre o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de rejeitos em Mariana-MG em 05/11/2015, foi necessário unir os dados do Programa Água de Minas (ou monitoramento tradicional do IGAM) e do PMQQS (ou apenas monitoramento emergencial).

A organização do banco de dados consistiu no cálculo dos percentuais dos *outliers*, na detecção dos valores censurados e na verificação da distribuição de frequência dos dados, se seguiam ou não a distribuição Normal. Os dados não seguem uma distribuição Normal e a frequência de monitoramento varia no tempo, portanto, foi necessário aplicar técnicas estatísticas não-paramétricas para a análise desses dois banco de dados de forma conjunta.

#### **4.4.8 Avaliação da qualidade das águas superficiais da bacia**

Diversas análises foram empregadas para comparação da qualidade das águas dos trechos de rio mais impactados entre o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de rejeitos em 2015, dentre elas:

- análise não paramétrica de KW e comparações múltiplas de *Dunn*;
- comparação com os limites de referência para qualidade das águas de acordo com a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG, nº 01 de 2008;
- comparação com a média histórica (calculada para 10/2008 a 10/2015) dos dados do monitoramento tradicional do IGAM do período anterior ao rompimento.

Com o objetivo de encontrar diferenças significativas entre as medidas dos parâmetros de qualidade da água das estações de monitoramento, foi aplicado o teste estatístico não paramétrico de KW, ao nível de significância de 5%, conforme será descrito a seguir.

Com o objetivo de encontrar diferenças significativas entre as medidas dos parâmetros de qualidade da água entre as estações de monitoramento entre antes (A) e depois (D) do rompimento, foi aplicado o teste estatístico não paramétrico de *Kruskal-Wallis* (KW), ao nível de significância de 5%, e, no caso de detecção de diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as estações de monitoramento, o teste de comparações múltiplas de *Dunn* foi utilizado para detectar quais as estações realmente se diferem entre si por parâmetro considerando antes e depois do rompimento. Além disso, gráficos *box-plots* foram gerados para melhor visualização dos resultados.

Para as análises foram utilizados os *softwares* Statistica 10.0 e o Software Tableau 10.4.



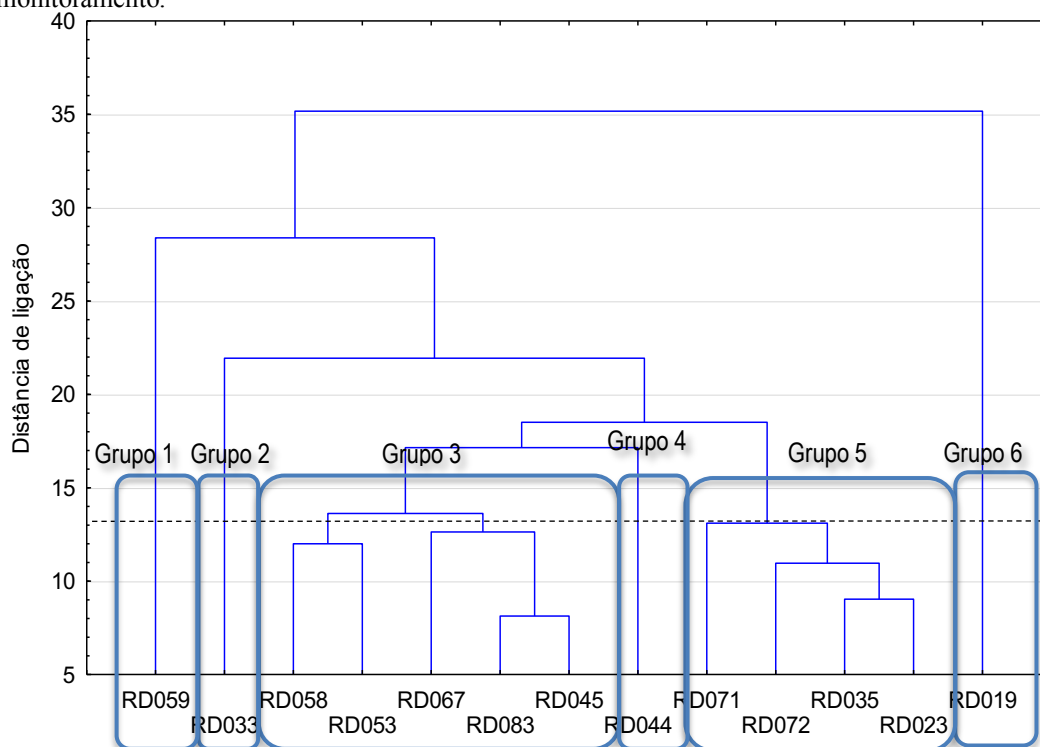
## 5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA PORÇÃO MINEIRA DO RIO DOCE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO

### 5.1 Resultado avaliação da qualidade das águas do período anterior ao rompimento

#### 5.1.1 Análise de Cluster e Análise Fatorial

Para os dados de outubro de 2008 a outubro de 2015, foi realizada a AC e, por similaridade, foram obtidos seis agrupamentos (Figura 5-1). Com esses agrupamentos, foi realizada a AF.

Figura 5-1 - Dendograma de Cluster para os dados de outubro de 2008 a outubro de 2015 das estações de monitoramento.



Para interpretação dos resultados, foram utilizados dados relativos às atividades econômicas dos municípios, obtidos no PNLA.

Além da comparação com os dados do PNLA, para os dados referentes ao período anterior ao rompimento, as medianas dos parâmetros por estação foram comparadas aos limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008 de acordo com o enquadramento dos corpos hídricos em análise. Essa comparação é apresentada na Tabela 5-1.

Apesar das análises estatísticas terem apontado diferença significativa ( $\alpha < 0,05$ ) entre as estações para a formação do dendograma do agrupamento de Cluster, é importante ressaltar que as medianas dos dados medidos violaram os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008 apenas para os parâmetros indicador biológico e manganês total, indicando contaminação por efluentes domésticos e por atividades minerárias desde o período anterior ao rompimento no trecho em estudo nas estações onde houve violação do limite.

Tabela 5-1 - Comparação da mediana dos parâmetros para os dados do pré-rompimento por agrupamento do dendograma de Cluster e por estação com os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. Estão destacadas com cor as medianas que superaram o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/2008.

		Arsênio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Condutividade elétrica in loco	DBO	DQO	Indicador biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Níquel total	Oxigênio dissolvido	pH in loco	SDT	SST	ST	Turbidez	Zinco total	
Grupo	Estação	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	mg/L	mg/L	NMP / 100 ml	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	un de pH	mg/L	mg/L	mg/L	UNT	mg/L	
<b>Mediana</b>	Grupo 1	RD059	0,0003	0,005	0,004	65,2	2	12	2.650	0,12	0,0323	0,004	7,9	7,2	54	15,5	70,5	15,3	0,0297
	Grupo 2	RD033	0,0003	0,005	0,004	81,05	2	9,7	12.099	0,13	0,1071	0,004	8,5	6,85	63	29	96,5	21,75	0,0234
	Grupo 3	RD083	0,0003	0,005	0,004	58,585	2	9,8	790	0,11	0,0482	0,004	7,6	6,85	53	13	72	22,95	0,02
		RD045	0,0003	0,005	0,004	60,5	2	10	4.950	0,17	0,0436	0,004	7,8	7	54	11	68	15,65	0,02
		RD053	0,0003	0,005	0,004	68,1	2	9,4	1.500	0,14	0,0443	0,004	7,5	7	56	18	73	20,55	0,0231
		RD058	0,0003	0,005	0,004	67,05	2	9,7	3.150	0,14	0,0365	0,004	7,85	7	55,5	17	73	18,3	0,0253
	Grupo 4	RD067	0,0003	0,005	0,004	63	2	11	490	0,10	0,0259	0,004	7,5	6,9	51,5	15	65,5	14,8	0,0283
		RD044	0,0003	0,005	0,004	64,1	2	9,2	3.100	0,15	0,0339	0,004	7,7	6,8	57	10,5	69	14,4	0,0236
	Grupo 5	RD071	0,00292	0,005	0,004	51,5	2	5,9	4.900	0,12	0,1752	0,004	8,1	6,7	41	25	63	28,3	0,02
		RD072	0,001	0,005	0,004	48,4	2	8,7	3.278	0,16	0,0787	0,004	8	6,8	47,5	14	67	14,75	0,02
		RD023	0,0003	0,005	0,004	47,5	2	12	330	0,13	0,101	0,004	8,2	6,9	45,5	23	65	20,1	0,02
		RD035	0,0003	0,005	0,004	53,85	2	11	9.676	0,14	0,1201	0,004	7,75	6,85	46	31,5	78	25,45	0,0273
	Grupo 6	RD019	0,0003	0,005	0,004	45,9	2	8,1	196	0,13	0,0867	0,004	7,75	6,9	44	15	60,5	15,7	0,02
	<b>Limite DN COPAM CERH-MG 01/2008</b>		<b>&lt; 0,01</b>	<b>&lt; 0,01</b>	<b>&lt; 0,009</b>	-	<b>&lt; 5</b>	-	<b>&lt; 1.000</b>	<b>&lt; 0,3</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,025</b>	<b>&gt; 5</b>	<b>6 a 9</b>	<b>&lt; 500</b>	<b>&lt; 100</b>	-	<b>&lt; 100</b>	<b>&lt; 0,18</b>

O grupo que mais destoa dos demais é o grupo 6, constituído apenas pela estação RD019 (Rio Casca e de São Domingos da Prata-MG). Essa estação apresentou um *outlier* superior maior que qualquer outra medição para o cobre. Ainda, os altos valores dos parâmetros condutividade elétrica *in loco*, DQO e pH *in loco* caracterizam contaminação por efluentes industriais. No dendograma apresentado, o isolamento da estação RD019 pode ser atribuído aos menores valores medidos para indicador biológico, de ST e de condutividade elétrica *in loco*, além de um apresentar mediana inferior às medianas das demais estações para os parâmetros arsênio total e zinco total (Tabela II, Apêndice I – Estatística Descritiva). Ressalta-se que as medições de concentrações acima do LD para o arsênio total ocorreram nos meses chuvosos de janeiro e dezembro. Isso pode ser justificado pelo fato de que os valores máximos de arsênio foram registrados nos trechos a montante, em Barra Longa (RD071) e em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (RD072) e que as atividades econômicas existentes na região, juntamente com o período chuvoso pode favorecer altas medições de arsênio no trecho monitorado pela RD019.

Por várias décadas, no distrito de Mariana funcionaram, funcionaram fábricas de óxido de arsênio, que aproveitavam o óxido de arsênio como subproduto do minério (IGAM, 2013). Os rejeitos de minério ricos em arsênio foram estocados às margens de riachos ou lançados diretamente nas drenagens, provocando grande comprometimento ambiental do solo e da água na região (IGAM, 2013). Os resultados de arsênio no rio do Carmo no trecho do município de Mariana estão associados, portanto, a este cenário. Atividades minerárias na bacia do rio Doce também contribuem com os valores observados para esse parâmetro. Além disso, em Mariana-MG, existem atividades de produção de carvão vegetal, o que pode contribuir para à redução do pH *in loco*, aumento das concentrações zinco, alumínio e cobre.

Em Rio Casca-MG, existe intensa atividade de extração de areia e cascalho para utilização imediata na construção civil desde 2004, o que pode favorecer o revolvimento do material depositado no fundo do curso d'água e o assoreamento nesse trecho. Além disso, existem diversas atividades relacionadas ao aparelhamento, beneficiamento, preparação e transformação de minerais não metálicos; produção de ligas metálicas e atividades agropecuárias (para produção de leite e abate).

Em São Domingos da Prata-MG, as atividades são semelhantes às existentes no município Rio Casca e ainda existem atividades relacionadas a lavra a céu aberto de minerais metálicos,

serviços de combate a pragas e comércio e/ou armazenamento de produtos agrotóxicos, veterinários e afins.

O grupo 1, composto apenas pela estação RD059 (em Resplendor-MG), também destoa dos demais grupos. Para os metais ferro dissolvido, manganês total, níquel total, chumbo total, a estação RD059 apresentou uma mediana próxima ao valor do limite de detecção. Contudo, para o zinco total foi medida a maior mediana da série. Com relação ao ferro dissolvido, a estação apresentou o maior *outlier* da série e a maior média da série e para o chumbo total, o segundo maior *outlier*. Além disso, a estação RD059 apresentou a maior média para o alumínio dissolvido, pH *in loco* e DBO e ainda, a segunda maior média para DQO e também a maior mediana para DQO, pH *in loco* e zinco total.

A estação RD059 está localizada a jusante do município de Resplendor-MG que desde o ano 2003 a atividade de extração de pedras e outros materiais de construção e desde 2012 apresenta atividades de lavra a céu aberto, com ou sem tratamento, para produção de rochas ornamentais e britas. Além disso, atividades de abate de animais e de bovinocultura para produção de leite desde 2006.

Com relação a evolução temporal da concentração dos parâmetros na estação RD059, nota-se que o arsênio total apresentou uma medição de 0,0003 mg/L até julho de 2013 e passou a registrar valores de 0,001 mg/L a partir de janeiro de 2014.

Quanto ao alumínio dissolvido, no início do monitoramento, apresentou um *outlier* superior de 3,118 mg/L em 27/01/2009. Contudo, para todos os monitoramentos seguintes, os valores não ultrapassaram 0,24 mg/L, sendo que a maior parte deles (77% das medições) foram inferiores ao LD (<0,1 mg/L Al).

De forma semelhante, em 27/01/2009, o chumbo total, o ferro dissolvido, o manganês total, o níquel total, o zinco total, os sólidos em suspensão e os sólidos totais também apresentaram um medição superior às demais medições conseguintes da série.

O grupo 2 da AC é formado apenas pela estação RD033 (em Belo Oriente e Bugre-MG), a jusante de Ipatinga-MG, sendo esta a estação que caracteriza o trecho de pior qualidade das águas principalmente, por apresentar os maiores valores de condutividade elétrica *in loco*, ST,

SDT e indicador biológico. O parâmetro condutividade elétrica pode apresentar correlação com o parâmetro indicador biológico, pois a contaminação por esgotos domésticos pode elevar as medições de condutividade elétrica para valores acima de 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (GASPAROTTO, 2011). Os altos valores medidos para os parâmetros ST, SST, SDT, turbidez, níquel total, chumbo total, arsênio total, manganês total e DQO indicam contaminação por fontes difusas como lançamentos de efluentes industriais no trecho.

Entre os municípios de Ipatinga-MG e Timóteo-MG, o rio Piracicaba deságua no rio Doce. O rio Piracicaba e também seus afluentes há muitos anos recebem lançamento de efluentes industriais oriundos da atuação das indústrias locais, como a Cenibra (papel e celulose), Vale S.A. (antiga Companhia Vale do Rio Doce), Gerdau (em Barão de Cocais), *Aperam South America* (em Timóteo), ArcelorMittal Aços Longos (em João Monlevade) e Usiminas (em Ipatinga) (GUERRA, 2001).

A jusante do município de Ipatinga-MG, já na estação RD033, nota-se uma diminuição da qualidade da água devido principalmente à falta de cobertura do solo e à sua degradação ocasionada pelas atividades pecuárias e minerárias, favorecendo o aporte de sólidos no rio Piracicaba, carreando nos períodos chuvosos nutrientes e metais provenientes da fertilização do solo e de outras fontes difusas, além do lançamento de esgotos domésticos e de efluentes industriais.

Além da contaminação advinda do rio Piracicaba, em Belo Oriente-MG, a prefeitura licenciou a instalação de interceptores, emissários, elevatórias e reversão de esgoto para tratamento de esgotos sanitários em abril de 2012. Portanto, é possível justificar os valores extremos de indicador biológico (da ordem de  $10^5$  NMP/100ml) medidos até dezembro de 2012 e a posterior redução já em janeiro de 2013 para medições na ordem de  $10^3$  NMP/100ml.

Já o grupo 3, é composto pelas estações mais a jusante no trecho:

- RD083 (em Fernandes Tourinho-MG e Periquito-MG);
- RD045 (a jusante de Governador Valadares-MG);
- RD053 (em Galileia-MG);
- RD058 (em Conselheiro Pena-MG); e
- RD067 (em Aimorés-MG e Baixo Guandu-MG);

Nota-se que, para este grupo, de montante para jusante (com exceção da estação RD067), há um aumento das concentração dos parâmetros chumbo total, zinco total e ferro dissolvido nas estações RD053 e RD058. Sendo que a estação RD045 apresentou a maior mediana da série para o ferro dissolvido. Como resultado, a AF apresentou quatro fatores que conseguem justificar 69% da variância total (Tabela 5-2). O fator 1, que explica 39% da variância total, apresentou forte correlação entre chumbo total, manganês total, níquel total, SDT, SST, ST e turbidez. Em janeiro de 2009, todas as estações do grupo 3 apresentaram as maiores medições de chumbo total, manganês dissolvido, SST, ST, turbidez e zinco.

O fator 2 justifica 13% da variância total e apresentou correlação forte e inversa para o arsênio total e moderada correlação e inversa para a condutividade elétrica *in loco*, o pH *in loco* e o zinco total.

Em Fernandes Tourinho-MG, foram instalados interceptores tratamento de esgotos sanitários apenas em 2010. Além disso, nesse município existe registros de atividades relacionadas à extração de argila usada na fabricação de cerâmica desde 2008. No município a jusante, em Alpercata-MG, existem atividades de extração de pedras desde 1999, de rocha para produção de britas desde 2005; e também cultivo de animais para produção de leite e para abate. Em Governador Valadares-MG (RD044), existem diversas atividades comerciais, industriais (siderurgias, produção de couro, alimentos, ração, tintas, aditivos agrícolas, tratamento químico de madeira etc), pecuária (produção de laticínio e abate de animais), mineração (lavras a céu aberto, em aluvião e subterrânea), compostagem de resíduos industriais, aterro sanitário e industrial etc.

Em Conselheiro Pena-MG, existem diversas atividades relacionadas a extração de minérios (lavras a céu aberto e subterrâneas, extração de pedras preciosas e outros minerais ferrosos e não-ferrosos), fabricação de leite e torrefação de café. Ressalta-se também que o tratamento dos esgotos sanitários foi licenciado apenas em outubro de 2013.

Em Aimorés-MG, as atividades econômicas são muito semelhante às existentes em Conselheiro Pena-MG. Sendo que as obras de construção de interceptores para tratamento de esgotos sanitários ocorreram em 2007 e 2017.

Tabela 5-2 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pré-rompimento para cada fator após rotação *varimax* da análise fatorial, referentes ao grupo 3 formado pela Análise de Cluster.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
Arsênio total	-0,133371	<b><u>-0,776467</u></b>	-0,118402	0,164636
Chumbo total	<b><u>0,944522</u></b>	0,010384	-0,058481	0,000837
Cobre dissolvido	-0,184650	-0,034665	0,306071	-0,398227
CE	-0,366892	<b><u>-0,704658</u></b>	-0,169836	-0,164548
DBO	-0,074249	-0,007481	0,032877	0,442901
DQO	0,089090	-0,039185	-0,029362	<b><u>0,752759</u></b>
Ind. biol.	0,161235	0,207360	<b><u>0,543345</u></b>	0,166167
Ferro dissolvido	0,076342	0,140239	<b><u>0,827156</u></b>	-0,089102
Manganês total	<b><u>0,924784</u></b>	0,147874	0,186780	0,069485
Níquel total	<b><u>0,949128</u></b>	-0,000475	-0,036251	-0,050064
OD	-0,164141	0,127095	<b><u>-0,548378</u></b>	-0,494198
pH <i>in loco</i>	-0,331307	<b><u>-0,725728</u></b>	-0,076872	0,112411
SDT	<b><u>0,754564</u></b>	-0,003247	0,262820	-0,064747
SST	<b><u>0,976651</u></b>	0,102035	0,056481	0,066372
ST	<b><u>0,982122</u></b>	0,092799	0,083952	0,052675
Turbidez	<b><u>0,943049</u></b>	0,172083	0,036373	0,072647
Zinco total	0,407532	<b><u>-0,591456</u></b>	0,334878	-0,151693
Var (%)	39%	13%	10%	8%
Var acumulada (%)	39%	51%	61%	69%

**Negrito** - Correlações moderadas (valor absoluto entre 0,50 - 0,75)

**Negrito e sublinhado** - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75)

O grupo 4, formado pela estação RD044, na cidade de Governador Valadares-MG, apresentou forte correlação entre os parâmetros chumbo total, manganês total, SST e zinco total e ainda, moderada correlação com o parâmetro turbidez. Em relação ao parâmetro chumbo total, a estação RD044 apresentou o maior *outlier* entre as estações, elevadas medições de zinco total durante a série de monitoramento e ainda, um dos maiores *outliers* de indicador biológico da série. Além disso, pode-se observar forte e inversa correlação para arsênio total e DBO e ainda, moderada e inversa correlação para pH *in loco* e zinco total e moderada e direta correlação com o OD. Todas essas características podem ter levado a esse isolamento da estação RD044 dos demais agrupamentos do dendograma de Cluster de pré-rompimento.



Por fim, o quinto grupo, formado pelas RD071 (em Barra Longa-MG), RD072 (em Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado-MG), RD035 (em Ipatinga-MG) e RD023 (em Marliéria e Pingo-D'Água-MG), estações estas mais a montante do trecho de estudo, apresentou como resultado da AF quatro fatores que explicam 63% da variância total dos dados (Tabela 5-3). O fator 1 (responsável por justificar 37% da variância), apresentou fortes correlações entre os metais arsênio total, chumbo total, manganês total; e entre ST, SST e turbidez. Para estas estações, foram monitorados valores menores de SDT, e altos valores de chumbo total, arsênio total e manganês total, sendo que estes dois últimos metais apresentaram os maiores *outliers* nas estações RD071 e RD072 e também a maior mediana na estação RD071.

Em Mariana-MG, existem diversas atividades econômicas relacionadas à extração de pedras, minérios de metais ferrosos e não ferrosos desde o ano de 1999. E ainda, extração de rocha para produção de brita desde 2008 e lavra a céu aberto desde 2005; e diversas atividades relacionadas a pecuária, abate de animais e produção de leite.

Em Barra Longa-MG, existem atividades de lavras e extração de cascalho; criação de animais para abate e para produção de leite e fabricação de ração e de água ardente. Em Rio Doce-MG, existe uma barragem para geração de energia; tratamento de esgotos licenciado em 2013; abate de animais e aterro para resíduos de construção civil. Em Santa Cruz do Escalvado-MG, existe extração de areia, extração de calcário; início da operação da Estação de Tratamento de Esgotos em dezembro de 2003 e obras de emissários em 2015 e 2016; bovinocultura de leite e de corte; cafeicultura e cultura de cana-de-açúcar.

Em Pingo D'Água-MG existem atividades relacionadas a extração de areia e cascalho; fabricação de telhas, tijolos, de peças, ornatos e estruturas de cimento ou de gesso. Em Marliéria-MG, existem atividades de serviços de combate a pragas e ervas daninhas; aterro e/ou área de reciclagem de resíduos classe a da construção civil; reciclagem ou regeneração de outros resíduos classe 2 (não perigosos) não especificados; tratamento químico para preservação de madeira; agricultura e pecuária; e ainda produção de carvão vegetal.

Em Ipatinga-MG, existem diversas atividades econômicas: siderurgia; metalurgia; extração de minério de ferro, areia, pedras e outros materiais; serviços galvanotécnicos; fabricação e curtimento de couro; usinagem; aparelhamento, beneficiamento, preparação e transformação de minerais não metálicos; abate de animais; fabricação de asfalto, concreto; beneficiamento

de resíduos industriais; fabricação de móveis etc. Ademais, a estação de tratamento de esgotos do município possui como data de emissão da LI em 1999, mas existem outras obras complementares relacionadas ao tratamento de esgotos sanitários licenciadas em 2013 e em 2017.

Tabela 5-3 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pré-rompimento para cada fator após rotação *varimax* da análise fatorial, referentes ao grupo 5 formado pela Análise de Cluster.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
Arsênio total	<b><u>0,809505</u></b>	-0,188022	-0,069807	-0,088637
Chumbo total	<b><u>0,860702</u></b>	0,094351	-0,070376	0,127223
Cobre dissolvido	0,012814	<b>-0,581850</b>	-0,087652	0,251216
CE	<b>-0,524025</b>	0,142458	-0,491397	0,190275
DBO	-0,090088	-0,062001	<b>0,698016</b>	0,285457
DQO	<b>0,504960</b>	0,031727	-0,099261	<b>0,511982</b>
Ind. biol.	0,291311	-0,111828	0,229694	0,139268
Ferro dissolvido	0,053731	<b>0,667066</b>	-0,075276	0,127411
Manganês total	<b><u>0,892387</u></b>	-0,125351	0,112205	-0,025886
Níquel total	<b>0,690679</b>	-0,088303	0,005489	0,118874
OD	-0,005098	-0,093408	-0,027864	<b><u>-0,864266</u></b>
pH <i>in loco</i>	-0,218592	-0,055200	<b>-0,713587</b>	0,178345
SDT	0,469193	<b>0,666289</b>	-0,084213	0,248037
SST	<b><u>0,921377</u></b>	0,191173	0,083004	0,045610
ST	<b><u>0,915842</u></b>	0,228814	0,073902	0,060742
Turbidez	<b><u>0,914474</u></b>	0,194713	0,145584	0,017405
Zinco total	<b>0,518882</b>	0,403648	0,191577	0,091195
Var (%)	37%	10%	8%	8%
Var acumulada (%)	37%	47%	55%	63%

**Negrito** - Correlações moderadas (valor absoluto entre 0,50 - 0,75)

**Negrito e sublinhado** - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75)

### 5.1.2 Conclusões

Para o período anterior ao rompimento, as medições dos parâmetros de qualidade das águas nas estações de monitoramento caracterizaram o trecho estudado como fortemente impactado pelas atividades econômicas (como mineração a céu aberto) e pelo lançamento de esgotos domésticos nos rios. Essas conclusões foram possíveis a partir da análise dos dados do PNLA e da comparação com o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. A partir da comparação com o limite da norma, foi observado que houve violação dos parâmetros manganês total e indicador biológico para muitas estações de monitoramento do trecho de estudo.

No rio Doce, um estudo feito em 2014 por Jardim e colaboradores apontou que nos últimos anos a concentração de oxigênio dissolvido se manteve alta e quase sempre constante, apresentando ainda aumentos em períodos estiviais, em todos os pontos de monitoramento do rio Doce, à exceção para o RD19. Essa alta concentração de oxigênio dissolvido pode estar relacionada ao aumento produção fotossintética das algas e das cianobactérias na água do rio devido ao aporte de nutrientes advindo do lançamento de esgotos (JARDIM, 2014).

A estação RD033 apresentou os maiores valores, superando o limite máximo permitido pela DN COPAM CERH-MG 01/08, para os parâmetros indicador biológico, SST e SDT, pois além da degradação já causada pelos municípios no entorno do rio Doce nesse trecho, é neste ponto que o rio Piracicaba deságua no rio Doce. O rio Piracicaba vem sendo degradado há décadas por atividades industriais do grande complexo industrial existente na região, principalmente siderúrgicas, indústria de papel e celulose, mineração, atividades agropecuárias e intenso lançamento de esgotos domésticos pelos municípios.

A montante da estação RD033 existe uma lagoa de estabilização, sendo esta uma fonte de contaminação por efluentes, o que pode contribuir para a elevação da concentração de fósforo, nitratos, cianobactérias, oxigênio dissolvido e coliformes termotolerantes medida neste ponto (JARDIM, 2014). Já a partir de Ipatinga-MG (RD035), há uma predominância de comércio e atividades industriais como coqueria, aciaria, fabricação de cervejas, couro, calçados, estruturas metálicas, peças de cimento, medicamentos, alimentos, e também transformação de termoplásticos etc. Ou seja, indústrias mais complexas caracterizando uma contaminação industrial diferente da observada mais a montante.

As estações a jusante de Belo Oriente-MG: RD044, RD053, RD058, RD059 e RD067 apresentaram contaminação por zinco total, ferro dissolvido, chumbo total e indicador biológico. Essas estações também apresentaram forte impacto das atividades minerárias e das demais atividades industriais e lançamento de esgotos domésticos na região, apresentando frequentemente medições de indicador biológico acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 para o enquadramento. O aumento da concentração dos termotolerantes na água após 2009, nos pontos de monitoramento das estações RD33, RD44 e RD58, é associado possivelmente ao aumento da contribuição de efluentes não tratados (JARDIM, 2014).

Já as estações mais a montante no rio, RD071 (rio do Carmo) e RD072 (primeira estação do rio Doce), apresentaram forte contaminação por arsênio total e as maiores medianas de manganês total, devido principalmente à fábrica antiga de produção de óxido de arsênio em Mariana-MG existente na região por décadas. Além disso, existe intensa atividade de extração de metais, rochas e areia; lavras a céu aberto; mineração e beneficiamento de minério no trecho entre Mariana-MG e Pingo D'Água-MG.

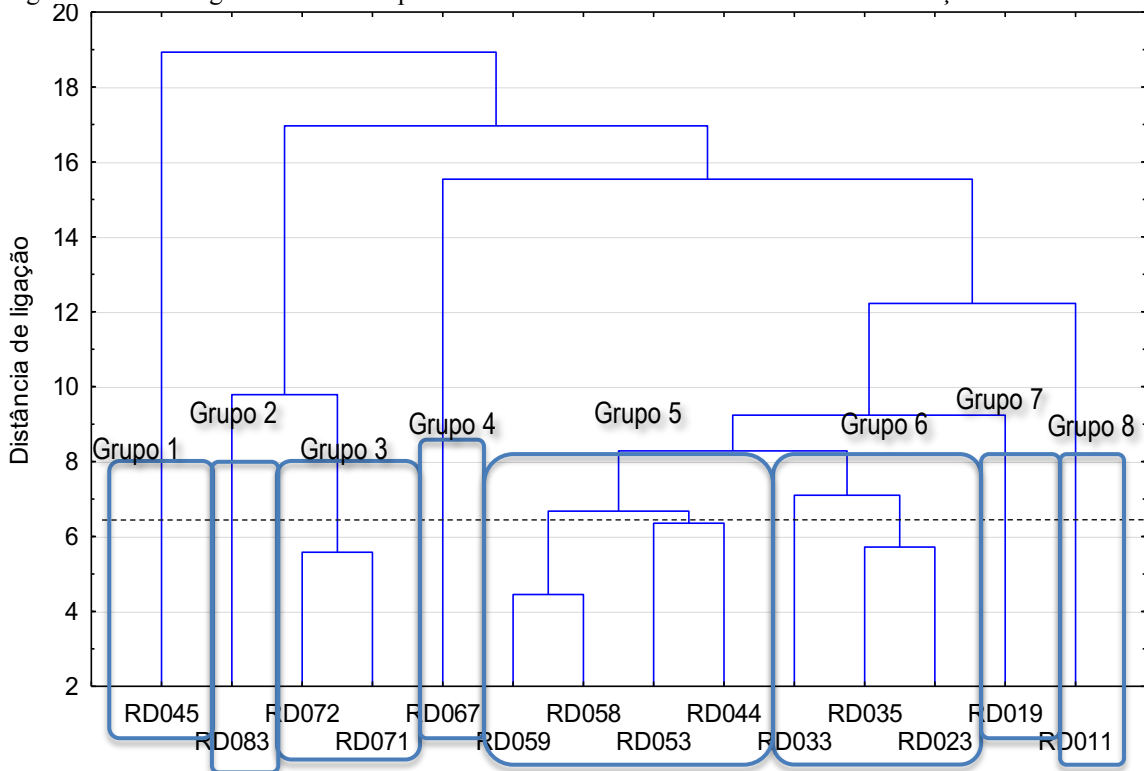
## 5.2 Resultado avaliação da qualidade das águas do período posterior ao rompimento

### 5.2.1 Análise de Cluster e Análise Fatorial

Conforme mencionado na metodologia (item 4.5.2), foi necessário desconsiderar os dados de 07/11/2015 a 24/11/2015 de todas as outras doze estações que são as localizadas na calha do rio Doce para que todas as estações pudessem ser analisadas.

Para os dados a partir de 25 de novembro de 2015 a meados de março de 2017, foi realizada a AC e, por similaridade, foram obtidos oito agrupamentos (Figura 5-2). Com esses agrupamentos, foram realizadas a ACP e a AF.

Figura 5-2 - Dendograma de Cluster para os dados de 25/11/2015 a 15/03/2017 das estações de monitoramento.



Além da análise estatística dos agrupamentos encontrados pelo dendograma de Cluster, as medianas dos parâmetros para os dados após monitorados após o dia 25/11/2015 foram comparadas com os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008 de acordo com o enquadramento da classe dos rios em estudo. Essa comparação está disponível na Tabela 5-4.

As análises estatísticas apontaram diferença significativa ( $\alpha < 0,05$ ) entre as estações agrupadas pelo dendograma de Cluster (Figura 5-2). Contudo, as medianas dos dados violaram os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008 apenas para os parâmetros alumínio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez, indicando a contaminação decorrente do rompimento da barragem de rejeitos. Além disso, ressalta que o parâmetro manganês total já apresentou violação aos limites da DN COPAM CERH-MG 01/2008 em alguns trechos de monitoramento mesmo antes do rompimento da barragem. É interessante notar que a estação RD067 (última estação do trecho de monitoramento) apresentou mediana superior ao limite da DN COPAM CERH-MG 01/2008 apenas para os parâmetros alumínio dissolvido e turbidez, sendo esta, portanto, a estação menos impactada do trecho de estudo para o período de pós-rompimento.

Tabela 5-4 - Comparação da mediana dos parâmetros para os dados do pós-rompimento por agrupamento do dendograma de Cluster e por estação com os limites preconizados pela DN COPAM CERH-MG 01/2008. Estão destacadas com cor as medianas que superaram o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/2008.

		Arsênio total	Alumínio dissolvido	Chumbo total	Condutividade elétrica in loco	Ferro dissolvido	Manganês total	Níquel total	Oxigênio dissolvido	pH in loco	SDT	SST	ST	Turbidez	Zinco total	
Grupo	Estação	mg/L	mg/L	mg/L	µS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	un de pH	mg/L	mg/L	mg/L	UNT	mg/L	
<b>Mediana</b>	Grupo 1	RD045	0,001	0,109	0,005	77,3	0,349	0,1195	0,004	7,3	7,2	79	68	139	171	0,02
	Grupo 2	RD083	0,001	0,103	0,005	72,91	0,346	0,1265	0,004	7,1	7	83,5	72	171	184	0,02
	Grupo 3	RD071	0,001825	0,1	0,005	67,5	0,273	0,6425	0,004	7,6	7,2	80	249	310,5	308	0,02
		RD072	0,001	0,1	0,005	59,27	0,423	0,301	0,004	7,7	7,3	72	229	334	267	0,02
	Grupo 4	RD067	0,001	0,1125	0,005	79,09	0,271	0,0654	0,004	7,5	7,1	86,5	61	173	196	0,02
	Grupo 5	RD044	0,001	0,1155	0,005	77,8	0,3445	0,146	0,004	7,2	7,1	88	73,5	150	176	0,02
		RD053	0,001	0,117	0,005	77,79	0,386	0,12	0,004	7,2	7,25	89	60	134	170	0,02
		RD058	0,001	0,128	0,005	78,5	0,3265	0,137	0,004	7,4	7,3	94	115	211	196	0,02
		RD059	0,001	0,1115	0,005	77,5	0,317	0,1054	0,004	7,3	7,2	80	109	189	214	0,02
	Grupo 6	RD023	0,0012	0,1	0,005	59,96	0,3805	0,4735	0,004	7,8	7,2	86	287	391	450	0,02
		RD035	0,00111	0,1025	0,005	66,53	0,336	0,457	0,004	7,2	7,2	86	200	302	421	0,02
		RD033	0,00121	0,109	0,005	85,6	0,3105	0,382	0,004	7,8	7,1	109	222	330	347	0,02
	Grupo 7	RD019	0,001245	0,1	0,005	58,9	0,326	0,5127987	0,004	7,4	7,1	85,5	330	420	502	0,02
Grupo 8	RD011	0,001	0,1	0,005	69,76	0,232	0,889	0,004	7,7	7,3	98	294	384	893	0,02	
<b>Limite DN COPAM CERH-MG 01/2008</b>		<b>&lt; 0,01</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,01</b>	<b>-</b>	<b>&lt; 0,3</b>	<b>&lt; 0,1</b>	<b>&lt; 0,025</b>	<b>&gt; 5</b>	<b>6 a 9</b>	<b>&lt; 500</b>	<b>&lt; 100</b>	<b>-</b>	<b>&lt; 100</b>	<b>&lt; 0,18</b>	

Dentre os grupos formados, o grupo 8 é o mais destoante, sendo composto apenas pela estação RD011 que, mesmo sem os 20 dias imediatos após o rompimento, apresentou os maiores valores de: manganês total (maior *outlier* no dia 16/01/2016 e maior mediana da série); chumbo, cádmio, cromo e níquel total e ainda ST e SST, cujos maiores *outliers* foram apresentados em 19/01/2016 pela RD011. Os altos valores de condutividade elétrica *in loco*, alumínio dissolvido, SST, SS, ST, turbidez, chumbo total, cromo total, níquel total e zinco total caracteriza a onda de rejeitos revolvendo os materiais do fundo do leito do rio Gualaxo do Norte em Barra Mansa. Além disso, os baixos valores de pH *in loco* e altos valores de ferro dissolvido, indicam a capacidade de dissolução do ferro em pH ácido. Pode-se concluir que a elevação da concentração de ferro dissolvido está de fato associada ao rejeito advindo da barragem, já que esse metal demorou mais tempo para estabelecer concentrações semelhantes às observadas para o período pré-rompimento, devido a constante chegada de rejeitos no ponto de monitoramento mesmo após a passagem da onda. Fato que não foi observado para os demais metais.

O grupo 7 é formado pela estação RD019 (localizada no município de Rio Casca-MG), sendo essa a segunda estação de montante para jusante localizada já na calha do rio Doce. Os altos valores de SST, SS, ST, SDT, turbidez, chumbo total e manganês total, alumínio dissolvido e níquel total caracterizam a chegada da onda de rejeitos na estação. Além disso, nota-se que o arsênio total, o chumbo total e o zinco total foram apresentar o pico de concentração no segundo ou terceiro dia após a chegada da onda na estação, caracterizando o arraste do material do fundo do curso d'água a montante.

A formação do grupo 3, também composto pelas estações mais a montante no trecho, ambas no município de Barra Longa-MG, RD071 (rio do Carmo), RD072 (primeira estação localizada na calha do rio Doce). O agrupamento dessas estações comprova o quanto esse trecho inicial foi fortemente impactado pelo rompimento, mesmo desconsiderando os 20 primeiros dias após o desastre. Ressalta-se que como resultado da AF, Tabela 5-5, tem-se que os primeiros 4 fatores justificam 79% da variância, sendo que o fator 1 é responsável por 49% da capacidade de explicação. O fator 1 apresenta forte correlação dos parâmetros SST, SS, ST, turbidez, chumbo total, manganês total e níquel total, ou seja, esse fator traduz o impacto da lama decorrente do rompimento e revolvimento do fundo dos cursos de água. Analisando os metais chumbo, cromo, manganês, mercúrio e níquel total observa-se altos valores medidos, principalmente na estação RD071 (segunda estação na rota do rompimento, que apresentou o segundo maior *outlier* para



os metais chumbo, cromo, manganês e níquel total e para os ST, SST e turbidez também em 19/02/2016). O fator 2, que justifica 11% da variância, mostra forte correlação com a condutividade elétrica *in loco*, moderada correlação com o pH *in loco* e com o arsênio total. Nota-se que esses parâmetros estão relacionados com as características do trecho mesmo após a passagem da onda, já que o arsênio total já possuía altas concentrações em Barra Longa-MG mesmo antes do rompimento.

Tabela 5-5 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pós-rompimento, desconsiderando os vinte primeiros dias após o desastre, para cada fator após rotação *varimax* da análise fatorial, referentes ao grupo 3 formado pela Análise de Cluster.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
CE	-0,323876	<b>0,785698</b>	0,191419	-0,003097
Alumínio dissolvido	0,048514	0,108129	<b>-0,831682</b>	0,217242
OD	-0,056121	0,054252	0,016663	<b>-0,840162</b>
pH in loco	0,297351	<b>0,700124</b>	-0,338079	0,064439
Ferro dissolvido	-0,211799	-0,214108	<b>-0,747792</b>	-0,315529
SDT	0,381782	-0,104101	0,018764	<b>0,591355</b>
SST	<b>0,995819</b>	0,000771	0,024929	0,055151
SS	<b>0,991597</b>	0,012321	0,042321	-0,009155
ST	<b>0,995735</b>	0,000199	0,024978	0,058269
Turbidez	<b>0,875722</b>	-0,043511	0,092712	0,300288
Arsênio total	0,137374	<b>0,663239</b>	0,085037	-0,430979
Chumbo total	<b>0,995845</b>	0,022516	-0,018306	0,027217
Manganês total	<b>0,995339</b>	0,013444	-0,008641	0,045700
Níquel total	<b>0,995560</b>	0,021276	0,000418	0,017370
Zinco total	0,422400	0,124735	0,228165	0,010141
Var (%)	49%	11%	10%	10%
Var acumulada (%)	49%	60%	69%	79%

**Negrito** - Correlações moderadas (valor absoluto entre 0,50 - 0,75)

**Negrito e sublinhado** - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75)

O grupo 6 formado pelas estações RD023 (localizada em Marliéria-MG), RD035 (localizada a jusante de Ipatinga-MG) e RD033 (localizada em Belo Oriente-MG) são estações vizinhas e se agruparam pela similaridade observado no tempo para os parâmetros (Tabela 5-6):

- da série de sólidos e turbidez (altos valores nos primeiros 4 dias de chegada da onda e posterior redução). Esse fato foi apresentado como forte correlação pelo fator 1 da AF que possui capacidade de justificar 32% da variância total do agrupamento;

- chumbo total, manganês total, níquel total e zinco total (altos valores de concentração com a chegada da onda e posterior redução). Além de apresentar uma suave elevação no período chuvoso de janeiro de 2016, cerca de 11 vezes menor que o observado com a chegada da onda. Essa forte correlação desses parâmetros foi apresentada pelo fator 2 da AF, que justifica 25% da variância do agrupamento.

Tabela 5-6 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pós-rompimento, desconsiderando os vinte primeiros dias após o desastre, para cada fator após rotação *varimax* da análise fatorial, referentes ao grupo 6 formado pela Análise de Cluster.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
CE	0,120888	-0,300327	-0,194525	-0,476824
Alumínio dissolvido	-0,025041	-0,040288	<b>0,868358</b>	0,033699
OD	-0,194247	-0,196086	<b>-0,511069</b>	0,431675
pH in loco	-0,195627	-0,142567	-0,061234	<b>-0,807679</b>
Ferro dissolvido	-0,137470	0,068368	<b>0,858432</b>	0,085195
SDT	<b>0,959096</b>	0,026879	-0,086808	-0,008437
SST	<b>0,928290</b>	0,337801	0,002751	0,065799
SS	<b>0,937733</b>	-0,043904	-0,044378	0,003016
ST	<b>0,935409</b>	0,323590	-0,001904	0,062318
Turbidez	<b>0,943154</b>	0,262290	0,004002	0,037755
Arsênio total	0,045468	0,361916	-0,210457	0,015830
Chumbo total	0,264882	<b>0,922735</b>	0,044593	0,120104
Manganês total	0,323737	<b>0,859623</b>	0,150491	0,235453
Níquel total	0,226711	<b>0,933417</b>	0,000310	0,049785
Zinco total	0,003892	<b>0,807751</b>	-0,122449	-0,324888
Var (%)	32%	25%	13%	8%
Var acumulada (%)	32%	56%	69%	77%

**Negrito** - Correlações moderadas (valor absoluto entre 0,50 - 0,75)

**Negrito e sublinhado** - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75)

O grupo 2, composto apenas pelas estações RD083 (localizadas em Fernandes Tourinho-MG), apresentou semelhança na variação da concentração no tempo entre três parâmetros da série de sólidos (SST, SS e ST) e turbidez e entre os metais arsênio, chumbo, manganês e níquel total, caracterizando a lama resultante do rompimento e o revolvimento do fundo do curso de água, aumento a concentração desses parâmetros com a passagem da onda de rejeitos. Essa estação apresentou um pico de concentração dos metais com a passagem da onda e um outro pico no final de novembro de 2015. Além disso, os valores registrados não foram tão altos com os registrados pelas estações mais montante, ou seja, essa estação não foi tão fortemente impactada como as estações mais a monte.

O grupo 1 formado pela estação RD045 (a jusante de Governador Valadares-MG) apresentou valores de pós-rompimento acima da média histórica da estação para os parâmetros da série de sólidos, turbidez, arsênio total, chumbo total, manganês total, níquel total e zinco total. Contudo, esses valores foram inferiores aos monitorados pelas estações mais próximas do ponto de rompimento; e também os parâmetros ST, SST e turbidez que caracterizam a onda de rejeitos. Ressalta-se que os metais fortemente correlacionados atingiram medições acima da média histórica para a estação RD045 apenas na passagem da pluma de rejeitos, voltando a atingir valores inferiores à média histórica após a passagem da pluma. Além disso, com uma chuva ocorrida no final de janeiro de 2016, as concentrações desses metais voltaram a apresentar um leve aumento, cerca de 4 a 12 vezes inferior ao apresentado com a passagem da onda de rejeitos em novembro de 2015. Além disso, o alumínio dissolvido e o ferro dissolvido demoraram cerca de 2 meses para apresentar medições de concentração semelhante às observados no período pré-rompimento, comprovando que esses metais sim estavam presentes em valores representativos na pluma de rejeitos.

O grupo 5, composto pelas estações RD058 e RD059 (localizadas em Conselheiro Pena-MG e a jusante da cidade de Resplendor-MG, respectivamente), RD044 (localizada a montante de Governador Valadares-MG), RD053 (localizada em Galiléia-MG), caracteriza-se por ser composto pelas estações mais a jusante do ponto de rompimento. Essas estações se agrupam devido aos parâmetros ST, SST e turbidez e também pelos menores valores medidos para chumbo e níquel total e maiores *outliers* de arsênio total. Como resultado da AF, na Tabela 5-7, tem-se que os quatro primeiros fatores possuem a capacidade de explicar 81% da variância do grupo 5. Sendo ainda, que o fator 1 explica 51% dessa variância. Como composição do fator 1, os parâmetros SST, SS, ST e turbidez apresentam forte correlação, caracterizando portanto, a onda de lama de rejeitos resultante do rompimento; e ainda, com forte correlação, os parâmetros chumbo total, arsênio total, manganês total e níquel total, caracterizando os metais que foram revolvidos do fundo do leito dos rios a montante e arrastados juntamente com a lama de rompimento. Nessas estações, a onda chegou com menor velocidade e o pico de aumento das concentrações dos parâmetros fortemente correlacionados foi menor, ou seja, menor concentração ao comparar com as estações mais a montante e esses valores ainda foram medidos por dois ou três dias com a chegada da onda e não em apenas um dia como o registrado para as estações mais a montante.

Além do fator 1, o fator 2 também possui grande capacidade de explicação da variância total do grupo: 20%. Compondo o fator 2, estão os parâmetros alumínio dissolvido e ferro dissolvido, fortemente correlacionados e ainda o parâmetro SDT, moderadamente correlacionado. Nota-se que, conforme os demais agrupamentos já apresentados, o ferro dissolvido oriundo do rejeito da barragem teve sua concentração reduzida mais lentamente, ao comparar com a redução da concentração dos metais que foram revolvidos do fundo. A redução da concentração de ferro dissolvido foi simultânea à redução do SDT e do alumínio dissolvido, alcançando concentrações semelhantes às observados no período de pré-rompimento já no início de fevereiro de 2016.

Tabela 5-7 - Cargas fatoriais dos parâmetros de qualidade da água para o período pós-rompimento, desconsiderando os vinte primeiros dias após o desastre, para cada fator após rotação *varimax* da análise fatorial, referentes ao grupo 5 formado pela Análise de Cluster.

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3
CE	-0,389321	-0,091374	<b>-0,710861</b>
Alumínio dissolvido	0,279421	<b>0,920666</b>	0,030320
OD	-0,094569	-0,415785	<b>-0,657778</b>
pH in loco	-0,156025	-0,005931	<b>-0,612030</b>
Ferro dissolvido	0,128006	<b>0,770414</b>	0,324055
SDT	<b>0,548023</b>	<b>0,698882</b>	0,041921
SST	<b>0,862604</b>	0,474720	0,083424
SS	<b>0,891695</b>	0,419298	0,068949
ST	<b>0,854747</b>	0,489145	0,082152
Turbidez	<b>0,888913</b>	0,201617	0,185431
Arsênio total	<b>0,944998</b>	-0,147419	0,145885
Chumbo total	<b>0,953465</b>	0,245410	0,109059
Manganês total	<b>0,964508</b>	0,076580	0,181388
Níquel total	<b>0,934198</b>	0,276819	0,078269
Zinco total	<b>0,645935</b>	0,204668	-0,015659
Var (%)	51%	20%	10%
Var acumulada (%)	51%	71%	81%

**Negrito** - Correlações moderadas (valor absoluto entre 0,50 - 0,75)

**Negrito e sublinhado** - Correlações fortes (valor absoluto maior que 0,75)

A estação RD067 (em Aimorés-MG), última estação do trecho, compõe o grupo 4 e apresentou medianas menores e também menor variância para os parâmetros alumínio dissolvido, ferro dissolvido, os parâmetros da série de sólidos e a turbidez, e ainda para os metais arsênio total, chumbo total e manganês total. Ou seja, esta pode ser considerada a estação que caracteriza o trecho menos impactado com o rompimento, já que, conforme mencionado anteriormente, o

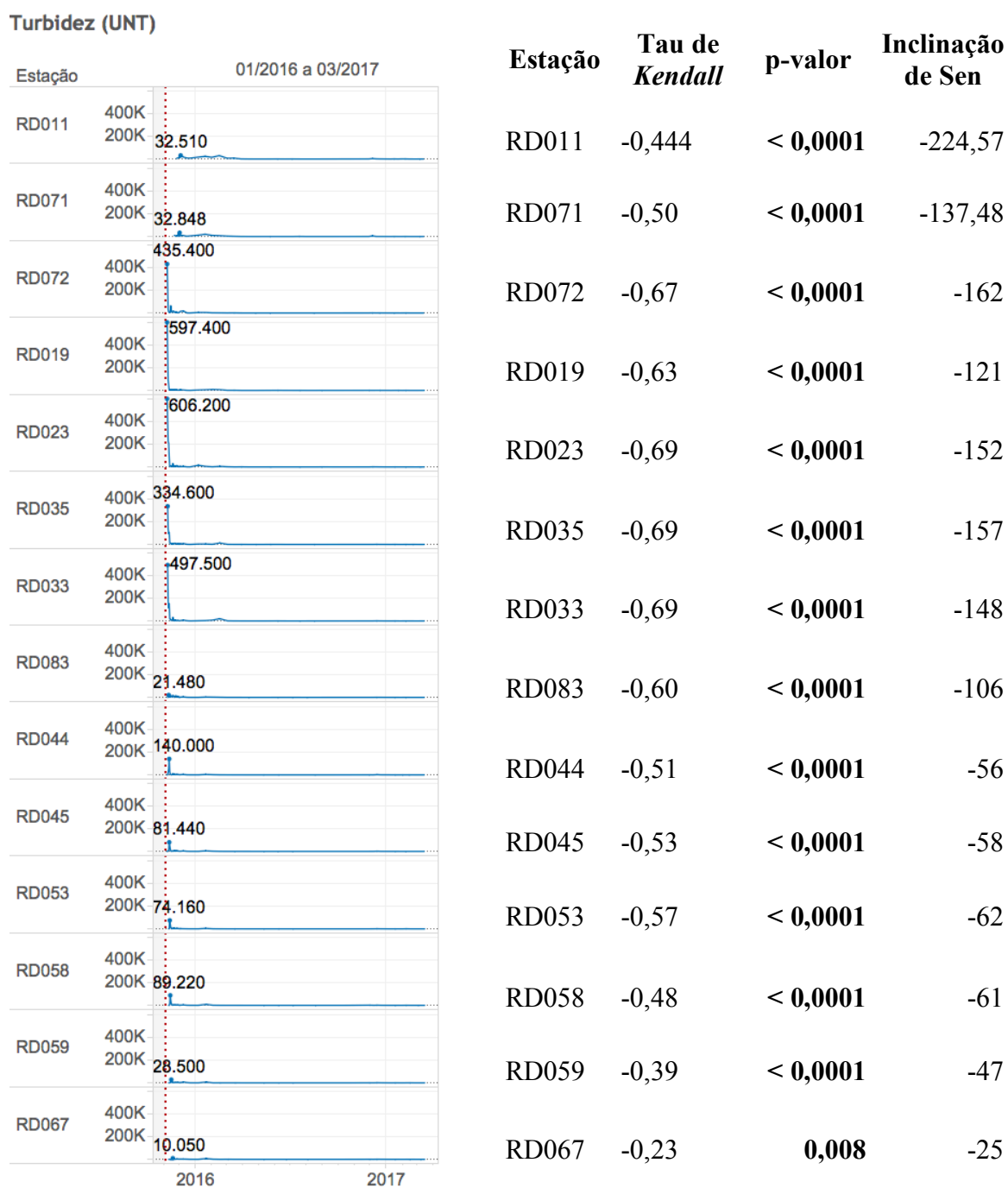
volume de rejeitos que chegou a esse ponto foi menor que o volume de rejeitos que alcançou os primeiros pontos imediatamente a jusante do rompimento (IBAMA, 2017; IBAMA, 2015). Ressalta-se também que como a onda de rejeitos resultante do rompimento da barragem chegou com uma velocidade muito menor em Aimorés-MG, os picos das concentrações dos parâmetros resultantes da sua passagem foram mais suaves e com maior duração no tempo, acompanhando a passagem da onda de rejeitos.

### **5.2.2 Teste de tendência temporal de *Mann-Kendall***

O teste de MK foi aplicado apenas para os principais parâmetros que caracterizam o impacto do rompimento da barragem: turbidez, oxigênio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total e ainda o arsênio total. Esses parâmetros foram selecionados por melhor caracterizarem a onda de rejeitos e por, de fato, terem apresentado altas medições com a passagem da onda pela estação de monitoramento.

Em todas as estações, pelo teste de MK, houve correlação do parâmetro turbidez com o tempo. E ainda, em todas as estações, a estatística do teste (Tau de *Kendall*) apresentou tendência de redução dos valores de turbidez com o tempo, conforme a Figura 5-3.

Figura 5-3 – Análise de tendência temporal da turbidez por meio da aplicação do teste de *Mann-Kendall*.

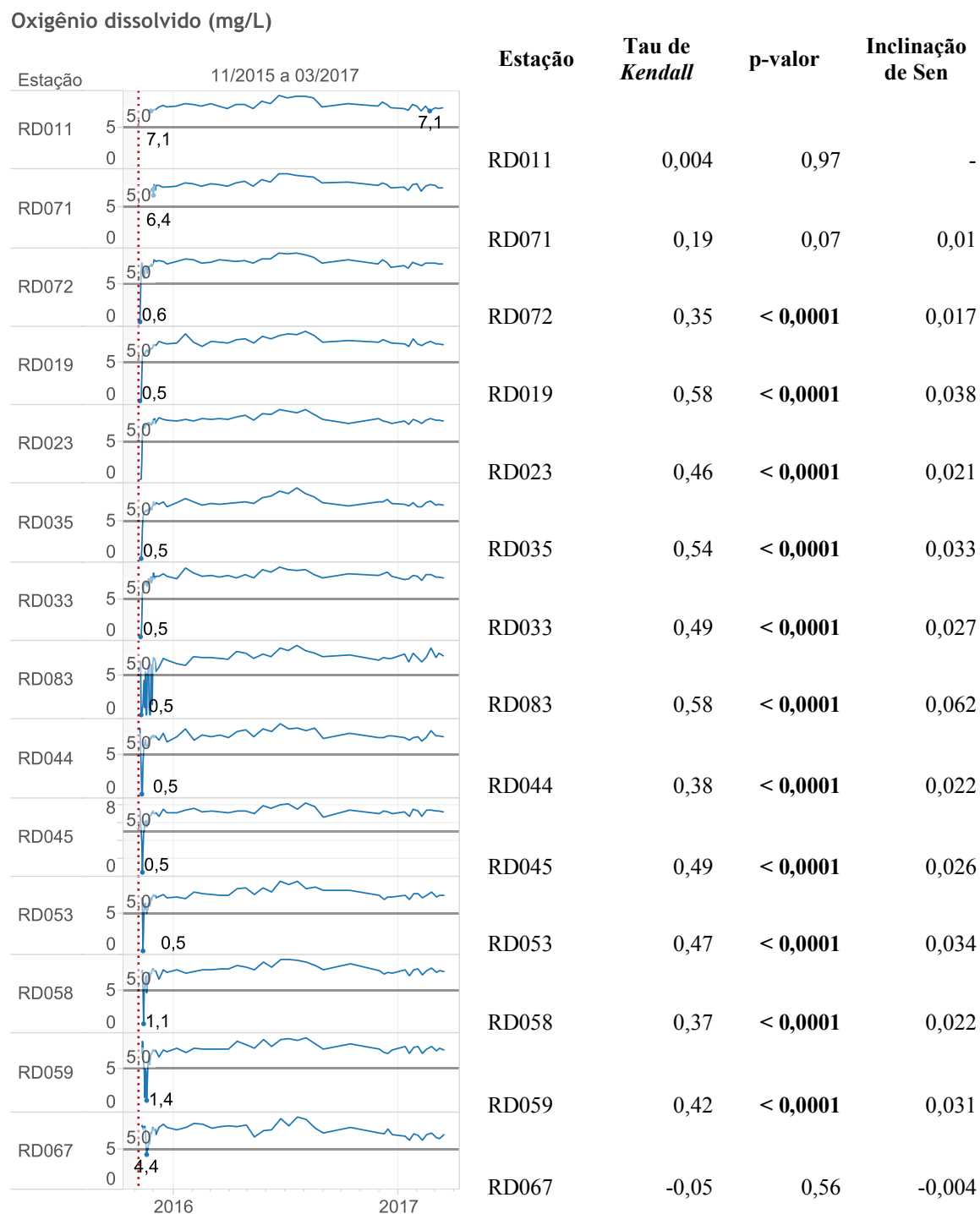


Pelo teste de MK realizado por estação para o período pós-rompimento, conforme apresentado na Figura 5-4, o OD apresentou correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha < 0,05$ ) em quase todas as estações de monitoramento e ainda tendência de aumento da concentração com o passar do tempo, pois Tau de *Kendall*  $> 0$ .

A primeira exceção ocorreu nas estações RD011 e RD071, pois como o monitoramento nessas estações iniciou 20 e 16 dias após o desastre, respectivamente, quando as medições de pós rompimento tiveram início o teor de OD já tinha sido restabelecido para valores acima de 6,5 mg/L. Dessa forma, essas duas estações não apresentaram correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha > 0,05$ ), apesar de ter indícios de aumento do OD com o tempo, já que Tau de *Kendall*  $> 0$ .

A segunda exceção ocorreu na estação RD067 que, por ser a última estação do trecho, foi a estação menos impactada pela chegada da pluma de rejeitos, chegando a atingir o menor valor igual a 4,4 mg/L apenas no dia 18/11/2015 e ainda registrando ocasionais valores menores que 7,0 mg/L apenas em fevereiro de 2017. Dessa forma, essa estação não apresentou correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha > 0,05$ ), já que o parâmetro não foi significativamente afetado com a chegada da onda de rejeitos no ponto, e ainda não apresentou indícios de aumento do OD com o tempo como as demais estações, já que Tau de *Kendall*  $< 0$ .

Figura 5-4 – Análise de tendência temporal do oxigênio dissolvido por meio da aplicação do teste de *Mann-Kendall*.



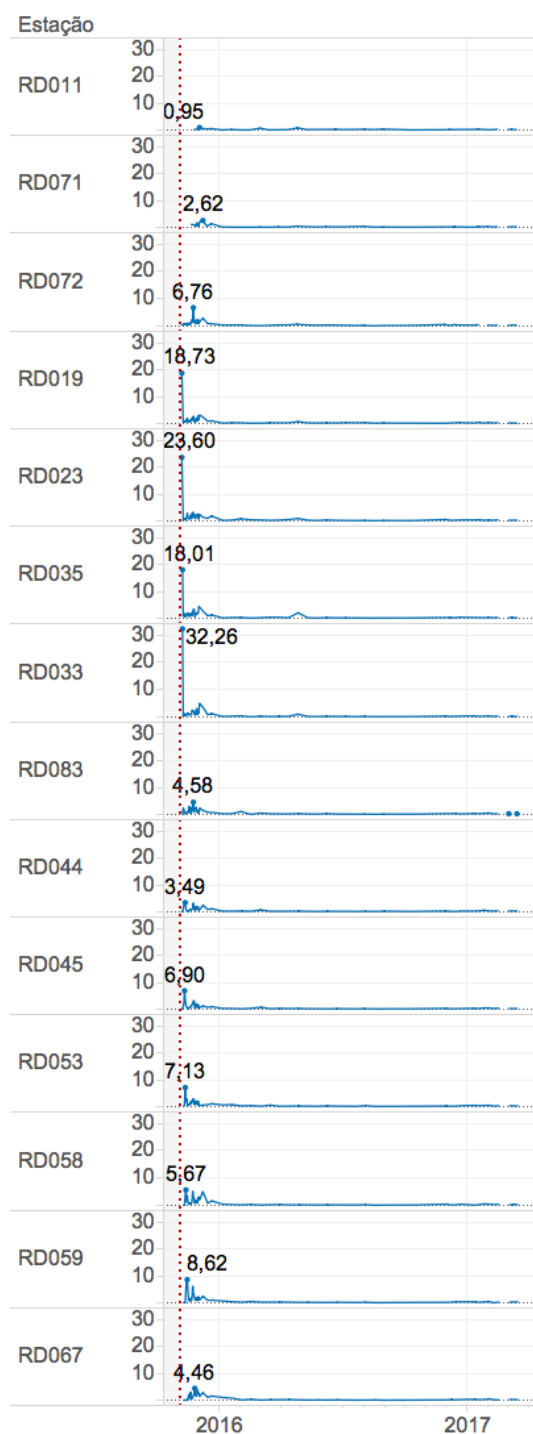


Pelo teste de MK realizada por estação para o período pós-rompimento, conforme apresentado na Figura 5-5 o ferro dissolvido apresentou correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha < 0,05$ ) em quase todas as estações de monitoramento e ainda tendência de redução da concentração com o passar do tempo, pois Tau de *Kendall*  $< 0$ .

A primeira exceção ocorreu na RD011, pois como o monitoramento nessa estação iniciou 20 dias após o desastre, quando as medições de pós-rompimento iniciaram a concentração de ferro dissolvido já tinha sido restabelecida para valores abaixo de 1 mg/L (registrando já no primeiro dia de monitoramento 0,166 mg/L em 25/11/2015). Dessa forma, essa estação não apresentou correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha > 0,05$ ), apesar de ter indícios de redução do ferro dissolvido com o tempo, já que Tau de *Kendall*  $< 0$ .

A segunda exceção ocorreu na estação RD067 que por ser a última estação do trecho, foi menos impactada pela chegada da pluma de rejeitos, o pico maior de ferro dissolvido foi registrado no dia 26/11/2015 igual a 4,46 mg/L, atingindo valores inferiores a 1 mg/L apenas no final de janeiro de 2016. Dessa forma, essa estação não apresentou correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha > 0,05$ ) apesar de ter apresentado indícios de redução do ferro dissolvido com o tempo, já que Tau de *Kendall*  $< 0$ .

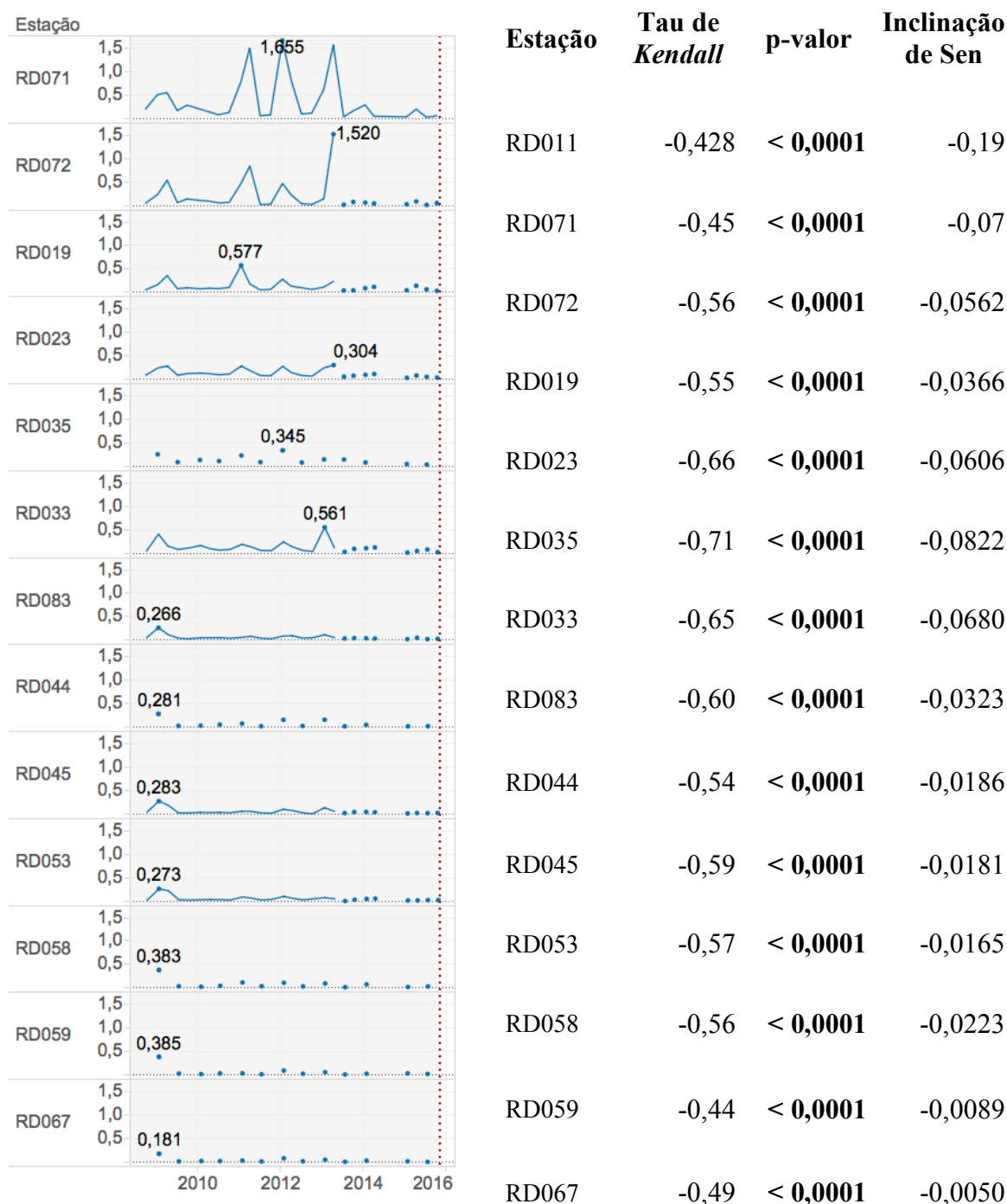
Figura 5-5 – Análise de tendência temporal do ferro dissolvido por meio da aplicação do teste de *Mann-Kendall*.



Estação	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
RD011	-0,049	0,66	-0,0006
RD071	-0,28	<b>0,01</b>	-0,01
RD072	-0,38	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,011
RD019	-0,41	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,014
RD023	-0,41	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,019
RD035	-0,41	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,020
RD033	-0,38	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,016
RD083	-0,37	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,016
RD044	-0,26	<b>0,004</b>	-0,011
RD045	-0,34	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,013
RD053	-0,45	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,018
RD058	-0,37	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,018
RD059	-0,40	<b>&lt; 0,0001</b>	-0,024
RD067	-0,14	0,12	-0,010

Pelo teste de MK realizada por estação para o período pós-rompimento, conforme apresentado na Figura 5-6, o manganês total apresentou correlação com o tempo (p-valor ou  $\alpha < 0,05$ ) em todas as estações de monitoramento e ainda tendência de redução da concentração com o passar do tempo, pois Tau de *Kendall*  $< 0$ .

Figura 5-6 – Análise de tendência temporal do manganês total por meio da aplicação do teste de *Mann-Kendall*.



Com teste de MK realizado por estação para o período pós-rompimento, conforme apresentado na Figura 5-7, o arsênio total apresentou correlação com o tempo em quase todas as estações de monitoramento e ainda tendência de redução da concentração com o passar do tempo, pois Tau de *Kendall*  $< 0$ . A exceção ocorreu na estação RD071 que apesar de não apresentar correlação com o tempo, apresentou Tau de *Kendall* positivo, ou seja, indícios de aumento da concentração com o tempo.

Reforça-se, portanto, que o arsênio existente nos sedimentos depositados por anos nos trechos de rio imediatamente a jusante do município de Mariana-MG (onde por anos funcionou uma fábrica de óxido de arsênio), influenciou a elevação de arsênio total nas estações a jusante de Mariana-MG (com o revolvimento do fundo dos cursos de água devido à passagem da pluma de rejeitos). E ainda, no ponto de desaguamento do rio Piracicaba no rio Doce, ou seja, na estação RD033, foi monitorada a maior medição de arsênio após o rompimento.

Figura 5-7 – Análise de tendência temporal arsênio total por meio da aplicação do teste de *Mann-Kendall*.



### 5.2.3 Conclusões

Desconsiderando os 20 dias imediatamente após o rompimento, a estação RD011, primeira na rota da pluma de rejeitos, apresentou os maiores valores de: manganês total, chumbo, cádmio, cromo e níquel total; e ainda, ST e SST em dias chuvosos de janeiro de 2016. A estação RD071, segunda estação na rota do rompimento, apresentou o segundo maior *outlier* para os metais chumbo, cromo, manganês e níquel total e para os parâmetros ST, SST e turbidez em fevereiro de 2016. E ainda, as estações RD019 e RD023 apresentaram altos valores para a série de sólidos, para a turbidez, o manganês e o arsênio total também no período chuvoso do início de 2016.

As estações mais a jusante apresentaram uma tendência de se agruparem por similaridade, com exceção da RD067. As medianas dos parâmetros ST, SST, turbidez, arsênio total, chumbo total e níquel total do período foram as menores, caracterizando o trecho de jusante como o menos impactado para o período de análise posterior ao rompimento. Por fim, a estação RD067 (última na rota da pluma) apresentou as menores medianas e a menor variância para o chumbo, o manganês, o arsênio total, o ferro dissolvido, os ST, os SST e a turbidez no período após o rompimento, ou seja, o trecho de Aimorés-MG pode ser considerado o menos impactado pelo desastre.

De forma geral, como resultado das análises de componentes principais e fatoriais, o fator 1 caracterizou a onda de rejeitos revolvendo os materiais do fundo do leito do rio, já que, conforme mencionado no capítulo 5, diversas atividades industriais existentes na região há anos contribuíram para contaminação e acúmulo de metais e arsênio total nos sedimentos do leito dos rios no trecho em estudo. Nota-se que no fator 1, o ferro dissolvido não se correlacionou com o arsênio, chumbo, níquel e o zinco em quase todos os agrupamento, exceto no agrupamento 4 da estação RD067 (devido aos baixos valores medidos para todos esses parâmetros nessa estação). Essa não correlação com o ferro dissolvido indica que esses metais eram advindos dos sedimentos do leito dos rios, já que rapidamente suas concentrações reduziam para abaixo do LD, rapidez de redução não observada para o ferro dissolvido. A única correlação do ferro dissolvido com o arsênio, chumbo, níquel e o zinco ocorreu apenas no grupo 4, pois já em Aimorés-MG, a onda de rejeitos chegou com menor velocidade e com menor impacto, aumentando o tempo no qual as maiores concentrações eram medidas; e mesmo esses maiores valores ainda eram menores que as medições realizadas com a passagem da onda de rejeito nas demais estações.

## 6 COMPARAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERCIAIS DA PORÇÃO MINEIRA DO RIO DOCE NO ENTRE ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM EM MARIANA-MG

### 6.1 *Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis e comparações múltiplas de Dunn*

A comparação foi feita por estação e por parâmetro, considerando os dois períodos: antes do rompimento (A) e depois do rompimento (D). Essas siglas foram utilizadas na distinção dos dados das estações entre os dois períodos no teste de *Kruskal-Wallis* (KW).

Uma sintetização das análises de KW e das comparações múltiplas de *Dunn* é apresentada a seguir (Tabela 6-1). Nessa sintetização, é feita uma comparação das diferenças significativas das medianas por estação de monitoramento, diferenças essas obtidas com o teste de comparações múltiplas de *Dunn*, por parâmetro e por agrupamento de tempo de análise: **antes x antes; antes x depois e depois x depois**.

Nota-se que há mais registros de diferenças significativas entre as estações ao se analisar o agrupamento de tempo de **antes x depois** do rompimento. O maior percentual de medianas significativamente superiores (ou significativamente diferentes entre si) ao comparar o antes e o depois do rompimento é atribuído aos parâmetros: condutividade elétrica *in loco*, ferro dissolvido, SDT, SST, ST, turbidez, arsênio total e manganês total. Com isso, tem-se também que os parâmetros ferro dissolvido, turbidez, manganês total e arsênio total foram corretamente assumidos como representativos para caracterização do impacto com a passagem da onda de rejeitos. A única exceção ocorreu por ter sido selecionado o parâmetro oxigênio dissolvido para apresentação dos resultados de forma mais detalhada a seguir. O oxigênio dissolvido foi incluído nessa apresentação de resultados, pois suas concentrações foram medidas próximas de zero imediatamente após a passagem da onda de rejeitos. E, em contrapartida, poucos dias depois da passagem da onda de rejeitos, as concentrações de oxigênio dissolvido voltaram a ser medidas em níveis de pré-rompimento. Portanto, foi de interesse investigar esse fenômeno entre as estações para melhor compreender o impacto do rompimento da barragem de rejeitos nos rios.

Por fim, tem-se que, ao comparar o antes e o depois, há um maior número de parâmetros que apresentam medianas significativamente diferentes entre si para as diferentes estações de monitoramento.

Tabela 6-1 – Percentual de medianas de concentrações medidas após o rompimento significativamente superiores às demais medianas do período anterior.

	Percentual de medianas, por parâmetro, significativamente superior às demais medianas		
	Antes x Antes	Antes x Depois	Depois x Depois
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	12%	63%	19%
Alumínio dissolvido	0%	17%	2%
Cobre dissolvido	0%	0%	0%
Oxigênio dissolvido	4%	0%	13%
pH <i>in loco</i>	1%	14%	1%
Ferro dissolvido	0%	83%	3%
Sólidos dissolvidos totais	1%	98%	0%
Sólidos em suspensão totais	0%	87%	4%
Sólidos totais	0%	97%	1%
Turbidez	0%	98%	2%
Arsênio total	5%	59%	0%
Cádmio total	0%	0%	0%
Chumbo total	0%	1%	0%
Cromo Total	0%	0%	0%
Manganês total	0%	58%	16%
Mercúrio total	0%	0%	0%
Níquel total	0%	0%	0%
Zinco total	0%	0%	0%

Para apresentação da análise entre antes e após o rompimento, uma discussão mais completa (incluindo tabelas, gráficos e figuras) será apresentada para os parâmetros turbidez, oxigênio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total e arsênio total. Esses parâmetros foram selecionados por serem os principais na investigação do impacto causado pelo rompimento da barragem, como já apresentado.

Para os demais parâmetros, a descrição completa dos resultados estará no Apêndice II.



### 6.1.1 Turbidez

A seguir são apresentados os resultados do teste de KW, sendo a Figura 6-1 referente aos box-whisker de antes e depois do rompimento para cada estação e a Figura 6-2 referente às comparações múltiplas de *Dunn*.

Com o teste de KW, foram obtidas três conclusões:

1. não houve diferença significativa entre as medianas das estações de monitoramento ao analisar isoladamente os dados antes (A) do rompimento.
2. não houve diferença significativa entre as medianas das estações de monitoramento ao analisar os dados depois (D) do rompimento. Com exceção da estação RD067.

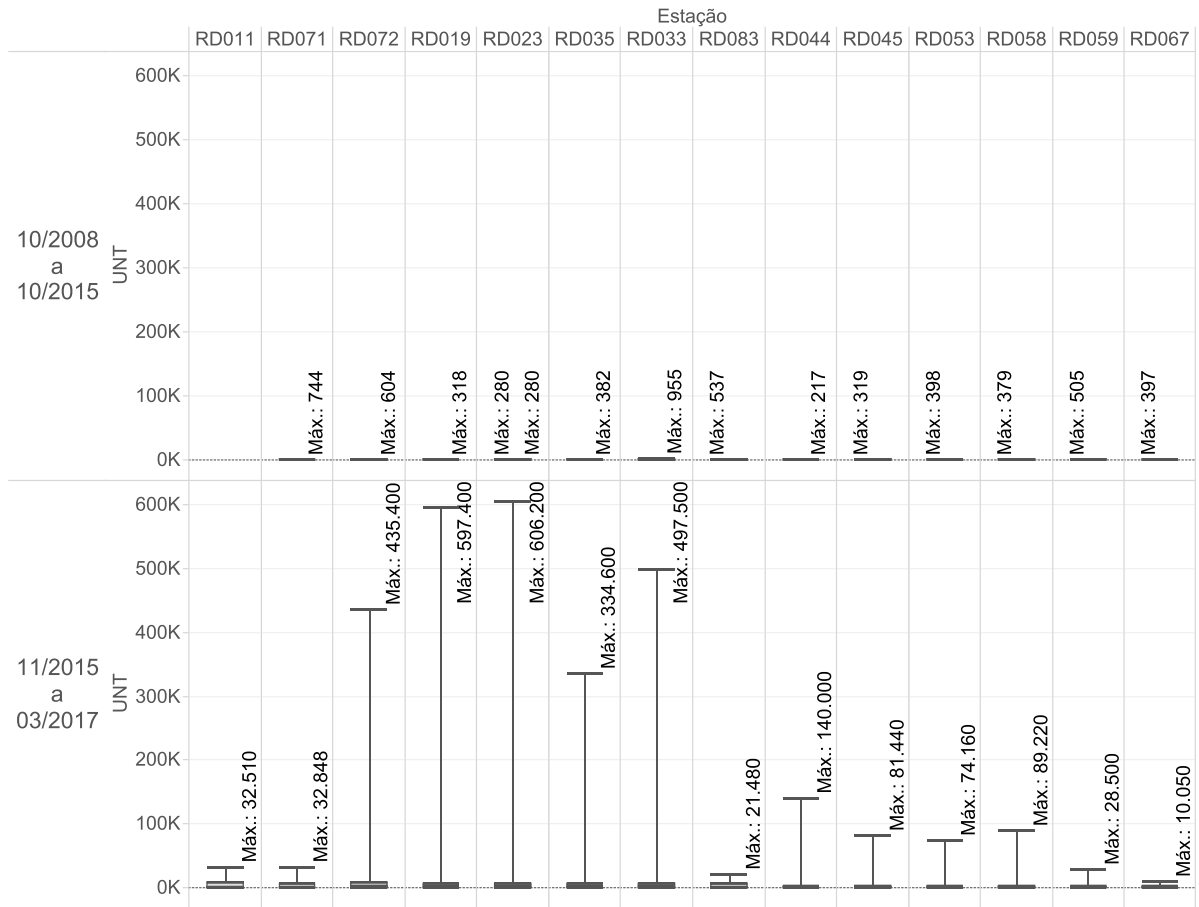
Não houve diferença significativa entre as medianas da estação RD067 para o pós rompimento (RD067\_D) em relação à mediana das estações RD071, RD035 e RD033 no período anterior ao rompimento (RD071\_A, RD035\_A e RD033\_A).

3. as medianas dos valores monitorados para turbidez em todas as estações no período pós-rompimento foram superiores significativamente às medianas do período pré-rompimento. Com exceção da estação RD067.

Analisando apenas o pós-rompimento (D), as estações entre os municípios Rio Casca-MG (RD019) e Belo Oriente-MG (RD033) apresentaram mediana significativamente superior à mediana de turbidez calculada para o trecho de Aimorés-MG (RD067).

Tem-se, portanto, que a estação RD067 é a estação relativamente menos impactada pela turbidez para o período pós-rompimento.

Figura 6-1 - Box-whisker do parâmetro turbidez medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.



Mesma escala no eixo das ordenadas: Turbidez (UNT)

Figura 6-2 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro turbidez das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.

	RD011_D	RD071_D	RD072_D	RD019_D	RD023_D	RD035_D	RD033_D	RD083_D	RD044_D	RD045_D	RD053_D	RD058_D	RD059_D	RD067_D
RD071_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
RD072_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD019_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD023_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD035_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
RD033_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
RD083_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD044_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD045_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD053_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD058_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD059_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD067_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
RD011_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD071_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD072_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD019_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	↓
RD023_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	↓
RD035_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	↓
RD033_D	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	↓

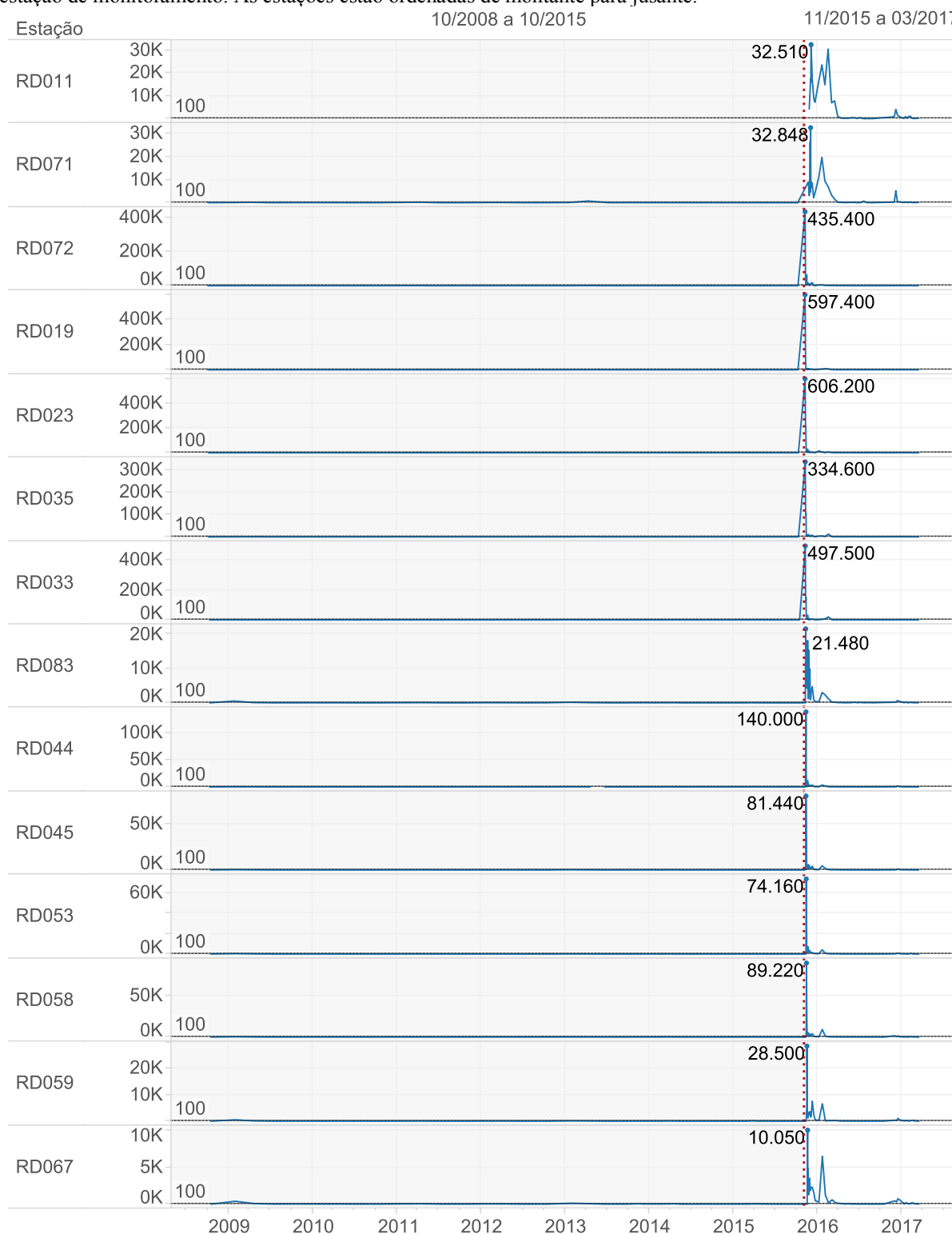
= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

A seguir, na Figura 6-3, é apresentada a evolução temporal do parâmetro turbidez desde o outubro de 2008 e ainda o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 para o enquadramento.

Figura 6-3 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro turbidez (UNT) por estação de monitoramento. As estações estão ordenadas de montante para jusante.



### 6.1.2 Oxigênio dissolvido

Os resultados do teste de KW são apresentados por meio do gráfico de box-whisker (Figura 6-4) com os dados de antes e depois do rompimento e ainda os diagramas com os resultados das comparações múltiplas de *Dunn* (Figura 6-5, Figura 6-6 e Figura 6-7).

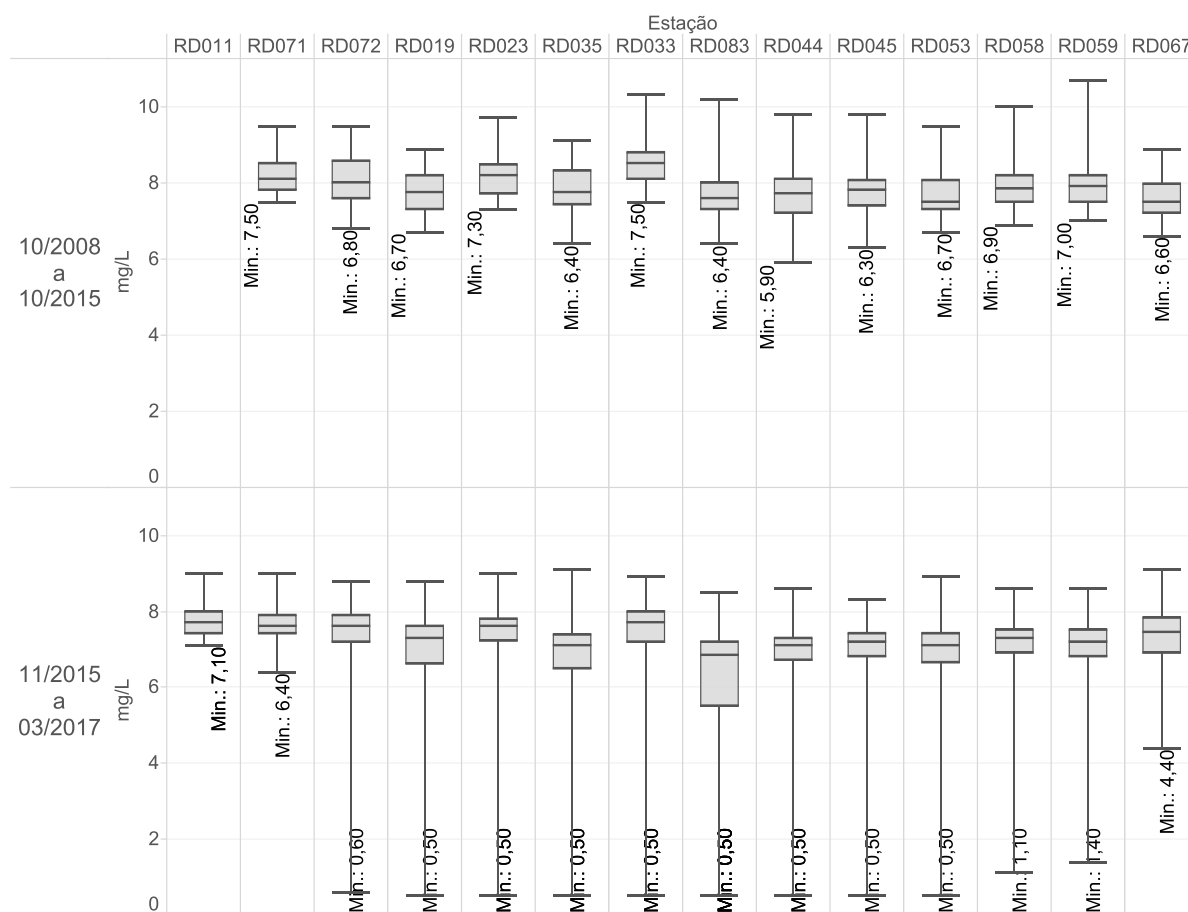
Com o teste de KW, foram obtidas três conclusões:

1. Analisando apenas os dados do período pré-rompimento (A), na Figura 6-5, tem-se que a estação RD033 (em Belo Oriente) apresentou mediana significativamente superior às medianas das estações RD019, RD083, RD044, RD045, RD053 e RD067.
2. Analisando apenas os dados do período pós-rompimento (D), na Figura 6-6, tem-se que as estações mais a montante (principalmente a RD011) apresentaram uma mediana de OD do pós-rompimento significativamente maior em relação à mediana de muitas das demais estações. Ressalta-se novamente que as estações RD011 e RD071 tiveram o monitoramento iniciado, respectivamente, 20 e 16 dias após o desastre. Ou seja, com 16 e 20 dias após o rompimento, já houve uma rápida elevação das concentrações de OD para valores muito acima das medições feitas imediatamente após o ocorrido.

Além disso, a estação RD067 também apresentou a mediana significativamente superior à mediana de OD da estação RD083, indicando que a estação RD067 foi uma das estações menos impactada com o rompimento, justamente por estar mais a jusante. Nota-se também que a estação RD033 (em Belo Oriente) apresentou mediana significativamente superior à mediana das estações RD035, RD083, RD044, RD045 e RD053, semelhante ao observado ao se considerar apenas os dados do pré-rompimento.

3. Ao comparar o antes (A) e o depois (D) do rompimento (Figura 6-7), nota-se, de forma geral, uma mediana significativamente inferior para os dados medidos no período posterior ao rompimento com relação ao período anterior ao rompimento. Esse fato confirma-se ainda mais para as estações RD035 e entre as estações RD083 e RD053. Nota-se que a estação RD011 não apresentou mediana significativamente inferior a nenhuma outra estação, isso se deve principalmente ao fato dessa estação ter seu monitoramento iniciado 20 dias após o rompimento.

Figura 6-4 - Box-whisker do parâmetro oxigênio dissolvido medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.



Mesma escala no eixo das ordenadas: Oxigênio Dissolvido (mg/L)

Figura 6-5 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro oxigênio dissolvido das estações considerando apenas o antes (A) do rompimento.

	RD071_A	RD072_A	RD019_A	RD023_A	RD035_A	RD033_A	RD083_A	RD044_A	RD045_A	RD053_A	RD058_A	RD059_A	RD067_A
RD071_A		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD072_A	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD019_A	=	=		=	=	↑	=	=	=	=	=	=	=
RD023_A	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD035_A	=	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=
RD033_A	=	=	↓	=	=		↓	↓	↓	↓	=	=	↓
RD083_A	=	=	=	=	=	↑		=	=	=	=	=	=
RD044_A	=	=	=	=	=	↑			=	=	=	=	=
RD045_A	=	=	=	=	=	↑	=			=	=	=	=
RD053_A	=	=	=	=	=	↑	=	=			=	=	=
RD058_A	=	=	=	=	=	=	=	=	=			=	=
RD059_A	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			=
RD067_A	=	=	=	=	=	↑	=	=	=	=	=		

= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Figura 6-6 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro oxigênio dissolvido das estações considerando apenas o depois (D) do rompimento.

	<i>RD011_D</i>	<i>RD071_D</i>	<i>RD072_D</i>	<i>RD019_D</i>	<i>RD023_D</i>	<i>RD035_D</i>	<i>RD033_D</i>	<i>RD083_D</i>	<i>RD044_D</i>	<i>RD045_D</i>	<i>RD053_D</i>	<i>RD058_D</i>	<i>RD059_D</i>	<i>RD067_D</i>
<i>RD011_D</i>	=	=	=	↓	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	=
<i>RD071_D</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	=	↓	=
<i>RD072_D</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	=	=	=	=	=
<i>RD019_D</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD023_D</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	=	=	=	=	=
<i>RD035_D</i>	↑	↑	↑	=	↑	=	↑	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD033_D</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	=	=	=
<i>RD083_D</i>	↑	↑	↑	=	↑	=	↑	=	=	=	=	=	=	↑
<i>RD044_D</i>	↑	↑	↑	=	↑	=	↑	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD045_D</i>	↑	↑	=	=	=	=	↑	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD053_D</i>	↑	↑	=	=	=	=	↑	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD058_D</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD059_D</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD067_D</i>	=	=	=	=	=	=	=	↓	=	=	=	=	=	=

= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Figura 6-7 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro oxigênio dissolvido das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.

	<i>RD011_D</i>	<i>RD071_D</i>	<i>RD072_D</i>	<i>RD019_D</i>	<i>RD023_D</i>	<i>RD035_D</i>	<i>RD033_D</i>	<i>RD083_D</i>	<i>RD044_D</i>	<i>RD045_D</i>	<i>RD053_D</i>	<i>RD058_D</i>	<i>RD059_D</i>	<i>RD067_D</i>
<i>RD071_A</i>	=	=	↓	↓	↓	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD072_A</i>	=	=	=	↓	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD019_A</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	=
<i>RD023_A</i>	=	=	↓	↓	↓	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD035_A</i>	=	=	=	↓	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	=
<i>RD033_A</i>	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD083_A</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	=	=	=
<i>RD044_A</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	=	=	=
<i>RD045_A</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	=	↓	=
<i>RD053_A</i>	=	=	=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	=	=	=
<i>RD058_A</i>	=	=	=	↓	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	=
<i>RD059_A</i>	=	=	=	↓	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD067_A</i>	=	=	=	=	=	=	=	↓	=	=	=	=	=	=

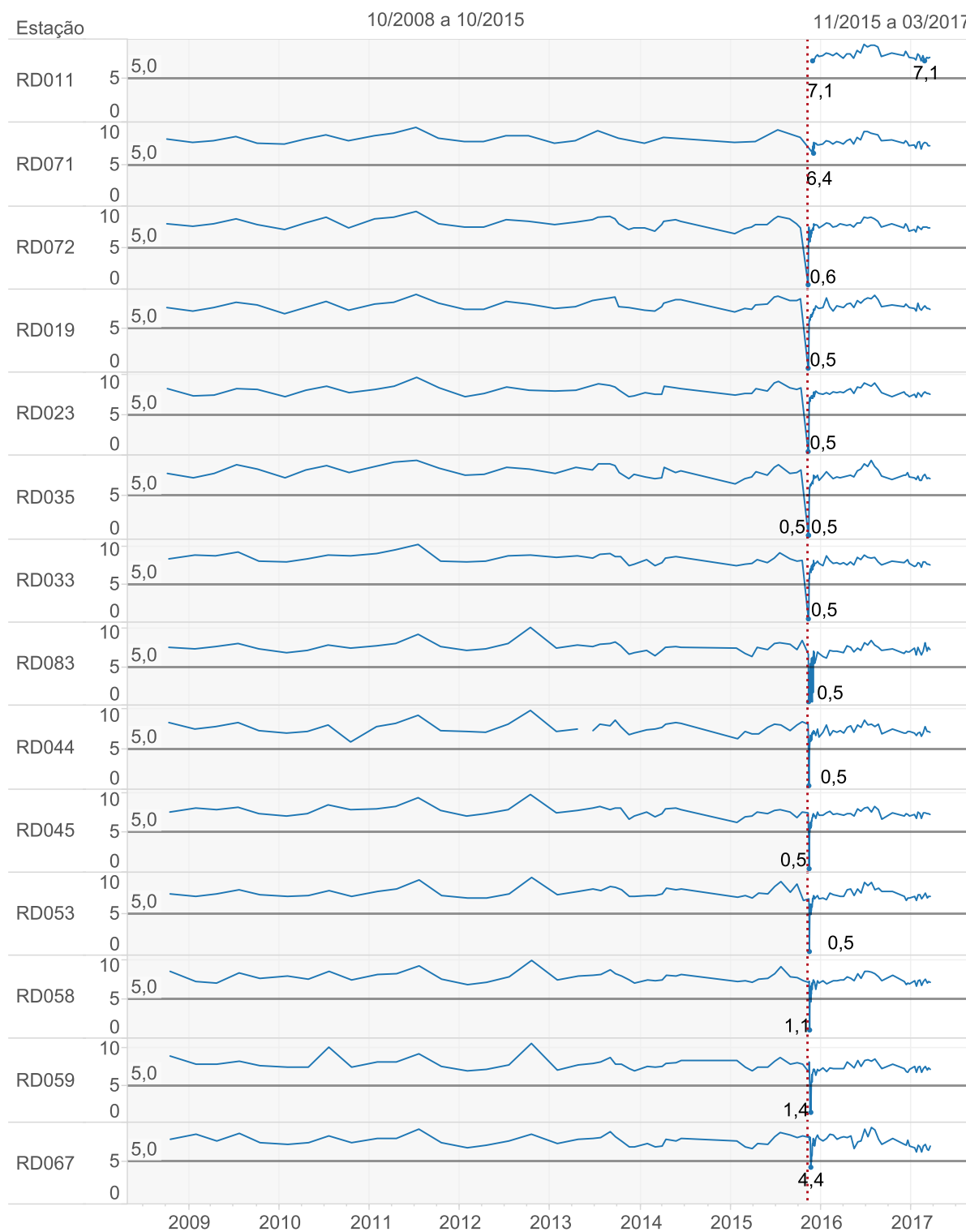
= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Na Figura 6-8 está sendo apresentada a evolução temporal das concentrações de OD por estação de monitoramento e o limite definido pela DN de acordo com o enquadramento.

Figura 6-8 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro oxigênio dissolvido (mg/L) por estação de monitoramento. As estações estão ordenadas de montante para jusante.



### 6.1.3 Ferro dissolvido

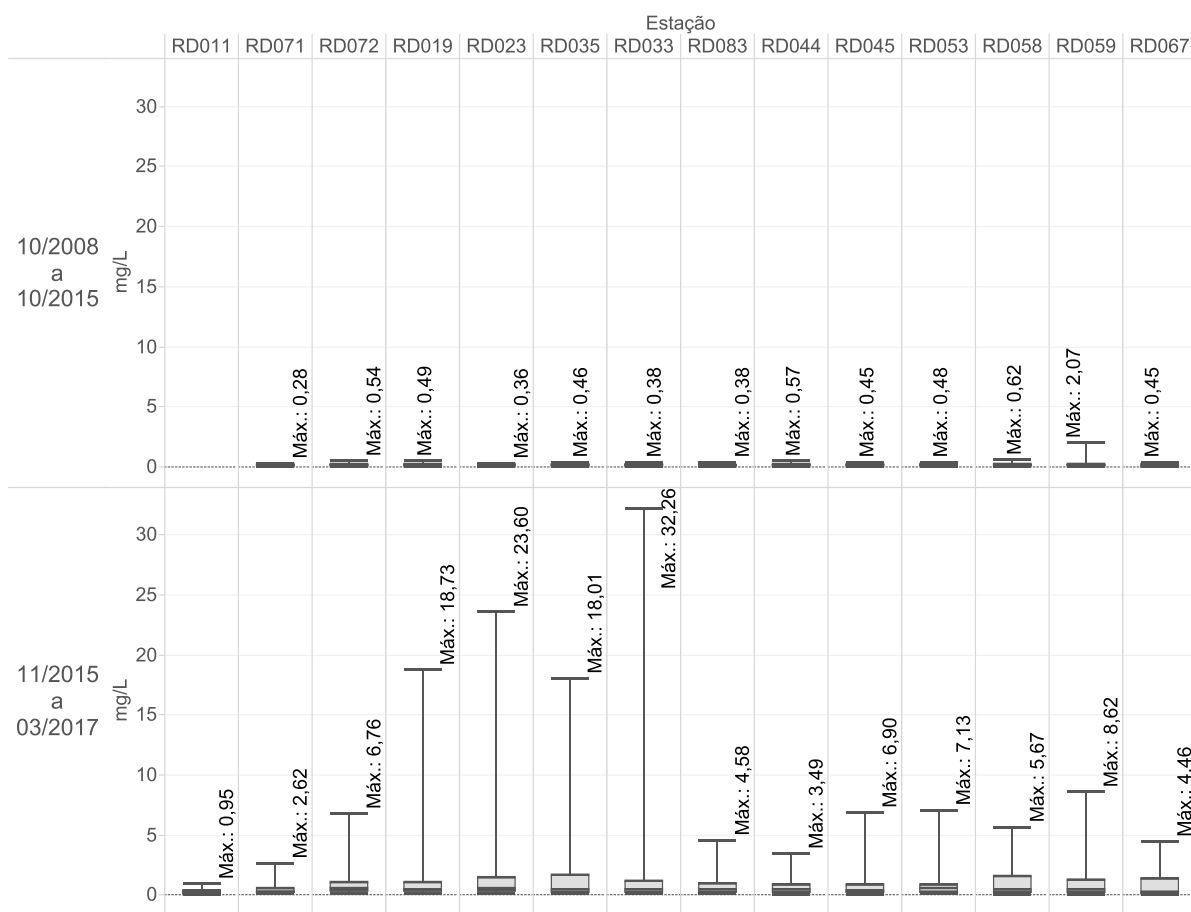
Os resultados do teste de KW são apresentados por meio do gráfico de box-whisker (Figura 6-9) com os dados de antes de depois do rompimento e ainda o diagrama com os resultados das comparações múltiplas de *Dunn* (Figura 6-10).

Com o teste de KW, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. Antes do rompimento (A) não há diferença significativa entre as medianas da concentração de ferro dissolvido medido nas estações de monitoramento do trecho.
2. Comparando o antes do rompimento (A) com o depois (D), as medianas da concentração de ferro dissolvido, de forma geral, foram significativamente maiores no pós-rompimento.
3. A mediana de ferro dissolvido medido na estação RD011 após o rompimento (RD011\_D) não apresentou diferença significativa em relação às medianas do pré-rompimento (A) das estações de monitoramento do trecho. Isso representa que os altos valores de ferro dissolvido que certamente impactaram essa estação, ainda mais por ser esta a primeira na rota da pluma de rejeitos, não foram assim medidos após o 20º dia após o rompimento. Ressalta-se novamente que a estação RD011 teve seu monitoramento iniciado 20 dias após o rompimento.
4. Considerando apenas o período após o rompimento (A), a estação RD011 ainda apresentou mediana significativamente inferior às medianas das estações mais a montante do trecho (entre a RD072 e a RD033) e ainda a RD053.
5. Comparando o antes do rompimento (A) com o depois (D), a estação RD071, por ter seu monitoramento iniciado 16 dias após o rompimento, não apresentou mediana de pós-rompimento significativamente superior às medianas do pré-rompimento das estações RD072, RD035, RD033, RD053, RD059.
6. Comparando o antes do rompimento (A) com o depois (D), a mediana da estação RD067 (última estação, localizada em Aimorés-MG) de pós-rompimento também não se apresentou significativamente superior à mediana da maior parte das estações do período pré-rompimento, o que caracteriza essa estação como a estação menos impactada pelo ferro dissolvido oriundo dos rejeitos da barragem que se rompeu.



Figura 6-9 - Box-whisker do parâmetro ferro dissolvido medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.



Mesma escala no eixo das ordenadas: Ferro Dissolvido (mg/L)

Figura 6-10 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro ferro dissolvido das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.

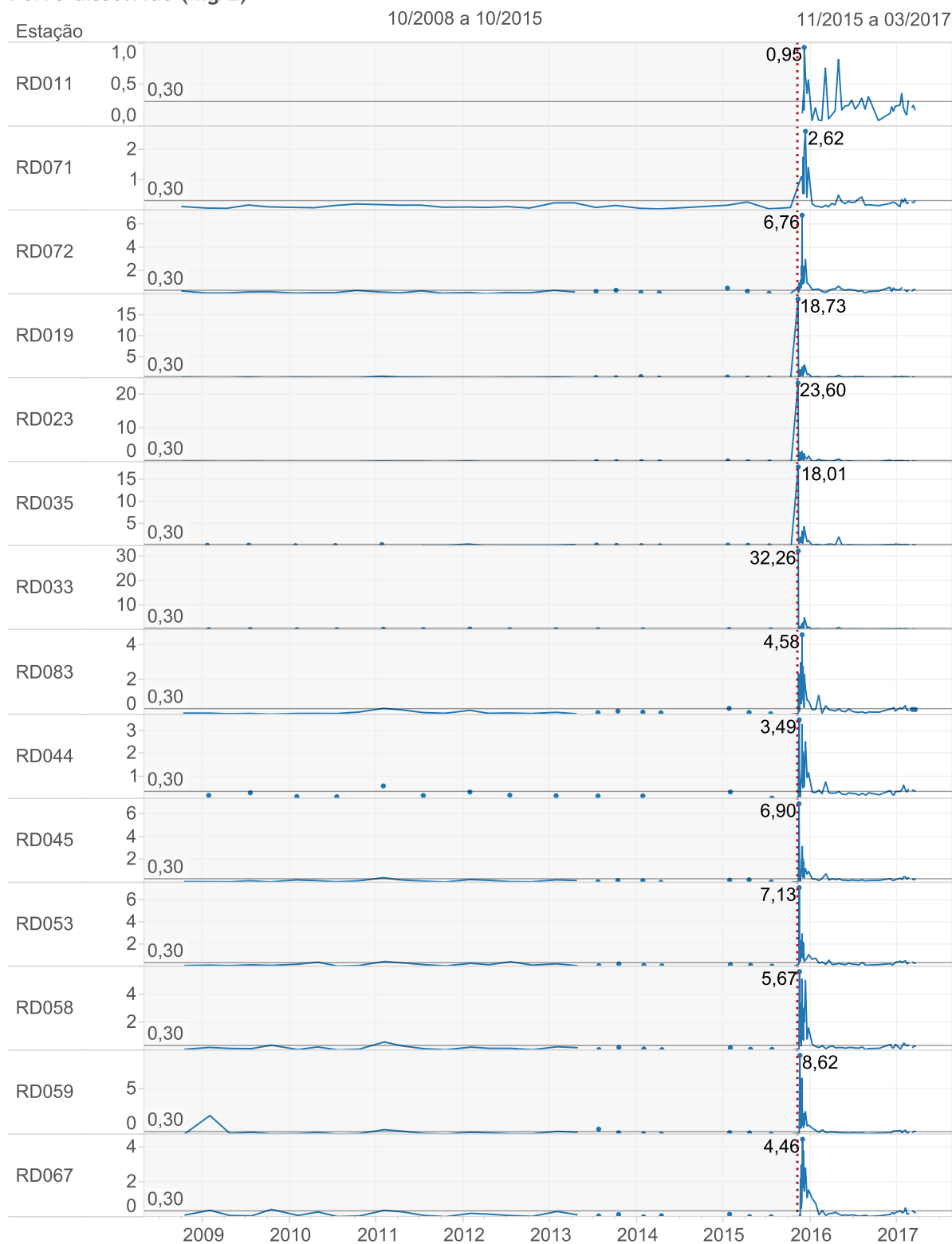
	<i>RD011_D</i>	<i>RD071_D</i>	<i>RD072_D</i>	<i>RD019_D</i>	<i>RD023_D</i>	<i>RD035_D</i>	<i>RD033_D</i>	<i>RD083_D</i>	<i>RD044_D</i>	<i>RD045_D</i>	<i>RD053_D</i>	<i>RD058_D</i>	<i>RD059_D</i>	<i>RD067_D</i>
<b>RD071_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD072_A</b>	=	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD019_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD023_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD035_A</b>	=	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD033_A</b>	=	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD083_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD044_A</b>	=	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	↑	=	=	=
<b>RD045_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD053_A</b>	=	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD058_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD059_A</b>	=	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=
<b>RD067_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD011_D</b>		=	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	↑	=	=	=
<b>RD071_D</b>	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD072_D</b>	↓	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD019_D</b>	↓	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD023_D</b>	↓	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD035_D</b>	↓	=	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD033_D</b>	↓	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=
<b>RD083_D</b>	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=	=
<b>RD044_D</b>	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=
<b>RD045_D</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=	=
<b>RD053_D</b>	↓	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=
<b>RD058_D</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=
<b>RD059_D</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=
<b>RD067_D</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	

- = Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)
- ↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)
- ↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Na Figura 6-11 estão sendo apresentados a evolução temporal das concentrações de ferro dissolvido por estação de monitoramento e o limite definido pela DN COPAM CERH-MG 01/08 de acordo com o enquadramento.

Figura 6-11 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro ferro dissolvido por estação de monitoramento.

**Ferro dissolvido (mg/L)**



#### 6.1.4 Manganês total

Os resultados do teste de KW são apresentados por meio do gráfico de box-whisker (Figura 6-12) com os dados de antes de depois do rompimento e ainda os diagramas com os resultados das comparações múltiplas de *Dunn* (Figura 6-13 e Figura 6-14).

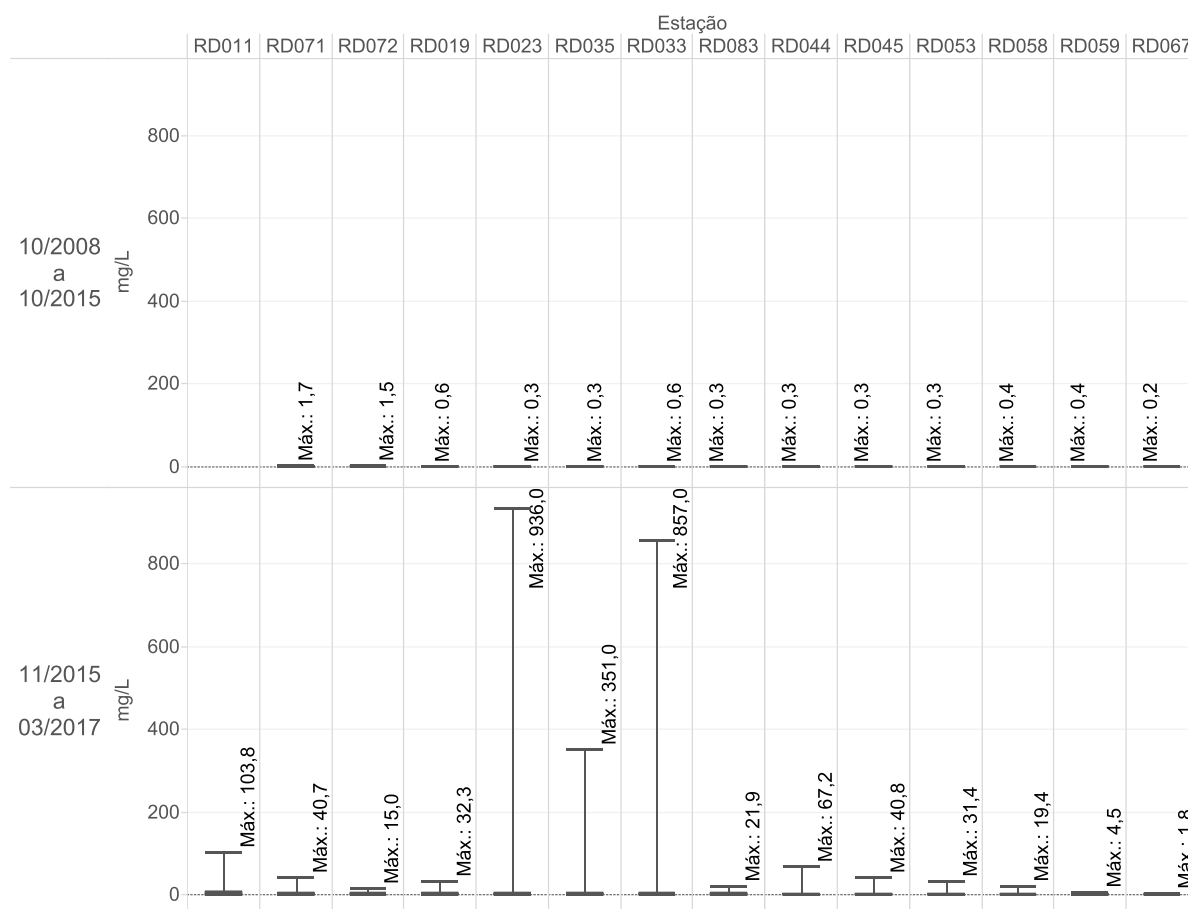
Com o teste de KW, foram obtidas três conclusões:

1. Antes do rompimento (A) não há diferença significativa entre as medianas da concentração de manganês total medido nas estações de monitoramento do trecho.
2. Comparando os valores de antes do rompimento (A) com depois (D), as medianas da concentração de manganês total, de forma geral, foram significativamente maiores no pós-rompimento. Exceto as medianas das duas últimas estações do trecho de monitoramento (RD059 e RD067), que não apresentaram diferença significativa com a mediana de nenhuma estação do período pré-rompimento. Isso significa que as estações mais a jusante representam que o trecho entre Resplendor-MG e Aimorés-MG foi o menos impactado quanto às medições de manganês total.
3. Comparando os valores de antes do rompimento (A) com depois (D), as medianas das estações mais a montante no trecho de monitoramento (entre Barra Longa-MG com a estação RD011 e Belo Oriente-MG com a estação RD033) do período pós-rompimento apresentaram mediana significativamente superior às medianas da maior parte das estações monitoradas no pré-rompimento.

Exceto a mediana da estação localizada no rio do Carmo para o pré-rompimento (RD071\_A) que não se apresentou significativamente inferior à mediana do pós-rompimento de nenhuma estação de monitoramento, o que indica que esse trecho de Barra Mansa-MG já era impactado pelo manganês total anteriormente ao desastre, principalmente devido à intensa atividade minerária existente na região a jusante.

4. Comparando apenas o período depois do rompimento (D), na Figura 6-15, tem-se que no período do pós-rompimento, as estações mais a montante no trecho foram mais fortemente impactadas pelo manganês total que as estações mais a jusante.

Figura 6-12 - Box-whisker do parâmetro manganês total medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.



Mesma escala no eixo das ordenadas: Manganês Total (mg/L)

Figura 6-13 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro manganês total das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.

	RD011_D	RD071_D	RD072_D	RD019_D	RD023_D	RD035_D	RD033_D	RD083_D	RD044_D	RD045_D	RD053_D	RD058_D	RD059_D	RD067_D
RD071_A	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
RD072_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=	=
RD019_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=	=
RD023_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=	=
RD035_A	=	=	=	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=	=
RD033_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=	=
RD083_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=
RD044_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=
RD045_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=
RD053_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=
RD058_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=
RD059_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=
RD067_A	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=

= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Figura 6-14 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro manganês total das estações considerando apenas depois (D) do rompimento.

	<i>RD011_D</i>	<i>RD071_D</i>	<i>RD072_D</i>	<i>RD019_D</i>	<i>RD023_D</i>	<i>RD035_D</i>	<i>RD033_D</i>	<i>RD083_D</i>	<i>RD044_D</i>	<i>RD045_D</i>	<i>RD053_D</i>	<i>RD058_D</i>	<i>RD059_D</i>	<i>RD067_D</i>
<i>RD011_D</i>		=	=	=	=	=	=	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD071_D</i>	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	↓	↓
<i>RD072_D</i>	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	↓	↓
<i>RD019_D</i>	=	=	=		=	=	=	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD023_D</i>	=	=	=	=		=	=	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD035_D</i>	=	=	=	=	=		=	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD033_D</i>	=	=	=	=	=	=		=	=	=	↓	=	↓	↓
<i>RD083_D</i>	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=	↓
<i>RD044_D</i>	↑	=	=	↑	↑	↑	=	=		=	=	=	=	=
<i>RD045_D</i>	↑	=	=	↑	↑	↑	=	=	=		=	=	=	=
<i>RD053_D</i>	↑	=	=	↑	↑	↑	↑	=	=	=		=	=	=
<i>RD058_D</i>	↑	=	=	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=		=	=
<i>RD059_D</i>	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=		=
<i>RD067_D</i>	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	

= Grupo em *itálico* (acima) não se difere significativamente do grupo em **negrito** (à esquerda)

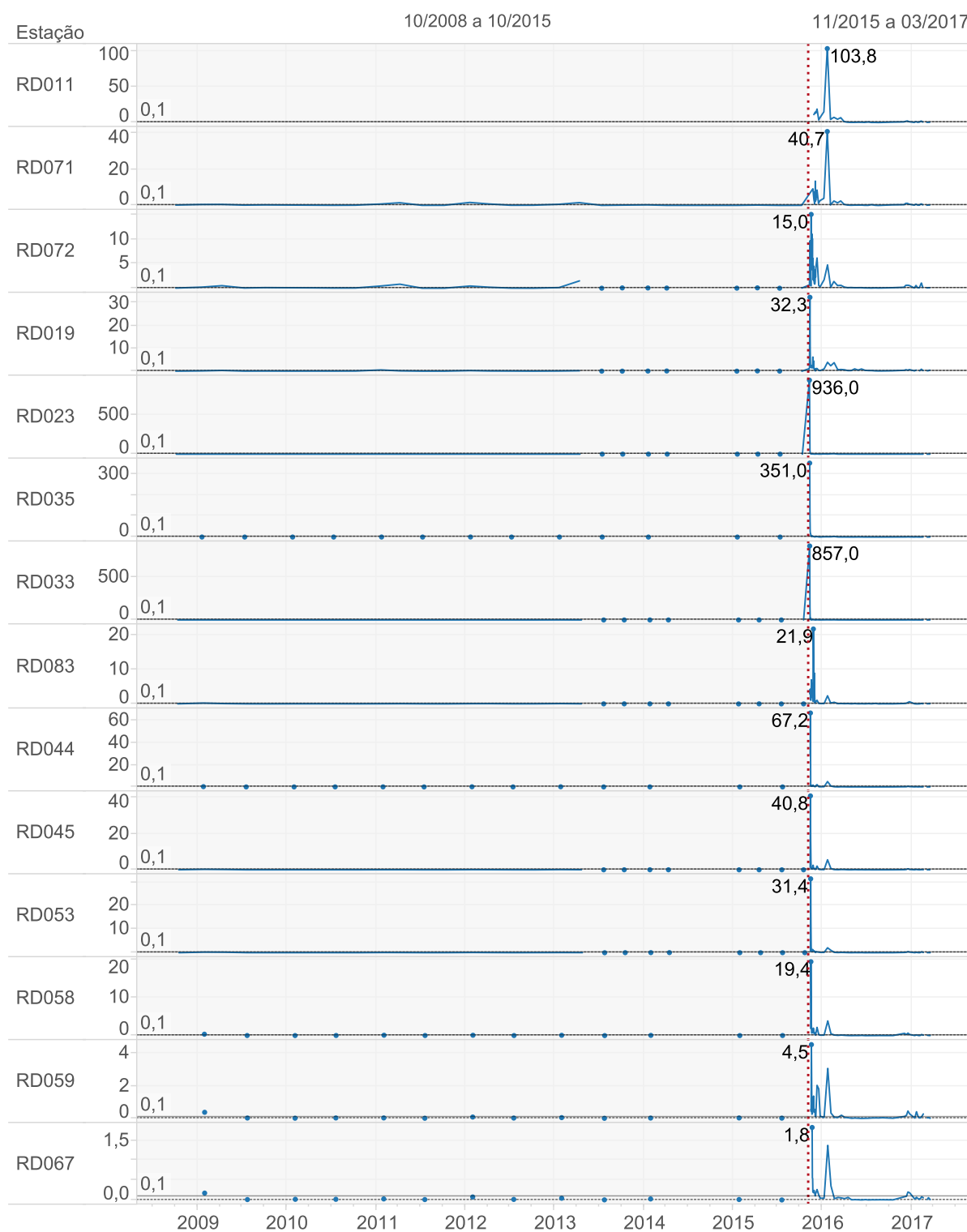
↑ Grupo em *itálico* (acima) significativamente maior que o grupo em **negrito** (à esquerda)

↓ Grupo em *itálico* (acima) significativamente menor que o grupo em **negrito** (à esquerda)

Na Figura 6-15 estão sendo apresentados a evolução temporal das concentrações de manganês total por estação de monitoramento e o limite definido pela DN COPAM CERH-MG 01/08 de acordo com o enquadramento.

Figura 6-15 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro manganês total por estação de monitoramento.

**Manganês total (mg/L)**



### **Análise referente ao arsênio e metais**

Os parâmetros arsênio total, cádmio total, cobre dissolvido, mercúrio total e níquel total se comportaram de forma semelhante em todas as estações de amostragem analisadas, apresentando, logo após o rompimento da barragem, valores acima da média histórica do IGAM no momento da passagem da pluma de rejeitos. Registrando, em seguida, com menos de 1 mês após o rompimento, uma redução em até mais de cem vezes de suas concentrações em todas as estações, conforme pode ser visualizado na Figura 6-16, observando a ordem de grandeza dos dados. Ressalta-se que apenas a partir do dia 25/11/2015 todas as estações estavam sendo monitoradas simultaneamente.

A partir da segunda semana após o rompimento da barragem, a grande maioria dos resultados esteve abaixo do LD de cada parâmetro. Algumas exceções ocorreram nas medições realizadas em dias chuvosos, por exemplo, o cobre dissolvido apresentou violações do limite de classe na última semana de janeiro de 2016, em todos os pontos de monitoramento, tornando essa violação isolada e esporádica. Além disso, nota-se que medições esporádicas de concentração de zinco total acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/2008 ocorreram no período chuvoso de 2016 e 2017 nas estações RD045, RD072 e RD019, caracterizando revolvimento dos sedimentos de leito dos rios.

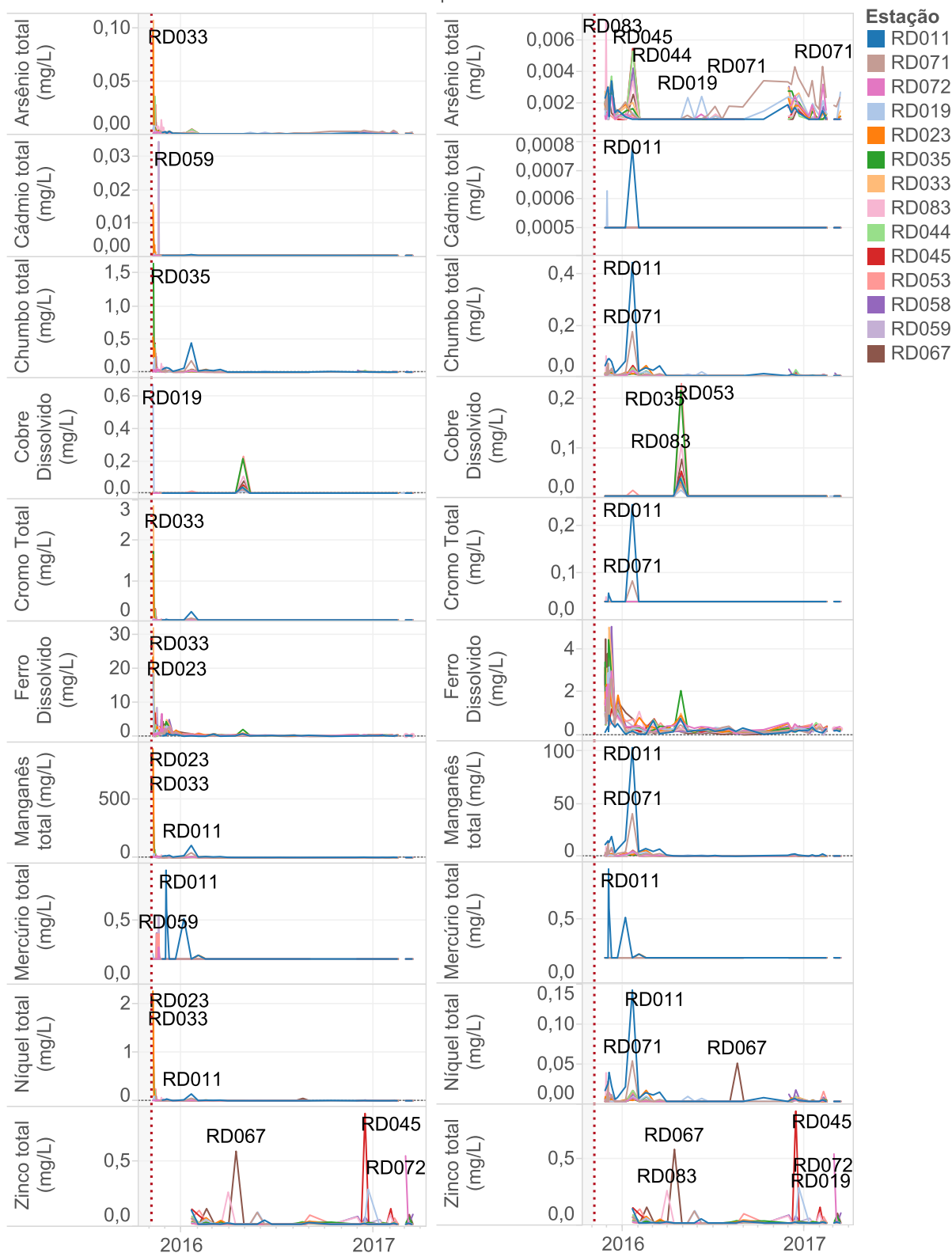
Maiores detalhes sobre os metais medidos ao longo do tempo no período após o rompimento em cada trecho pode ser consultado no Apêndice II.



Figura 6-16 - Evolução da concentração do arsênio e dos metais considerando (a) imediatamente e pós-rompimento e (b) 20 dias após o rompimento.

(a) Série do monitoramento emergencial a partir de 07/11/2015

(b) Série do monitoramento emergencial a partir de 25/11/2015



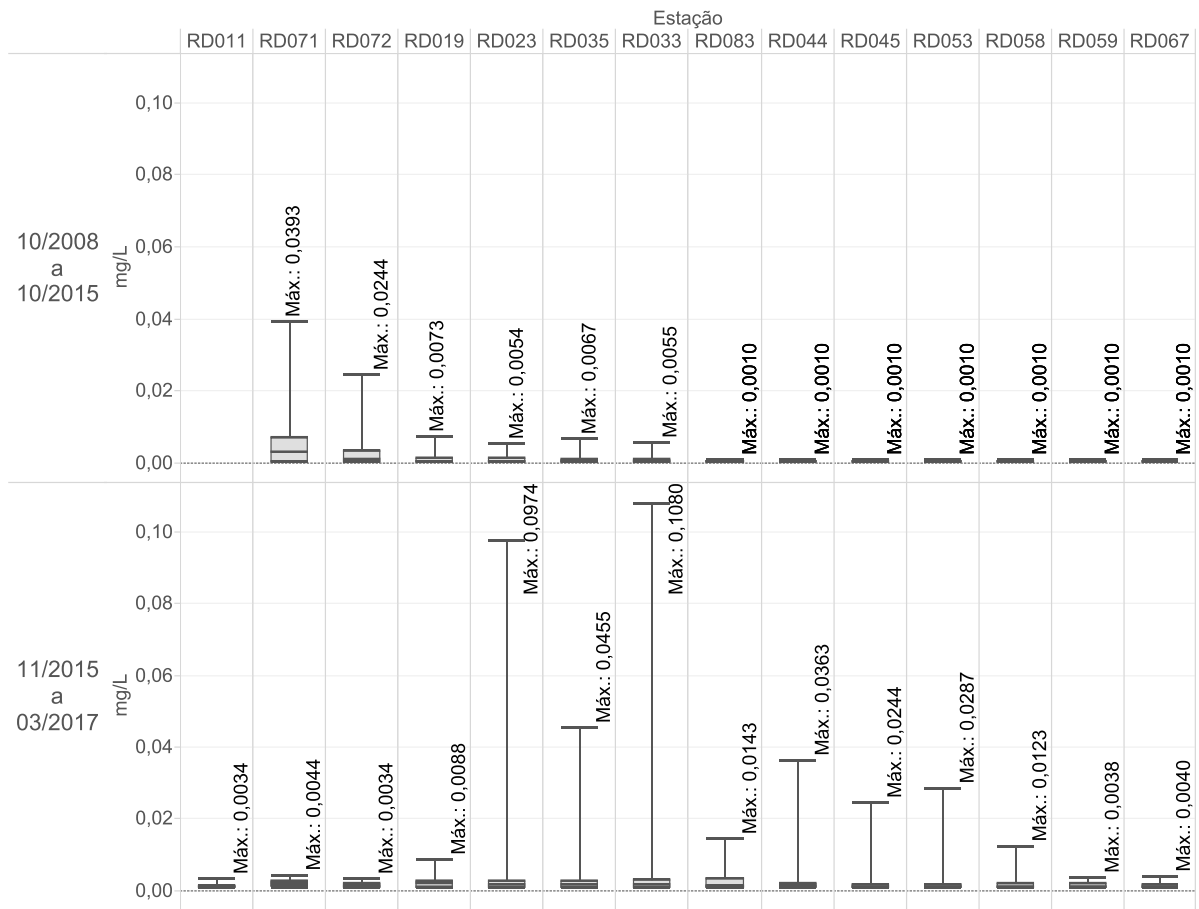
### 6.1.5 Arsênio total

Como resultado do teste de KW, é apresentado o gráfico de box-whisker do período antes e depois do rompimento na Figura 6-17 e as comparações múltiplas de *Dunn* quando houve diferença significativa entre as medianas das estações (Figura 6-18 e Figura 6-19).

Com o teste de KW, foram obtidas três conclusões:

1. Analisando apenas os dados do pré-rompimento (A), conforme Figura 6-18, tem-se que a estação RD071 (localizada em Barra Longa-MG no rio do Carmo) apresentou uma mediana significativamente superior às medianas das estações mais a jusante no trecho (RD035, RD083, RD044, RD045, RD053, RD058, RD059 e RD067). Esse fato se justifica por ter existido por anos na cidade de Mariana-MG uma fábrica de óxido de arsênio, conforme mencionado anteriormente no capítulo 5.
2. Analisando apenas os dados do pós-rompimento (D), não houve diferença significativa entre nenhuma estação de monitoramento.
3. Comparando o pré e o pós-rompimento, a mediana da concentração de arsênio total calculada por estação para o período do pós-rompimento (D) é, de modo geral, superior à mediana calculada por estação do trecho a jusante de Merliéria-MG (RD083) para o período pré-rompimento (A), conforme a Figura 6-19. Além disso, as estações RD071\_D, RD019\_D e RD033\_D apresentaram significativamente medianas superiores às medianas de um maior número de estações do pré-rompimento (A). Ressalta-se novamente que a estação RD033 é a primeira estação após confluência do rio Piracicaba com o rio Doce, sendo que o rio Piracicaba, já há muitos anos, recebe lançamento de efluentes industriais oriundos da atuação das indústrias locais.

Figura 6-17 - Box-whisker do parâmetro arsênio total medido nas estações para dois períodos: anterior (10/2008 a 10/2015) e posterior (11/2015 a 03/2017) ao rompimento.



Mesma escala no eixo das ordenadas: Arsênio Total (mg/L)

Figura 6-18 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro arsênio total das estações considerando apenas o antes (A) do rompimento.

	<i>RD071_A</i>	<i>RD072_A</i>	<i>RD019_A</i>	<i>RD023_A</i>	<i>RD035_A</i>	<i>RD033_A</i>	<i>RD083_A</i>	<i>RD044_A</i>	<i>RD045_A</i>	<i>RD053_A</i>	<i>RD058_A</i>	<i>RD059_A</i>	<i>RD067_A</i>
<i>RD071_A</i>		=	=	=	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
<i>RD072_A</i>	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD019_A</i>	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD023_A</i>	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD035_A</i>	↑	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=	=
<i>RD033_A</i>	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=	=	=
<i>RD083_A</i>	↑	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=	=
<i>RD044_A</i>	↑	=	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=
<i>RD045_A</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=	=
<i>RD053_A</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=
<i>RD058_A</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=
<i>RD059_A</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=
<i>RD067_A</i>	↑	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	

= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Figura 6-19 - Análise de comparações múltiplas de *Dunn* como complemento do teste de *Kruskal-Wallis* para o parâmetro arsênio total das estações para antes (A) e depois (D) do rompimento.

	<i>RD011_D</i>	<i>RD071_D</i>	<i>RD072_D</i>	<i>RD019_D</i>	<i>RD023_D</i>	<i>RD035_D</i>	<i>RD033_D</i>	<i>RD083_D</i>	<i>RD044_D</i>	<i>RD045_D</i>	<i>RD053_D</i>	<i>RD058_D</i>	<i>RD059_D</i>	<i>RD067_D</i>
<b>RD071_A</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD072_A</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD019_A</b>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD023_A</b>	=	↑	=	↑	=	=	↑	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD035_A</b>	=	↑	=	↑	↑	↑	↑	↑	=	↑	=	↑	=	=
<b>RD033_A</b>	=	↑	=	↑	↑	↑	↑	=	=	=	=	=	=	=
<b>RD083_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD044_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD045_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD053_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD058_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD059_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
<b>RD067_A</b>	=	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

= Grupo em itálico (acima) não se difere significativamente do grupo em negrito (à esquerda)

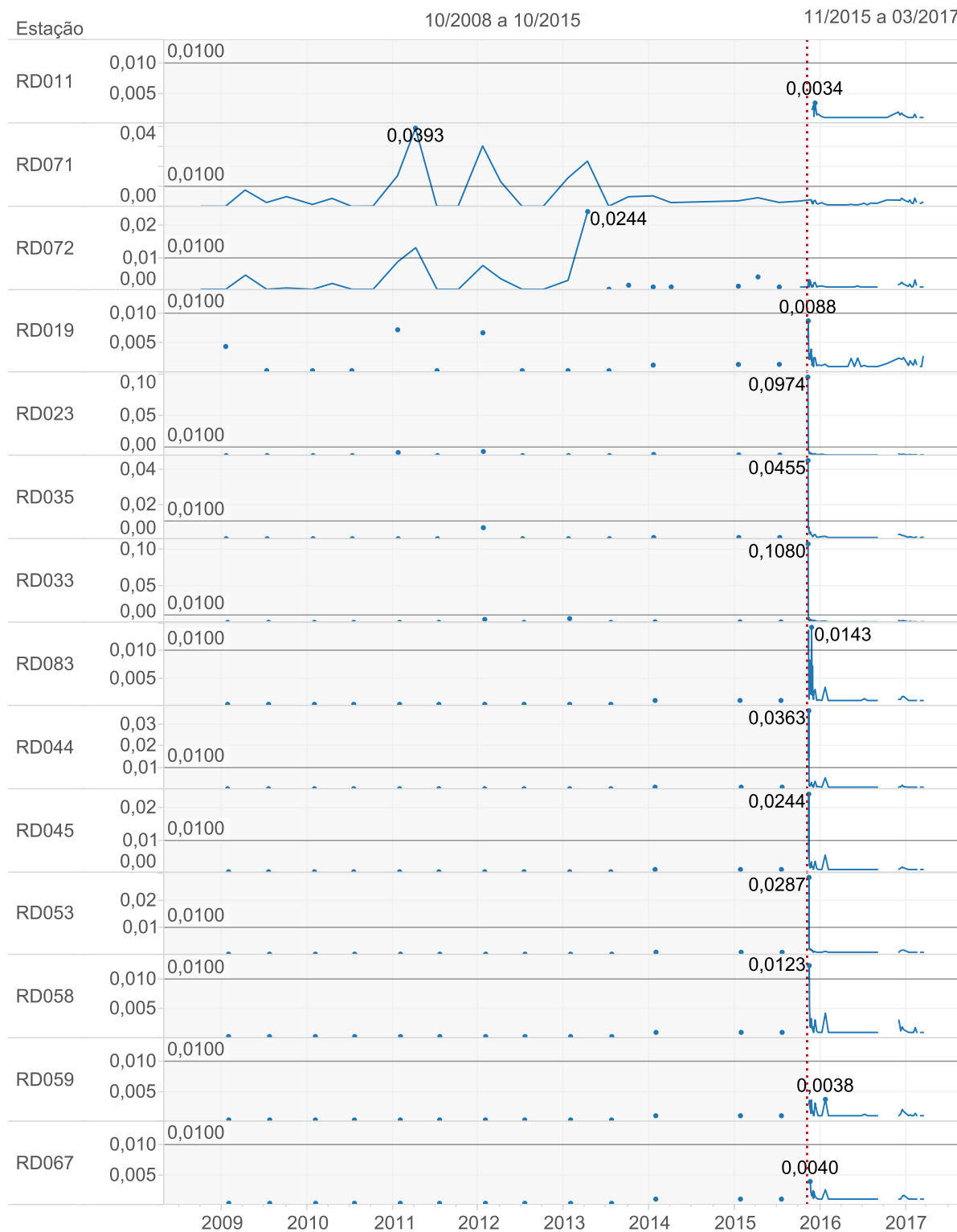
↑ Grupo em itálico (acima) significativamente maior que o grupo em negrito (à esquerda)

↓ Grupo em itálico (acima) significativamente menor que o grupo em negrito (à esquerda)

Na Figura 6-20, é apresentada a evolução temporal das concentrações de arsênio total por estação de monitoramento e o limite definido pela DN COPAM CERH-MG 01/08 de acordo com o enquadramento.

Figura 6-20 - Gráfico de série temporal referente a todo o período de estudo para o parâmetro arsênio total por estação de monitoramento.

**Arsênio total (mg/L)**



## 7 CONCLUSÕES

A magnitude do impacto do rompimento da barragem de rejeitos no meio ambiente é inquestionável, principalmente no que tange a perda de vidas humanas. Contudo, com relação à qualidade físico-química das águas superficiais, tomando como base o rompimento da barragem de Fundão em Mariana em 05/11/2015, os cursos d'água diretamente impactados possuem uma capacidade de autorrecuperação relacionada, principalmente, ao restabelecimento das condições pré-existentes ao desastre.

Os rios que compõem o trecho em análise (rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce), já há décadas, são fortemente impactados pelas atividades minerárias, industriais e pelo lançamento de esgotos domésticos diretamente em seus cursos.

Após o rompimento, os trechos mais a jusante se mostraram menos impactados com a chegada da pluma de rejeitos, principalmente entre Resplendor (RD059) e Aimorés – MG (RD067). Já os trechos mais a montante apresentaram-se mais impactados, devido aos maiores valores de turbidez, concentrações da série de sólidos e concentrações de metais e menores valores medidos de OD. Todavia, com o tempo, a tendência observada foi de redução e de restabelecimento das condições pré-rompimento. Ressalta-se também que houve uma certa limitação na análise da qualidade das águas do trecho em Barra Mansa-MG imediatamente após o rompimento, representado pelas estações RD011 (no rio do Gualaxo do Norte) e RD071 (no rio do Carmo), já que o monitoramento nas mesmas não se iniciou imediatamente após o desastre.

Com exceção principalmente do ferro dissolvido e do manganês total, que de fato eram advindos da pluma de rejeitos, foi observado que o aumento das concentrações dos demais metais ocorreu apenas com a passagem da onda pelo trecho de análise e rapidamente (um ou dois dias) os valores medidos voltaram a ser observados conforme observado no período anterior ao rompimento. Algumas exceções esporádicas foram observadas em medições realizadas em dias chuvosos de 2016, onde algumas medições de metais apresentavam-se um pouco acima da média histórica, apesar de ainda bastante inferior ao que foi observado no momento do rompimento. Dessa forma, as altas medições de metais com a passagem da pluma podem ser atribuídas ao revolvimento dos sedimentos do leito dos rios já contaminados há anos.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o período anterior ao rompimento, as medições dos parâmetros de qualidade das águas nas estações de monitoramento caracterizaram o trecho estudado como fortemente impactado pelas atividades econômicas, principalmente a mineração, e pelo lançamento de esgotos domésticos e industriais nos rios.

Além dos impactos causados diretamente no rio Doce e nos rios do Carmo e Gualaxo do Norte, há um desaguamento do rio Piracicaba no rio Doce entre os municípios de Ipatinga-MG e Timóteo-MG. Esse rio é, há décadas, degradado por intensa atividade minerária na região e pelo lançamento de esgotos domésticos. Dessa forma, a jusante do município de Ipatinga-MG, já na estação RD033, nota-se uma diminuição da qualidade da água devido principalmente à falta de cobertura do solo e à sua degradação ocasionada pelas atividades pecuárias e minerárias, favorecendo o aporte de sólidos no rio Piracicaba, carreando nos períodos chuvosos nutrientes e metais provenientes da fertilização do solo e de outras fontes difusas, além do lançamento de esgotos domésticos e de efluentes industriais.

Já as estações mais a montante no rio, RD071 (rio do Carmo) e RD072 (primeira estação do rio Doce), apresentaram forte contaminação por arsênio total e as maiores medianas de manganês total, devido principalmente à fábrica antiga de produção de óxido de arsênio em Mariana-MG existente na região por décadas. Além disso, existe intensa atividade de extração de metais, rochas e areia; lavras a céu aberto; mineração e beneficiamento de minério no trecho entre Mariana-MG e Pingo D'Água-MG.

Após o rompimento da barragem, as estações RD011 e RD071, primeiras na rota da pluma de rejeitos, apresentaram as maiores medições de metais e da série de sólidos principalmente no período chuvoso de janeiro e fevereiro de 2016. Já as estações mais a jusante, apresentaram uma tendência de se agruparem por similaridade, com exceção da RD067 (última na rota da pluma). As medianas dos parâmetros da série de sólidos e também do arsênio total e dos metais chumbo total e níquel total do período foram as menores, caracterizando o trecho de jusante como o menos impactado para o período de análise posterior ao rompimento. Já a última estação na porção mineira do trecho impactado (RD067), apresentou as menores medianas e a menor variância para os metais chumbo total, manganês total, ferro dissolvido e para o arsênio total e

ainda para a série de sólidos e a turbidez no período após o rompimento, ou seja, o trecho de Aimorés-MG pode ser considerado o menos impactado pelo desastre.

De forma geral, como resultado das análises de componentes principais e fatoriais, o fator 1 da AF caracterizou a onda de rejeitos revolvendo os materiais do fundo do leito do rio, já que diversas atividades industriais existentes na região há anos contribuíram para contaminação e acúmulo de metais e arsênio total nos sedimentos do leito dos rios no trecho em estudo. Nota-se também que o ferro dissolvido não se correlacionou com o arsênio, chumbo, níquel e o zinco em quase todos os agrupamentos, exceto no agrupamento 4 da estação RD067 (devido aos baixos valores medidos para todos esses parâmetros nessa estação). Essa não correlação com o ferro dissolvido indica que esses metais eram advindos dos sedimentos do leito dos rios, já que rapidamente suas concentrações reduziam para abaixo do LD, rapidez de redução não observada para o ferro dissolvido. A única correlação do ferro dissolvido com o arsênio, chumbo, níquel e o zinco ocorreu apenas no grupo 4, pois já em Aimorés-MG, a onda de rejeitos chegou com menor velocidade e com menor impacto, aumentando o tempo no qual as maiores concentrações eram medidas; e mesmo esses maiores valores ainda eram menores que as medições realizadas com a passagem da onda de rejeito nas demais estações.

A magnitude do impacto do rompimento da barragem de rejeitos no meio ambiente é inquestionável, principalmente no que tange a perda de vidas humanas. Contudo, com relação à qualidade das águas superficiais, tomando como base o rompimento da barragem de Fundão em Mariana em 05/11/2015, os cursos d'água diretamente impactados possuem uma capacidade de autorrecuperação relacionada principalmente ao restabelecimento das condições pré-existentes ao desastre.

Após o rompimento, os trechos mais a jusante se mostraram menos impactados com a chegada da pluma de rejeitos. Já os trechos mais a montante apresentaram-se mais impactados, devido aos maiores valores de turbidez, concentrações da série de sólidos e concentrações de metais e menores valores medidos de OD. Todavia, com o tempo, a tendência observada foi de redução e de restabelecimento das condições pré-rompimento. Ressalta-se também que houve uma certa limitação na análise da qualidade das águas do trecho em Barra Mansa-MG imediatamente após o rompimento, representado pelas estações RD011 (no rio do Gualaxo do Norte) e RD071 (no rio do Carmo), já que o monitoramento nas mesmas não se iniciou imediatamente após o desastre.



Com exceção principalmente do ferro dissolvido e do manganês total, que de fato eram advindos da pluma de rejeitos, foi observado que o aumento das concentrações dos demais metais ocorreu apenas com a passagem da onda pelo trecho de análise. Algumas exceções esporádicas foram observadas em medições realizadas em dias chuvosos de 2016, onde algumas medições de metais apresentavam-se um pouco acima da média histórica, apesar de ainda bastante inferior ao que foi observado no momento do rompimento. Dessa forma, as altas medições de metais com a passagem da pluma podem ser atribuídas ao revolvimento dos sedimentos do leito dos rios já contaminados há anos. Fato este que também não deixa de ser um impacto causado pelo rompimento da barragem de rejeitos de Fundão.

Conclui-se que, após o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro, nos rios diretamente impactados pela passagem da pluma de rejeitos, há uma tendência de recuperação da qualidade das águas superficiais com o passar do tempo. Além disso, observou-se também que quanto mais distante os trechos de monitoramento do ponto de rompimento, justamente pelo fato da pluma de rejeitos chegar com menor volume e menor velocidade, há uma tendência de menor variância das medidas dos parâmetros de qualidade das águas superficiais e um menor aumento das concentrações dos parâmetros com a passagem da pluma de rejeitos.

## **9 RECOMENDAÇÕES**

Recomenda-se que seja feita uma análise dos parâmetros físico-químicos dos sedimentos do rio Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce para o período após o rompimento, pois, mesmo que não existam dados de sedimentos para o período do pré-rompimento para comparação histórica, podem ser identificadas tendências e também padrões importantes para uma maior compreensão da capacidade de recuperação do trecho dos rios em estudo.

Recomenda-se também que os dados das estações do IGAM localizadas no Estado do Espírito Santo sejam analisados para que seja comprovada a tendência de redução do impacto do rompimento da barragem com o aumento da distância entre o ponto de rompimento e o ponto de monitoramento da qualidade das águas superficiais no rio.

## REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana/MG. 2015. *Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR*. Brasília/DF: 2016.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. *Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil*. 2005. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR. Brasília/DF: 2005.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. *Relatório de Segurança de Barragens 2014*. Brasília: Agência Nacional de Águas. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – SPR. Brasília/DF: 2015.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. *Relatório Técnico do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimentos*. Nº do Relatório: RT-029\_159-515-2282\_07-J. Fundação Renova e Golder Associates. p. 247. Disponível em: <[http://arquivos.ana.gov.br/Riodoce/RelatorioANA/20170412\\_ProgramadeMonitoramentoQuali-QuantitativoSistemadeAguaeSedimentos.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/Riodoce/RelatorioANA/20170412_ProgramadeMonitoramentoQuali-QuantitativoSistemadeAguaeSedimentos.pdf)>. Acesso em: mai. 2017.

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, set./dez. 2007.

ARAÚJO, E. N. *Estudo do comportamento espacial dos parâmetros de qualidade das águas da bacia do rio Paraopeba*. (Trabalho de Conclusão de Curso) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2014.

ARAÚJO, 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, set/dez. 2007.

AZAM, S.; LI, Q. *Tailings dam failures: a review of the last one hundred years*. Geotechnical News, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010.

BAPTISTA, M; PÁDUA, V. L. *Restauração de sistema fluviais*. 1ª ed. Barueri, SP: Manole, 2016.

BENOIST, G. *Les études d'ondes de submersion des grands barrages d' EDF*. La Houille Blanche, nº 1, p 43-54. 1989.

BERNARDI, J.V.E.; FOWLER, H.G.; LANDIM, P.M.B. *Um estudo de impacto ambiental utilizando análises estatísticas espacial e multivariada*. Holos Environmental, v. 1, p. 162-172. 2001.

BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; RAWLINS, B.; MATSCHULLAT, J. *Arsenic in water and sediment in the Iron Quadrangle, state of Minas Gerais, Brazil*. Revista Brasileira de Geociências, n. 30, v. 3, p. 558-561, set. 2000.

BARBOSA, T. B. C. *Avaliação da qualidade das águas Superficiais da sub-bacia do rio Paracatu em função do uso e Ocupação do solo*. 2015. 156 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

BOWKER, L.; CHAMBERS, D. *The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures*. Research Paper. Stonington, ME, 2015.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000*. (09/21/2010 ed.). Brasília, DF: Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo. 2010.

BRASIL, L. S. S. *Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. 203 p. Belo Horizonte, 2005.

BU, H.; TAN, X.; LI, S.; ZHANG, Q. *Temporal and spatial variations of water quality in the Jinshui River of the South Qinling Mts., China*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, n. 73, p. 907-913, 2010.

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.

CALLAHAN, M.A.; SLIMAK, M.W.; GABLE, N.W. *Water-related fate of 129 priority pollutants*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Planning and Standards. EPA-440/4-79-029a. 1979.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. *A história das barragens no Brasil. Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens*. 524 p. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

CBH-Doce - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. *A bacia*. 2014. Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/a-bacia/>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem*. 2009. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/125-variaveis-de-qualidade-das-aguas-e-dos-sedimentos>>. Acesso em: jan 2017.

CEXBARRA - COMISSÃO EXTERNA DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM NA REGIÃO DE MARIANA-MG. *Requerimento nº 3.479, de 2015*. p. 233. 2016.

CHANG, H. *Spatial analysis of water quality trends in the Hain River basin, South Korea*. *Water Research*, v. 42, p. 3285-3304, 2008.

CHRISTOFARO, C.; LEÃO, M. M. D. *Caracterização temporal do arsênio nos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG, Brasil, ao longo de uma década (1998-2007)*.

Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Universidade de Taubaté, v. 4, n. 3, p. 54-66, 2009.

CHRISTOFARO, M. C. *Avaliação probabilística de risco ecológico de metais nas águas superficiais da bacia do rio das Velhas*. Tese de doutoramento – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental e Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Belo Horizonte. 251p. 2009.

COELHO, A. L. N. *Bacia hidrográfica do rio Doce (MG/ES): uma análise socioambiental integrada*. Periódicos UFES. UFES. Geografares. nº 7. p. 131-146. 2009. Disponível em: <<http://periodicos.ufes.br/geografares/article/viewFile/156/82>>. Acesso em: abr. 2017.

COSTA, E. P. *Avaliação da violação de parâmetros de qualidade das águas superficiais aos limites da legislação mineira em sub-bacias hidrográficas do rio São Francisco*. 2014. 163 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Monitoramento especial do rio Doce. relatório 02: geoquímica segunda campanha de campo 12 a 23 de novembro de 2015. belo horizonte dezembro/2015. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/eventos\\_criticos/riodoce\\_relatorio2.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/eventos_criticos/riodoce_relatorio2.pdf)> Acesso em: 23 jul 2017.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 4.3. Cobre. *Série estatísticas e economia mineral. Outras publicações*. 2017. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/4-3-cobre/view>>. Acesso em mar. 2017.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Dados sobre as Barragens de Mineração*. Brasília: DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. 2015.

DOBRY, R.; ALVAREZ, L. *Seismic failures of Chilean tailings dams*, J. Soil Mech. Div. 93 n. 6. p. 237–260, 1967.

DRAVES, J.F.; FOX, M.G. *Effects of a mine tailings spill on feeding and metal concentrations in yellow perch (Perca flavescens)*. Environ. Toxicol. Chem. n. 17, p. 1626–1632. 1998.

ESPANHA. Orden Ministerial Ref. 1996/07319, de 12 mar. 1996. *Reglamento Técnico Sobre Seguridad de Presas y Embalses*. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid, 30 mar. 1996.

FEMA - FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. *Federal guidelines for dam safety: selecting and accommodating inflow design floods for dams*. Interagency Committee on Dam Safety, U.S. Department of Homeland Security, October 1998. Reprinted April 2004. 58p.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais*. Ano 2014. Belo Horizonte: FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2014a.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <[http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS\\_MINERA%C3%87%C3%83O/Invent%C3%A1rio\\_de\\_Barragens\\_2015\\_Final\\_V01.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERA%C3%87%C3%83O/Invent%C3%A1rio_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf)>. Acesso em: 08 de set. 2016.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Lista de Barragens 2012. In lista\_das\_barragens\_2012.xls (Ed.). 2012.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Lista de Barragens 2013. In lista de barragens -2013 (Ed.). 2013.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Lista de Barragens 2014. In lista de barragens\_2014\_publicacao.xls (Ed.). 2014b.

FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTEH, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D. C.; DIRZOB, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR, P. M.; MILLANG, V. E. G.; MIELKEG, C.; RAMIREZK, J. L.; NEVESA, A.; ROGASSG, C.; RIBEIROL, S. P.; SCARIOTM, A.; SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Natureza & Conservação*, vol. 14, n. 2, p. 35-45. 2016.

FRANÇA, M. S.; SCAPULATEMPO, C. V.; KAVISKI, E.; KNAPIK, H. G.; PORTO, M. F. A. *Análise multivariada de dados de monitoramento de qualidade de água: estudo de caso da Bacia do Alto Iguaçu*. In: XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Campo Grande, MS. Anais. Campo Grande: ABRH, 2009.

FREITAS, C. M.; SILVA, M. A.; MENEZES, F. C. *O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres*. *Ciência e Cultura*, v. 68, n. 3, p. 25-30, 2016.

GASPAROTTO, F. A. *Avaliação Ecotoxicológica e Microbiológica da água de nascentes urbanas no município de Piracicaba-SP*. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 90. 2011.

GAUTHIER, T. D. Detecting trends using Spearman's Rank Correlation Coefficient. *Environmental Forensics*, v. 2, p. 359-362, 2001.

GIRÃO, E. G.; ANDRADE, E. M.; ROSA, M. F.; ARAÚJO, L. F. P.; MEIRELES, A. C. M. *Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal*. *Revista Ciência Agronômica*, v. 38, n. 1, p. 17-24, 2007.

GROPPO, J. D. *Estudo de tendências nas series temporais de qualidade de água de rios do estado de São Paulo com diferentes graus de intervenção antrópica*. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GUERRA, C. B. *Expedição Piracicaba 300 anos depois*. Escritório da Bacia do Rio Doce. Belo Horizonte: SEGRAC. 2001.

GUIMARÃES, H.; CASTRO, L.; COSTA, M. B.; ROCHA, M.; NUNNES, R.; PAIXÃO, F.; SCHETTINI, M. *Um adeus ao rio Doce*. *Jornal O Tempo*. 17 ago. 2017. Disponível em: <[http://www.otempo.com.br/polopoly\\_fs/1.1180473.1449081357!/desastres.html](http://www.otempo.com.br/polopoly_fs/1.1180473.1449081357!/desastres.html)>. Acesso em: ago. 2017.

HAGEN, V. K. *Re-evaluation of design floods and dam safety*. *Proceedings of the 14th International Congress on Large Dams*, vol. 1, Commission on Large Dams Congress, Rio de Janeiro, 1982, pp. 475–491.



HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, R. A. Techniques for trend assessment for monthly water quality data, *Water Resources Research*, v.18. p.107-121, 1982.

HYNES, H. B. N. *The stream and its valley*. Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie, v.19, p.1-15, 1975.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Laudo Técnico Preliminar – Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*. Diretoria de Proteção Ambiental - DIPRO & Coordenação Geral de Emergências Ambientais – CGEMA: Brasília. p.38. 2015.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Última atualização: 29 de setembro de 2017. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/noticias/66-2015/205-onda-de-rejeitos-da-samarco-atingiu-663-km-de-rios-e-devastou-1-469-hectares-de-terras>>. Acesso em: 03 out. 2017.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Relatório Acidentes Ambientais 2008*. Brasília: IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2009.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração*. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. p. 128. Brasília: IBRAM, 2016.

ICMBio - INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Relatório: Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação. 1ª Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura do CEPISUL/ICMBio, Brasília. 2016.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais em 2014. Resumo executivo/ Instituto Mineiro de Gestão das Águas*. p. 175. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2015.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais em 2015. *Resumo executivo/ Instituto Mineiro de Gestão das Águas*. p. 179. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2016a.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais do rio Doce no Estado de Minas Gerais*. 2017. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/1-ultimas-noticias/735-monitoramento-revela-melhora-na-qualidade-da-agua-da-bacia-do-rio-doce>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Monitoramento da qualidade das águas superficiais do rio Doce no Estado de Minas Gerais. Relatório técnico. Acompanhamento da qualidade das águas do rio Doce após o rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG*. 17 nov. 2015. p. 29. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2016b.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. 2006. Plano Estadual dos Recursos Hídricos de Minas Gerais. Relatório final. Contrato 010/2006. Belo Horizonte: IGAM, 238p. 2006.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH / Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte: IGAM, 139p. 2011.

INPE - INSTITUTO ESPACIAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2014. *SOS Mata Atlântica e INPE apresentam dados do Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica*. Mai 27, 2014. Disponível em: <[http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=3610](http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=3610)>. Acesso em 4 jan 2017.

ITC. *Trade Map: trade statistics for international business development*. 2015. Disponível em: <<http://www.trademap.org/>>. Acessado em: nov. 2015.

JACOBI, P. *Dilemas socioambientais na gestão metropolitana: do risco à busca da sustentabilidade urbana*. Revista de ciências sociais-política & trabalho, v. 25, 2006.

JARDIM, F. A.; VON SPERLING, E.; DE MELO JARDIM, B. F.; DE BRITO ALMEIDA, K. C. Fatores determinantes das florações de cianobactérias na água do Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, n. 3, p. 207-218, 2014.

JUNG, K. Y.; LEE K.; IMA, T. H. *Evaluation of water quality for the Nakdong River watershed using multivariate analysis*. *Environmental Technology & Innovation*. V. 5 p. 67–82. 2016.

KOIDE, S.; SOUZA, M. A. A. *Monitoramento da qualidade da água*. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. 1 ed. Porto Alegre: ABRH. 626 p. 2001.

LIMA, H. S. *Qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do rio Doce e sua relação com aspectos socioambientais*. 2015, 157 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

LIMA, R. P. C. *Avaliação de índices de severidade de seca na bacia do rio Doce visando ao desenvolvimento de sistema de classificação de secas*. 98 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais. 2016.

LUDWIG, J. A.; REYNOLDS, J. F. *Statistical ecology: a primer in methods and computing*. John Wiley & Sons, 1988.

MACHADO, F. L. J.; PERUFFO, N. E., LIMA, S. E. J. *Projeto estudo da vulnerabilidade à contaminação dos mananciais subterrâneos decorrente da extração do carvão mineral*. - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM, Vol. 1, Relatório Interno - Porto Alegre, 1984.

MACKLIN, M. G. *Fluxes and storage of sediment-associated heavy metals in floodplain systems: assessment and river basin management issues at a time of rapid environmental change*. *Floodplain processes*, v. 13, p. 441-459, 1996.

MARQUES, M.A.M. *Aplicação da Análise multivariada no estudo da infra-estrutura dos serviços de saúde dos municípios paranaenses*. Curitiba-PR. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, 2006.

MATSUMURA, M. S. Avaliação e estudo das emissões de metais pesados pela Barragem de Santarém (Samarco Mineração S. A.) no sistema hídrico da Região de Ouro Preto e Mariana. Um estudo da qualidade das águas. 1999. 113 f. *Dissertação (Mestrado em Geologia)* – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1999.

MEDEIROS, A. O.; MISSAGIA, B. S.; BRANDÃO, L. R.; CALLISTO, M.; BARBOSA, F. A.; ROSA, C. A. *Water Quality and Diversity of yeasts from Tropical Lakes and Rivers from the Rio Doce Basin in Southeastern Brazil*. Brazilian Journal of Microbiology: 1582-1594 ISSN 1517-8382. 2012.

MILANEZ, B.; WANDERLEY, L.; MANSUR, M.; PINTO, R.; GONÇALVES, R.; SANTOS, R.; COELHO, T. *Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG)*. A questão mineral no Brasil - Vol.2. Editorial iGuana. p. 237. 2016.

MIL-HOMENS, M.; COSTA, A. M.; FONSECA, S.; TRANCOSO, M. A.; LOPES, C.; SERRANO, R.; SOUSA, R. Characterization of heavy-metal contamination in surface sediments of the Minho River Estuary by way of factor analysis. *Arch Environ Contam Toxicol*. vol. 64, p. 617–631. 2013.

MPMG - MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *Mapa – Comarcas e municípios atingidos pelo rompimento da Barragem de Fundão*. Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico, 2017. Disponível em: <<http://patrimoniocultural.blog.br/rompimentodabarragem/>>. Acesso em 10 out. 2017.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Programa Nacional de Capacitação de Gestores Ambientais. Módulo Específico: Licenciamento Ambiental de Estações de Tratamento de Esgoto e Aterros Sanitários*. p. 68, Brasília: MMA, 2009.

MOITA NETO, J. M.; MOITA, G. C. *Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados*. Química Nova, v. 21, n. 4, 1998.

MOTTA, E. M. P. L.; ARAÚJO, F. O.; SILVA, H.; ALMEIDA, I. C. S.; CALAZANS, J. A.; SERVO, L. M. S. *Caracterização demográfica e socioeconômica da população atingida pelo rompimento da barragem do Fundão*. NPGAU. CEDEPLAR. UFMG. Disponível em:

<[http://diamantina.cedeplar.ufmg.br/2016/anais/economia/415-710-1-RV\\_2016\\_10\\_09\\_00\\_37\\_47\\_017.pdf](http://diamantina.cedeplar.ufmg.br/2016/anais/economia/415-710-1-RV_2016_10_09_00_37_47_017.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2017.

MULLER, G.; ROESER, H. Jazidas de ferro no Brasil – Problemas de sua formação. Bases para o futuro. Brasília: CNPq, 1991. p. 249-259.

NEVES, A. C. O.; NUNES, F. P.; CARVALHO, F. A.; FERNANDES, G. W. Neglect of ecosystems services by mining, and the worst environmental disaster in Brazil. *Natureza & Conservação*, v. 14, n. 1, p. 24-27. 2016.

NONATO, E. A.; VIOLA, Z. G. G.; ALMEIDA, K. C. B.; SCHOR, H. H. R. *Tratamento estatístico dos parâmetros da qualidade das águas da bacia do alto curso do rio das Velhas*. Química Nova, v. 30, n. 4, p. 797-804, Mar. 2007.

OLIVEIRA, N. *Minas já sofreu com outros rompimentos de barragens*. O Tempo. 2015. Acesso em: 11/10/2015. Disponível em: <<http://www.otempo.com.br/cidades/minas-j%C3%A1-sofreu-com-outrosrompimentos-de-barragens-1.1159501>>. Acesso em: mai. 2017.

ORTEGA, A. P. *A Comprehensive Study on the Applicability of Japanese Dam Technologies to the Alarming Condition of Angat Dam in Bulacan, Philippines*. ADRC Visiting Researcher. p. 58. 2015.

OUYANG, Y. *Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis*. Water Research, n. 39, p. 2621-2635, 2005.

PARREIRAS, M. *Poluição resiste ao tempo e deixa água imprópria para consumo no Rio Doce: Dois meses após rompimento da Barragem do Fundão, curso d' água continua sujo em muitos pontos*. 04 de janeiro de 2016. Disponível em: <[http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/04/interna\\_gerais,721655/poluicao-resiste-ao-tempo-e-deixa-agua-impropria-para-consumo-no-rio-d.shtml](http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2016/01/04/interna_gerais,721655/poluicao-resiste-ao-tempo-e-deixa-agua-impropria-para-consumo-no-rio-d.shtml)>. Acesso em 20 ago. 2017.

PASTORINHO, R. M.; TELFER, T. C.; NOGUEIRA, A. J. A.; SOARES, A. M. V. M.; RANVILLE, J. F. An evaluation of trace metal distribution, enrichment factors and risk in sediments of a coastal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal). *Environ Earth Sci*. vol. 67, p. 2043–2052. 2012.

PIRES, J. M. M.; LENA, J. C.; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da barragem de Germano. *Revista Árvore*. Sociedade de Investigações Florestais: Viçosa-MG, v.27, n.3, p.393-397, 2003.

PORTAL NACIONAL DO LICENCIAMENTO AMBIENTAL – PNLA. 2015. *Sobre o portal*. Disponível em < <http://pnla.mma.gov.br/>>. Acesso em 15 de dez. 2015.

PORTUGAL. Decreto-Lei n. 11, 06 jan. 1990. *Regulamento de Segurança de Barragens*. Lisboa: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 1990. Diário da República, Série 1, n.5, 06 jan. 1990.

QI, S.; LEIPE, T.; RUECKERT, P.; DI, Z.; HARFF, J. Geochemical sources, deposition and enrichment of heavy metals in short sediment cores from the Pearl River Estuary, Southern China. *J Mar Syst*. vol 82, p. S28–S42. 2010.

RICO, M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, A. *Floods from tailings dam failures*. Journal of Hazardous Materials, v. 154, n. 1, p. 79-87, 2008.

SALES, J. W. F.; STUDART, T. M.; BECKER, H.; GOMES, R. B.; SOUZA FILHO, F.; SOUSA, M. C. B. *Indicadores de qualidade de água utilizando técnicas de análise multivariada*. In: XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Campo Grande, MS. Anais. Campo Grande: ABRH, 2009.

SANDERS, T. G.; WARD, R. C.; LOFTIS, J. C.; STEELE, T. D., ADRIAN, D. D.; YEVJEVICH, V. *Design of Networks for Monitoring Water Quality*. 5 ed. Colorado: Water Resources Publications, 2003. 328 p.

SANTOLIN, C. V. A.; CIMINELLI, V. S. T.; NASCENTES, C. C.; WINDMÖLLER, C. C. Distribution and environmental impact evaluation of metals in sediments from the Doce River Basin, Brazil. *Environ Earth Sci*. vol. 74, p. 1235-1248. 2015.

SANTOS-ROMÁN, D. M.; WARNER, G. S.; SCATENA, F. *Multivariate analysis of water quality and physical characteristics of selected watersheds in Puerto Rico*. Journal of the American Water Resources Association, p. 829-839, ago. 2003.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SEMAD. *Encarte especial sobre a qualidade das águas do rio Doce após 1 ano do rompimento de barragem de Fundão - 2015/2016*. Belo Horizonte, 16 de novembro de 2016. p. 1-21. 2016.

SEGURA, F. R.; NUNES, E. A.; PANIZ, F. P.; PAULELLI, A. C. C.; RODRIGUES, G. B.; BRAGA, G. Ú. L.; PEDREIRA FILHO, W. R.; BARBOSA, JR, F.; CERCHIARO, G.; SILVA, F. F. BATISTA, B. L. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution*, v. 218, p. 813-825. 2016.

SHINZATO, M.C. *Comportamento geoquímico de íons metálicos associados a solos/sedimentos e águas subterrâneas em indústrias de reciclagem*. Exame de qualificação. Instituto de geociências da USP, São Paulo - SP, 58 p.,1997.

SHRESTHA, S.; KAZAMA, F. *Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river, Japan*. *Environmental Modeling & software*, n. 22, p. 464-475, 2007.

SILVA A. F.; LIMA, G. R. S.; ALVES, J. C.; SANTOS, S. H.; GARCIA, C. A. B.; ALVES, J. P. H.; ARAUJO, R. G. O.; PASSOS, E. A. Evaluation of trace metal levels in surface sediments of the Sergipe River Hydrographic Basin, Northeast Brazil. *J Braz. Chem Soc.* vol. 23, p. 1669–1679. 2012.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. *Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados*. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 3, n. 3, p. 111-131, 1998.

SINGH, K. P.; MALIK, A.; MOHAN, D.; SINHA, S. *Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) – a case study*. *Water Research*, n. 38, p. 3980-3992, 2004.

SIMEONOV, V.; STRATIS, J. A.; SAMARA, C.; ZACHARIADIS, G.; VOUTSA, D.; ANTHEMIDIS, A.; SOFONIOU, M.; KOUIMTZIS, Th. *Assessment of the surface water quality in Northern Greece*. *Water Research*, n. 37, p. 4119-4124, 2003.

SIQUEIRA, G. W.; APRILE, F.; MIGUEIS, A. M. *Diagnóstico da qualidade da água do rio Parauapebas (Pará - Brasil)*. Acta Amaz. [online]. 2012, vol.42, n.3, pp. 413-422. ISSN 0044-5967.

SOJKA, M.; SIEPAK, M.; ZIOLA, A.; FRANKOWSKI, M. *Application of multivariate statistical techniques to evaluation of water quality in the Mala Welna River (Western Poland)*. Environ Monit Assess, n. 147, p. 159-170, 2008.

TAKENO, Naoto. Atlas of Eh-pH diagrams. *Geological survey of Japan open file report*, v. 419, p. 102, 2005.

TOLEDO, L. G. DE; NICOLELLA, G. *Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano*. Scientia Agrícola, v.59, p.181-186, 2002.

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) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia - Ciência e Aplicação*. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. p. 943. 2009.

VAN GEEN, A.; ROBERTSON, A. P.; LECKIE, J. O. Completion of carbonate species at the goethite surface: implications for adsorption of metal ions in natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 58, n. 9, p. 2073- 2086, 1994.

VEGA, M.; PARDO, R.; BARRADO, E.; DEBAÂ, L. *Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis*. Water Research, v.32, p.3581–3592, 1998.

VICINI, L. *Análise multivariada da teoria à prática*. 2005. 215 f. Monografia (Especialização) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.



Vu, H. P., Shaw, S., Brinza, L., & Benning, L. G. . Partitioning of Pb (II) during goethite and hematite crystallization: Implications for Pb transport in natural systems. *Applied geochemistry*, v. 39, p. 119-128, 2013.

WANDERLEY, L. J.; MANSUR, M. S.; MILANEZ, B.; PINTO, R. G. *Desastre da Samarco/Vale/BHP no Vale do Rio Doce: aspectos econômicos, políticos e socioambientais*. *Ciência e Cultura*, v. 68, n. 3, p. 30-35, 2016.

WANG, F. K.; DU, T. C. T. *Using principal component analysis in process performance for multivariate data*. *Omega*, v. 28, n. 2, p. 185-194, 2000.

WANG, X.; LU, Y.; HAN, J.; HE, G.; WANG, T. *Identification of anthropogenic influences of water quality of rivers in Taihu watershed*. *Journal of Environmental Sciences*, n. 19, p. 475-482, 2007.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. *Zinc*. Geneva: *Environmental Health Criteria*. p. 221. 2001.

WORLD INFORMATION SERVICE ON ENERGY – WISE. *Tailings dam safety: Chronology of major tailings dam failures*. *Wiseinternational.org*, 2017. Disponível em: <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acessado em: nov. 2016.

WU, M. L.; WANG, Y. S.; WANG, Y. T.; SUN, F. L.; SUN, C. C.; CHENG, H.; DONG, J. D. *Seasonal and spatial variations of water quality and trophic status in Daya Bay, South China Sea*. *Marine pollution bulletin*, 112(1), 341-348. 2016.

WUNDERLIN, D. A.; DÍAZ, M. P.; AMÉ, M. V.; PESCE, S. F.; HUED, A. C.; BISTONI, M. A. *Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Córdoba-Argentina)*. *Water Research*, v. 35, n. 12, p. 2881-2894, 2001.

YUE, S; PILON, P; CAVADIAS, G. *Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series*. *Journal of Hydrology*. 259:254-271. 2002.

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*. Environ Monit Assess, n. 173, p. 17-27, 2011.

# APÊNDICE I

## Estatística descritiva dos dados pré-rompimento (01/10/2008 a 31/10/2015)

MÉDIA	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0068	0,104	0,0005	0,006	0,004	52,0	0,04	2,1	7,8	5,090	0,1379	0,3912	0,2	0,0049	8,2	6,8	43	94	137	23,5	24,45	68,14	0,0262
RD072	0,0031	0,106	0,0005	0,006	0,004	49,7	0,04	2,0	10,1	9,142	0,1992	0,2153	0,2	0,0055	8,1	6,8	48	75	123	23,9	24,61	62,40	0,0289
RD019	0,0019	0,130	0,0005	0,005	0,014	48,2	0,04	2,0	10,5	3,981	0,1583	0,1273	0,2	0,0043	7,7	6,9	48	38	86	25,5	27,44	46,22	0,0257
RD023	0,0012	0,115	0,0005	0,006	0,004	49,0	0,04	2,0	11,1	6,051	0,1459	0,1342	0,2	0,0043	8,2	6,9	45	46	91	25,6	26,67	44,81	0,0290
RD035	0,0010	0,114	0,0005	0,006	0,004	57,5	0,04	2,1	11,0	16,346	0,1622	0,1449	0,2	0,0045	7,8	6,9	51	57	108	25,7	26,63	52,49	0,0319
RD033	0,0012	0,107	0,0005	0,007	0,004	83,8	0,04	2,1	12,0	34,856	0,1528	0,1363	0,2	0,0046	8,5	6,8	67	58	125	25,4	25,29	63,18	0,0334
RD083	0,0005	0,101	0,0005	0,006	0,004	62,1	0,04	2,0	11,7	5,167	0,1449	0,0599	0,2	0,0050	7,7	6,8	55	31	86	26,6	26,96	42,34	0,0253
RD044	0,0005	0,105	0,0005	0,009	0,004	68,4	0,04	2,1	10,0	14,144	0,1980	0,0740	0,2	0,0043	7,7	6,9	58	22	80	27,3	29,82	32,94	0,0335
RD045	0,0005	0,112	0,0005	0,006	0,004	64,0	0,04	2,0	11,7	9,425	0,1669	0,0631	0,2	0,0045	7,7	7,0	53	30	83	27,3	29,30	36,93	0,0331
RD053	0,0005	0,108	0,0005	0,005	0,004	68,5	0,04	2,1	11,0	7,112	0,1833	0,0661	0,2	0,0050	7,7	7,0	56	34	90	26,7	27,13	34,25	0,0439
RD058	0,0005	0,113	0,0005	0,006	0,004	67,4	0,04	2,0	10,7	13,380	0,1767	0,0787	0,2	0,0058	7,9	7,1	57	42	99	27,5	29,38	37,42	0,0576
RD059	0,0005	0,347	0,0005	0,007	0,004	67,6	0,04	2,2	11,8	6,055	0,2495	0,0632	0,2	0,0049	8,0	7,3	58	32	90	28,6	31,36	35,70	0,0370
RD067	0,0005	0,129	0,0005	0,006	0,004	65,5	0,04	2,1	11,6	1,484	0,1557	0,0420	0,2	0,0046	7,6	6,9	57	23	79	27,7	30,31	32,74	0,0365

MÍNIMO	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	31,7	0,04	2,0	5,0	23	0,0491	0,0351	0,2	0,0040	7,5	6,1	28	2	37	17,7	14,20	1,80	0,0200
RD072	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	33,9	0,04	2,0	5,0	242	0,0693	0,0263	0,2	0,0040	6,8	5,9	28	2	35	18,1	14,40	0,50	0,0200
RD019	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	33,5	0,04	2,0	5,0	23	0,0400	0,0308	0,2	0,0040	6,7	6,4	29	2	35	21,3	21,20	2,71	0,0200
RD023	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	35,8	0,04	2,0	5,0	7	0,0465	0,0358	0,2	0,0040	7,3	6,0	27	2	39	20,6	18,00	2,24	0,0200
RD035	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	37,5	0,04	2,0	5,0	23	0,0545	0,0443	0,2	0,0040	6,4	5,9	32	2	45	20,1	19,60	2,76	0,0200
RD033	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	46,2	0,04	2,0	5,0	50	0,0403	0,0287	0,2	0,0040	7,5	6,0	30	2	59	19,5	17,20	2,29	0,0200
RD083	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	33,7	0,04	2,0	5,0	10	0,0500	0,0217	0,2	0,0040	6,4	5,9	39	2	46	21,5	22,40	2,78	0,0200
RD044	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	40,1	0,04	2,0	5,0	0	0,0395	0,0203	0,2	0,0040	5,9	6,1	28	2	28	18,9	18,70	2,28	0,0200
RD045	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	34,6	0,04	2,0	5,0	90	0,0439	0,0161	0,2	0,0040	6,3	6,2	36	2	45	22,3	21,40	2,57	0,0200
RD053	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	49,4	0,04	2,0	5,0	20	0,0431	0,0150	0,2	0,0040	6,7	5,8	34	2	47	22,1	20,50	1,83	0,0200
RD058	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	45,1	0,04	2,0	5,0	23	0,0486	0,0159	0,2	0,0040	6,9	6,2	40	2	47	23,2	24,40	1,67	0,0200
RD059	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	47,5	0,04	2,0	5,0	23	0,0373	0,0143	0,2	0,0040	7,0	6,3	36	2	44	24,3	23,70	3,28	0,0200
RD067	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	47,5	0,04	2,0	5,0	23	0,0307	0,0098	0,2	0,0040	6,6	6,1	31	2	48	22,4	23,30	2,16	0,0200

### Estadística descriptiva dos dados pré-rompimento (01/10/2008 a 31/10/2015)

MÁXIMO	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0393	0,209	0,0005	0,014	0,008	83,2	0,04	3,5	25,0	17,000	0,2790	1,6546	0,2	0,0111	9,5	7,8	96	1,088	1,184	27,8	33,30	744,00	0,0597
RD072	0,0244	0,171	0,0005	0,014	0,005	73,9	0,04	2,1	27,0	90,000	0,5380	1,5200	0,2	0,0193	9,5	7,7	74	894	968	29,0	32,50	604,00	0,0740
RD019	0,0073	0,304	0,0005	0,007	0,411	74,1	0,04	2,0	26,0	90,000	0,4880	0,5770	0,2	0,0068	8,9	7,7	84	223	283	31,2	35,30	318,00	0,0493
RD023	0,0054	0,243	0,0005	0,010	0,005	72,1	0,04	2,0	25,0	160,000	0,3580	0,3040	0,2	0,0066	9,7	7,9	65	204	265	31,2	33,60	280,00	0,0631
RD035	0,0067	0,183	0,0005	0,015	0,004	110,0	0,04	3,3	24,0	92,000	0,4570	0,3450	0,2	0,0073	9,1	7,7	91	230	307	33,1	35,80	382,00	0,0710
RD033	0,0055	0,176	0,0005	0,025	0,004	168,0	0,04	4,9	33,0	160,000	0,3820	0,5610	0,2	0,0104	10,3	7,5	108	678	786	30,3	31,40	955,00	0,0794
RD083	0,0010	0,127	0,0005	0,019	0,004	125,0	0,04	2,0	35,0	140,000	0,3810	0,2660	0,2	0,0140	10,2	8,3	92	451	517	31,5	32,80	537,00	0,0626
RD044	0,0010	0,157	0,0005	0,056	0,004	129,0	0,04	3,1	27,0	160,000	0,5730	0,2810	0,2	0,0085	9,8	7,5	163	169	226	31,8	36,10	217,00	0,0962
RD045	0,0010	0,219	0,0005	0,012	0,005	111,0	0,04	2,6	33,0	50,000	0,4490	0,2830	0,2	0,0104	9,8	8,2	70	284	354	31,6	35,70	319,00	0,0760
RD053	0,0010	0,181	0,0005	0,011	0,004	114,0	0,04	4,1	26,0	90,000	0,4760	0,2730	0,2	0,0141	9,5	8,2	94	345	439	30,0	36,20	398,00	0,1834
RD058	0,0010	0,181	0,0005	0,023	0,005	114,0	0,04	2,6	26,0	90,000	0,6240	0,3830	0,2	0,0242	10,0	8,9	132	476	566	31,7	34,70	379,00	0,1750
RD059	0,0010	3,118	0,0005	0,025	0,011	110,0	0,04	5,6	25,0	50,000	2,0700	0,3850	0,2	0,0144	10,7	8,8	149	488	574	32,6	39,80	505,00	0,0987
RD067	0,0010	0,271	0,0005	0,018	0,004	116,0	0,04	3,6	30,0	13,000	0,4500	0,1810	0,2	0,0093	8,9	7,6	105	289	386	39,8	37,20	397,00	0,0861

DESV PADRÃO	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0099	0,021	0,0000	0,002	0,001	12,9	0,00	0,3	4,4	4,584	0,0631	0,4799	0,0	0,0019	0,5	0,4	13	211	220	2,9	4,69	145,04	0,0107
RD072	0,0053	0,018	0,0000	0,003	0,000	10,4	0,00	0,0	5,5	18,963	0,1071	0,3272	0,0	0,0032	0,6	0,5	10	171	176	2,8	4,00	128,41	0,0147
RD019	0,0025	0,067	0,0000	0,001	0,063	10,0	0,00	0,0	5,5	14,288	0,1100	0,1178	0,0	0,0009	0,6	0,3	13	57	63	2,9	3,20	74,45	0,0096
RD023	0,0016	0,040	0,0000	0,001	0,000	9,0	0,00	0,0	4,9	24,898	0,0793	0,0824	0,0	0,0007	0,5	0,5	11	55	60	2,6	3,85	65,39	0,0146
RD035	0,0017	0,029	0,0000	0,003	0,000	13,8	0,00	0,3	5,4	20,800	0,1062	0,0872	0,0	0,0010	0,6	0,5	14	59	66	2,9	4,13	74,83	0,0157
RD033	0,0017	0,021	0,0000	0,006	0,000	27,3	0,00	0,5	6,6	53,689	0,0989	0,1164	0,0	0,0018	0,6	0,4	17	109	115	2,6	2,94	150,76	0,0208
RD083	0,0003	0,005	0,0000	0,004	0,000	19,5	0,00	0,0	6,7	21,512	0,0904	0,0484	0,0	0,0028	0,7	0,4	11	70	72	2,6	2,77	84,36	0,0119
RD044	0,0003	0,016	0,0000	0,014	0,000	19,6	0,00	0,2	5,0	33,720	0,1381	0,0790	0,0	0,0012	0,7	0,4	21	32	40	2,8	3,94	47,22	0,0252
RD045	0,0003	0,033	0,0000	0,002	0,000	17,6	0,00	0,1	6,5	11,112	0,0922	0,0589	0,0	0,0018	0,6	0,4	10	50	53	2,3	3,43	60,72	0,0204
RD053	0,0003	0,023	0,0000	0,002	0,000	13,6	0,00	0,4	5,8	15,319	0,1227	0,0586	0,0	0,0028	0,6	0,5	13	56	64	2,1	2,76	63,55	0,0450
RD058	0,0003	0,029	0,0000	0,004	0,000	14,1	0,00	0,1	5,3	23,975	0,1266	0,0976	0,0	0,0056	0,6	0,5	17	82	92	2,2	2,86	63,22	0,0566
RD059	0,0003	0,834	0,0000	0,006	0,001	14,7	0,00	0,6	5,8	9,515	0,3900	0,0989	0,0	0,0029	0,8	0,5	19	75	82	2,4	3,40	78,38	0,0238
RD067	0,0003	0,060	0,0000	0,003	0,000	14,3	0,00	0,3	6,5	2,683	0,1271	0,0462	0,0	0,0015	0,6	0,4	16	44	53	3,0	3,46	63,06	0,0220

## Estatística descritiva dos dados pré-rompimento (01/10/2008 a 31/10/2015)

MÉD GEOMÉTRICA	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0023	0,103	0,0005	0,005	0,004	50,5	0,04	2,0	7,0	2.346	0,1244	0,2068	0,2	0,0046	8,2	6,7	42	30	88	23,3	23,99	21,71	0,0247
RD072	0,0011	0,105	0,0005	0,006	0,004	48,7	0,04	2,0	9,0	3.670	0,1761	0,1098	0,2	0,0050	8,1	6,8	47	18	81	23,7	24,28	16,81	0,0264
RD019	0,0008	0,119	0,0005	0,005	0,005	47,3	0,04	2,0	9,2	352	0,1280	0,0974	0,2	0,0043	7,7	6,9	46	18	73	25,3	27,26	19,30	0,0244
RD023	0,0006	0,111	0,0005	0,005	0,004	48,2	0,04	2,0	10,0	451	0,1267	0,1130	0,2	0,0043	8,1	6,9	44	24	78	25,5	26,38	21,53	0,0265
RD035	0,0005	0,112	0,0005	0,006	0,004	56,1	0,04	2,1	9,7	6.497	0,1346	0,1237	0,2	0,0044	7,8	6,9	50	34	94	25,5	26,32	26,27	0,0292
RD033	0,0006	0,106	0,0005	0,006	0,004	79,9	0,04	2,1	10,4	13.283	0,1266	0,1070	0,2	0,0044	8,5	6,8	65	30	108	25,2	25,12	25,64	0,0291
RD083	0,0004	0,101	0,0005	0,006	0,004	59,4	0,04	2,0	10,1	747	0,1245	0,0499	0,2	0,0046	7,6	6,8	54	14	76	26,5	26,82	21,65	0,0237
RD044	0,0004	0,104	0,0005	0,006	0,004	65,9	0,04	2,0	9,0	--	0,1629	0,0490	0,2	0,0042	7,6	6,9	55	11	73	27,1	29,54	16,85	0,0284
RD045	0,0004	0,109	0,0005	0,005	0,004	61,8	0,04	2,0	10,2	4.821	0,1440	0,0488	0,2	0,0043	7,7	7,0	52	14	75	27,2	29,10	18,08	0,0288
RD053	0,0004	0,107	0,0005	0,005	0,004	67,3	0,04	2,1	9,6	1.331	0,1499	0,0526	0,2	0,0046	7,7	7,0	54	18	80	26,6	26,99	17,50	0,0332
RD058	0,0004	0,110	0,0005	0,005	0,004	66,1	0,04	2,0	9,6	3.862	0,1439	0,0516	0,2	0,0048	7,9	7,1	55	19	83	27,4	29,24	18,80	0,0394
RD059	0,0004	0,144	0,0005	0,006	0,004	66,1	0,04	2,1	10,3	2.064	0,1514	0,0388	0,2	0,0045	8,0	7,2	56	14	78	28,5	31,17	17,05	0,0322
RD067	0,0004	0,120	0,0005	0,005	0,004	64,2	0,04	2,1	10,1	560	0,1121	0,0299	0,2	0,0045	7,6	6,9	55	14	72	27,6	30,12	15,78	0,0318

PERCENTIL 25%	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	41,9	0,04	2,0	5,0	2.109	0,0940	0,0846	0,2	0,0040	7,8	6,5	36	12	56	21,8	21,80	6,29	0,0200
RD072	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	41,6	0,04	2,0	6,2	2.200	0,1210	0,0545	0,2	0,0040	7,6	6,4	41	6	52	22,4	22,08	5,74	0,0200
RD019	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	39,9	0,04	2,0	5,0	71	0,0848	0,0609	0,2	0,0040	7,3	6,7	39	9	52	23,0	25,05	7,37	0,0200
RD023	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	41,7	0,04	2,0	6,7	60	0,0796	0,0807	0,2	0,0040	7,7	6,5	38	14	57	24,1	24,43	8,47	0,0200
RD035	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	48,7	0,04	2,0	6,4	1.895	0,0793	0,0897	0,2	0,0040	7,4	6,5	42	18	64	24,3	24,15	11,08	0,0200
RD033	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	62,3	0,04	2,0	6,4	7.751	0,0860	0,0714	0,2	0,0040	8,1	6,5	56	16	85	23,6	24,13	11,83	0,0200
RD083	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	49,4	0,04	2,0	6,9	220	0,0889	0,0360	0,2	0,0040	7,3	6,5	48	6	60	24,7	24,95	8,73	0,0200
RD044	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	54,9	0,04	2,0	6,4	1.700	0,1283	0,0227	0,2	0,0040	7,2	6,6	48	5	63	25,4	27,55	7,60	0,0200
RD045	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	50,4	0,04	2,0	6,6	2.438	0,0901	0,0327	0,2	0,0040	7,4	6,8	45	7	60	25,5	26,78	7,43	0,0200
RD053	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	57,3	0,04	2,0	5,8	291	0,0978	0,0364	0,2	0,0040	7,3	6,7	45	9	61	25,1	25,53	7,47	0,0200
RD058	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	56,0	0,04	2,0	5,5	1.705	0,0854	0,0319	0,2	0,0040	7,5	6,9	47	9	61	25,6	27,23	9,37	0,0200
RD059	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	56,4	0,04	2,0	5,4	718	0,0795	0,0246	0,2	0,0040	7,5	6,9	50	8	60	26,9	28,78	7,52	0,0200
RD067	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	57,1	0,04	2,0	5,6	268	0,0631	0,0196	0,2	0,0040	7,2	6,6	46	10	59	25,6	28,03	6,55	0,0200

## Estatística descritiva dos dados pré-rompimento (01/10/2008 a 31/10/2015)

PERCENTIL 50%	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0029	0,100	0,0005	0,005	0,004	51,5	0,04	2,0	5,9	4.900	0,1200	0,1752	0,2	0,0040	8,1	6,7	41	25	63	24,1	24,60	28,30	0,0200
RD072	0,0010	0,100	0,0005	0,005	0,004	48,4	0,04	2,0	8,7	3.278	0,1616	0,0787	0,2	0,0040	8,0	6,8	48	14	67	24,0	24,85	14,75	0,0200
RD019	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	45,9	0,04	2,0	8,1	196	0,1274	0,0867	0,2	0,0040	7,8	6,9	44	15	61	25,6	27,50	15,70	0,0200
RD023	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	47,5	0,04	2,0	12,0	330	0,1250	0,1010	0,2	0,0040	8,2	6,9	46	23	65	25,7	26,70	20,10	0,0200
RD035	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	53,9	0,04	2,0	11,0	9.676	0,1398	0,1201	0,2	0,0040	7,8	6,9	46	32	78	25,9	25,90	25,45	0,0273
RD033	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	81,1	0,04	2,0	9,7	12.099	0,1267	0,1071	0,2	0,0040	8,5	6,9	63	29	97	25,6	25,50	21,75	0,0234
RD083	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	58,6	0,04	2,0	9,8	790	0,1100	0,0482	0,2	0,0040	7,6	6,9	53	13	72	26,6	26,80	22,95	0,0200
RD044	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	64,1	0,04	2,0	9,2	3.100	0,1508	0,0339	0,2	0,0040	7,7	6,8	57	11	69	27,7	30,50	14,40	0,0236
RD045	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	60,5	0,04	2,0	10,0	4.950	0,1710	0,0436	0,2	0,0040	7,8	7,0	54	11	68	27,1	29,95	15,65	0,0200
RD053	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	68,1	0,04	2,0	9,4	1.500	0,1400	0,0443	0,2	0,0040	7,5	7,0	56	18	73	27,1	27,10	20,55	0,0231
RD058	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	67,1	0,04	2,0	9,7	3.150	0,1400	0,0365	0,2	0,0040	7,9	7,0	56	17	73	27,5	29,15	18,30	0,0253
RD059	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	65,2	0,04	2,0	12,0	2.650	0,1200	0,0323	0,2	0,0040	7,9	7,2	54	16	71	28,6	32,10	15,30	0,0297
RD067	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	63,0	0,04	2,0	11,0	490	0,1035	0,0259	0,2	0,0040	7,5	6,9	52	15	66	27,7	30,30	14,80	0,0283

PERCENTIL 75%	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0070	0,100	0,0005	0,005	0,004	58,9	0,04	2,0	8,8	5.970	0,1765	0,5330	0,2	0,0040	8,5	6,9	47	92	128	26,0	27,00	69,25	0,0272
RD072	0,0033	0,100	0,0005	0,005	0,004	57,0	0,04	2,0	13,0	8.000	0,2550	0,1966	0,2	0,0055	8,6	7,2	55	37	88	25,9	27,08	40,45	0,0323
RD019	0,0014	0,100	0,0005	0,005	0,004	52,9	0,04	2,0	14,0	1.383	0,1921	0,1356	0,2	0,0040	8,2	7,2	55	36	82	27,4	29,58	42,95	0,0260
RD023	0,0011	0,100	0,0005	0,005	0,004	53,7	0,04	2,0	14,0	2.295	0,1915	0,1663	0,2	0,0040	8,5	7,2	54	44	94	27,4	29,55	53,30	0,0263
RD035	0,0010	0,100	0,0005	0,005	0,004	63,7	0,04	2,0	15,0	20.702	0,2000	0,1530	0,2	0,0040	8,3	7,3	61	69	116	27,0	29,45	55,28	0,0327
RD033	0,0010	0,100	0,0005	0,005	0,004	93,5	0,04	2,0	18,0	23.500	0,1900	0,1522	0,2	0,0040	8,8	7,2	72	60	127	27,1	26,70	56,50	0,0371
RD083	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	70,9	0,04	2,0	14,0	2.075	0,1625	0,0576	0,2	0,0040	8,0	7,0	61	26	78	28,5	28,63	39,13	0,0266
RD044	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	79,9	0,04	2,0	11,0	7.950	0,2700	0,0780	0,2	0,0040	8,1	7,1	62	23	82	29,1	32,05	35,85	0,0293
RD045	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	73,9	0,04	2,0	15,0	10.600	0,2278	0,0670	0,2	0,0040	8,1	7,2	59	30	83	28,9	31,48	38,33	0,0412
RD053	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	77,2	0,04	2,0	15,0	6.500	0,2452	0,0697	0,2	0,0040	8,1	7,2	63	34	89	28,4	28,58	36,25	0,0541
RD058	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	72,9	0,04	2,0	13,0	11.000	0,2300	0,0942	0,2	0,0040	8,2	7,5	59	29	83	29,2	31,35	38,10	0,0818
RD059	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	77,0	0,04	2,0	16,0	7.675	0,2450	0,0376	0,2	0,0040	8,2	7,6	59	24	82	30,7	33,78	27,95	0,0390
RD067	0,0003	0,110	0,0005	0,005	0,004	69,7	0,04	2,0	16,0	1.290	0,2018	0,0354	0,2	0,0040	8,0	7,2	61	20	82	29,4	32,03	30,10	0,0444

## Estatística descritiva dos dados pré-rompimento (01/10/2008 a 31/10/2015)

COEF. CURTOSE	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	4,1770	26,755	-2,1667	13,556	12,152	-0,1	-2,17	27,0	8,0	1	-0,3643	2,1748	-2,2	3,7224	0,2	0,7	10	21	21	-0,9	-0,10	19,56	4,0375
RD072	10,1880	7,334	-2,1667	3,192	24,580	-0,1	-2,17	42,0	2,4	15	2,3717	9,6825	-2,2	13,3724	-0,3	-1,0	0	14	14	-0,5	0,08	9,61	2,6214
RD019	0,9627	3,903	-2,4000	13,000	41,998	0,6	-2,40	-	0,1	34	2,3914	7,8644	-	6,0263	-0,9	-0,7	0	4	4	-0,9	-0,36	6,30	2,8208
RD023	3,1657	10,621	-2,4000	5,721	37,868	0,3	-2,40	-	0,2	38	0,6398	-0,3840	-	9,0324	0,3	-0,6	-1	2	2	-0,4	-0,55	6,97	1,3489
RD035	12,0055	2,204	-2,4000	4,195	-2,103	3,9	-2,40	10,8	-0,5	7	1,8097	0,9547	-	3,4338	-0,5	-0,7	0	1	2	0,3	-0,36	9,83	2,4553
RD033	3,5022	11,570	-2,4000	8,961	42,000	1,1	-2,40	32,1	0,9	2	1,2537	7,0702	-	11,4119	0,9	-0,7	0	27	28	-0,3	0,95	31,59	0,7739
RD083	0,0945	27,000	-2,4000	13,000	-2,103	2,4	-2,40	-	2,2	40	1,8592	12,7831	-	11,2143	4,1	2,5	2	34	34	-0,7	-0,55	30,38	9,5616
RD044	0,0945	11,570	-2,4000	13,000	-2,103	1,0	-2,40	16,8	3,2	16	4,0103	3,0823	-	13,0000	1,4	-0,5	15	11	6	0,8	1,24	8,74	3,3326
RD045	0,0945	10,749	-2,4000	13,000	21,880	0,2	-2,40	33,6	1,6	4	1,6674	7,4364	-	13,0000	2,6	1,2	-1	17	17	-0,6	-0,53	13,23	1,1517
RD053	0,0945	9,311	-2,4000	13,000	-2,103	1,8	-2,40	17,8	-0,4	21	0,5045	7,3160	-	11,3959	0,8	0,9	1	24	22	-0,7	2,10	27,41	8,8379
RD058	0,0945	3,164	-2,4000	20,489	31,220	1,6	-2,40	42,0	0,7	6	4,9384	9,1678	-	12,1116	1,8	3,3	9	20	18	-1,0	-0,75	21,35	0,1116
RD059	0,0945	12,924	-2,4000	12,845	41,846	1,1	-2,40	21,5	-1,0	12	19,7041	11,5667	-	12,1311	3,9	0,9	15	35	32	-1,1	-0,12	33,09	3,3013
RD067	0,0945	2,802	-2,4000	19,507	42,000	3,6	-2,40	18,7	1,0	11	-0,0308	7,5835	-	9,3356	-0,6	-0,9	2	35	28	4,9	-0,29	28,40	1,1844

COEF. ASSIMETRIA	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	2,1048	5,163	-1,0598	3,594	3,591	0,5	-1,06	5,2	2,6	1	0,6670	1,7696	-1,1	2,1301	0,9	1,0	3	4	4	-0,4	-0,11	4,22	2,1248
RD072	3,0119	2,867	-1,0598	2,118	4,833	0,6	-1,06	6,5	1,6	4	1,4018	2,9370	-1,1	3,3826	0,1	0,0	0	4	4	-0,2	-0,31	3,09	1,8011
RD019	1,5483	2,234	-1,1355	3,606	6,481	1,0	1,14	-	0,9	6	1,4999	2,6131	-	2,5531	0,2	0,4	1	2	2	0,2	0,22	2,59	1,9349
RD023	2,0014	3,187	-1,1355	2,456	6,069	0,8	1,14	-	0,6	6	0,9747	0,9866	-	2,9222	0,4	0,1	0	2	2	-0,1	-0,33	2,64	1,6012
RD035	3,4209	1,867	-1,1355	2,205	-1,037	1,6	1,14	3,3	0,7	2	1,3795	1,1965	-	2,0066	0,0	-0,2	1	2	2	0,1	0,34	2,93	1,7286
RD033	2,1326	3,363	-1,1355	2,959	6,481	1,1	1,14	5,5	1,0	2	1,2255	2,5116	-	3,3375	0,5	-0,3	1	5	5	-0,3	-0,33	5,40	1,4746
RD083	1,4511	5,196	-1,1355	3,606	-1,037	1,2	1,14	-	1,4	6	1,5797	3,2490	-	3,3063	1,3	0,7	1	6	6	0,1	0,29	5,26	2,9869
RD044	1,4511	3,363	-1,1355	3,606	-1,037	0,9	1,14	4,2	1,7	4	1,8250	1,8445	-	3,6056	0,3	-0,2	3	3	2	-0,7	-0,87	2,87	2,1208
RD045	1,4511	3,234	-1,1355	3,606	4,693	0,8	1,14	5,7	1,2	2	1,0618	2,6281	-	3,6056	0,8	0,4	0	4	4	0,1	-0,40	3,49	1,5401
RD053	1,4511	3,017	-1,1355	3,606	-1,037	1,1	1,14	4,3	0,8	4	1,1779	2,6816	-	3,3350	1,0	0,1	1	4	4	-0,5	0,61	4,93	2,8349
RD058	1,4511	2,153	-1,1355	4,507	5,471	1,0	1,14	6,5	1,0	3	1,9180	2,8876	-	3,4510	1,1	1,1	3	4	4	-0,1	0,09	4,26	1,3012
RD059	1,4511	3,591	-1,1355	3,577	6,463	1,1	1,14	4,5	0,4	3	4,2175	3,3477	-	3,4543	1,7	0,6	3	6	5	0,0	-0,14	5,51	1,9082
RD067	1,4511	2,024	-1,1355	4,366	-6,481	1,7	1,14	4,4	1,1	3	1,0744	2,6577	-	2,9707	0,2	-0,1	1	6	5	1,4	0,05	5,01	1,4321

## Estatística descritiva dos dados pré-rompimento (01/10/2008 a 31/10/2015)

Q3+1,5AIQ	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0,0169	0,100	0,0005	0,005	0,004	84,4	0,04	2,0	14,4	11.762	0,3001	1,2057	0,2	0,0040	9,6	7,5	62	212	237	32,2	34,80	163,70	0,0379
RD072	0,0078	0,100	0,0005	0,005	0,004	80,1	0,04	2,0	23,2	16.700	0,4560	0,4096	0,2	0,0078	10,0	8,4	76	84	141	31,2	34,58	92,52	0,0506
RD019	0,0030	0,100	0,0005	0,005	0,004	72,4	0,04	2,0	27,5	3.351	0,3531	0,2477	0,2	0,0040	9,6	7,9	79	75	127	33,9	36,36	96,32	0,0350
RD023	0,0024	0,100	0,0005	0,005	0,004	71,6	0,04	2,0	25,0	5.648	0,3593	0,2948	0,2	0,0040	9,6	8,2	78	88	149	32,3	37,24	120,54	0,0358
RD035	0,0021	0,100	0,0005	0,005	0,004	86,2	0,04	2,0	27,9	48.913	0,3811	0,2480	0,2	0,0040	9,6	8,4	88	146	193	31,1	37,40	121,58	0,0518
RD033	0,0021	0,100	0,0005	0,005	0,004	140,3	0,04	2,0	35,4	47.124	0,3460	0,2734	0,2	0,0040	9,9	8,2	96	125	189	32,3	30,56	123,51	0,0628
RD083	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	103,2	0,04	2,0	24,7	4.858	0,2730	0,0900	0,2	0,0040	9,1	7,8	81	56	104	34,0	34,14	84,73	0,0365
RD044	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	117,3	0,04	2,0	17,9	17.325	0,4826	0,1610	0,2	0,0040	9,5	7,9	83	49	111	34,6	38,80	78,23	0,0433
RD045	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	109,0	0,04	2,0	27,6	22.843	0,4344	0,1185	0,2	0,0040	9,1	7,8	80	64	118	33,9	38,53	84,67	0,0730
RD053	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	107,1	0,04	2,0	28,8	15.814	0,4662	0,1196	0,2	0,0040	9,2	7,9	90	71	129	33,3	33,15	79,42	0,1053
RD058	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	98,3	0,04	2,0	24,3	24.942	0,4469	0,1877	0,2	0,0040	9,3	8,3	77	58	116	34,5	37,54	81,20	0,1745
RD059	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	107,9	0,04	2,0	31,9	18.110	0,4933	0,0571	0,2	0,0040	9,3	8,6	73	47	114	36,4	41,28	58,60	0,0675
RD067	0,0003	0,126	0,0005	0,005	0,004	88,5	0,04	2,0	31,6	2.822	0,4099	0,0591	0,2	0,0040	9,1	8,1	84	35	117	35,2	38,03	65,42	0,0810

Q3-1,5AIQ	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	-0,0030	0,100	0,0005	0,005	0,004	33,4	0,04	2,0	3,1	178	0,0528	-0,1397	0,2	0,0040	7,5	6,3	31	-28	19	19,7	19,20	-25,20	0,0164
RD072	-0,0012	0,100	0,0005	0,005	0,004	33,9	0,04	2,0	2,8	-700	0,0540	-0,0165	0,2	0,0032	7,1	6,0	34	-10	34	20,6	19,58	-11,62	0,0139
RD019	-0,0002	0,100	0,0005	0,005	0,004	33,4	0,04	2,0	0,5	-585	0,0312	0,0235	0,2	0,0040	6,9	6,5	31	-4	37	20,9	22,79	-10,42	0,0170
RD023	-0,0001	0,100	0,0005	0,005	0,004	35,7	0,04	2,0	3,1	-1.057	0,0236	0,0378	0,2	0,0040	7,3	6,2	30	-1	39	22,5	21,86	-13,94	0,0169
RD035	-0,0001	0,100	0,0005	0,005	0,004	41,2	0,04	2,0	2,1	-7.508	0,0190	0,0581	0,2	0,0040	7,0	6,1	33	-8	38	22,9	21,50	-11,03	0,0137
RD033	-0,0001	0,100	0,0005	0,005	0,004	46,7	0,04	2,0	0,6	-124	0,0340	0,0310	0,2	0,0040	7,8	6,2	48	-6	64	21,8	22,84	-10,51	0,0115
RD083	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	38,6	0,04	2,0	3,4	-708	0,0520	0,0252	0,2	0,0040	7,0	6,3	41	-4	51	22,9	23,11	-6,47	0,0167
RD044	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	42,4	0,04	2,0	4,1	-1.425	0,0575	-0,0050	0,2	0,0040	6,8	6,4	41	-4	53	23,5	25,30	-6,53	0,0154
RD045	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	38,7	0,04	2,0	2,4	-1.643	0,0212	0,0155	0,2	0,0040	7,1	6,6	38	-4	49	23,9	24,43	-8,02	0,0094
RD053	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	47,3	0,04	2,0	1,2	-2.814	0,0241	0,0197	0,2	0,0040	6,9	6,5	36	-3	48	23,5	24,00	-6,92	0,0029
RD058	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	47,5	0,04	2,0	1,8	-2.942	0,0131	0,0008	0,2	0,0040	7,2	6,6	41	-1	50	23,8	25,16	-5,00	-0,0109
RD059	0,0003	0,100	0,0005	0,005	0,004	46,1	0,04	2,0	0,1	-2.760	-0,0032	0,0181	0,2	0,0040	7,2	6,6	46	0	49	25,0	26,28	-2,70	0,0105
RD067	0,0003	0,095	0,0005	0,005	0,004	50,8	0,04	2,0	0,4	-242	-0,0063	0,0117	0,2	0,0040	6,8	6,3	38	5	48	23,6	26,03	-5,22	0,0078



## Resultados do teste de AIQ para os dados de pré-rompimento

% outliers sup.	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	12%	12%	0%	12%	8%	0%	0%	4%	4%	19%	0%	15%	0%	19%	0%	8%	4%	8%	12%	0%	0%	12%	12%
RD072	7%	10%	0%	12%	10%	0%	0%	2%	5%	10%	2%	12%	0%	10%	0%	0%	0%	17%	17%	0%	0%	15%	10%
RD019	7%	7%	0%	2%	12%	5%	0%	0%	0%	15%	5%	7%	0%	5%	0%	0%	5%	15%	12%	0%	0%	10%	5%
RD023	5%	7%	0%	15%	5%	2%	0%	0%	2%	10%	0%	2%	0%	7%	2%	0%	0%	17%	17%	0%	0%	10%	7%
RD035	2%	7%	0%	10%	0%	2%	0%	12%	0%	7%	2%	5%	0%	7%	0%	0%	2%	15%	17%	2%	0%	12%	5%
RD033	5%	5%	0%	7%	2%	5%	0%	10%	0%	17%	2%	5%	0%	5%	2%	0%	10%	7%	5%	0%	5%	7%	5%
RD083	7%	2%	0%	2%	0%	5%	0%	0%	2%	17%	7%	10%	0%	5%	5%	2%	2%	12%	10%	0%	0%	7%	2%
RD044	7%	5%	0%	2%	0%	2%	0%	7%	7%	17%	2%	2%	0%	2%	2%	0%	5%	14%	12%	0%	0%	7%	5%
RD045	7%	5%	0%	2%	5%	2%	0%	5%	2%	15%	2%	7%	0%	2%	5%	2%	0%	10%	7%	0%	0%	7%	5%
RD053	7%	5%	0%	2%	0%	2%	0%	12%	0%	15%	2%	5%	0%	5%	2%	2%	2%	10%	12%	0%	2%	7%	2%
RD058	7%	7%	0%	7%	5%	2%	0%	2%	2%	15%	2%	2%	0%	5%	5%	2%	7%	15%	17%	0%	0%	10%	2%
RD059	7%	7%	0%	5%	2%	5%	0%	7%	0%	5%	7%	7%	0%	5%	7%	5%	10%	15%	15%	0%	0%	12%	5%
RD067	7%	7%	0%	7%	0%	10%	0%	5%	0%	15%	2%	5%	0%	7%	0%	0%	7%	10%	7%	2%	0%	10%	2%

% outliers inf.	Arsênio total	Alumínio dissolvido	Cádmio total	Chumbo total	Cobre dissolvido	Cond. elétr. in loco	Cromo total	DBO	DQO	Ind. biológico	Ferro dissolvido	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	OD	pH in loco	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbi dez	Zinco total
RD071	0%	0%	0%	0%	0%	4%	0%	0%	0%	12%	4%	0%	0%	0%	0%	4%	8%	0%	0%	19%	15%	0%	0%
RD072	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	2%	5%	0%	0%	17%	7%	0%	0%
RD019	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	2%	5%	0%	2%	0%	7%	0%	0%
RD023	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	7%	5%	12%	0%	0%	15%	12%	0%	0%
RD035	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	0%	0%	2%	7%	7%	0%	0%	15%	15%	0%	0%
RD033	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	12%	7%	7%	0%	5%	10%	20%	0%	0%
RD083	0%	0%	0%	0%	0%	12%	0%	0%	0%	0%	5%	5%	0%	0%	15%	7%	5%	0%	2%	10%	12%	0%	0%
RD044	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	5%	7%	10%	0%	10%	7%	10%	0%	0%
RD045	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	12%	12%	2%	0%	2%	5%	12%	0%	0%
RD053	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	2%	10%	2%	0%	2%	12%	12%	0%	0%
RD058	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7%	10%	2%	0%	7%	2%	10%	0%	0%
RD059	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	10%	7%	15%	0%	2%	5%	10%	0%	0%
RD067	0%	0%	0%	0%	2%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	15%	2%	5%	15%	0%	5%	10%	0%	0%

Parte da estatística descritiva dos dados pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

MÉDIA	Cond. elétr. in loco	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH in loco	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	73,1	0,124	0,0049	7,8	7,2	0,287	107	4.105	4.212	26,2	29,6	5.489	0,00131	0,0005	0,029	0,046	6,1654	0,24	0,0126	0,03
RD071	68,2	0,173	0,0045	7,6	7,2	0,511	113	2.437	2.550	26,4	30,2	4.122	0,00208	0,0005	0,014	0,041	2,6582	0,20	0,0068	0,02
RD072	70,8	0,271	0,0044	7,4	7,3	0,866	129	3.553	3.682	26,6	28,9	12.160	0,00149	0,0005	0,012	0,040	2,1450	0,20	0,0063	0,04
RD019	79,3	0,324	0,0156	7,0	7,1	1,070	148	5.500	5.648	26,2	27,3	14.411	0,00205	0,0005	0,015	0,041	1,8772	0,20	0,0078	0,03
RD023	82,0	0,676	0,0046	7,3	7,1	1,260	149	7.916	8.065	27,0	28,9	21.363	0,00365	0,0008	0,029	0,068	17,9111	0,20	0,0475	0,02
RD035	90,0	0,544	0,0075	6,7	7,2	1,283	140	4.143	4.282	27,5	29,4	13.576	0,00283	0,0006	0,050	0,073	9,8612	0,20	0,0280	0,03
RD033	113,0	0,862	0,0048	7,3	7,1	1,388	163	5.910	6.073	27,9	30,1	18.638	0,00395	0,0008	0,045	0,092	18,2422	0,20	0,0486	0,02
RD083	93,9	0,397	0,0057	5,8	7,0	0,857	137	1.034	1.171	28,5	29,3	3.411	0,00289	0,0005	0,018	0,041	1,7657	0,20	0,0093	0,03
RD044	97,8	0,422	0,0046	6,8	6,9	0,740	151	1.020	1.171	28,0	29,8	4.771	0,00237	0,0005	0,022	0,049	2,1434	0,20	0,0114	0,02
RD045	97,5	0,541	0,0049	6,9	7,0	0,844	128	1.045	1.173	27,9	29,4	3.795	0,00219	0,0005	0,019	0,045	1,5576	0,20	0,0099	0,06
RD053	99,6	0,584	0,0082	6,9	7,1	0,882	153	1.103	1.256	28,0	29,5	3.263	0,00186	0,0005	0,016	0,045	1,1747	0,21	0,0101	0,03
RD058	95,5	0,744	0,0048	7,0	7,1	1,050	184	849	1.033	27,9	29,9	3.755	0,00197	0,0005	0,017	0,042	1,0828	0,21	0,0082	0,03
RD059	94,1	0,945	0,0049	6,9	7,1	1,209	152	510	662	29,0	30,3	1.942	0,00157	0,0011	0,011	0,040	0,4752	0,21	0,0057	0,02
RD067	92,5	0,585	0,0053	7,2	6,9	0,830	159	273	433	28,5	31,3	1.189	0,00141	0,0005	0,008	0,040	0,2084	0,21	0,0056	0,05

MÍNIMO	Cond. elétr. in loco	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH in loco	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	40,6	0,100	0,0040	7,1	5,8	0,073	24	36	92	20,1	21,2	54	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0099	0,20	0,0040	0,02
RD071	41,2	0,100	0,0040	6,4	6,2	0,102	36	19	72	20,6	21,0	21	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0048	0,20	0,0040	0,02
RD072	41,4	0,100	0,0040	0,6	6,0	0,111	30	13	72	21,0	23,0	32	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0622	0,20	0,0040	0,02
RD019	43,4	0,100	0,0040	0,5	5,8	0,148	40	46	100	19,2	17,8	65	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,1270	0,20	0,0040	0,02
RD023	43,2	0,100	0,0040	0,5	5,4	0,129	30	21	84	20,4	21,2	66	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,1200	0,20	0,0040	0,02
RD035	46,5	0,100	0,0040	0,5	5,9	0,147	50	27	80	21,3	22,0	50	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,1450	0,20	0,0040	0,02
RD033	50,8	0,100	0,0040	0,5	5,9	0,103	50	16	123	22,4	21,9	51	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0420	0,20	0,0040	0,02
RD083	33,5	0,100	0,0040	0,5	5,8	0,087	40	3	76	23,9	22,1	33	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0210	0,20	0,0040	0,02
RD044	42,3	0,100	0,0040	0,5	6,0	0,068	44	7	60	21,2	21,0	3	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0196	0,20	0,0040	0,02
RD045	49,8	0,100	0,0040	0,5	6,1	0,074	20	6	69	21,2	21,2	5	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0136	0,20	0,0040	0,02
RD053	50,8	0,100	0,0040	0,5	5,9	0,134	40	2	68	22,6	20,5	2	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0126	0,20	0,0040	0,02
RD058	52,0	0,100	0,0040	1,1	6,0	0,079	46	4	68	21,2	23,5	5	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0117	0,20	0,0040	0,02
RD059	56,7	0,100	0,0040	1,4	5,8	0,030	40	2	62	22,9	24,6	4	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0110	0,20	0,0040	0,02
RD067	48,9	0,100	0,0040	4,4	5,3	0,030	40	4	72	21,2	25,4	3	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0105	0,20	0,0040	0,02

Parte da estatística descritiva dos dados pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

MÁXIMO	Cond. elétr. in loco	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH in loco	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	Zinco total
RD011	158,0	0,362	0,0400	9,0	8,2	0,951	250	53.760	53.910	30,3	36,0	32.510	0,00344	0,0008	0,446	0,246	103,8000	0,89	0,1440	0,13
RD071	98,8	1,035	0,0284	9,0	8,2	2,620	460	28.920	29.040	31,2	36,8	32.848	0,00436	0,0005	0,177	0,084	40,7000	0,20	0,0550	0,11
RD072	244,8	2,390	0,0285	8,8	8,0	6,758	380	112.280	112.470	31,9	37,5	435.400	0,00337	0,0005	0,056	0,040	15,0100	0,29	0,0238	0,54
RD019	312,3	2,896	0,6750	8,8	7,7	18,730	390	221.110	221.430	30,9	37,4	597.400	0,00879	0,0011	0,221	0,070	32,3000	0,24	0,0990	0,29
RD023	311,7	23,200	0,0321	9,0	7,8	23,600	430	344.550	344.980	30,0	36,0	606.200	0,09740	0,0135	0,536	1,658	936,0000	0,23	2,2800	0,07
RD035	289,6	11,000	0,2170	9,1	7,9	18,010	470	123.850	124.220	30,4	36,6	334.600	0,04550	0,0080	1,650	1,730	351,0000	0,20	0,9510	0,07
RD033	306,0	32,200	0,0343	8,9	7,6	32,260	630	204.230	204.860	32,3	37,8	497.500	0,10800	0,0158	1,500	2,863	857,0000	0,20	2,1300	0,05
RD083	247,7	2,526	0,1080	8,5	8,5	4,583	430	8.760	9.190	32,4	35,8	21.480	0,01433	0,0005	0,133	0,070	21,8500	0,20	0,0696	0,26
RD044	218,1	3,268	0,0416	8,6	7,8	3,490	940	20.370	20.580	34,3	40,4	140.000	0,03630	0,0015	0,424	0,298	67,2000	0,23	0,2160	0,08
RD045	214,0	8,090	0,0543	8,3	7,9	6,900	440	20.770	20.910	32,2	38,2	81.440	0,02440	0,0015	0,442	0,320	40,8000	0,26	0,2110	0,86
RD053	220,7	8,250	0,2310	8,9	8,5	7,130	730	29.540	30.270	31,8	37,0	74.160	0,02870	0,0009	0,292	0,309	31,4100	0,40	0,2500	0,12
RD058	200,0	6,029	0,0479	8,6	8,2	5,670	2.110	13.650	15.760	30,8	42,6	89.220	0,01230	0,0008	0,246	0,132	19,3900	0,40	0,1060	0,09
RD059	190,1	10,550	0,0420	8,6	8,2	8,615	660	5.700	6.130	32,4	37,4	28.500	0,00375	0,0346	0,079	0,040	4,5400	0,53	0,0337	0,08
RD067	163,0	3,137	0,0785	9,1	7,8	4,456	930	2.470	3.270	31,2	40,1	10.050	0,00396	0,0005	0,042	0,040	1,8200	0,49	0,0521	0,57

DESV PADRÃO	Cond. elétr. in loco	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH in loco	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	Zinco total
RD011	23,2	0,059	0,0058	0,5	0,6	0,198	60	9.387	9.412	2,5	2,9	8.735	0,00061	0,0000	0,072	0,033	16,8482	0,13	0,0234	0,02
RD071	13,9	0,167	0,0036	0,6	0,5	0,539	82	5.815	5.837	2,5	3,6	6.994	0,00096	0,0000	0,027	0,007	6,4330	0,00	0,0085	0,02
RD072	30,6	0,344	0,0031	1,0	0,5	0,989	84	14.528	14.544	2,1	3,4	55.484	0,00063	0,0000	0,012	0,000	3,1110	0,01	0,0042	0,09
RD019	50,2	0,423	0,0873	1,4	0,5	2,414	96	29.074	29.096	2,4	3,7	76.249	0,00130	0,0001	0,032	0,005	4,3176	0,00	0,0140	0,05
RD023	52,7	2,944	0,0037	1,5	0,5	3,019	94	44.505	44.545	2,1	3,3	85.231	0,01240	0,0017	0,085	0,207	119,6754	0,00	0,2937	0,01
RD035	52,7	1,409	0,0273	1,5	0,4	2,406	91	16.461	16.495	2,1	3,2	47.792	0,00578	0,0010	0,219	0,219	46,8128	0,00	0,1255	0,01
RD033	52,6	4,094	0,0046	1,6	0,4	4,129	103	26.826	26.890	2,1	3,2	69.739	0,01373	0,0020	0,199	0,364	110,8235	0,00	0,2763	0,01
RD083	44,5	0,514	0,0133	2,4	0,5	0,914	95	1.920	1.964	2,0	3,2	5.165	0,00318	0,0000	0,026	0,005	3,6295	0,00	0,0122	0,05
RD044	41,6	0,640	0,0048	1,4	0,4	0,809	134	3.245	3.316	2,7	4,3	18.896	0,00492	0,0002	0,074	0,047	9,4103	0,00	0,0359	0,01
RD045	42,0	1,154	0,0064	1,2	0,4	1,118	94	3.285	3.306	2,3	3,8	12.290	0,00348	0,0001	0,060	0,036	5,6743	0,01	0,0282	0,15
RD053	41,8	1,172	0,0301	1,3	0,5	1,106	121	4.182	4.272	2,0	3,3	10.887	0,00370	0,0000	0,043	0,036	4,4321	0,04	0,0333	0,02
RD058	37,1	1,257	0,0057	1,1	0,5	1,347	275	1.985	2.234	2,1	3,2	12.680	0,00203	0,0000	0,036	0,012	2,9298	0,03	0,0147	0,02
RD059	33,2	2,007	0,0050	1,4	0,5	1,864	124	940	1.009	2,2	2,8	4.299	0,00081	0,0046	0,013	0,000	0,8228	0,04	0,0046	0,01
RD067	26,8	0,778	0,0097	0,9	0,5	1,048	162	500	634	2,1	3,5	2.004	0,00068	0,0000	0,008	0,000	0,3801	0,04	0,0070	0,10

Parte da estatística descritiva dos dados pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

MÉD GEOMÉTRICA	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	70,1	0,116	0,0042	7,8	7,2	0,236	91	588	796	26,1	29,4	1.062	0,00122	0,0005	0,011	0,043	1,2044	0,22	0,0073	0,02
RD071	66,7	0,139	0,0042	7,6	7,2	0,357	95	389	582	26,3	30,0	640	0,00188	0,0005	0,008	0,041	0,6697	0,20	0,0053	0,02
RD072	66,8	0,187	0,0041	7,2	7,3	0,610	107	494	724	26,5	28,7	998	0,00139	0,0005	0,009	0,040	0,7233	0,20	0,0054	0,02
RD019	70,9	0,209	0,0045	6,6	7,1	0,566	122	535	733	26,1	27,1	1.418	0,00179	0,0005	0,009	0,041	0,8585	0,20	0,0055	0,03
RD023	72,8	0,229	0,0042	6,8	7,1	0,639	123	566	770	26,9	28,7	1.557	0,00185	0,0005	0,011	0,044	1,0391	0,20	0,0067	0,02
RD035	80,9	0,256	0,0043	6,3	7,2	0,659	117	573	783	27,4	29,2	1.395	0,00186	0,0005	0,012	0,045	1,0654	0,20	0,0072	0,03
RD033	104,2	0,246	0,0043	6,8	7,1	0,593	141	549	831	27,9	30,0	1.353	0,00198	0,0006	0,011	0,045	0,8641	0,20	0,0072	0,02
RD083	85,9	0,231	0,0042	4,6	7,0	0,535	113	202	421	28,4	29,1	657	0,00193	0,0005	0,010	0,041	0,3716	0,20	0,0062	0,03
RD044	90,7	0,226	0,0042	6,4	6,9	0,469	120	141	325	27,8	29,5	395	0,00153	0,0005	0,008	0,043	0,2547	0,20	0,0051	0,02
RD045	90,7	0,237	0,0042	6,6	7,0	0,502	103	152	335	27,8	29,1	378	0,00154	0,0005	0,008	0,042	0,2441	0,20	0,0052	0,03
RD053	93,0	0,273	0,0044	6,6	7,0	0,556	122	131	329	28,0	29,3	341	0,00136	0,0005	0,008	0,042	0,2147	0,20	0,0051	0,03
RD058	90,0	0,304	0,0042	6,9	7,1	0,537	129	159	381	27,8	29,8	368	0,00154	0,0005	0,009	0,041	0,2466	0,20	0,0056	0,03
RD059	89,6	0,304	0,0044	6,6	7,0	0,522	119	122	312	28,9	30,2	284	0,00141	0,0005	0,008	0,040	0,1682	0,20	0,0050	0,02
RD067	88,8	0,265	0,0042	7,2	6,9	0,363	119	71	230	28,4	31,1	170	0,00131	0,0005	0,007	0,040	0,0828	0,20	0,0046	0,03

PERCENTIL 25%	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	58,5	0,100	0,0040	7,4	6,9	0,178	59	112	176	25,0	28,3	181	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,3260	0,20	0,0040	0,02
RD071	60,0	0,100	0,0040	7,4	6,9	0,225	64	94	140	24,7	27,9	85	0,00127	0,0005	0,005	0,040	0,1744	0,20	0,0040	0,02
RD072	57,3	0,100	0,0040	7,2	6,9	0,381	62	81	145	25,8	26,1	94	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,1430	0,20	0,0040	0,02
RD019	57,4	0,100	0,0040	6,6	7,0	0,296	69	169	254	25,8	25,7	314	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,3565	0,20	0,0040	0,02
RD023	56,5	0,100	0,0040	7,2	6,8	0,302	76	139	206	26,5	26,7	246	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,2980	0,20	0,0040	0,02
RD035	64,4	0,100	0,0040	6,5	7,0	0,277	75	112	198	26,8	27,5	211	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,2760	0,20	0,0040	0,02
RD033	83,2	0,100	0,0040	7,2	6,8	0,256	100	102	222	27,1	27,7	165	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,2090	0,20	0,0040	0,02
RD083	66,6	0,100	0,0040	5,5	6,9	0,271	71	39	118	27,7	26,8	85	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0790	0,20	0,0040	0,02
RD044	71,6	0,100	0,0040	6,7	6,6	0,257	73	30	104	27,0	26,6	60	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0595	0,20	0,0040	0,02
RD045	71,9	0,100	0,0040	6,8	6,7	0,249	70	35	105	26,6	26,9	41	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0607	0,20	0,0040	0,02
RD053	72,8	0,107	0,0040	6,7	6,8	0,262	71	28	107	27,3	27,6	42	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0487	0,20	0,0040	0,02
RD058	72,6	0,100	0,0040	6,9	6,9	0,221	74	25	105	27,4	28,0	44	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0490	0,20	0,0040	0,02
RD059	74,9	0,100	0,0040	6,8	6,8	0,196	68	25	98	28,3	28,3	28	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0505	0,20	0,0040	0,02
RD067	69,4	0,100	0,0040	6,9	6,6	0,133	69	15	90	27,9	28,4	17	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0253	0,20	0,0040	0,02

Parte da estatística descritiva dos dados pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

PERCENTIL 50%	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	Zinco total
RD011	69,8	0,100	0,0040	7,7	7,3	0,232	98	294	384	26,6	29,8	893	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,8890	0,20	0,0040	0,02
RD071	68,0	0,100	0,0040	7,6	7,2	0,273	80	252	312	26,5	30,1	326	0,00183	0,0005	0,005	0,040	0,7010	0,20	0,0040	0,02
RD072	62,5	0,110	0,0040	7,6	7,5	0,551	102	676	750	26,5	29,3	1.118	0,00121	0,0005	0,005	0,040	0,6340	0,20	0,0040	0,02
RD019	61,8	0,117	0,0040	7,3	7,2	0,393	120	670	758	26,9	27,4	1.708	0,00193	0,0005	0,006	0,040	0,8890	0,20	0,0040	0,02
RD023	64,0	0,158	0,0040	7,6	7,3	0,536	100	644	930	27,6	28,9	1.686	0,00155	0,0005	0,008	0,040	0,7790	0,20	0,0040	0,02
RD035	71,6	0,221	0,0040	7,1	7,3	0,443	108	570	712	28,1	29,2	1.556	0,00165	0,0005	0,009	0,040	0,8320	0,20	0,0049	0,02
RD033	96,7	0,155	0,0040	7,7	7,1	0,430	124	510	660	28,4	30,0	1.571	0,00180	0,0005	0,007	0,040	0,7120	0,20	0,0040	0,02
RD083	79,1	0,128	0,0040	6,9	7,1	0,426	100	196	320	28,6	29,1	587	0,00120	0,0005	0,005	0,040	0,2325	0,20	0,0040	0,02
RD044	84,2	0,124	0,0040	7,1	7,0	0,387	100	108	210	28,4	29,6	415	0,00116	0,0005	0,005	0,040	0,2300	0,20	0,0040	0,02
RD045	85,7	0,135	0,0040	7,2	7,2	0,377	87	210	312	28,2	28,7	412	0,00111	0,0005	0,005	0,040	0,2090	0,20	0,0040	0,02
RD053	84,3	0,166	0,0040	7,1	7,2	0,485	107	145	274	28,2	29,2	393	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,1680	0,20	0,0040	0,02
RD058	82,1	0,172	0,0040	7,3	7,3	0,404	102	210	376	28,4	29,7	474	0,00109	0,0005	0,005	0,040	0,2870	0,20	0,0040	0,02
RD059	83,3	0,149	0,0040	7,2	7,1	0,405	103	158	324	29,3	30,0	298	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,1785	0,20	0,0040	0,02
RD067	88,5	0,120	0,0040	7,5	7,0	0,272	90	68	178	29,1	31,2	202	0,00100	0,0005	0,005	0,040	0,0824	0,20	0,0040	0,02

PERCENTIL 75%	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	Zinco total
RD011	79,9	0,111	0,0040	8,0	7,5	0,330	140	4.136	4.324	28,0	30,8	7.394	0,00142	0,0005	0,026	0,040	5,6720	0,20	0,0105	0,02
RD071	76,3	0,141	0,0040	7,9	7,6	0,557	132	1.688	1.830	28,2	32,8	6.058	0,00268	0,0005	0,012	0,040	2,4720	0,20	0,0059	0,02
RD072	70,8	0,316	0,0040	7,9	7,7	0,990	163	2.438	2.528	28,1	31,0	7.944	0,00190	0,0005	0,014	0,040	2,7100	0,20	0,0076	0,02
RD019	74,4	0,383	0,0040	7,6	7,4	1,072	200	1.230	1.450	27,5	29,2	5.269	0,00249	0,0005	0,012	0,040	1,8225	0,20	0,0055	0,02
RD023	80,1	0,446	0,0040	7,8	7,4	1,396	210	1.450	1.660	28,2	30,8	6.303	0,00254	0,0005	0,016	0,040	2,4700	0,20	0,0079	0,02
RD035	85,0	0,538	0,0040	7,4	7,4	1,654	190	1.930	2.120	28,8	31,2	6.199	0,00279	0,0005	0,020	0,040	2,8800	0,20	0,0097	0,03
RD033	122,7	0,482	0,0040	8,0	7,4	1,141	200	1.720	1.980	29,4	32,1	6.186	0,00301	0,0005	0,016	0,040	2,5100	0,20	0,0086	0,02
RD083	108,5	0,418	0,0040	7,2	7,3	0,984	170	1.140	1.250	29,8	31,6	4.759	0,00331	0,0005	0,017	0,040	2,0425	0,20	0,0082	0,02
RD044	110,4	0,478	0,0040	7,3	7,3	0,861	210	540	790	29,6	33,3	2.432	0,00190	0,0005	0,009	0,040	0,8040	0,20	0,0045	0,02
RD045	103,2	0,496	0,0040	7,4	7,3	0,861	150	530	740	29,7	31,8	2.543	0,00181	0,0005	0,009	0,040	0,7250	0,20	0,0040	0,02
RD053	106,7	0,557	0,0040	7,4	7,4	0,878	178	563	795	29,4	31,7	2.414	0,00178	0,0005	0,010	0,040	0,7500	0,20	0,0046	0,02
RD058	103,4	0,736	0,0040	7,5	7,4	1,505	215	760	998	29,2	31,3	2.429	0,00196	0,0005	0,015	0,040	0,8260	0,20	0,0062	0,03
RD059	100,8	0,762	0,0040	7,5	7,4	1,216	195	565	760	30,4	32,1	2.472	0,00185	0,0005	0,011	0,040	0,4625	0,20	0,0057	0,02
RD067	110,1	0,841	0,0040	7,8	7,2	1,304	180	305	570	30,0	33,7	1.849	0,00162	0,0005	0,008	0,040	0,2085	0,20	0,0040	0,02

Parte da estatística descritiva dos dados pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

COEF. CURTOSE	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	3,4	9,804	39,0000	0,5	-0,2	3,228	(0)	21	21	0,2	1,5	3	4,91182	39,0000	31,672	38,054	31,5305	16,72	27,7279	24,58
RD071	-0,4	16,103	45,0000	0,8	-0,4	5,776	6	13	13	-0,2	-0,2	8	#####	-2,0952	31,885	45,000	28,9087	-	24,9585	19,85
RD072	17,3	24,146	60,7866	30,7	0,0	21,246	1	56	56	0,7	-0,5	58	0,79285	-2,0690	3,950	-2,069	5,1987	60,00	5,7719	30,98
RD019	9,4	23,372	58,9581	11,7	0,3	49,611	0	53	53	2,0	1,1	59	#####	54,4803	31,967	28,031	43,3469	61,00	33,7700	23,15
RD023	7,8	59,984	54,0835	13,7	1,9	52,104	0	57	57	1,5	-0,1	38	#####	53,8703	25,443	60,662	60,6428	28,08	59,4669	13,20
RD035	5,4	52,651	60,9849	9,5	1,7	40,002	2	49	49	1,1	0,2	35	#####	58,6060	50,164	57,404	49,2243	-2,07	51,8652	11,82
RD033	3,6	60,064	33,2346	12,2	0,3	54,440	6	52	52	0,3	0,0	38	#####	59,2582	50,865	58,976	57,3170	-2,07	57,2837	2,03
RD083	3,6	7,320	60,9881	0,4	1,8	3,957	2	8	8	-0,1	-0,6	2	3,99341	-2,0702	7,101	25,250	16,8209	-2,07	11,1533	22,98
RD044	1,4	9,770	60,9093	13,9	-0,4	3,487	20	25	24	0,3	-0,5	45	#####	30,2932	26,120	26,862	41,7860	58,00	27,1776	16,99
RD045	2,0	31,295	60,7883	12,2	-0,4	14,146	3	27	26	0,4	-0,2	30	#####	58,0000	44,189	58,431	41,4240	58,00	47,7002	28,30
RD053	1,9	33,582	56,6800	10,9	0,2	17,428	8	40	39	0,5	0,3	34	#####	57,0000	34,857	54,672	40,8872	25,35	51,6303	7,92
RD058	1,9	7,861	58,1154	13,1	0,1	3,313	43	31	34	1,6	3,0	37	#####	38,8583	31,061	54,313	29,7749	33,04	37,5879	3,70
RD059	2,3	13,579	55,6995	6,1	0,3	7,523	5	16	15	0,5	-0,2	26	0,92546	55,9993	15,730	-2,075	11,8214	55,00	26,6449	11,01
RD067	-0,6	2,013	58,9769	1,0	1,0	2,066	12	10	11	2,1	-0,4	8	4,56999	-2,0816	13,253	-2,082	11,4611	51,00	41,4194	27,06

COEF. ASSIMETRIA	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	1,5	3,130	6,2450	1,0	-0,5	1,781	1	4	4	-0,8	-0,4	2	2,32454	6,2450	5,410	6,139	5,3961	4,02	4,9847	4,81
RD071	0,1	3,655	6,7082	0,5	-0,3	2,364	2	4	4	-0,5	-0,3	3	0,74399	-1,0348	5,368	6,708	5,0495	-	4,7685	4,37
RD072	3,6	4,351	7,7906	-4,7	-0,9	4,005	1	7	7	-0,3	0,4	8	1,27329	-1,0254	2,031	-1,025	2,2046	7,75	2,3765	5,56
RD019	3,0	4,194	7,6772	-3,1	-1,1	6,755	1	7	7	-1,3	0,2	8	2,82437	7,2697	5,532	5,379	6,2470	7,81	5,6694	4,68
RD023	2,8	7,715	7,2362	-3,6	-1,3	6,980	1	7	7	-1,4	0,0	6	7,56944	7,2222	4,947	7,779	7,7773	5,38	7,6966	3,53
RD035	2,4	7,036	7,8088	-2,8	-1,3	5,849	2	7	7	-1,2	0,3	6	7,05534	7,6022	6,923	7,502	6,8469	1,03	7,0626	2,99
RD033	1,9	7,723	5,7371	-3,4	-0,9	7,209	2	7	7	-0,8	0,1	6	7,63201	7,6538	6,982	7,633	7,4944	1,03	7,5077	1,78
RD083	1,8	2,598	7,8091	-1,4	-0,2	1,911	2	3	3	-0,5	0,1	2	2,07510	-1,0258	2,587	4,997	3,7365	1,03	3,1603	4,61
RD044	1,4	3,044	7,8018	-3,4	-0,5	1,996	4	5	5	-0,6	0,1	6	6,22182	5,5194	5,194	5,287	6,3048	7,62	5,2806	3,86
RD045	1,7	5,141	7,7907	-3,1	-0,7	3,308	2	5	5	-0,8	0,5	5	5,32317	7,6158	6,421	7,629	6,2057	7,62	6,7185	5,24
RD053	1,6	5,343	7,5196	-2,5	-0,2	3,593	2	6	6	-0,7	0,2	6	7,18216	7,5498	5,742	7,341	6,2164	5,14	7,0894	2,83
RD058	1,6	2,809	7,6002	-2,9	-0,7	1,953	6	5	5	-1,4	1,1	6	3,72228	6,1080	5,289	7,310	5,2312	5,65	5,8417	2,17
RD059	1,7	3,588	7,3784	-2,2	-0,3	2,697	2	4	3	-0,9	0,4	5	1,41929	7,4833	3,661	-1,028	3,2239	7,42	4,7887	3,28
RD067	0,5	1,679	7,6789	-0,9	-1,0	1,617	3	3	3	-1,4	0,4	3	2,08792	-1,0300	3,603	-1,030	3,3993	7,14	6,2347	5,10

Parte da estatística descritiva dos dados pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

Q3+1,5AIQ	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	Zinco total
RD011	112,16	0,13	0,004	8,90	8,50	0,56	262,25	#####	#####	32,45	34,49	#####	0,0020	0,0005	0,06	0,04	13,69	0,20	0,02	0,02
RD071	100,64	0,20	0,004	8,65	8,59	1,06	234,00	4.079,00	4.365,00	33,33	40,13	#####	0,0048	0,0005	0,02	0,04	5,92	0,20	0,01	0,02
RD072	90,87	0,64	0,004	8,95	8,90	1,90	313,63	5.972,63	6.101,25	31,43	38,25	#####	0,0032	0,0005	0,03	0,04	6,56	0,20	0,01	0,02
RD019	99,89	0,81	0,004	9,06	8,00	2,24	396,50	2.821,50	3.244,00	30,13	34,48	#####	0,0047	0,0005	0,02	0,04	4,02	0,20	0,01	0,02
RD023	115,64	0,97	0,004	8,66	8,41	3,04	411,00	3.416,50	3.841,00	30,79	36,95	#####	0,0049	0,0005	0,03	0,04	5,73	0,20	0,01	0,02
RD035	115,85	1,20	0,004	8,69	8,00	3,72	362,50	4.657,00	5.003,00	31,80	36,81	#####	0,0055	0,0005	0,04	0,04	6,79	0,20	0,02	0,05
RD033	181,93	1,06	0,004	9,20	8,29	2,47	350,00	4.147,00	4.617,00	32,88	38,71	#####	0,0060	0,0005	0,03	0,04	5,96	0,20	0,02	0,03
RD083	171,32	0,90	0,004	9,76	7,90	2,05	318,50	2.791,50	2.948,00	32,89	38,88	#####	0,0068	0,0005	0,03	0,04	4,99	0,20	0,01	0,03
RD044	168,59	1,05	0,004	8,20	8,29	1,77	415,50	1.305,00	1.819,00	33,34	43,29	5.988,86	0,0032	0,0005	0,02	0,04	1,92	0,20	0,01	0,03
RD045	150,05	1,09	0,004	8,30	8,24	1,78	270,00	1.272,50	1.692,50	34,36	39,05	6.294,08	0,0030	0,0005	0,01	0,04	1,72	0,20	0,00	0,03
RD053	157,63	1,23	0,004	8,53	8,38	1,80	337,25	1.364,63	1.827,75	32,43	37,73	5.972,08	0,0029	0,0005	0,02	0,04	1,80	0,20	0,01	0,03
RD058	149,54	1,69	0,004	8,40	8,12	3,43	426,50	1.862,50	2.336,25	31,74	36,39	6.005,06	0,0034	0,0005	0,03	0,04	1,99	0,20	0,01	0,04
RD059	139,56	1,75	0,004	8,61	8,34	2,75	385,50	1.375,00	1.753,00	33,46	37,90	6.136,79	0,0031	0,0005	0,02	0,04	1,08	0,20	0,01	0,03
RD067	171,11	1,95	0,004	9,21	8,11	3,06	346,50	740,00	1.290,00	33,03	41,60	4.596,33	0,0025	0,0005	0,01	0,04	0,48	0,20	0,00	0,02

Q3-1,5AIQ	Cond. elétr. <i>in loco</i>	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH <i>in loco</i>	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercurio total	Níquel total	Zinco total
RD011	47,71	0,09	0,004	7,10	6,55	0,10	17,75	-1.900,00	-1.898,75	23,45	27,06	#####	0,0008	0,0005	-0,01	0,04	-2,35	0,20	0,00	0,02
RD071	51,91	0,08	0,004	7,15	6,56	0,06	30,00	-703,00	-705,00	22,98	25,43	#####	0,0006	0,0005	0,00	0,04	-0,97	0,20	0,00	0,02
RD072	50,64	-0,01	0,004	6,85	6,50	0,08	11,38	-1.097,63	-1.046,25	24,68	23,70	#####	0,0006	0,0005	0,00	0,04	-1,14	0,20	0,00	0,02
RD019	48,89	-0,04	0,004	6,14	6,80	-0,09	3,50	-361,50	-344,00	24,88	23,98	#####	0,0003	0,0005	0,00	0,04	-0,38	0,20	0,00	0,02
RD023	44,61	-0,07	0,004	6,94	6,48	-0,25	9,00	-516,50	-521,00	25,61	24,65	#####	0,0002	0,0005	0,00	0,04	-0,79	0,20	0,00	0,02
RD035	54,15	-0,12	0,004	6,06	6,80	-0,41	17,50	-797,00	-763,00	25,80	25,64	#####	0,0001	0,0005	0,00	0,04	-1,03	0,20	0,00	0,01
RD033	63,43	-0,09	0,004	6,80	6,50	-0,19	50,00	-707,00	-657,00	25,98	25,44	#####	0,0000	0,0005	0,00	0,04	-0,94	0,20	0,00	0,02
RD083	45,63	-0,06	0,004	4,64	6,70	-0,09	21,50	-511,50	-448,00	26,66	24,33	#####	-0,0002	0,0005	0,00	0,04	-0,90	0,20	0,00	0,02
RD044	52,16	-0,09	0,004	6,40	6,26	-0,04	4,50	-225,00	-239,00	25,76	23,26	#####	0,0006	0,0005	0,00	0,04	-0,31	0,20	0,00	0,02
RD045	56,30	-0,10	0,004	6,50	6,42	-0,06	30,00	-212,50	-212,50	24,99	24,50	#####	0,0006	0,0005	0,00	0,04	-0,27	0,20	0,00	0,02
RD053	55,78	-0,12	0,004	6,28	6,43	-0,05	17,75	-239,63	-237,75	26,28	25,58	#####	0,0006	0,0005	0,00	0,04	-0,30	0,20	0,00	0,02
RD058	57,26	-0,22	0,004	6,60	6,68	-0,42	3,50	-342,50	-341,25	26,56	26,26	#####	0,0005	0,0005	0,00	0,04	-0,34	0,20	0,00	0,02
RD059	61,94	-0,23	0,004	6,44	6,46	-0,31	4,50	-245,00	-233,00	27,24	26,35	#####	0,0006	0,0005	0,00	0,04	-0,16	0,20	0,00	0,02
RD067	49,04	-0,27	0,004	6,44	6,30	-0,45	13,50	-130,00	-150,00	26,88	25,70	-898,33	0,0007	0,0005	0,00	0,04	-0,07	0,20	0,00	0,02

## Resultados do teste de AIQ para os dados de pós-rompimento (07/11/2015 a 15/03/2017)

% outliers sup.	Cond. elétr. in loco	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH in loco	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	5%	15%	3%	3%	0%	13%	0%	15%	15%	0%	8%	8%	10%	3%	15%	8%	10%	10%	15%	18%
RD071	0%	22%	2%	9%	0%	11%	11%	11%	11%	0%	0%	7%	0%	0%	11%	2%	11%	0%	11%	15%
RD072	16%	10%	3%	0%	0%	8%	6%	6%	6%	2%	0%	5%	2%	0%	8%	0%	6%	2%	8%	10%
RD019	16%	8%	5%	0%	0%	8%	0%	8%	8%	2%	5%	5%	5%	3%	8%	3%	6%	2%	18%	11%
RD023	13%	5%	5%	5%	0%	3%	2%	8%	8%	0%	0%	8%	6%	3%	8%	5%	8%	3%	8%	11%
RD035	15%	6%	5%	3%	0%	5%	3%	8%	8%	0%	0%	8%	8%	3%	8%	5%	10%	0%	8%	2%
RD033	11%	5%	5%	0%	0%	10%	6%	11%	8%	0%	0%	11%	3%	6%	10%	3%	8%	0%	13%	10%
RD083	6%	11%	3%	0%	2%	13%	6%	11%	11%	0%	0%	13%	15%	0%	15%	6%	11%	0%	15%	10%
RD044	11%	10%	3%	2%	0%	11%	3%	10%	8%	2%	0%	6%	10%	3%	11%	3%	6%	2%	18%	8%
RD045	11%	13%	5%	0%	0%	15%	6%	11%	11%	0%	0%	6%	11%	2%	13%	3%	10%	2%	21%	8%
RD053	14%	8%	7%	3%	2%	17%	7%	7%	7%	0%	0%	7%	3%	2%	8%	3%	7%	3%	15%	12%
RD058	10%	10%	5%	5%	2%	8%	5%	10%	10%	0%	2%	8%	8%	3%	10%	3%	8%	5%	12%	8%
RD059	10%	12%	13%	0%	0%	12%	7%	10%	10%	0%	0%	7%	8%	3%	12%	0%	12%	2%	8%	7%
RD067	0%	8%	5%	0%	0%	3%	8%	8%	5%	0%	0%	7%	7%	0%	8%	0%	8%	2%	13%	10%

% outliers inf.	Cond. elétr. in loco	Alumínio dissolvido	Cobre dissolvido	OD	pH in loco	Ferro dissolvido	SDT	SST	ST	T°C da água	T°C do ar	Turbidez	Arsênio total	Cádmio total	Chumbo total	Cromo total	Manganês total	Mercúrio total	Níquel total	Zinco total
RD011	5%	0%	0%	0%	15%	13%	0%	0%	0%	13%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD071	15%	0%	0%	15%	13%	0%	0%	0%	0%	7%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD072	13%	0%	0%	11%	6%	0%	0%	0%	0%	13%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD019	6%	0%	0%	11%	23%	0%	0%	0%	0%	19%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD023	3%	0%	0%	11%	6%	0%	0%	0%	0%	21%	11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD035	6%	0%	0%	11%	16%	0%	0%	0%	0%	16%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD033	6%	0%	0%	13%	11%	0%	0%	0%	0%	16%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD083	3%	0%	0%	21%	16%	0%	0%	0%	0%	16%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD044	5%	0%	0%	19%	10%	0%	0%	0%	0%	21%	6%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD045	5%	0%	0%	19%	16%	0%	2%	0%	0%	11%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD053	2%	0%	0%	22%	15%	0%	0%	0%	0%	19%	12%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD058	3%	0%	0%	17%	17%	0%	0%	0%	0%	20%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD059	7%	0%	0%	20%	13%	0%	0%	0%	0%	18%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD067	2%	0%	0%	17%	13%	0%	0%	0%	0%	18%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%



## APÊNDICE II

### **Análise da correlação com o tempo por estação de monitoramento após o rompimento**

Os dados utilizados para o teste de *Mann-Kendall* estão compreendidos entre o início do monitoramento pós-rompimento (novembro de 2015) e meados do mês de março de 2017. Para que os resultados do teste de MK possam ser visualizados com detalhes, as tabelas foram disponibilizadas no final do Apêndice II.

Conforme o esperado, a maior parte dos parâmetros monitorados em cada estação apresentou correlação com o tempo. Dessa forma, as análises serão voltadas para aqueles parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo.

A seguir, os resultados serão apresentados de montante para jusante a partir do ponto de rompimento da barragem de rejeitos.

#### **Estação RD011**

A estação é RD011 é a primeira estação de monitoramento a jusante do ponto de rompimento da barragem de rejeitos. Essa estação está localizada no rio Gualaxo do Norte no município de Barra Longa-MG.

O monitoramento da estação RD011 iniciou-se com sua criação, apenas no dia 25/11/2015, como já mencionado, devido à necessidade de complementar as análises que estavam sendo feitas para as outras estações a jusante. Esses 20 dias iniciais sem monitoramento, acabou por descaracterizar o impacto imediato causado com a chegada da pluma. Como, ao se analisar o parâmetro OD pelo teste de MK, este não apresentou correlação com o tempo, já que no primeiro dia de monitoramento da estação RD011, o valor medido já estava normalizado de 7,1 mg/L O<sub>2</sub> e se manteve próximo desse valor com o passar do tempo. Apesar de não ter apresentado correlação com o tempo, o valor da estatística do teste (Tau de *Kendall*) apresentou-se positivo, ou seja, pode haver uma tendência da elevação da concentração de OD com o tempo.

Além do OD, o pH *in loco* e os metais cobre dissolvido, ferro dissolvido, cádmio total e zinco total também não apresentaram correlação com o tempo, apesar de terem apresentado tendência

de redução de acordo com a estatística do teste (Tau de *Kendall*). Com relação ao parâmetro cobre dissolvido, não foi verificada tendência de correlação com o tempo, pois o único valor acima de 0,004 mg/L Cu (valor medido desde o primeiro dia de monitoramento) foi registrado em 25/04/2016 como 0,04 mg/L, podendo inclusive representar um erro de reporte de informação associado à casa decimal. Já o parâmetro ferro dissolvido, não apresentou correlação com o tempo por oscilar. Como por exemplo, no primeiro dia de monitoramento da estação, foi registrado um valor de 0,1656 mg/L Fe, contra um valor de 0,431 mg/L Fe em 02/12/2015, uma semana após a primeira mediação. E ainda, voltou a ser registrado um valor inferior no dia seguinte: 0,199 mg/L Fe em 03/12/2015.

O parâmetro cádmio total também não apresentou correlação com o tempo, pois no dia 19/01/2016 foi medido um valor diferente e superior ao monitorado até então para todo o período: 0,00078 mg/L Cd. Ou seja, antes e depois de 19/01/2016 só foram registrados valores de cádmio total inferiores a 0,0005 mg/L Cd.

O zinco total também não apresentou correlação com o tempo, devido às oscilações de concentração com o tempo. Contudo, o maior valor de 0,1271 mg/L Zn foi medido em 19/01/2016, sendo esta a primeira data de medição deste parâmetro em específico. Nota-se que a maior parte (74%) das medições apresentou valores menores que LD que é de 0,02 mg/L Zn.

Ressalta-se que no dia 19/01/2016, foi registrado o maior valor de zinco total da série e também o maior valor para outros parâmetros: níquel total, manganês total, cromo total, chumbo total, cádmio total, sólidos em suspensão totais, sólidos sedimentáveis, sólidos totais e condutividade elétrica *in loco*.

### **Estação RD071**

A estação RD071 é a única estação de monitoramento do rio do Carmo, localizada no município de Barra Longa-MG.

O monitoramento da estação RD071 iniciou-se apenas no dia 21/11/2015, como já mencionado, justamente devido à dificuldade da equipe de monitoramento de se aproximar do local de coleta das amostras de qualidade das águas. Portanto, de forma semelhante à estação RD011, os parâmetros cobre dissolvido, OD, pH *in loco*, cromo total e zinco total não apresentaram correlação com o tempo. Apesar de terem apresentado tendência de redução de acordo com a

estatística do teste (Tau de Kendall) para todos exceto o OD, cujo Tau de Kendall apresentou tendência de aumento da concentração. Além disso, ressalta-se que não foi possível aplicar o teste de *Mann-Kendall* para cádmio total e para o mercúrio total, pois todas as medições no período pós-rompimento foram inferiores ao limite de detecção do método, menor que 0,04 mg/L Cr e menor que 0,02 mg/L Hg.

Dentre os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo, nota-se em especial o arsênio total que, apesar de também não apresentar correlação com o tempo ( $p$ -valor = 0,34), apresentou estatística do teste (Tau de Kendall) positiva, ou seja, indicando uma tendência de aumento da concentração com tempo. A concentração de arsênio medida pela estação RD071 no rio do Carmo registrou valores acima do LD de 21/11/2015 (primeiro dia de monitoramento após o rompimento) até 19/01/2016 e depois voltou a apresentar valores acima do LD de informa intermitente após 01/08/2016 até o final da data de monitoramento do banco de dados selecionado.

### **Estação RD072**

A estação RD072 é a primeira estação localizada no rio Doce após o ponto de rompimento da barragem, localizada entre os municípios de Rio Doce-MG e Santa Cruz do Escalvado-MG.

Essa estação começou a ser monitorada pelo monitoramento emergencial do IGAM no dia 07/11/2015, com a chegada da onda de rejeitos, tanto que o OD medido neste dia foi de 0,6 mg/L, voltando a atingir 6,77 mg/L dois dias depois e não voltando a reduzir para concentrações próximas de condições anóxicas. A correlação deste parâmetro com o tempo é evidente ( $p < 0,0001$ ) e a tendência de aumento das concentrações de OD com o tempo também (Tau de Kendall = 0,35). Comportamento semelhante é observado para os parâmetros que demonstraram tendência de estabelecer as condições de pré-rompimento com o passar do tempo.

Poucos parâmetros não apresentaram correlação com o tempo: cádmio e cromo total, por não apresentarem qualquer valor diferente de inferior ao LD, sendo de  $< 0,0005$  mg/L Cd e  $< 0,04$  mg/L Cr. Além destes dois parâmetros, cobre dissolvido, mercúrio total e zinco total foram os outros parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo. Ressalta-se contudo, que o cobre dissolvido e o mercúrio total apresentaram tendência de redução com o tempo e o zinco total apresentou uma tendência de aumento com o tempo.

O zinco total não chegou a atingir 0,18 mg/L (limite DN COPAM CERH-MG 01/08) desde o primeiro dia de medição em 20/01/2016 até 13/02/2017. Contudo, no dia 01/03/2017, o valor monitorado foi registrado como 0,539 mg/L Zn, valor vinte e seis vezes superior à média do ano anterior de medição. Ressalta-se que cinco dias depois, já no dia 06/03/2016, o zinco total volta a ser medido na mesma ordem de grandeza que as medições anteriores: 0,02 mg/L Zn.

O mercúrio total foi medido quase sempre como inferior ao LD (<0,2 mg/L Hg), com exceção do dia 18/11/2015 que este foi medido como 0,293 mg/L Hg. O cobre dissolvido apresentou observações semelhantes, sendo quase sempre medido como inferior ao LD (< 0,004 mg/L), com exceção do dia 25/04/2016, cuja medição foi registrada como 0,0285 mg/L Cu.

### **Estação RD019**

A estação RD019 é localizada entre os municípios de Rio Casca-MG e São Domingos do Prata-MG.

Com exceção de três parâmetros, todos os outros apresentaram correlação com o tempo (p-valor<0,05). Essa estação começou a ser monitorada no dia 07/11/2015, dois dias após o rompimento e já registrou o impacto da chegada da onda de rejeitos na qualidade das águas com a redução da concentração de OD para valores menores que 0,5 mg/L e elevação dos demais parâmetros (como por exemplo: ferro dissolvido alcançou 18,73 mg/L).

Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram cobre dissolvido, cádmio total, mercúrio total e zinco total, semelhantemente ao que foi encontrado no teste de MK para a estação RD072.

Com relação ao cobre dissolvido, durante toda a série do período pós-rompimento, foram apresentados apenas dois registros não iguais aos registros das demais medições (que foram todas baixo do LD, ou seja, <0,004 mg/L Cu). Sendo um dos registros no primeiro dia do monitoramento após o rompimento (0,675 mg/L Cu em 07/11/2015); e o outro em 26/04/2016 (0,0163 mg/L Cu).

O cádmio total também apresentou quase todas as medições inferiores ao LD (<0,0005 mg/L Cd), com exceção de duas: uma no dia 10/11/2015 igual a 0,00105 mg/L Cd e outra no dia 29/11/2015 igual a 0,00063 mg/L. De forma semelhante, o mercúrio total apresentou apenas

uma medição diferente das demais que foram todas inferiores ao LD ( $<0,20$  mg/L Hg): a medição do dia 07/11/2015 que foi igual a 0,239 mg/L. Por fim, o zinco total apresentou 77% abaixo do LD ( $<0,02$  mg/L Zn). O restante das medições acima do LD foram todas abaixo de 0,1 mg/L (o que é abaixo do limite de 0,18 mg/L Zn estabelecido pela DN COPAM CERH-MG 01/08) com exceção da medição do dia 06/01/2016 (sendo esta correspondente ao maior *outlier*: 24 mg/L).

### **Estação RD023**

A estação RD023 é localizada entre os municípios de Marliéria-MG e Pingo D'Água-MG.

Semelhantemente à estação RD019 e à estação RD072, a estação RD023 apresentou correlação temporal para quase todos parâmetros ( $p$ -valor $<0,05$ ), com exceção de três: cobre dissolvido, mercúrio total e zinco total.

Essa estação começou a ser monitorada no dia 07/11/2015, dois dias após o rompimento e já registrou o impacto da chegada da onda de rejeitos na qualidade das águas com a redução da concentração de OD para valores menores que 0,5 mg/L e elevação dos demais parâmetros. Como por exemplo: ferro dissolvido alcançou 23,6 mg/L Fe, o alumínio dissolvido alcançou 23,2 mg/L Al, o manganês total alcançou 936 mg/L Mn e o níquel alcançou 2,28 mg/L Ni etc. Todos já apresentaram forte redução (de até 230 vezes, como no caso do alumínio dissolvido) um ou dois dias depois.

Com relação ao cobre dissolvido, extremamente semelhante à estação RD019, durante toda a série do período pós-rompimento, foram apresentados apenas dois registros não iguais aos registros das demais medições (que foram todas baixo do LD, ou seja,  $<0,004$  mg/L Cu). Sendo um dos registros no primeiro dia do monitoramento após o rompimento (0,0108 mg/L Cu em 07/11/2015); e o outro em 26/04/2016 (0,0321 mg/L Cu).

De forma semelhante, o mercúrio total apresentou apenas duas medições diferentes das demais que foram todas inferiores ao LD ( $<0,20$  mg/L Hg): a medição do dia 18/11/2015 que foi igual a 0,225 mg/L e a do dia 02/02/2016 que foi igual a 0,229 mg/L. Por fim, exatamente como a estação RD019, o zinco total apresentou 77% abaixo do LD ( $<0,02$  mg/L Zn). O restante das medições acima do LD foram todas abaixo de 0,1 mg/L (o que é abaixo do limite de 0,18 mg/L Zn estabelecido pela DN COPAM CERH-MG 01/08) e ocorreram todas a partir de 2016.

O cádmio total apresentou correlação com o tempo e tendência de redução por ter apresentado duas medições acima do LD logo no início do período de monitoramento: uma no dia 07/11/2015 igual a 0,0135 mg/L Cd e outra no dia 10/11/2015 igual a 0,00373 mg/L.

### **Estação RD035**

A estação RD035 é localizada a jusante da cidade de Ipatinga-MG.

Semelhantemente às estações RD023, RD019 e RD072, a estação RD035 apresentou correlação temporal para quase todos parâmetros ( $p$ -valor $<0,05$ ), com exceção de três: cobre dissolvido, mercúrio total e zinco total.

Essa estação começou a ser monitorada no dia 08/11/2015, três dias após o rompimento e já registrou o impacto da chegada da onda de rejeitos na qualidade das águas com a redução da concentração de OD para valores menores que 0,5 mg/L e elevação dos demais parâmetros. Como por exemplo: ferro dissolvido alcançou 18 mg/L Fe, o alumínio dissolvido alcançou 11 mg/L Al, o manganês total alcançou 351 mg/L Mn e o níquel alcançou 0,951 mg/L Ni etc. Todos já apresentaram forte redução de até 20 vezes, como no caso do ferro dissolvido já no dia 09/11/2015.

Com relação ao cobre dissolvido, extremamente semelhante às estações RD019 e RD023, durante toda a série do período pós-rompimento, foram apresentados apenas dois registros não iguais aos registros das demais medições (que foram todas abaixo do LD, ou seja,  $<0,004$  mg/L Cu). Sendo um dos registros no primeiro dia do monitoramento após o rompimento (0,0061 mg/L Cu em 08/11/2015); e o maior *outlier* no dia 26/04/2016 (0,217 mg/L Cu).

Com relação ao mercúrio total, não foi possível calcular o teste de MK, pois todas as medições para o período pós rompimento foram inferiores ao LD ( $<0,20$  mg/L Hg). Por fim, o zinco total apresentou 55% das medições abaixo do LD ( $<0,02$  mg/L Zn). O restante das medições acima do LD foram todas abaixo de 0,1 mg/L (o que é abaixo do limite de 0,18 mg/L Zn estabelecido pela DN COPAM CERH-MG 01/08) e ocorreram todas a partir de 2016.

O cádmio total e o cromo total começaram a apresentar medições abaixo do LD já no dia 10/11/2015, dois dias após o início do monitoramento. Já o arsênio total, começou a apresentar medições abaixo do LD apenas a partir de 02/02/2016, mas voltando a apresentar valores acima

do LD em 20/11/2016, valores estes que apesar de acima do LD permaneceram abaixo do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08. O único valor monitorado de arsênio acima do limite da DN COPAM CERH-MG 01/08 foi registrado em 08/11/2015 (0,0455 mg/L).

### **Estação RD033**

A estação RD033, localizada entre os municípios de Belo Oriente-MG e Bugre-MG, apresentou o seguinte resultado do teste de MK.

Semelhantemente às estações RD035, RD023, RD019 e RD072, a estação RD033 apresentou correlação temporal para quase todos parâmetros ( $p$ -valor $<0,05$ ), com exceção de três: cobre dissolvido, mercúrio total e zinco total.

Essa estação começou a ser monitorada no dia 08/11/2015, três dias após o rompimento e já registrou o impacto da chegada da onda de rejeitos na qualidade das águas com a redução da concentração de OD para valores menores que 0,5 mg/L e elevação dos demais parâmetros. Como por exemplo: ferro dissolvido alcançou 32,26 mg/L Fe, o alumínio dissolvido alcançou 32,2 mg/L Al, o manganês total alcançou 857 mg/L Mn e o níquel alcançou 2,13 mg/L Ni etc. Todos já apresentaram forte redução de até 242 vezes, como no caso do alumínio dissolvido já no dia 09/11/2015.

Com relação ao cobre dissolvido, extremamente semelhante às estações RD035, RD019 e RD023, durante toda a série do período pós-rompimento, foram apresentados apenas dois registros não iguais aos registros das demais medições (que foram todas abaixo do LD, ou seja,  $<0,004$  mg/L Cu). Sendo um dos registros no primeiro dia do monitoramento após o rompimento (0,0343 mg/L Cu em 08/11/2015); e outro no dia 26/04/2016 (0,0238 mg/L Cu).

Exatamente como na estação RD035, com relação ao mercúrio total, não foi possível calcular o teste de MK, pois todas as medições para o período pós rompimento foram inferiores ao LD ( $<0,20$  mg/L Hg). Por fim, o zinco total apresentou 67% das medições abaixo do LD ( $<0,02$  mg/L Zn). O restante das medições acima do LD foram todas abaixo de 0,1 mg/L (o que é abaixo do limite de 0,18 mg/L Zn estabelecido pela DN COPAM CERH-MG 01/08) e ocorreram todas a partir de 2016.

O cádmio começou a apresentar medições abaixo do LD de forma ininterrupta já no dia 13/11/2015 e o cromo total já no dia 10/11/2015, dois dias após o início do monitoramento. Já o arsênio total, começou a apresentar medições abaixo do LD apenas a partir de 02/02/2016, exatamente como a estação RD035, mas voltando a apresentar valores acima do LD em 11/10/2016, valores estes que apesar de acima do LD permaneceram abaixo do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08. O único valor monitorado de arsênio acima do limite da DN COPAM CERH-MG 01/08 foi registrado em 08/11/2015 (0,108 mg/L).

### **Estação RD083**

A estação RD083 é localizada entre os municípios de Fernandes Tourinho-MG e Periquito-MG.

A estação RD083 já se localiza mais a jusante no trecho de estudo e é a partir dela que são observados resultados mais destoantes dos resultados obtidos para as estações a montante.

O monitoramento dessa estação se iniciou no dia 08/11/2015, mas só no dia 09/11/2015, com a chegada da onda de rejeitos, que é possível notar o impacto. Como por exemplo, o OD sofre depleção para valores inferiores a 0,5mg/L apenas no dia 09/11/2015. Com relação ao parâmetro ferro dissolvido, nota-se que o valor máximo medido nesta estação não é o do dia 09/11/2015 (2,359 mg/L Fe) que já foi maior do que a medição do dia anterior (0,0865 mg/L Fe). O valor máximo medido para ferro dissolvido é o do dia 24/11/2015 (4,583 mg/L). Contudo, comparando o valor máximo de ferro medido nesta estação com os valores máximos medidos nas estações a montante, que são muito superiores (32 mg/L na RD033, 18 mg/L na RD035, 23,6 mg/L na RD023 etc), a estação RD083 foi menos impactada com a chegada da onda de rejeitos.

Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o cobre dissolvido, o pH *in loco*, o zinco total e ainda, o cádmio e o mercúrio total por não apresentarem nenhuma medição acima do LD no período de análise do pós-rompimento.

Novamente, como nas demais estações, o cobre dissolvido não apresentou correlação com o tempo, devido a uma medição de alta concentração (0,108 mg/L Cu) realizada em 27/04/2016. Ressalta-se que as demais medições para o período pós-rompimento foram inferiores ao LD.



Para o zinco total, 71% das medições se encontraram abaixo do LD. Contudo, as demais medições estiveram distribuídas no tempo. Ressalta-se também que apenas uma medição foi acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08, a do dia 29/03/2016 cujo valor monitorado foi de 0,2638 mg/L Zn.

#### **Estação RD044**

A estação RD044 é localizada em Governador Valadares-MG.

O monitoramento dessa estação se iniciou no dia 08/11/2015, mas só no dia 10/11/2015, com a chegada da onda de rejeitos, um dia depois do que foi na estação RD083 a montante, que é possível notar o impacto. Como por exemplo, o OD sofre depleção para valores inferiores a 0,5mg/L apenas no dia 10/11/2015. Com relação ao parâmetro ferro dissolvido, nota-se que o valor máximo medido nesta estação não é o do dia 10/11/2015 (2,447 mg/L Fe) que já foi maior do que a medição do dia anterior (0,0677 mg/L Fe). O valor máximo medido para ferro dissolvido é o do dia 12/11/2015 (3,49 mg/L). Contudo, comparando o valor máximo de ferro medido nesta estação com os valores máximos medidos nas primeiras estações a montante mais próximas do ponto de rompimento, que são muito superiores (32 mg/L na RD033, 18 mg/L na RD035, 23,6 mg/L na RD023 etc), a estação RD044, assim como a RD083, foi menos impactada com a chegada da onda de rejeitos.

Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o cobre dissolvido, o pH *in loco*, o mercúrio total e o zinco total.

Novamente, como nas demais estações, o cobre dissolvido não apresentou correlação com o tempo, devido a uma medição de alta concentração (0,0416 mg/L Cu) realizada em 27/04/2016. Ressalta-se que as demais medições para o período pós-rompimento foram inferiores ao LD.

O mercúrio total não apresentou correlação com o tempo por apresentar uma única medição acima do LD (0,2 mg/L Hg). Essa medição foi de 0,225 mg/L Hg em 18/11/2015. Ressalta-se que o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 é de 0,2 mg/L Hg.

Para o zinco total, exatamente como na estação RD083 a montante, 71% das medições se encontraram abaixo do LD. Contudo, as demais medições estiveram distribuídas no tempo e nenhuma medição foi acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08. O que

mostra essa estação menos impactada com relação ao parâmetro zinco total com relação às demais estações a montante.

### **Estação RD045**

A estação RD045 é localizada a jusante de Governador Valadares-MG.

A estação RD045 começou a ser monitorada no dia 07/11/2015, mas apenas no dia 11/11/2015 que a onda de rejeitos atingiu esse ponto. Em 11/11/2015, o OD atingiu valores menores de 0,05 mg/L O<sub>2</sub>, retomando para 5,1 mg/L já no dia 13/11/2015, ou seja, acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08. Além do OD, no dia 11/11/2015, valores antes medidos inferiores ao LD para o alumínio dissolvido, cobre dissolvido, cádmio total e cromo total apresentaram valores maiores que o LD. Superando inclusive o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 para o alumínio dissolvido, cádmio total e cromo total, mas permanecendo acima desse limite por um ou dois dias e voltando a valores inferiores ao LD, com exceção do alumínio dissolvido cujos valores ainda permaneceram acima do limite da DN COPAM CERH-MG 01/08 até 20/01/2016.

De forma semelhante ao observado nas estações RD083 e RD044, os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o cobre dissolvido, o pH *in loco*, o cádmio total, o mercúrio total e o zinco total.

Novamente, como nas demais estações, o cobre dissolvido não apresentou correlação com o tempo, devido a uma medição de alta concentração (0,0543 mg/L Cu) realizada em 27/04/2016. Foi observado também outro valor acima do LD em 11/11/2015 (0,0058 mg/L Cu). Ressalta-se que as demais medições para o período pós-rompimento foram inferiores ao LD.

O cádmio total apresentou apenas um valor acima LD que foi em 11/11/2015 o valor de 0,00148 mg/L Cd. Após esse período, até o fim da série adotada para este estudo, o valor medido sempre esteve abaixo do LD (<0,0005 mg/L Cd) para esta estação. O mercúrio total também não apresentou correlação com o tempo por apresentar uma única medição acima do LD (0,2 mg/L Hg). Essa medição foi de 0,259 mg/L Hg em 18/11/2015, mesma data em que houve um registro acima do LD na estação RD044 a montante. Ressalta-se que o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 é de 0,2 mg/L Hg.

Para o zinco total, semelhante ao observado nas estações RD044 e RD083 a montante, 68% das medições se encontraram abaixo do LD. Contudo, as demais medições estiveram distribuídas no tempo e apenas uma medição foi acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08, a medição do dia 14/12/2016 que registrou 0,861 mg/L Zn.

### **Estação RD053**

A estação RD053, localizada a jusante do rio Suaçuí Grande entre Galileia-MG e Tumiritinga-MG.

A estação RD053 começou a ser monitorada no dia 10/11/2015, mas apenas no dia 12/11/2015 que a onda de rejeitos atingiu esse ponto. Em 12/11/2015, o OD atingiu valores menores de 0,05 mg/L O<sub>2</sub>, retomando para 6,2 mg/L já no dia 14/11/2015, ou seja, acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08. Além do OD, no dia 12/11/2015, valores antes medidos inferiores ao LD para o cobre dissolvido, o cádmio total e o cromo total apresentaram valores maiores que o LD. Superando inclusive o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 para o cromo total, mas permanecendo acima desse limite dois dias e voltando a valores inferiores ao LD. Além disso, no dia 14/11/2015, o mercúrio total registrou o primeiro valor acima do LD, que foi de 0,397 mg/L Hg, maior inclusive que o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 (<0,2 mg/L Hg).

De forma semelhante ao observado nas estações RD083, RD044 e RD045, os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o cobre dissolvido, o pH *in loco*, o cádmio total e o zinco total.

Novamente, como nas demais estações, o cobre dissolvido não apresentou correlação com o tempo, devido a uma medição de alta concentração (0,231 mg/L Cu) realizada em 27/04/2016. Foi observado também outros dois valores acima do LD em 20/01/2016 (0,0157 mg/L Cu) e em 13/11/2015 (0,0041 mg/L Cu), sendo que nesta última data, também houve um registro de alta concentração de cobre dissolvido no trecho monitorado pela estação RD045 a montante. Ressalta-se que as demais medições para o período pós-rompimento foram inferiores ao LD.

O cádmio total apresentou apenas um valor acima LD que foi em 12/11/2015 o valor de 0,00085 mg/L Cd, semelhante ao que foi observado na estação RD045 a montante. Após esse período,

até o fim da série adotada para este estudo, o valor medido sempre esteve abaixo do LD (<0,0005 mg/L Cd) para esta estação.

Para o zinco total, semelhante ao observado nas estações RD045, RD044 e RD083 a montante, 74% das medições se encontraram abaixo do LD. Contudo, as demais medições estiveram distribuídas no tempo e nenhuma medição registrou valor superior ao limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08.

### **Estação RD058**

A estação RD058 é localizada na cidade de Conselheiro Pena-MG. A estação RD058 começou a ser monitorada no dia 10/11/2015, mas apenas no dia 13/11/2015 que a onda de rejeitos atingiu esse ponto. Em 12/11/2015, o OD começou a reduzir (5 mg/L O<sub>2</sub>) e atingiu o menor valor no dia seguinte 1,1 mg/L O<sub>2</sub> com a chegada da onda de rejeitos, retomando para 5,72 mg/L já no dia 15/11/2015, ou seja, acima do limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08. Além do OD, no dia 13/11/2015, valores antes medidos inferiores ao LD para o cobre dissolvido, o cádmio total e o cromo total apresentaram valores maiores que o LD. Superando inclusive o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 para o cromo total, mas permanecendo acima desse limite dois dias e voltando a valores inferiores ao LD. Além disso, no dia 14/11/2015, o mercúrio total registrou o primeiro valor acima do LD, que foi de 0,402 mg/L Hg, maior inclusive que o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 (<0,2 mg/L Hg).

Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o cobre dissolvido, o pH *in loco* e o zinco total.

Novamente, como nas demais estações, o cobre dissolvido não apresentou correlação com o tempo, devido a uma medição de alta concentração (0,0479 mg/L Cu) realizada em 28/04/2016. Foi observado também outro valor acima do LD em 13/11/2015 (0,0076 mg/L Cu), sendo que nesta última data, também houve um registro de alta concentração de cobre dissolvido no trecho monitorado pelas estações RD053 e RD045 a montante. Ressalta-se que as demais medições para o período pós-rompimento foram inferiores ao LD.

Para o zinco total, semelhante ao observado nas estações RD053, RD045, RD044 e RD083 a montante, 67% das medições se encontraram abaixo do LD. Contudo, as demais medições

estiveram distribuídas no tempo e nenhuma medição registrou valor superior ao limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08.

### **Estação RD059**

A estação RD059 é a penúltima estação de monitoramento do trecho em estudo, localizada a jusante da cidade de Resplendor-MG. Dessa forma, já é possível notar que a partir dela, um número maior de parâmetros de qualidade das águas não sofreu impacto com o rompimento da barragem. Tanto que não há correlação dos mesmos com o tempo.

A estação RD059 começou a ser monitorada no dia 10/11/2015, mas apenas no dia 15/11/2015 que a onda de rejeitos atingiu esse ponto. Em 13/11/2015, o OD começou a reduzir (5,7 mg/L O<sub>2</sub>) e atingiu o menor valor dois dias depois 1,7 mg/L O<sub>2</sub> com a chegada da onda de rejeitos, retomando para o primeiro valor acima de 5 mg/L (limite DN COPAM CERH-MG 01/08) apenas no dia 20/11/2015.

Além do OD, no dia 13/11/2015, valores antes medidos inferiores ao LD para o alumínio dissolvido e para o cobre dissolvido começaram a apresentar valores maiores que o LD. Além desses dois parâmetros, o cádmio total e o mercúrio total apresentaram um valor acima do LD no dia 18/11/2015. Superando inclusive o limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08 para o alumínio dissolvido, cádmio total e mercúrio total, mas estes dois últimos metais permaneceram acima do limite da DN COPAM CERH-MG 01/08 apenas um dia e já voltaram a registrar valores inferiores ao LD.

Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o pH *in loco*, sólidos em suspensão, cádmio total, mercúrio total, zinco total e ainda, o cromo total, este por não apresentar nenhuma medição superior ao LD (<0,04 mg/L Cr).

Primeiramente, é importante ressaltar que pelo fato da onda de rejeitos de minério ter chegado nessa estação com menor intensidade, não houve aqui um pico de alta concentração para os parâmetros impactados com duração de um ou dois dias como houve nas demais estações a montante. Houve entretanto, algumas medições de *outliers* (menos discrepantes dos demais registros do banco de dados) e conseqüentemente, esses valores altos de concentração permaneceram por mais tempo, devido a maior lentidão de passagem da onda.

Tem-se portanto que, na estação RD059, por não terem ocorridos *outliers* bem demarcados com a chegada da pluma de rejeitos, o teste de MK não detectou correlação com o tempo para diversos parâmetros.

Com relação ao parâmetro sólidos em suspensão, valores elevados entre 500 e 3.000 mg/L foram medidos desde a chegada da pluma até o final do mês de novembro de 2015. Contudo, frequentemente ainda foram observados valores acima de 1.000mg/L até o final do mês de janeiro de 2016, atingindo 2.652 mg/L de sólidos em suspensão no dia chuvoso de 21/01/2016. Tem-se por fim que valores da ordem de  $10^2$  mg/L voltaram a ser observados no final do ano de 2016 com as primeiras chuvas do verão.

Com relação ao parâmetro cádmio total, em toda a série, apenas uma medição (no dia 18/11/2015 cujo valor medido foi de 0,0346 mg/L Cd), foi acima do LD (<0,0005 mg/L Cd). Para o cromo total, não foi medido nenhum valor acima do LD (<0,04 mg/L Cr), por esse motivo o teste de MK não conseguiu ser calculado.

Para o mercúrio total, foi registrado um valor acima do LD (<0,2 mg/L Hg) no dia 18/11/2015, sendo esse valor igual a 0,529 mg/L Hg. Apesar de, pelo teste de MK, esse parâmetro não ter correlação com tempo, pela estatística do teste é observada uma tendência de redução da concentração desse parâmetro com o tempo (Tau de Kendall < 0).

Para o zinco total, semelhante ao observado nas estações RD053, RD045, RD044 e RD083 a montante, 71% das medições se encontraram abaixo do LD. Contudo, as demais medições estiveram distribuídas no tempo e nenhuma medição registrou valor superior ao limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08.

### **Estação RD067**

A estação RD067 é a última estação de monitoramento do trecho em estudo, localizada entre Aimorés-MG e Baixo Guandu-ES. Dessa forma, como na estação RD059, um número maior de parâmetros de qualidade das águas não sofreu impacto com o rompimento da barragem, não apresentando portanto, correlação com o tempo.

A estação RD067 começou a ser monitorada no dia 10/11/2015, mas apenas entre os dias 17 e 18/11/2015 os parâmetros monitorados começaram a apresentar o impacto da chegada da pluma

de rejeitos. O menor valor de OD foi registrado em 18/11/2015 como 4,4 mg/L O<sub>2</sub>, sendo este o único valor abaixo do limite DN COPAM CERH-MG 01/08 de 5 mg/L.

Com relação ao alumínio dissolvido, valores antes medidos inferiores ao LD, começaram a ser observados acima do LD (0,163 mg/L Al em 14/11/2015), alcançando 3,137 mg/L Al em 20/11/2015. Essa ordem de valores monitorados para o alumínio dissolvido manteve-se até o final de janeiro de 2016. Já em fevereiro de 2016, começaram a ser registrados novamente valores inferiores ao LD. O mesmo fenômeno de oscilação da concentração dos parâmetros foi observado para o ferro dissolvido e para a série de sólidos, cuja redução para valores próximos aos observados das antes da chegada da pluma ocorreu de fato no final de março de 2016, com o fim de período chuvoso.

Os parâmetros que não apresentaram correlação com o tempo foram o cobre dissolvido, OD, ferro dissolvido, sólidos em suspensão, cádmio total, cromo total, mercúrio total, níquel total e zinco total. Sendo que os metais cádmio total e cromo total não apresentaram resultados associados ao teste de MK por não apresentar nenhuma medição superior ao LD (<0,0005mg/L Cd e <0,04 mg/L Cr).

Primeiramente, é importante ressaltar que pelo fato da onda de rejeitos de minério ter chegado nessa estação com menor intensidade, não houve aqui um pico de alta concentração para os parâmetros impactados com duração de um ou dois dias como houve nas demais estações a montante. Houve entretanto, algumas medições de *outliers* (menos discrepantes dos demais registros do banco de dados) e conseqüentemente, esses valores altos de concentração permaneceram por mais tempo, devido a maior lentidão de passagem da onda.

Tem-se portanto que, na estação RD067, por não terem ocorridos *outliers* bem demarcados com a chegada da pluma de rejeitos, o teste de MK não detectou correlação com o tempo para diversos parâmetros.

O cobre dissolvido apresentou apenas duas medições acima do LD, sendo uma igual a 0,0042 mg/L Cu em 22/11/2015 e outra igual a 0,0785 mg/L Cu em 28/04/2016.

Com relação ao parâmetro sólidos em suspensão, valores elevados acima de 1.000mg/L foram medidos entre o dia 17 e 19/11/2015. Depois desse período, um valor acima de 1.000mg/L foi

medido no dia 21/01/2016. Após esse período chuvoso, os valores se mantiveram abaixo de 100 mg/L até a primeira chuva em 30/11/2016, dia no qual foi registrado um valor igual a 124 mg/L SS.

Para o mercúrio total, foi registrado um valor acima do LD ( $<0,2$  mg/L Hg) no dia 18/11/2015, sendo esse valor igual a 0,489 mg/L Hg. Apesar de, pelo teste de MK, esse parâmetro não ter correlação com tempo, pela estatística do teste é observada uma tendência de redução da concentração desse parâmetro com o tempo (Tau de Kendall  $< 0$ ). O mesmo foi observado para o níquel total, que apresentou alguns valores um pouco acima do LD no início do monitoramento emergencial em novembro de 2015 e outras quatro medições em 2016. Contudo, mesmo não apresentando correlação com o tempo, a estatística do teste também mostrou tendência de redução da concentração de níquel total.

Para o zinco total, 81% das medições se encontraram abaixo do LD. As demais medições estiveram distribuídas no tempo e apenas uma medição registrou um valor superior ao limite preconizado pela DN COPAM CERH-MG 01/08: 0,574 mg/L Zn em 13/04/2016.

## TABELAS

Resultados do teste de *Meann-Kendall* por estação para cada parâmetro

- Duas estações mais a montante, não localizadas no rio Doce:



Série\Teste	RD011			RD071		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,484	< <b>0,0001</b>	-1,18	-0,22	<b>0,04</b>	-0,36
Alumínio dissolvido	-0,319	<b>0,01</b>	-	-0,34	<b>0,002</b>	-
Cobre dissolvido	-0,048	0,72	-	-0,01	0,94	-
OD	0,004	0,97	-	0,19	0,07	0,01
pH <i>in loco</i>	-0,020	0,86	-	-0,08	0,45	-0,003
Ferro dissolvido	-0,049	0,66	-0,0006	-0,28	<b>0,01</b>	-0,01
SDT	-0,263	<b>0,02</b>	-2	-0,42	< <b>0,0001</b>	-2,70
SST	-0,530	< <b>0,0001</b>	-147,2	-0,55	< <b>0,0001</b>	-54,75
SS	-0,593	<b>0,0002</b>	-0,13	-0,53	< <b>0,0001</b>	-0,064
Sólidos totais	-0,513	< <b>0,0001</b>	-150	-0,56	< <b>0,0001</b>	-58,47
Turbidez	-0,444	< <b>0,0001</b>	-224,57	-0,50	< <b>0,0001</b>	-137,48
Arsênio total	-0,308	<b>0,01</b>	-	0,10	0,34	5,00E-06
Cádmio total	-0,131	0,33	-	-	-	-
Chumbo total	-0,556	< <b>0,0001</b>	-0,0007	-0,59	< <b>0,0001</b>	-0,0001
Cromo total	-0,303	<b>0,02</b>	-	-0,08	0,54	-
Manganês total	-0,428	< <b>0,0001</b>	-0,19	-0,45	< <b>0,0001</b>	-0,07
Mercúrio total	-0,353	<b>0,01</b>	-	-	-	-
Níquel total	-0,515	< <b>0,0001</b>	-0,00024	-0,34	<b>0,003</b>	-
Zinco total	-0,089	0,53	-	-0,12	0,39	-

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.

- Para as estações localizadas na calha do rio Doce

Série\Teste	RD072			RD019		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,49	< 0,0001	-0,63	-0,56	< 0,0001	-0,79
Alumínio dissolvido	-0,46	< 0,0001	-0,003	-0,49	< 0,0001	-0,005
Cobre dissolvido	-0,05	0,67	0	-0,14	0,18	0
OD	0,35	< 0,0001	0,017	0,58	< 0,0001	0,038
pH <i>in loco</i>	-0,26	0,004	-0,007	-0,32	0,000	-0,009
Ferro dissolvido	-0,38	< 0,0001	-0,011	-0,41	< 0,0001	-0,014
SDT	-0,42	< 0,0001	-2,3	-0,41	< 0,0001	-2,9
SST	-0,64	< 0,0001	-47	-0,62	< 0,0001	-28
SS	-0,54	< 0,0001	-0,028	-0,30	0,007	-0,008
Sólidos totais	-0,62	< 0,0001	-51	-0,61	< 0,0001	-32
Turbidez	-0,67	< 0,0001	-162	-0,63	< 0,0001	-121
Arsênio total	-0,24	0,01	0,00	-0,40	< 0,0001	0,00
Cádmio total			0	0	0,13	0
Chumbo total	-0,51	< 0,0001	-0,0001	-0,57	< 0,0001	-0,0002
Cromo total			0	0	0,02	0
Manganês total	-0,56	< 0,0001	-0,0562	-0,55	< 0,0001	-0,0366
Mercúrio total	-0,12	0,26	0	-0,18	0,09	0
Níquel total	-0,37	0,0002	0	-0,43	< 0,0001	0
Zinco total	0,21	0,16	0	-0,16	0,27	0

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.

Série\Teste	RD023			RD035		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,53	< 0,0001	-0,81	-0,44	< 0,0001	-0,66
Alumínio dissolvido	-0,50	< 0,0001	-0,006	-0,45	< 0,0001	-0,008
Cobre dissolvido	-0,14	0,18	0	-0,14	0,18	0
OD	0,46	< 0,0001	0,021	0,54	< 0,0001	0,033
pH <i>in loco</i>	-0,26	0,004	-0,007	-0,21	0,02	-0,005
Ferro dissolvido	-0,41	< 0,0001	-0,019	-0,41	< 0,0001	-0,020
SDT	-0,45	< 0,0001	-3,1	-0,44	< 0,0001	-2,7
SST	-0,64	< 0,0001	-33	-0,67	< 0,0001	-49
SS	-0,59	< 0,0001	-0,024	-0,55	< 0,0001	-0,033
Sólidos totais	-0,63	< 0,0001	-37	-0,66	< 0,0001	-54
Turbidez	-0,69	< 0,0001	-152	-0,69	< 0,0001	-157
Arsênio total	-0,60	< 0,0001	0,00	-0,62	< 0,0001	0,00
Cádmio total	-0,25	0,02	0	-0,26	0,02	0,00
Chumbo total	-0,67	< 0,0001	-0,0003	-0,71	< 0,0001	-0,0004
Cromo total	-0,31	0,004	0	-0,31	0,003	0,00
Manganês total	-0,66	< 0,0001	-0,0606	-0,71	< 0,0001	-0,0822
Mercúrio total	-0,08	0,47	0			0
Níquel total	-0,55	< 0,0001	0	-0,62	< 0,0001	0
Zinco total	-0,16	0,28	0	0,05	0,72	0

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.

Série\Teste	RD033			RD083		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,33	<b>0,0001</b>	-1,04	-0,42	< <b>0,0001</b>	-1,10
Alumínio dissolvido	-0,45	< <b>0,0001</b>	-0,007	-0,46	< <b>0,0001</b>	-0,007
Cobre dissolvido	-0,15	0,17	0	-0,05	0,67	0
OD	0,49	< <b>0,0001</b>	0,027	0,58	< <b>0,0001</b>	0,062
pH <i>in loco</i>	-0,23	<b>0,01</b>	-0,006	0,02	0,79	0,000
Ferro dissolvido	-0,38	< <b>0,0001</b>	-0,016	-0,37	< <b>0,0001</b>	-0,016
SDT	-0,39	< <b>0,0001</b>	-2,3	-0,31	<b>0,0004</b>	-1,9
SST	-0,67	< <b>0,0001</b>	-44	-0,59	< <b>0,0001</b>	-23
SS	-0,47	< <b>0,0001</b>	-0,033	-0,23	<b>0,04</b>	0,000
Sólidos totais	-0,66	< <b>0,0001</b>	-47	-0,58	< <b>0,0001</b>	-26
Turbidez	-0,69	< <b>0,0001</b>	-148	-0,60	< <b>0,0001</b>	-106
Arsênio total	-0,55	< <b>0,0001</b>	0,00	-0,60	< <b>0,0001</b>	0,00
Cádmio total	-0,35	<b>0,001</b>	0			0
Chumbo total	-0,72	< <b>0,0001</b>	-0,0003	-0,55	< <b>0,0001</b>	-0,0001
Cromo total	-0,26	<b>0,02</b>	0	-0,27	<b>0,01</b>	0
Manganês total	-0,65	< <b>0,0001</b>	-0,0680	-0,60	< <b>0,0001</b>	-0,0323
Mercurio total			0			0
Níquel total	-0,59	< <b>0,0001</b>	0	-0,49	< <b>0,0001</b>	0
Zinco total	0,03	0,85	0	-0,04	0,80	0

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.

Série\Teste	RD044			RD045		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,45	< <b>0,0001</b>	-1,17	-0,48	< <b>0,0001</b>	-1,05
Alumínio dissolvido	-0,41	< <b>0,0001</b>	-0,006	-0,47	< <b>0,0001</b>	-0,007
Cobre dissolvido	-0,05	0,67	0	-0,13	0,21	0
OD	0,38	< <b>0,0001</b>	0,022	0,49	< <b>0,0001</b>	0,026
pH <i>in loco</i>	0,05	0,58	0,001	0,06	0,53	0,000
Ferro dissolvido	-0,26	<b>0,004</b>	-0,011	-0,34	< <b>0,0001</b>	-0,013
SDT	-0,44	< <b>0,0001</b>	-2,9	-0,35	< <b>0,0001</b>	-2,1
SST	-0,43	< <b>0,0001</b>	-10	-0,50	< <b>0,0001</b>	-11
SS	-0,37	<b>0,001</b>	0,000	-0,48	< <b>0,0001</b>	0,000
Sólidos totais	-0,45	< <b>0,0001</b>	-15	-0,52	< <b>0,0001</b>	-15
Turbidez	-0,51	< <b>0,0001</b>	-56	-0,53	< <b>0,0001</b>	-58
Arsênio total	-0,58	< <b>0,0001</b>	0,00	-0,59	< <b>0,0001</b>	0,00
Cádmio total	-0,25	<b>0,02</b>	0	-0,18	0,10	0
Chumbo total	-0,48	< <b>0,0001</b>	0,0000	-0,57	< <b>0,0001</b>	-0,0001
Cromo total	-0,26	<b>0,02</b>	0	-0,25	<b>0,02</b>	0
Manganês total	-0,54	< <b>0,0001</b>	-0,0186	-0,59	< <b>0,0001</b>	-0,0181
Mercurio total	-0,13	0,22	0	-0,13	0,22	0
Níquel total	-0,37	<b>0,0003</b>	0	-0,38	<b>0,0002</b>	0
Zinco total	-0,20	0,16	0	-0,10	0,50	0

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.

Série\Teste	RD053			RD058		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,50	< 0,0001	-1,12	-0,47	< 0,0001	-1,01
Alumínio dissolvido	-0,51	< 0,0001	-0,012	-0,42	< 0,0001	-0,013
Cobre dissolvido	-0,12	0,27	0	-0,14	0,18	0
OD	0,47	< 0,0001	0,034	0,37	< 0,0001	0,022
pH <i>in loco</i>	0,05	0,56	0,002	0,02	0,82	0,000
Ferro dissolvido	-0,45	< 0,0001	-0,018	-0,37	< 0,0001	-0,018
SDT	-0,37	< 0,0001	-2,6	-0,27	0,002	-2,2
SST	-0,59	< 0,0001	-15	-0,46	< 0,0001	-17
SS	-0,34	0,01	0,000	-0,38	0,001	0,000
Sólidos totais	-0,58	< 0,0001	-19	-0,45	< 0,0001	-21
Turbidez	-0,57	< 0,0001	-62	-0,48	< 0,0001	-61
Arsênio total	-0,62	< 0,0001	0,00	-0,54	< 0,0001	0,00
Cádmio total	-0,18	0,10	0	-0,22	0,049	0
Chumbo total	-0,54	< 0,0001	-0,0001	-0,45	< 0,0001	-0,0001
Cromo total	-0,25	0,02	0	-0,25	0,02	0
Manganês total	-0,57	< 0,0001	-0,0165	-0,56	< 0,0001	-0,0223
Mercúrio total	-0,22	0,04	0	-0,28	0,01	0
Níquel total	-0,37	0,0004	0	-0,34	0,001	0
Zinco total	-0,23	0,11	0	0,08	0,55	0

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.

Série\Teste	RD059			RD067		
	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen	Tau de Kendall	p-valor	Inclinação de Sen
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	-0,46	< 0,0001	-0,89	-0,49	< 0,0001	-1,03
Alumínio dissolvido	-0,46	< 0,0001	-0,017	-0,26	0,006	-0,002
Cobre dissolvido	-0,32	0,003	0	-0,11	0,31	0
OD	0,42	< 0,0001	0,031	-0,05	0,56	-0,004
pH <i>in loco</i>	0,15	0,10	0,006	0,05	0,604	0,000
Ferro dissolvido	-0,40	< 0,0001	-0,024	-0,14	0,12	-0,010
SDT	-0,34	0,0001	-2,6	-0,22	0,02	-0,9
SST	-0,38	< 0,0001	-11	-0,31	0,0005	-5
SS	-0,08	0,49	0,000	0,06	0,64	0,000
Sólidos totais	-0,41	< 0,0001	-16	-0,33	0,0002	-8
Turbidez	-0,39	< 0,0001	-47	-0,23	0,008	-25
Arsênio total	-0,48	< 0,0001	0,00	-0,62	< 0,0001	0,00
Cádmio total	-0,20	0,07	0			0
Chumbo total	-0,49	< 0,0001	-0,0001	-0,51	< 0,0001	0,0000
Cromo total			0			0
Manganês total	-0,44	< 0,0001	-0,0089	-0,49	< 0,0001	-0,0050
Mercúrio total	-0,16	0,17	0	-0,19	0,10	0
Níquel total	-0,24	0,02	0	-0,17	0,13	0
Zinco total	-0,01	0,93	0	-0,13	0,39	0

Em negrito são apresentados os p-valores que indicam correlação significativa (<0,05) do parâmetro com o tempo.