

Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento
da barragem de Fundão na bacia do rio Doce

Relatório Pós Desastre:

Grupo 1

Qualidade de Água

Águas Subterrâneas

Pesca

Ecotoxicologia

Institutos Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Janeiro/2018



Documento:	Diagnóstico Socioambiental do Rio Doce – Relatório Preliminar Pós Desastre – Grupo 1.
Considerações Gerais:	Este documento refere-se ao relatório preliminar pós desastre, das seguintes áreas: Qualidade de Água, Águas Subterrâneas, Pesca e Ecotoxicologia, que são parte integrante do Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Rio Doce, o qual demonstra características ambientais identificadas após o rompimento da barragem de Fundão ocorrido no dia 5 de novembro de 2015.
Contrato:	4500173758 – Samarco/Lactec
Solicitante:	Empresa: Ministério Público Federal Procuradoria da República em Minas Gerais
	CNPJ:
	Endereço: Av. Brasil, 1877
	Bairro: Bairro Funcionários
	Cidade: Belo Horizonte/MG
	CEP: CEP 30140-007
	A/C: Dr. José Adercio Leite Sampaio
Executante:	E-mail: joseadercio@mpf.mp.br
	Institutos Lactec Rodovia BR-116, km 98, nº 8813 Jardim das Américas Caixa Postal 19067 CEP 81531-980 Curitiba – PR – BR e-mail: leonardo.bastos@lactec.org.br Divisão de Meio Ambiente T + 55 (41) 3361-6882

Autoria:

Equipe Técnica dos Institutos Lactec

Emitido por:

Leonardo Pussieldi Bastos, M. Sc.
Biólogo / CRBio 28808-07D
Divisão de Meio Ambiente

Aprovado por:

Tânia Lucia Graf de Miranda, D. Sc.
Engenheira Agrônoma / Crea RS 069105/D
Gerente de Serviços Tecnológicos e Inovação

Luiz Alkmin de Lacerda, D. Sc.
Engenheiro Civil / Crea PR 155674/D
Gerente de Pesquisa e Inovação

EQUIPE TÉCNICA

PRESIDÊNCIA		
Luiz Fernando Vianna	Diretor Presidente	
DIRETORIA		
Alessandro Zimmer	Diretor de Desenvolvimento Tecnológico	
Lauro Elias Neto	Diretor de Operações Tecnológicas	
Luiz Fernando Vianna	Diretor Administrativo-Financeiro	
PESQUISA E INOVAÇÃO		
Luiz Alkimin de Lacerda	Gerente de Pesquisa e Inovação	http://lattes.cnpq.br/0043721710279191
GERENTE DE SERVIÇOS TECNOLÓGICOS E INOVAÇÃO		
Tania Lucia Graf de Miranda	Gerente de Serviços Tecnológicos e Inovação	http://lattes.cnpq.br/1121417252853145
COORDENAÇÃO TÉCNICA		
Leonardo Pussieldi Bastos	MSc., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/5329663591015036
GESTÃO E ACOMPANHAMENTO		
Franciele Dãobroski	Esp., Eng. Eletricista	http://lattes.cnpq.br/7297801978779218
Guilherme de Poli	Administrador de Empresas	http://lattes.cnpq.br/5037459782326201
Jefferson Arndt	Esp., Analista de Sistemas	http://lattes.cnpq.br/2235028013916918
Leandro Zem	Gerente Escritório de Projetos	http://lattes.cnpq.br/2357615179502522
MEIO FÍSICO		
QUALIDADE DE ÁGUA		
Alexandre Brandelli	MSc., Oceanólogo	http://lattes.cnpq.br/3313473380886724
Ana Carolina Wosiack	MSc., Ciências Biológicas	http://lattes.cnpq.br/1895187637306662
Kleber Franke Portella	Dr., Químico	http://lattes.cnpq.br/3831923854387307
Luciano Hermanns	Dr., Oceanólogo	http://lattes.cnpq.br/0771345308920546
Marianne Schaefer França Sieciechowicz	MSc., Engenheira Ambiental	http://lattes.cnpq.br/5577907738809542
Nicole Machuca Brassac de Arruda	Dra., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/2555202156228591
Patrícia Dammski Borges de Andrade	MSc., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/3040297416264303
Priscila Izabel Tremarin	Dra., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/3229087673435470

Susan da Silva	Tecnóloga em Gestão Ambiental	http://lattes.cnpq.br/6563092431055823
Tomaz Bohrer Brentano	Engenheiro Ambiental	http://lattes.cnpq.br/1685187955178243
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS		
André Virmond Lima Bittencourt	Dr., Engenheiro Químico	http://lattes.cnpq.br/2304114776847879
Ernesto Goldfarb Figueira	MSc., Geólogo	http://lattes.cnpq.br/4401942500945463
Gheysa do Rocio Morais Pires	MSc., Química Ambiental	http://lattes.cnpq.br/2618972397792943
MEIO BIÓTICO		
PESCA		
Matheus Oliveira Freitas	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/5550609084808301
Maurício Belézia de Oliveira	Esp., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/6239819920450961
Vinícius Abilhoa	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/0315094345358871
ECOTOXICOLOGIA		
Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/5026609882283698

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das estações de monitoramento na região de estudo.....	17
Figura 2 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez no rio Doce (MG), em termos de mediana.	24
Figura 3 – Alteração do parâmetro turbidez em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).	25
Figura 4 – Alteração do parâmetro turbidez em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG), com detalhamento.	26
Figura 5 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).	27
Figura 6 – Evolução temporal da turbidez em afluentes do rio Doce (MG).	29
Figura 7 – Evolução temporal e espacial para o parâmetro turbidez no rio Doce (ES), em termos de mediana.	30
Figura 8 – Alteração do parâmetro turbidez em relação ao período pré-desastre em número de vezes (ES).	31
Figura 9 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).	33
Figura 10 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana.	34
Figura 11 – Alteração do parâmetro oxigênio dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).	35
Figura 12 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 5%.	36
Figura 13 – Evolução temporal do oxigênio dissolvido em afluentes do rio Doce (MG).	38
Figura 14 – Evolução temporal e espacial para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce (ES), em termos de mediana.	40
Figura 15 – Alteração do parâmetro oxigênio dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (ES).	40
Figura 16 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 5% (ES).	42
Figura 17 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce (MG), em termos de mediana.....	43
Figura 18 – Alteração do parâmetro pH em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).	43
Figura 19 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 5% (MG).	45
Figura 20 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).	45
Figura 21 – Evolução temporal do pH em afluentes do rio Doce (MG).	47
Figura 22 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce (ES), em termos de mediana.	49

Figura 23 – Alteração do parâmetro pH em relação ao período pré-desastre em número de vezes (ES).	49
Figura 24 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 5% (ES).	50
Figura 25 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).	51
Figura 26 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana.	52
Figura 27 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana, com detalhamento.	52
Figura 28 – Alteração do parâmetro alumínio dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).	53
Figura 29 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).	54
Figura 30 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.	54
Figura 31 – Evolução temporal do alumínio dissolvido em afluentes do rio Doce (MG).	56
Figura 32 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce (ES), em termos de mediana.	57
Figura 33 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).	58
Figura 34 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce (MG), em termos de mediana.	59
Figura 35 – Alteração do parâmetro arsênio total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).	60
Figura 36 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).	61
Figura 37 – Evolução temporal do arsênio total em afluentes do rio Doce (MG).	62
Figura 38 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce (ES), em termos de mediana.	64
Figura 39 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).	65
Figura 40 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce (MG), em termos de mediana.	66
Figura 41 – Alteração do parâmetro chumbo total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).	66
Figura 42 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).	68
Figura 43 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.	68
Figura 44 – Evolução temporal do chumbo total em afluentes do rio Doce (MG).	70

Figura 45 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce (ES), em termos de mediana.	71
Figura 46 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).....	72
Figura 47 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana.	73
Figura 48 – Alteração do parâmetro ferro dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).....	74
Figura 49 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).....	75
Figura 50 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.	76
Figura 51 – Evolução temporal do ferro dissolvido em afluentes do rio Doce (MG).....	77
Figura 52 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce (ES), em termos de mediana.	79
Figura 53 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).....	80
Figura 54 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce (MG), em termos de mediana.	81
Figura 55 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce (MG), em termos de mediana, com detalhamento.....	81
Figura 56 – Alteração do parâmetro manganês total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).....	82
Figura 57 – Alteração do parâmetro manganês total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG), com detalhamento.	82
Figura 58 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).....	84
Figura 59 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.	84
Figura 60 – Evolução temporal do manganês total em afluentes do rio Doce (MG).	85
Figura 61 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce (ES), em termos de mediana.....	87
Figura 62 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).....	88
Figura 63 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce (MG), em termos de mediana.	89
Figura 64 – Alteração do parâmetro zinco total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).....	89
Figura 65 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).....	91
Figura 66 – Evolução temporal do zinco total em afluentes do rio Doce (MG).....	92

Figura 67 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce (ES), em termos de mediana.	94
Figura 68 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).....	95
Figura 69 – Número de unidades de captação de água subterrânea outorgadas nas sub-bacias da BHRD em Minas Gerais.	104
Figura 70 – Poços com cadastro no SIAGAS situados na BHRD até setembro de 2017 com as respectivas vazões específicas.	105
Figura 71 – Intervalos de vazão registrados no SIAGAS para poços perfurados na BHRD.	107
Figura 72 – Mapa da vazão de produção de poços da BHRD registrados no SIAGAS/CPRM.	108
Figura 73 – Mapa da profundidade do nível estático dos poços relacionados no SIAGAS.	109
Figura 74 – Diagramas triangulares associados representando o comportamento conjunto de Fe, Mn, Ni, As, Cd e Pb em pontos de água de Belo Oriente, Governador Valadares e Colatina.	112
Figura 75 – Distribuição da composição da água de poços na região de Linhares e mais poços em Itueta, Resplendor e Tumiritinga, operados pela Copasa em um diagrama de Durov modificado. ...	115
Figura 76 – Distribuição de amostras de água superficial coletadas em rios da porção mineira da BHRD, em três poços tubulares e uma água mineral.	116
Figura 77 – Situação de amostras de água da região de Linhares, Itueta, Resplendor e Tumiritinga em um diagrama de Durov expandido.	117
Figura 78 – Distribuição dos pescadores da bacia do rio Doce.	123
Figura 79 – Área afetada e peixes encontrados mortos	128
Figura 80 – Imagem da barragem de Fundão após o rompimento.	134
Figura 81 – Imagem aérea da pluma de lama ao atingir a Foz do rio Doce, Regência (ES).....	134
Figura 82 – Imagem da foz do rio Doce, área da Rebio Comboios e vila de Regência, Linhares (ES) no dia 05/05/2017 (um ano e meio após o desastre).....	135
Figura 83 – Área amostrada: (A) Localização da cidade de Mariana. A linha tracejada indica o caminho percorrido pela lama desde o local do desastre até a foz do rio Doce. (B) Município de Mariana e a extensão dos rios afetados: vermelho (2 a 3, ± 6 km), amarelo (3 a 4, ± 50 km, rio Gualaxo do Norte), verde (4 a 5, ± 20 km, rio do Carmo) e azul (5 até o final, ± 600 km, rio Doce até o mar, não mostrado). Pontos 1, 2, 3, 4, 5 significam: Mariana, Barragem de Fundão, Bento Rodrigues, Barra Longa, Rio Doce. (C) C: Vista aérea dos principais locais de amostragem do estudo (amostras 1 e 17 estão localizadas no sul de Bento Rodrigues).	140
Figura 84 – Mapa indicando a localização dos pontos de coleta do grupo de avaliação ecotoxicológica FURG/Coral Vivo/ICMBio.....	153
Figura 85 – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) dos elementos cádmio (A) e cromo (B) determinadas em amostras de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e ovelha) coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (outubro de 2015) e após (28/01/2016 e 24/04/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre.	155
Figura 86 – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) dos elementos ferro (A), manganês (B) e cobre (C) determinadas em amostras de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e ovelha) coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (outubro de 2015) e após (28/01/2016 e 24/04/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre.	156

- Figura 87** – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) do elemento chumbo determinadas em amostras de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e oveva) coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (outubro de 2015) e após (28/01/2016 e 24/04/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre. 157
- Figura 88** – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) dos elementos cádmio (A), cromo (B), cobre (C), ferro (D), manganês (E) e chumbo (F) determinadas em amostras de músculo (barra preta) e fígado (barra cinza) de peixes de diferentes espécies coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (19 a 23/11/2015) e após (20 a 30/06/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre..... 158
- Figura 89** – Concentração corporal de arsênio ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 160
- Figura 90** – Concentração corporal de cromo ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 160
- Figura 91** – Concentração corporal de manganês ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 161
- Figura 92** – Concentração corporal de cobre ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 161
- Figura 93** – Concentração corporal de chumbo ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 163
- Figura 94** – Concentração corporal de cádmio ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 163
- Figura 95** – Concentração corporal de ferro ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos

vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 164

Figura 96 – Nível corporal de peroxidação lipídica nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: a) Campanha 1 - dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). b) Campanha 2 - os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1. 165

Figura 97 – Nível corporal de lipoperoxidação nas amostras de zooplâncton e hidrocoral (*Millepora alcicornis*) dos pontos de coleta na área de Abrolhos. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. 165

SUMÁRIO

QUALIDADE DE ÁGUA.....	13
INTRODUÇÃO	13
OBJETIVO	13
METODOLOGIA	13
Abrangência da região avaliada	13
Período avaliado	18
Parâmetros de qualidade de água	19
Avaliação dos dados de qualidade de água.....	20
RESULTADOS.....	24
Parâmetros físicos e químicos.....	24
Síntese dos resultados	95
CONCLUSÕES.....	101
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	103
INTRODUÇÃO	103
CONTEXTUALIZAÇÃO	103
METODOLOGIA	104
DIAGNÓSTICO	104
DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS.....	104
VAZÕES DOS POÇOS CADASTRADOS	105
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BHRD	109
PESCA.....	121
IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	121
OBJETO – CONCEITO	121
METODOLOGIA	121
RESULTADOS.....	122
CONSIDERAÇÕES	129
ECOTOXICOLOGIA.....	130
CONTEXTUALIZAÇÃO	130
Poluição do ambiente aquático e o uso de biomarcadores	130
Metais: características e efeitos	131
O rompimento da barragem	133
OBJETIVO E METODOLOGIA.....	136

RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS PÓS-DESASTRE E COMPARAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESULTADOS DE LINHA-BASE.....	136
Bacia Hidrográfica do Rio Doce.....	136
Foz do rio Doce	145
CONCLUSÕES PRELIMINARES.....	165
APÊNDICES	166
REFERÊNCIAS.....	182

QUALIDADE DE ÁGUA

INTRODUÇÃO

A lama de rejeitos minerários provenientes da ruptura da barragem de Fundão atingiu, direta ou indiretamente, os meios físico, biótico e antrópico em diferentes escalas. Em relação às águas de ambientes fluviais, seus aspectos qualitativos foram alterados, causando danos a diversos usos (abastecimento público e industrial, irrigação, criação de animais etc.).

Nesse contexto, no presente documento apresentam-se resultados da avaliação de dados de físicos e químicos das águas do rio Doce e tributários, relativos ao período posterior ao desastre de Mariana. A apresentação de tais resultados visa subsidiar a compreensão do evento ocorrido, em termos da magnitude e da dinâmica das alterações na qualidade da água do ambiente atingido.

OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo avaliar as condições que o rio Doce e alguns de seus tributários passaram a apresentar após o impacto causado pelo rompimento da barragem de Fundão. A partir da comparação de dados físicos e químicos obtidos após o desastre com aqueles provenientes da linha-base, ou seja, de condição anterior ao rompimento, buscou-se estimar a magnitude do impacto gerado, bem como sua evolução no tempo e no espaço.

METODOLOGIA

Para a avaliação das condições que o rio Doce e alguns de seus tributários passaram a apresentar após o impacto causado pelo rompimento da barragem de Fundão, foi necessário o cumprimento de diversas etapas metodológicas, descritas nos itens a seguir.

ABRANGÊNCIA DA REGIÃO AVALIADA

De modo a viabilizar a comparação de dados de qualidade de água pré e pós-desastre, buscou-se avaliar, sempre que possível, as mesmas estações de monitoramento utilizadas para a elaboração da linha-base (INSTITUTOS LACTEC, 2017).

No estado de Minas Gerais, foram avaliados no presente estudo os dados de qualidade de água de 12 estações de monitoramento do rio Doce (**Tabela 1**). Em afluentes do rio Doce, inclusive aqueles que contribuem para sua formação, foram avaliados os dados de 11 estações de monitoramento (Tabela 2). As referidas estações fazem parte da rede de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Em relação à frequência de amostragem das estações do IGAM, logo após o rompimento da barragem, as estações localizadas na calha do rio Doce foram monitoradas diariamente. No início de dezembro/2015, a frequência de amostragem passou a ser semanal. Em janeiro/2016, novamente a frequência foi alterada, passando a ser quinzenal. Nos meses de outubro e novembro/2016, as amostragens de água foram realizadas mensalmente e, a partir do mês de dezembro/2016, estas voltaram a ser semanais, em virtude da preocupação com o início do período chuvoso (IGAM, 2017).

Tabela 1 – Estações de monitoramento de qualidade de água avaliadas no rio Doce (MG).

Estação IGAM	Data de Instalação	Rio	Município	Latitude	Longitude
RD072	01/10/08	Doce	Rio Doce, Santa Cruz do Escalvado	20° 14' 52.739''	42° 53' 08.481''
RD019	02/09/97	Rio Doce	Rio Casca, São Domingos do Prata	20° 01' 19.735''	42° 45' 09.475''
RD023	16/09/97	Rio Doce	Marliéria, Pingo-d'Água	19° 45' 36.732''	42° 29' 07.464''
RD035	05/08/97	Rio Doce	Santana do Paraíso	19° 29' 20.727''	42° 29' 40.462''
RD033	30/07/97	Rio Doce	Belo Oriente, Bugre	19° 19' 39.725''	42° 22' 33.457''
RD083	08/07/08	Rio Doce	Fernandes Tourinho, Periquito	19° 05' 43.722''	42° 09' 18.448''
RD044	21/02/00	Rio Doce	Governador Valadares	18° 53' 01.719''	41° 57' 11.44''
RD045	30/07/97	Rio Doce	Governador Valadares	18° 51' 37.719''	41° 50' 02.436''
RD053	04/09/97	Rio Doce	Galileia, Tumiritinga	18° 58' 11.723''	41° 38' 50.431''
RD058	22/02/00	Rio Doce	Conselheiro Pena	19° 09' 59.728''	41° 27' 36.427''
RD059	04/09/97	Rio Doce	Resplendor	19° 20' 46.734''	41° 14' 20.421''
RD067	25/03/98	Rio Doce	Aimorés (MG), Baixo Guandu (ES)	19° 30' 21.739''	41° 00' 48.415''

Para as estações de qualidade de água localizadas em afluentes do rio Doce (**Tabela 2**), de acordo com as planilhas obtidas a partir do *site* do IGAM (<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica>), o monitoramento ocorreu de modo trimestral, o que resultou em um número menor de observações em relação às estações monitoradas no rio Doce.

As estações RD011 e RD071 (**Tabela 2**), nos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, respectivamente, que confluem para a formação do rio Doce antes da entrada do rio Piranga, foram monitoradas mais frequentemente, apresentando um número maior de observações.

Com exceção da estação RD011, instalada após o rompimento da barragem em 25/11/2015 (IGAM, 2016a), as demais apresentam série histórica de dados.

Tabela 2 – Estações de monitoramento de qualidade de água avaliadas em afluentes do rio Doce e em rios que contribuem para sua formação (MG).

Estação IGAM	Data de Instalação	Rio	Município	Latitude	Longitude
RD011	25/11/15	Rio Gualaxo do Norte	Barra Longa	20° 17' 9.780"	43° 03' 57.024"
RD071	01/10/08	Rio do Carmo	Barra Longa	20° 16' 58.252"	43° 01' 55.971"
RD013	23/07/97	Rio Piranga	Ponte Nova	20° 23' 0.741"	42° 54' 09.483"
RD018	15/02/00	Rio Casca	Rio Casca, São Pedro dos Ferros	20° 05' 54.758"	42° 37' 48.472"
RD073	17/10/08	Ribeirão Sacramento	Bom Jesus do Galho, Pingo-d'Água	19° 42' 33.952"	42° 26' 44.903"
RD034	17/02/00	Rio Piracicaba	Coronel Fabriciano, Timóteo	19° 31' 49.727"	42° 36' 10.466"
RD039	30/07/97	Rio Santo Antônio	Naque	19° 13' 26.723"	42° 20' 35.455"
RD040	18/02/00	Rio Corrente Grande	Governador Valadares, Periquito	19° 01' 15.72"	42° 09' 46.448"
RD089	10/07/08	Rio Suaçuí Grande	Governador Valadares	18° 51' 01.719"	41° 47' 04.434"
RD057	04/09/97	Rio Caratinga	Conselheiro Pena	19° 04' 16.726"	41° 32' 40.428"
RD065	27/08/97	Rio Manhuaçu	Aimorés	19° 29' 52.738"	41° 10' 11.42"

Nota: Sistema de Coordenadas Geográficas, *Datum* SIRGAS 2000. Coordenadas originais obtidas de IGAM (2009) e do site <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica>.

No estado do Espírito Santo, o monitoramento da qualidade da água após o desastre de Mariana foi realizado pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) em cinco pontos no rio Doce: P1, P2, P3, P4 e P5. Com exceção do P1, que coincide com a estação RD067 do IGAM, todos os demais locais foram avaliados no presente estudo. Convém ressaltar que desses locais, somente o P2 e o P4 apresentaram localização coincidente com a rede de amostragem anterior ao desastre, a qual serviu para a elaboração da linha-base (INSTITUTOS LACTEC, 2017).

De modo a facilitar a comparação de dados anteriores e posteriores ao desastre, optou-se por utilizar neste relatório uma nomenclatura diferenciada de acordo com a localização das estações, de montante para jusante (**Tabela 3**):

Tabela 3 – Estações de monitoramento de qualidade de água avaliadas no rio Doce (ES).

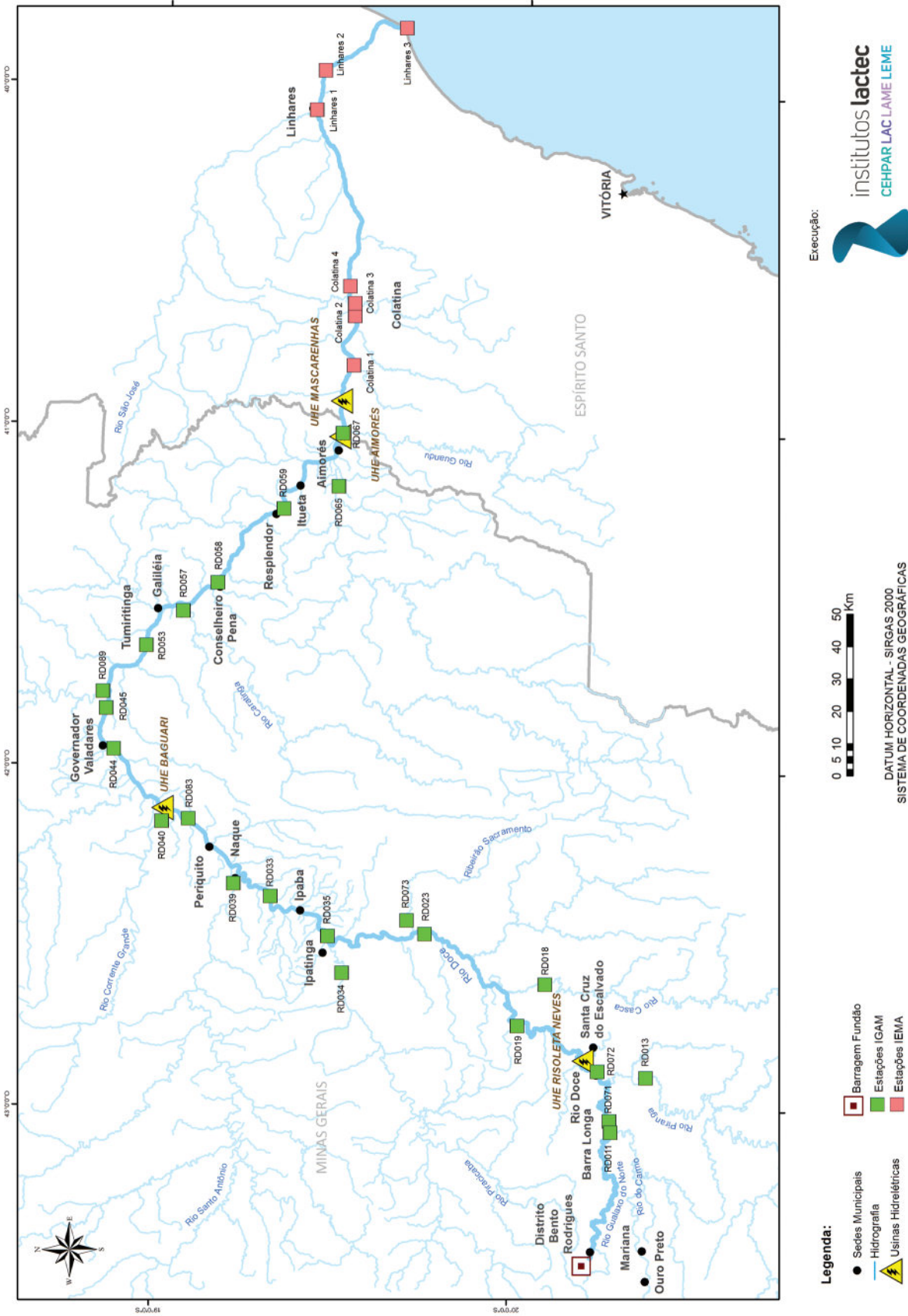
Nomenclatura adotada	Antes do desastre	Após o desastre	Latitude	Longitude	Descrição
Colatina 1	RDC1E010	P2	19° 31' 41.016''	40° 48' 46.008''	Distrito de Itapina
Colatina 2	RDC1E015		19° 31' 56.742''	40° 40' 4.405''	Bairro Honório Fraga
Colatina 3		P3	19° 31' 52.320''	40° 37' 51.60''	Ponte Florentino Avidos
Colatina 4	RDC1E020		19° 31' 0.743''	40° 34' 49.402''	Bairro Barbados
Linhares 1	RDC1E025	P4	19° 24' 38.016''	40° 03' 54.0''	Ponte Joaquim Calmon
Linhares 2	RDC1E030		19° 25' 55.746''	39° 56' 52.380''	30 km a montante da foz do rio Doce
Linhares 3		P5	19° 39' 18.0''	39° 49' 0.840''	Foz do rio Doce

Nota: Sistema de Coordenadas Geográficas, *Datum* SIRGAS 2000. Coordenadas originais obtidas da base de dados online Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) e a partir de e-mail enviado pelo IEMA.

Com o rompimento da barragem de Fundão, o IEMA iniciou o monitoramento do rio Doce em 10/11/2015, quando a onda de cheia atingiu o município de Colatina (CPRM, 2015). Entre dezembro/2015 e janeiro/2016, as coletas de amostras de água no rio Doce foram mais frequentes. Entre fevereiro/2016 e abril/2016, as coletas ocorreram de modo semanal. No período de maio/2016 a agosto/2016, as coletas foram quinzenais.

Na **Figura 1** está apresentada a localização das estações de monitoramento de qualidade de água listadas na Tabela 1 à **Tabela 3**, as quais tiveram seus dados avaliados e resultados apresentados no presente documento.

Figura 1 – Localização das estações de monitoramento na região de estudo.



PERÍODO AVALIADO

Neste documento, buscou-se apresentar os resultados de avaliações realizadas quanto às alterações na qualidade da água em relação às condições de linha-base, ou seja, aquelas anteriores ao desastre. No relatório de linha-base (INSTITUTOS LACTEC, 2017), a influência da sazonalidade sobre alguns parâmetros de qualidade de água ficou evidenciada. Desse modo, quando comparados os dados relativos aos períodos pré e pós-desastre, a distinção entre a estação seca e a chuvosa foi levada em consideração.

Até o momento do início da elaboração deste documento, os dados pós-desastre do IGAM que se encontravam disponíveis para avaliação eram aqueles relativos ao período de novembro/2015 a março/2017. O IGAM, todavia, mantém suas atividades de monitoramento no rio Doce, sendo que os dados gerados a *posteriori* serão incluídos nos próximos relatórios de diagnóstico. No Espírito Santo, o IEMA realizou o monitoramento do rio Doce entre novembro/2015 e agosto/2016. A partir de agosto/2016, o IEMA descontinuou suas atividades de monitoramento no rio Doce, sendo que estas têm sido realizadas pela Fundação Renova.

Os dados pós-desastre, assim como os dados relativos ao período anterior ao rompimento, foram separados de acordo com a estação seca e a chuvosa. De acordo com IGAM (2016b), o período chuvoso ocorre na região, normalmente, entre outubro e março, e o período seco, entre abril e setembro.

Ressalta-se que se optou por avaliar o mês de novembro/2015 como um período distinto, visto que o desastre ocorreu naquele mês. Desse modo, de acordo com a base de dados disponíveis do IGAM e do IEMA, resultaram quatro períodos pós-desastre para o estado de Minas Gerais e três períodos pós-desastre para o estado do Espírito Santo (**Tabela 4**).

Assim, as comparações entre os períodos pré e pós-desastre seguiram de acordo com a sazonalidade encontrada na região, ou seja, os períodos pós-desastre chuvosos (novembro/2015; dezembro/2015 a março/2015; outubro/2016 a março/2017) foram comparados com o período pré-desastre chuvoso, e o período pós-desastre seco (abril/2016 a setembro/2016) foi comparado com o período pré-desastre seco.

Tabela 4 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.

Período	Minas Gerais (IGAM)	Espírito Santo (IEMA)	Estação
Pré-desastre	Série histórica de dados	Série histórica de dados	Seca
			Chuvosa
Pós-desastre	Novembro/2015	Novembro/2015	Chuvosa
	Dezembro/2015 a março/2016	Dezembro/2015 a março/2016	Chuvosa
	Abril/2016 a setembro/2016	Abril/2016 a agosto/2016	Seca
	Outubro/2016 a março/2017	-	Chuvosa

PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ÁGUA

Para a avaliação de alterações na qualidade da água decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, foram analisados inicialmente os parâmetros: turbidez, oxigênio dissolvido, pH, alumínio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, chumbo total, arsênio e zinco total. Tais parâmetros são contemplados pela Resolução CONAMA nº 357/2005, a qual dispõe sobre as condições e os padrões de qualidade que o corpo hídrico deve apresentar de acordo com sua classe de enquadramento.

O rio Doce, assim como a grande maioria de seus afluentes, não possui enquadramento aprovado no âmbito do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Dessa forma, conforme orientação da Resolução CNRH nº 91/2008 (artigo 15, parágrafo 2º) (BRASIL, 2008), até que a autoridade outorgante estabeleça a classe correspondente, poderá ser adotada, para as águas doces superficiais, a classe 2.

Na **Tabela 5**, estão apresentados os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os parâmetros avaliados neste relatório.

Tabela 5 – Variáveis de qualidade de água avaliadas e respectivos limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2.

Parâmetro de qualidade de água	Limite para rios de classe 2
Turbidez	≤ 100 UNT
Oxigênio dissolvido (OD)	≥ 5,00 mg.L ⁻¹
pH <i>in loco</i>	6,0 a 9,0
Alumínio dissolvido	≤ 0,1 mg.L ⁻¹
Arsênio total	≤ 0,01 mg.L ⁻¹
Chumbo total	≤ 0,01 mg.L ⁻¹
Ferro dissolvido	≤ 0,3 mg.L ⁻¹
Manganês total	≤ 0,1 mg.L ⁻¹
Zinco total	≤ 0,18 mg.L ⁻¹

Ressalta-se que a estação Linhares 3 (vide **Tabela 3**), localizada na foz do rio Doce no oceano Atlântico, tem influências da maré. Dessa forma, na foz do rio Doce pode ocorrer águas do tipo doce, quando a salinidade é igual ou inferior a 0,5%, em massa, ou águas do tipo salobra, quando a salinidade é superior a 0,5% e inferior a 30%, em massa, de acordo com as definições adotadas na Resolução CONAMA nº 357/2005. Na região, todavia, mesmo que ocorram águas salobras, estas não apresentam enquadramento efetivado.

De tal modo, considerando que: (i) no presente documento a intenção em se avaliar a estação Linhares 3 é de se conhecer como o impacto evoluiu espacialmente até a foz; (ii) as águas da referida estação também podem apresentar salinidade inferior a 0,5%, sendo classificadas como doce; e (iii) os limites das águas salobras de classe 1 são idênticos aos da classe 2 das águas doces para a grande maioria dos parâmetros analisados neste relatório, foram utilizados os limites da classe 2 para águas superficiais doces quando pertinente.

Complementarmente, no Apêndice A, constam os Limites de Quantificação (LQs) dos métodos utilizados para determinação dos parâmetros supracitados em laboratório. Foram apresentados os limites de quantificação utilizados tanto no período anterior ao rompimento da barragem quanto no

período posterior ao desastre. Contudo, tais informações não se encontraram disponíveis para todas as variáveis avaliadas.

Destaca-se que, nos casos em que os resultados das análises dos parâmetros de qualidade de água resultaram em valor inferior ao limite de quantificação do método, utilizou-se o próprio valor do LQ para fins de cálculo. Desse modo, faz-se importante conhecer os limites de quantificação utilizados para que não se façam interpretações equivocadas.

AVALIAÇÃO DOS DADOS DE QUALIDADE DE ÁGUA

Para a avaliação dos dados de qualidade de água, foi necessário considerar primeiramente a existência de três tipos diferentes de conjunto de dados: (a) Minas Gerais – rio Doce, que engloba os resultados das estações de monitoramento no rio Doce no trecho mineiro; (b) Minas Gerais – afluentes do rio Doce, que engloba os resultados de estações de monitoramento de afluentes e rios formadores do rio Doce no estado de Minas Gerais; (c) Espírito Santo – rio Doce, que engloba os resultados das estações de monitoramento no rio Doce no trecho capixaba. Na sequência, os três conjuntos estão detalhados, assim como as suas especificidades:

- a) Minas Gerais – rio Doce: formado por dados das estações listadas na Tabela 1, apresenta série histórica para diversos parâmetros de qualidade de água, incluindo metais. Após o desastre, as estações de qualidade de água do rio Doce, no trecho mineiro, continuaram a ser monitoradas de modo ainda mais frequente do que se tinha previamente ao rompimento.
- b) Minas Gerais – afluentes do rio Doce: formado por dados das estações listadas na **Tabela 2**, apresenta série histórica para diversos parâmetros de qualidade de água, incluindo metais. Após o rompimento da barragem, a frequência de monitoramento permaneceu trimestral, sendo retomado em janeiro/2016, o que resultou em um menor número de observações para a maioria dos afluentes em relação às estações do rio Doce. Com o desastre de Mariana, o IGAM instalou uma nova estação no rio Gualaxo do Norte (RD011) no final do mês de novembro/2015, desse modo esta não apresenta série histórica de dados anteriores ao rompimento. Em relação às demais estações localizadas em afluentes, essa nova estação no rio Gualaxo do Norte (RD011) e a estação no rio do Carmo (RD071) foram as que foram monitoradas mais intensamente, apresentando maior número de observações.
- c) Espírito Santo – rio Doce: apresenta série histórica para os parâmetros de qualidade de água necessários para o cálculo do Índice de Qualidade das Águas (pH, turbidez, oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total, nitrogênio total, sólidos totais). Todavia, este não contempla valores de metais em água. Desse modo, não existe série histórica para metais no rio Doce no trecho capixaba. Após o evento do rompimento da barragem, a avaliação de metais foi incluída no monitoramento do rio Doce. Na **Tabela 3**, estão apresentadas as estações de qualidade de monitoradas no rio Doce no trecho capixaba antes (série histórica) e após o desastre. Diferentemente dos demais conjuntos, o período de monitoramento, após o desastre, ocorreu até agosto/2016.

O número de observações para os três conjuntos de dados avaliados é apresentado no Apêndice B, de acordo com suas estações.

Os conjuntos de dados foram avaliados de acordo com os itens descritos a seguir, de acordo com suas especificidades. Preferencialmente, os dados gerados após o desastre foram comparados com aqueles referentes ao período anterior ao rompimento. Em situações em que dados de linha-base não se encontravam disponíveis, utilizaram-se os limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 como referência.

Avaliação espacial e temporal dos dados de qualidade de água

Foram elaborados gráficos visando à avaliação dos diferentes períodos pós-desastre em relação à situação de linha-base e também entre eles, com o objetivo de se observar tendências de melhora ou não da qualidade da água. A evolução do desastre espacialmente também foi analisada. Para a realização das referidas análises, foram calculadas as medianas para cada estação, de acordo com os diferentes períodos, considerando a estação seca (sc) e a chuvosa (ch).

A mediana é uma medida estatística de posição, dividindo a série de dados (ordenada em modo crescente) em partes iguais. Assim, sabe-se que 50% das observações da série têm valor superior à mediana, enquanto a outra metade das observações possui valor inferior a ela. Além disso, a mediana não é tão sensível a valores discrepantes, como a média. A média, ao contrário da mediana, é uma medida muito influenciada por valores “muito altos” ou “muito baixos”, mesmo que esses valores surjam em baixa frequência na amostra. Desse modo, a média pode não representar adequadamente o conjunto dos dados.

A análise de evolução espacial e temporal foi realizada para os conjuntos “Minas Gerais – rio Doce” e “Espírito Santo – rio Doce”, visto que estes apresentavam um número razoável de observações para o cálculo de medianas.

Para o conjunto do Espírito Santo, conforme comentado anteriormente, algumas estações de monitoramento sofreram alterações de localização, de modo que a comparação com a linha-base só foi possível para as estações Colatina 1 e Linhares 1.

Magnitude das alterações na qualidade da água em decorrência do rompimento da barragem de Fundão

Em ordem de se conhecer a magnitude do impacto gerado pelo rompimento da barragem na qualidade da água, calculou-se o número de vezes em que o parâmetro avaliado ultrapassou (ou não) o valor de linha-base.

Tal comparação foi realizada para cada estação de monitoramento e para cada período pós-desastre em relação à condição pré-desastre, considerando as medianas, de acordo com a estação seca e a chuvosa, conforme a equação:

$$\text{Alteração} = \frac{\text{mediana}_{\text{pós-desastre}}}{\text{mediana}_{\text{pré-desastre}}}$$

A análise de magnitude foi realizada para os conjuntos “Minas Gerais – rio Doce” e “Espírito Santo – rio Doce”. Para o conjunto “Espírito Santo – rio Doce”, essa análise foi realizada somente para parâmetros e estações com série histórica.

Avaliação de diferenças estatísticas significativas

Por meio da aplicação do teste de permutação, de acordo com o descrito em Good (2013), foi possível avaliar se houve diferença estatística significativa entre os dados anteriores e posteriores ao desastre, visando dirimir eventuais questionamentos.

Tal análise foi realizada para os conjuntos “Minas Gerais – rio Doce” e “Espírito Santo – rio Doce”, sendo para este último avaliados somente os parâmetros turbidez, oxigênio dissolvido e pH, para os quais se possuem dados pré-rompimento. Os dados foram agrupados em períodos assim como apresentado anteriormente.

O teste estatístico de permutação foi utilizado para comparar as medianas dos períodos pré e pós-desastre. Foi calculado o valor da diferença entre as medianas dos dados observados. No passo seguinte, os rótulos (a que período o dado pertence) foram aleatorizados 10.000 vezes e, para cada uma das permutações, foi calculada a diferença entre as medianas, construindo-se, dessa forma, a distribuição empírica sob a hipótese de igualdade (H_0 : $Mediana_{Antes} = Mediana_{Depois}$). Com a distribuição, o *p-valor* foi calculado. Resultados de *p-valor* inferiores a 0,05 indicaram diferença estatística significativa, ou seja, as medianas do período pré e pós-desastre são estatisticamente diferentes (H_1 : $Mediana_{Antes} \neq Mediana_{Depois}$). Os resultados de *p-valor* referentes ao teste de permutação estão apresentados no Apêndice C.

Avaliação de não conformidades dos parâmetros de qualidade da água

Assim como realizado no relatório de linha-base, foram calculados para os diferentes períodos pós-desastre os percentuais de desacordos em relação aos limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2.

Os percentuais de desacordos dos períodos pós-desastre foram comparados com aqueles obtidos na linha-base, ou seja, na condição anterior ao desastre, respeitando a estação seca (sc) e a chuvosa (ch). Quando os percentuais de não conformidades do período pós-desastre foram superiores aos do período pré-desastre, os valores foram destacados em vermelho. Para aquelas estações e variáveis que não possuem valores de referência de linha-base, os valores foram comparados diretamente com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 e, quando em desacordo, os valores foram destacados em laranja.

Na referida análise, todas as observações de uma determinada estação e variável de qualidade de água foram comparadas com o limite legislado. Desse modo, o resultado indicou quantas observações do total apresentaram-se não conformes, contudo não apresenta em quanto o limite foi superado.

A avaliação de não conformidades foi executada para os três conjuntos de dados: “Minas Gerais – rio Doce” e “Espírito Santo – rio Doce”. Todavia, nem todas as estações e parâmetros avaliados possuem linha-base.

Avaliação dos percentis de 5% e 95%

A mediana representa o percentil de 50%, de modo que metade das observações possui valor inferior à mediana e a outra metade das observações da série tem valor superior à mediana. Com vistas a se obter uma visão com maior amplitude dos dados, foram calculados também os percentis de 5% e 95%, dependendo da variável analisada.

Com a série de dados ordenada em modo crescente, o percentil de 95% é o valor que separa as observações de modo que 95% dos dados sejam inferiores a ele. Desse modo, os 5% restantes dos dados são maiores que esse valor.

Para o percentil de 5%, 5% dos dados da série apresentam valor inferior a ele, enquanto 95% dos dados da série apresentam valor superior a ele.

Assim sendo, para os parâmetros de qualidade de água, cujo aumento de seus valores indica degradação do ambiente, foram calculados os percentis de 95%. Para aqueles parâmetros cuja diminuição indique degradação, foram calculados os percentis de 5% (por exemplo: oxigênio dissolvido). Para aqueles que se encaixam nos dois casos (por exemplo: pH), calcularam-se ambos os percentis.

A avaliação dos percentis foi realizada para os conjuntos “Minas Gerais – rio Doce” e “Espírito Santo – rio Doce”, visto que estes apresentavam um número razoável de observações para o cálculo dos percentis.

Avaliação dos dados de afluentes do rio Doce

Conforme citado anteriormente, o conjunto “Minas Gerais – afluentes do rio Doce” apresenta uma quantidade de observações inferior aos demais conjuntos, o que impossibilitou a realização das análises supracitadas.

Desse modo, visando avaliar possíveis alterações dos parâmetros de qualidade de água, foram utilizados gráficos de dispersão para cada uma das variáveis de qualidade de água, colocando-se na forma gráfica os dados do período seco e chuvoso em comparação ao limite legislado adotado, considerando os períodos pré e pós-desastre.

Tendo em vista a quantidade reduzida de dados, foram calculados para cada período avaliado e estação os valores mínimos e máximos das séries. Para o período pré-desastre, foram apresentadas também as medianas.

RESULTADOS

PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

Turbidez

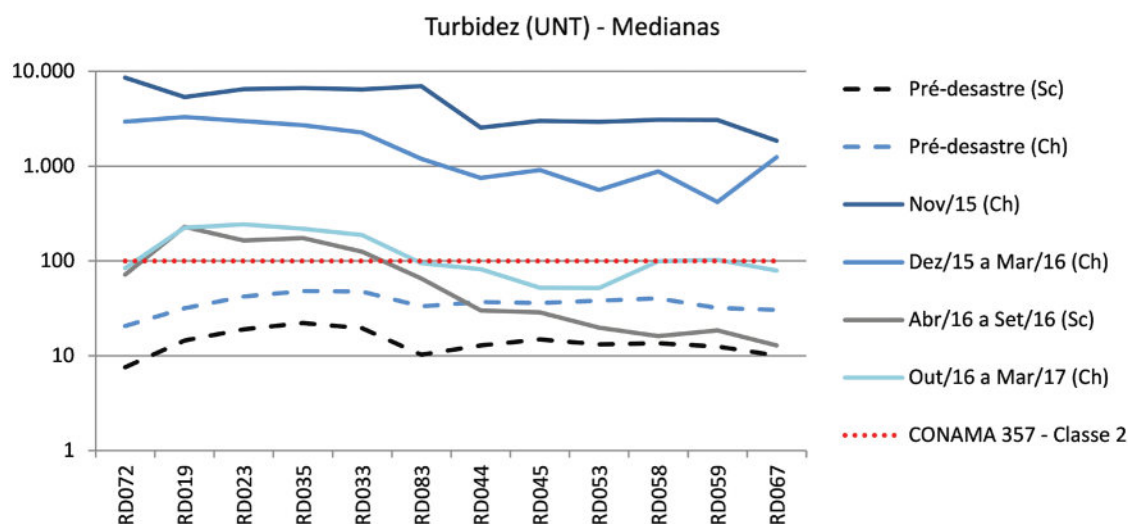
Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A **Figura 2** apresenta os valores de turbidez ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (em quatro períodos distintos) em relação à situação que se tinha previamente. Destaca-se que, no gráfico, em virtude da amplitude dos dados, os valores estão representados em termos de mediana, na escala logarítmica.

Quando comparados os quatro períodos pós-desastre entre si (novembro/2015; dezembro/2015 a março/2016; abril/2016 a setembro/2016; outubro/2016 a março/2017), observa-se inicialmente uma tendência à redução dos valores de turbidez ao longo do tempo. No período de outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa), entretanto, os valores voltaram a se elevar em relação ao período anterior, sendo superiores às condições de linha-base (estação chuvosa). Especialmente, têm-se, de modo geral, valores mais elevados nas estações de montante e mais baixos nas estações de jusante.

Figura 2 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez no rio Doce (MG), em termos de mediana.



A Figura 3 mostra a alteração do parâmetro turbidez, em número de vezes, quando comparados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação. Na **Figura 4**, estão apresentados os mesmos dados, com maior detalhamento, a fim de se destacar as variações ocorridas nos últimos períodos pós-desastre.

Logo após o desastre (período de novembro/2015), ocorreram as alterações mais significativas. Na estação RD072, entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, registrou-se um aumento de mais de 400 vezes em relação à condição pré-desastre. Na estação RD067 (entre os municípios de Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES), no mesmo período, observou-se a “menor” alteração: 60 vezes superior àquela registrada na linha-base.

No período seguinte, dezembro/2015 a março/2016, as alterações variaram para mais de 13 (RD059) a 140 vezes (RD072) em relação à situação anterior ao rompimento. Entre abril/2016 e setembro/2016, a alteração mais elevada foi observada na estação RD019 (entre os municípios de Rio Casca e Santa Cruz do Escalvado), sendo mais de 15 vezes superior à condição anterior. No período de outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa), apesar de se observar decréscimo no número de vezes de alterações em relação ao período anterior nas estações de montante, para as estações de jusante, a situação voltou a se agravar. No referido período, as concentrações medianas foram de 1,4 e 7,1 vezes superiores às concentrações medianas anteriores ao rompimento ao longo das estações.

Em relação à linha-base, as únicas estações que apresentaram algum indicativo de retomada à situação pré-rompimento foram aquelas a jusante do município de Tumiritinga/MG (RD053). Contudo, isso foi observado apenas para o primeiro período seco após o desastre (abril/2016 a setembro/2016), no período chuvoso seguinte (outubro/2016 a março/2017) os valores voltaram a se elevar (**Figura 4**).

Figura 3 – Alteração do parâmetro turbidez em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).

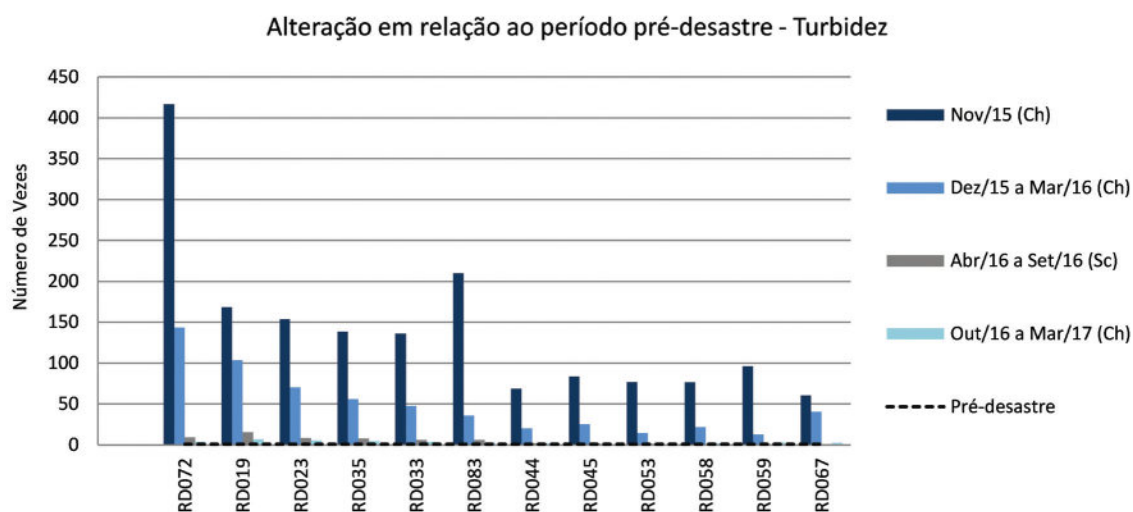
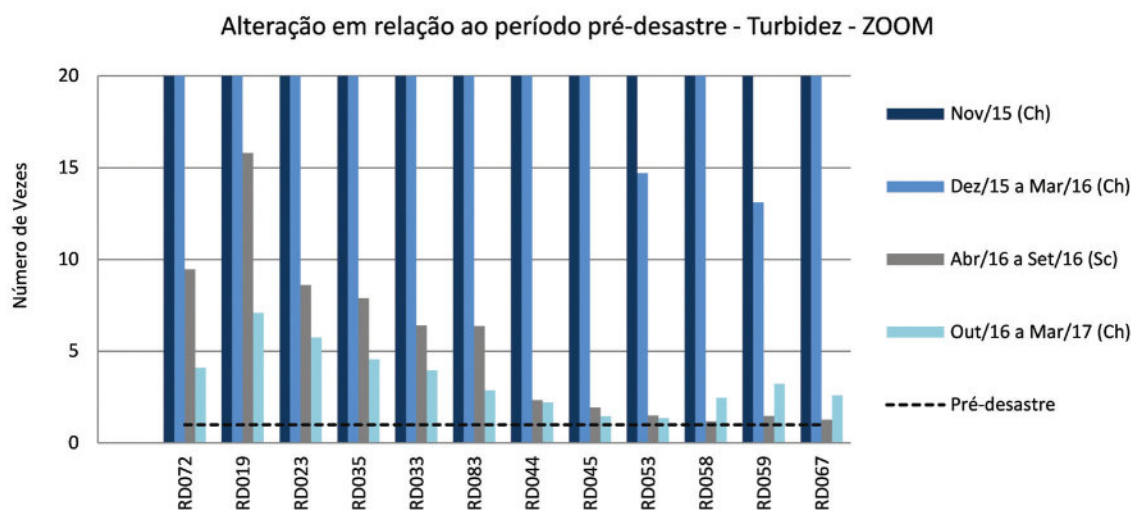


Figura 4 – Alteração do parâmetro turbidez em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG), com detalhamento.



A **Tabela 6** mostra a avaliação de conformidades do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre. No período anterior ao desastre, para a estação seca, os percentuais de desacordos variaram de 0% a 12% ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce. Na estação chuvosa, os percentuais de não conformidades variaram de 9% a 28% ao longo do rio Doce.

Com o rompimento da barragem de Fundão e a liberação dos rejeitos de minério de ferro, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 (≤ 100 UNT), de modo geral, aumentou, atingindo percentuais de desacordos de 100%, no período de novembro/2015. Entre dezembro/2015 e março/2016, os percentuais de desacordos ainda se mantiveram bastante elevados. Para o período de abril/2016 a setembro/2016, notou-se, para a maioria das estações, uma redução nos percentuais de desacordo em relação ao período anterior. Nas estações de monitoramento situadas mais a jusante, inclusive, os percentuais foram inferiores à condição pré-desastre (estação seca). Para o período de outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa), houve redução nos percentuais de desacordo nas estações de montante em relação ao período pós-desastre anterior, contudo, os percentuais de desacordo ainda se mostraram superiores à situação pré-desastre (estação chuvosa), em todas as estações de monitoramento avaliadas.

Tabela 6 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para turbidez (MG).

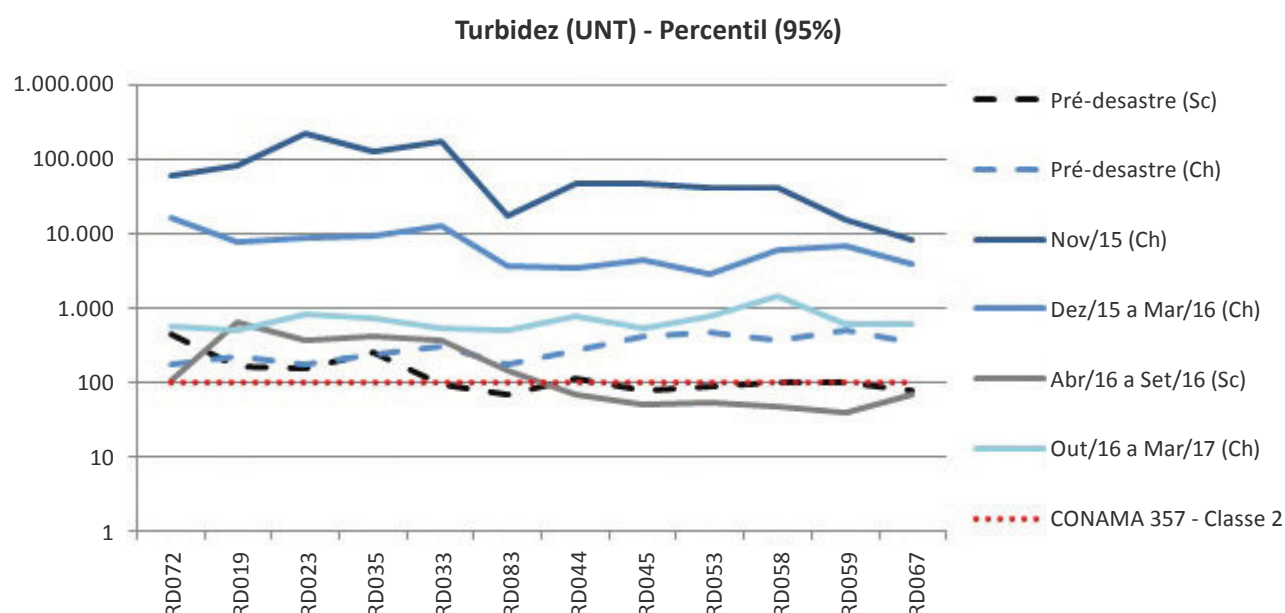
Percentual de desacordos – Turbidez						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	12%	9%	100%	93%	29%	33%
RD019	6%	18%	100%	100%	100%	78%
RD023	9%	22%	100%	100%	100%	83%

Percentual de desacordos – Turbidez						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD035	9%	22%	100%	100%	100%	78%
RD033	4%	27%	100%	100%	79%	78%
RD083	0%	13%	96%	92%	21%	44%
RD044	7%	20%	91%	100%	0%	41%
RD045	4%	24%	91%	100%	0%	41%
RD053	4%	23%	95%	100%	0%	39%
RD058	7%	28%	90%	100%	0%	50%
RD059	6%	27%	86%	92%	0%	56%
RD067	2%	27%	67%	100%	0%	44%

A **Figura 5** apresenta a evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%. Nesse caso, apenas 5% dos dados da série histórica podem apresentar valor igual ou superior ao indicado. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados na escala logarítmica.

Assim como registrado previamente para as medianas, observou-se temporalmente uma tendência à redução dos percentis de 95% da turbidez. Para o período de abril/2016 a setembro/2016, a partir de Governador Valadares (MG), a condição apresentou-se melhor do que aquela da linha-base (estação seca). No último período avaliado (outubro/2016 a março/2017), contudo, os valores voltaram a se elevar em comparação com o período de abril/2016 a setembro/2016. Tais valores também se apresentaram mais elevados do que a condição de linha-base (estação chuvosa), sendo a diferença menor nas estações de jusante.

Figura 5 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).



Afluentes do rio Doce

A **Figura 6** apresenta os valores de turbidez em afluentes do rio Doce, ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão. A escala do gráfico é logarítmica, dada a amplitude de valores observada.

Complementarmente, a **Tabela 7** apresenta os valores mínimos e máximos de turbidez para quatro diferentes períodos pós-desastre. Além dessas medidas, para o período anterior à ruptura da barragem, foram calculadas as medianas para a estação seca e a chuvosa.

De acordo com a **Figura 6**, nos rios Gualaxo do Norte (RD011) e do Carmo (RD071) foram registrados os valores mais elevados de turbidez após o desastre. Esses rios contribuem para a formação do rio Doce, sendo suas estações localizadas a 74,9 km e a 79,8 km da barragem de Fundão, respectivamente.

Para a estação RD071, no rio do Carmo, os valores máximos de turbidez nos períodos pós-desastre mostraram-se superiores aos máximos históricos. Nos períodos chuvosos pós-desastre, os valores máximos variaram entre 5.228 UNT e 32.848 UNT, sendo que, antes do rompimento, o valor máximo registrado foi de 219 UNT na estação chuvosa (Tabela 7). Para a estação RD011, no rio Gualaxo do Norte, os valores máximos de turbidez foram semelhantes aos do rio do Carmo, de modo geral, chegando a 32.510 UNT no período de dezembro/2015 a março/2016.

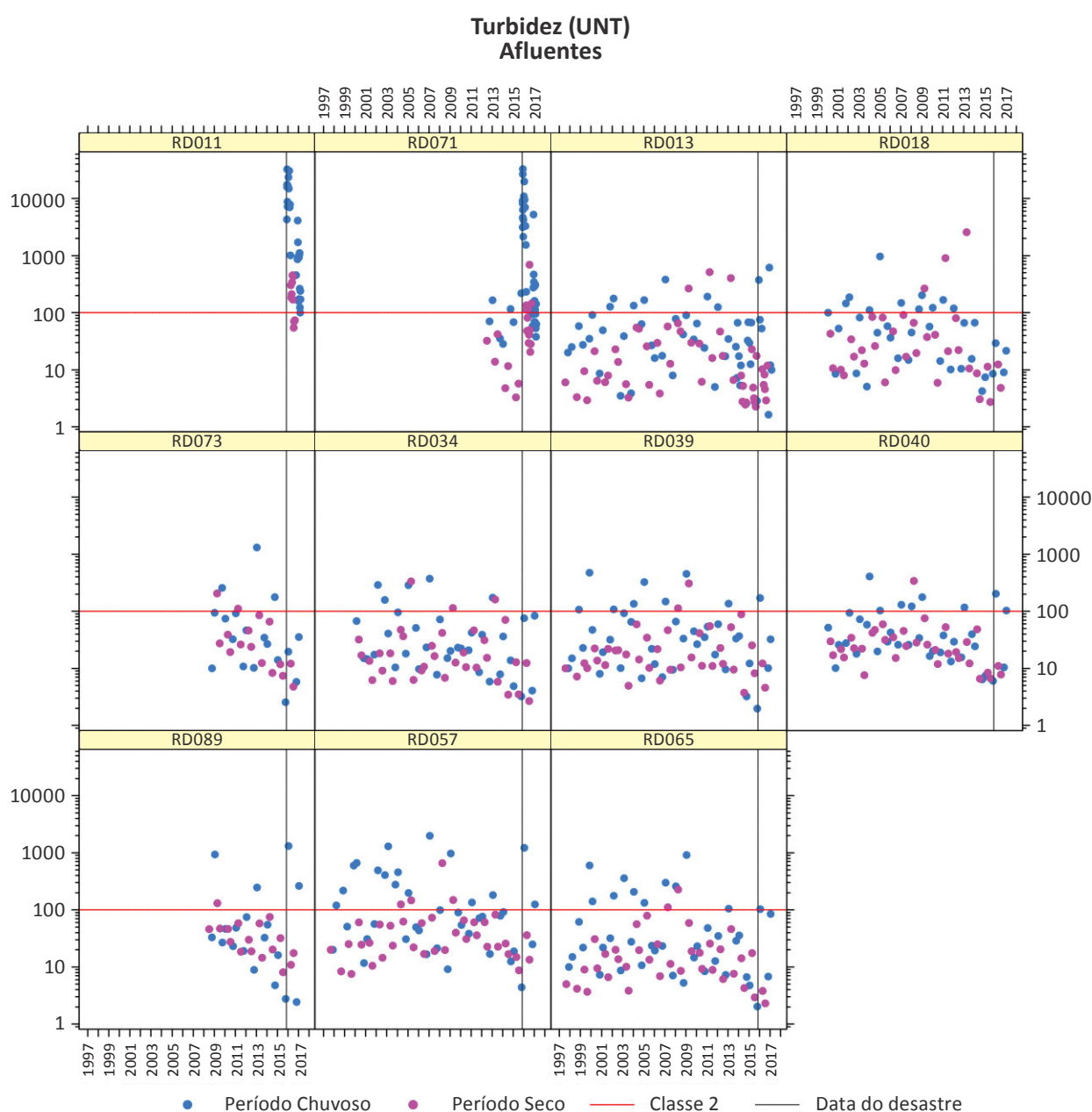
Para os rios Piranga (RD013), Piracicaba (RD034), Santo Antônio (RD039), Corrente Grande (RD040), Suaçuí Grande (RD089), Caratinga (RD057) e Manhuaçu (RD065), no período de dezembro/2015 a março/2016, os valores registrados para turbidez tenderam aos valores máximos da série histórica. Para a estação RD013, ainda, registrou-se valor superior ao da série histórica entre outubro/2016 e março/2017 (**Tabela 7**).

Para as estações RD018 (rio Piranga) e RD073 (ribeirão Sacramento), as observações realizadas após o desastre estiveram de acordo com o padrão mais frequente da série histórica. As referidas estações localizam-se a 23 km e 8 km do rio Doce, respectivamente.

Entre abril/2016 e setembro/2016, estação seca, os valores máximos registrados para turbidez foram inferiores àqueles da condição pré-desastre, com exceção da estação do rio do Carmo. Para a estação do rio Gualaxo do Norte (RD011), não existem dados pretéritos na base do IGAM, impedindo tal avaliação.

Na região em estudo, a turbidez é influenciada pela sazonalidade, tendo seus valores aumentados no período chuvoso. Com o retorno da estação chuvosa, entre outubro/2016 e março/2017, notaram-se, para as estações RD018 e RD034 (rio Piranga e rio Piracicaba), valores máximos de turbidez ainda mais elevados do que aqueles registrados entre dezembro/2015 e março/2016. Contudo, ambos os registros se mostraram inferiores aos valores máximos da série histórica.

É importante destacar que algumas estações de monitoramento estão localizadas a mais de 10 km do rio Doce. Desse modo, não se pode descartar que, em alguma localidade desses tributários com distância inferior a esta, possa ter ocorrido alguma alteração.

Figura 6 – Evolução temporal da turbidez em afluentes do rio Doce (MG).**Tabela 7** – Valores mínimos e máximos de turbidez em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Turbidez (UNT)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	3	2	3	7	3	4	7	8	8	3
	Med.	-	12	9	22	27	16	15	24	32	26	14
	Máx.	-	42	513	2.564	205	333	307	340	131	659	227
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	28	3	4	3	3	2	6	3	4	2
	Med.	-	70	33	55	35	22	33	29	33	76	23
	Máx.	-	219	380	964	1.312	373	474	407	935	1.986	914

		Turbidez (UNT)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	4.296	3.134	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	4.296	26.720	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	3	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	1.008	232	53	29	20	76	171	203	1.317	1.223	103
	Máx.	32.510	32.848	374	29	20	76	171	203	1.317	1.223	103
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	6	2	2	2	2	2	2	2	2
	Mín.	54	21	3	5	5	3	5	8	11	13	2
	Máx.	450	692	12	12	12	12	12	11	18	36	4
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	5	2	2	2	2	2	2	2	2
	Mín.	100	38	2	9	6	4	10	10	2	25	7
	Máx.	4.105	5.228	616	22	35	83	32	103	263	125	85

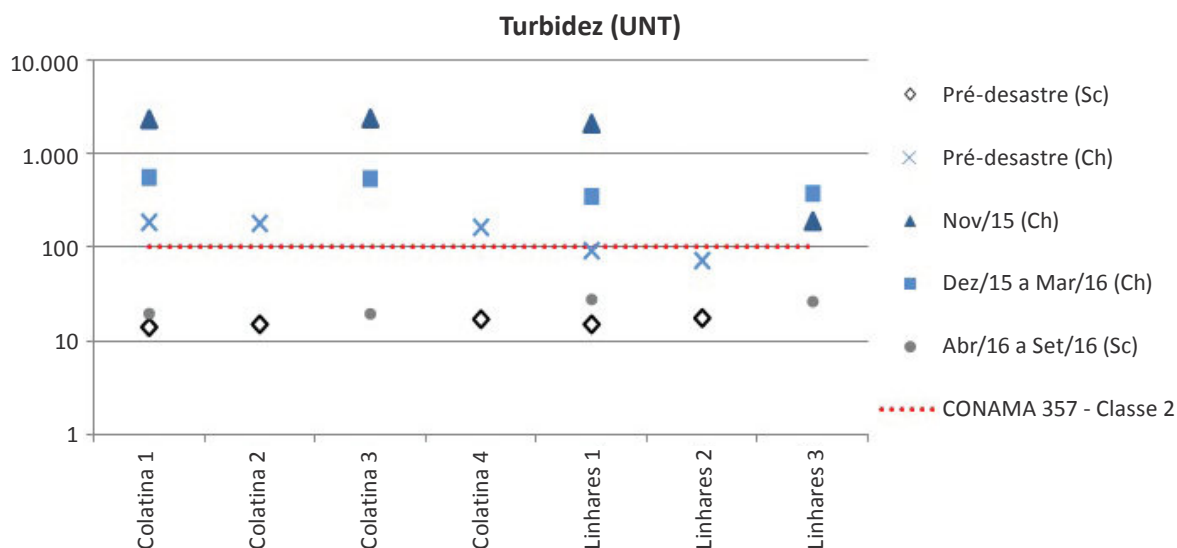
Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

Rio Doce

A **Figura 7** apresenta os valores de turbidez ao longo do rio Doce na porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão (em três períodos distintos) em relação à situação pretérita ao desastre. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana, em escala logarítmica. Em virtude da alteração da localização das amostragens de água após o desastre, algumas estações de monitoramento possuem somente dados anteriores ao desastre (Colatina 2, Colatina 4 e Linhares 2) enquanto outras só possuem dados posteriores ao rompimento (Colatina 3 e Linhares 3).

Figura 7 – Evolução temporal e espacial para o parâmetro turbidez no rio Doce (ES), em termos de mediana.

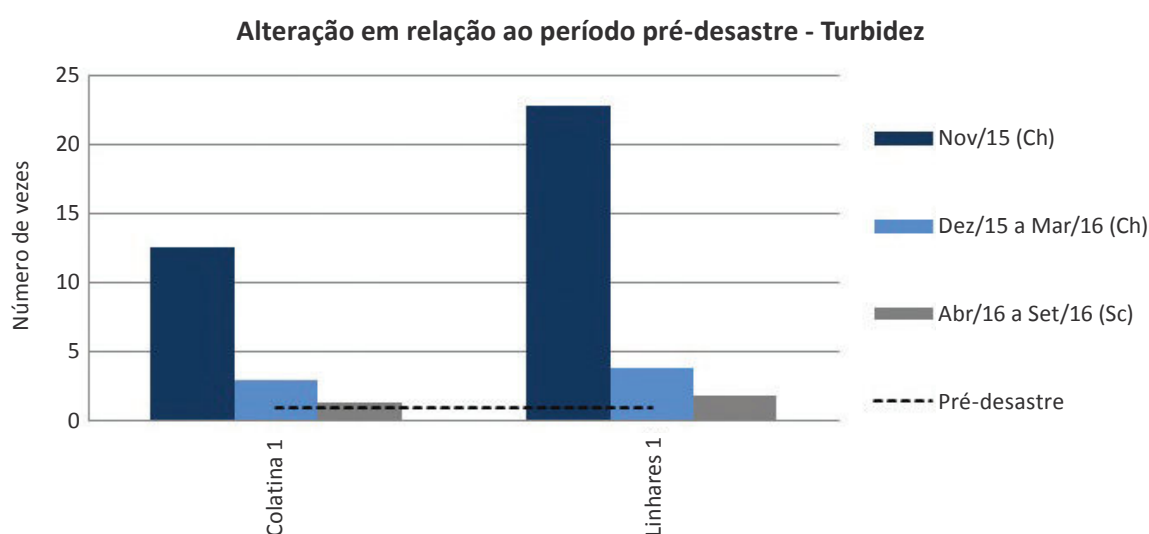


Temporalmente, os valores de turbidez no rio Doce após o desastre tenderam a diminuir, de modo geral. Para os períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016, as medianas apresentaram-se superiores às da linha-base (estação chuvosa). Para o período de abril/2016 a agosto/2016, as medianas aproximaram-se daquelas da condição pré-desastre (estação seca). Visto que o monitoramento na porção capixaba, por parte do IEMA, cessou a partir de agosto/2016, não foi possível observar se com o retorno da estação chuvosa os valores de turbidez voltaram a se elevar, como notado para a porção mineira.

Espacialmente, os valores de turbidez pós-rompimento apresentaram-se em modo decrescente de montante para jusante, principalmente na estação chuvosa. Para a estação seca, os valores apresentaram-se um pouco mais homogêneos, sendo os maiores valores observados a jusante.

A **Figura 8** mostra a alteração do parâmetro turbidez, em número de vezes, quando comparados os três períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizados os dados das estações Colatina 1 e Linhares 1, visto que estas apresentam valores de linha-base. As medianas dos dados serviram como base de comparação.

Figura 8 – Alteração do parâmetro turbidez em relação ao período pré-desastre em número de vezes (ES).



Para as estações Colatina 1 e Linhares 1, os valores medianos de turbidez no período de novembro/2015 chegaram a ser mais de 10 e 20 vezes superiores ao que existia para a condição anterior ao rompimento, respectivamente. Tendência ao retorno à condição de linha-base foi observada para o período de abril/2016 a agosto/2016. Contudo, a base de dados do IEMA não apresenta dados após esse período.

A **Tabela 8** mostra a avaliação de conformidades do rio Doce para a turbidez, na porção capixaba, com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 (≤ 100 UNT) para os períodos pré e pós-desastre. Foram destacados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre. Tal destaque ocorreu somente para as estações Colatina 1 e Linhares 1, que possuem dados de linha-base. Para estações de monitoramento sem referencial histórico, não conformidades com a referida resolução foram destacadas em laranja.

Paras as estações Colatina 1 e Linhares 1, observa-se na **Tabela 8** que, tanto para o período de novembro/2015 quanto para o período de dezembro/2015 a março/2016, os percentuais de não conformidades foram superiores ao que se tinha previamente ao rompimento (estação chuvosa). De modo geral, entre dezembro/2015 e março/2016, os percentuais foram ainda mais elevados do que aqueles do período de novembro/2015, chegando a 100%. Entre abril/2016 e agosto/2016, na estação Linhares 1, os percentuais de desacordos também se mostraram superiores aos da linha-base (estação seca).

Previamente ao rompimento, os valores de turbidez normalmente apresentavam-se mais elevados e com maior número de não conformidades com o limite da classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 na estação chuvosa. Com o desastre, tal problemática foi acentuada. Com o retorno da estação seca, a condição tendeu àquela do pré-desastre.

Tabela 8 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para turbidez (ES).

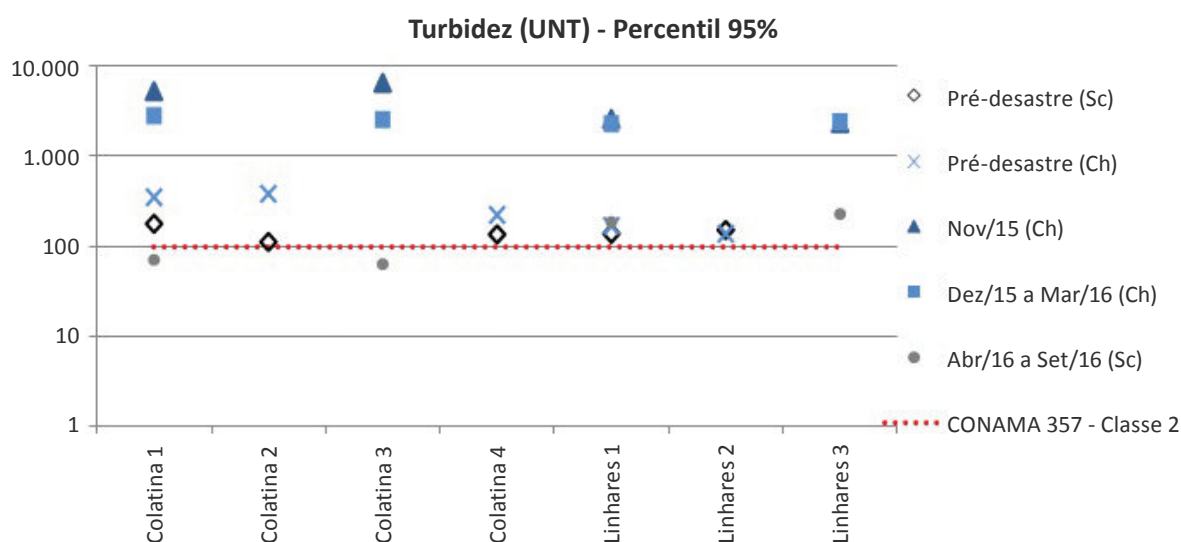
Percentual de Desacordos – Turbidez					
Estações IEMA	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	11%	75%	83%	100%	0%
Colatina 2	8%	83%			
Colatina 3			67%	100%	0%
Colatina 4	11%	75%			
Linhares 1	6%	43%	60%	94%	8%
Linhares 2	11%	29%			
Linhares 3			60%	87%	8%

A **Figura 9** apresenta a evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez, antes e após o rompimento da barragem de Fundão, considerando o percentil de 95%. Nesse caso, apenas 5% dos dados da série histórica podem apresentar valor igual ou superior ao indicado. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados na escala logarítmica.

Assim como registrado previamente para as medianas, observou-se no período após o rompimento uma tendência à redução dos percentis de 95% da turbidez ao longo do tempo. Sendo que, para o mês de novembro/2015, foram observados os maiores valores: 2.302 a 5.193 UNT. Para as estações Linhares 1 e Linhares 3, os percentis de 95% para os períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016 foram semelhantes, indicando a permanência de valores elevados mesmo depois de passados alguns meses após o desastre.

Para o período de abril/2016 a agosto/2016, os percentis de 95% foram semelhantes aos da condição pré-desastre.

Figura 9 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro turbidez no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



Oxigênio dissolvido (OD)

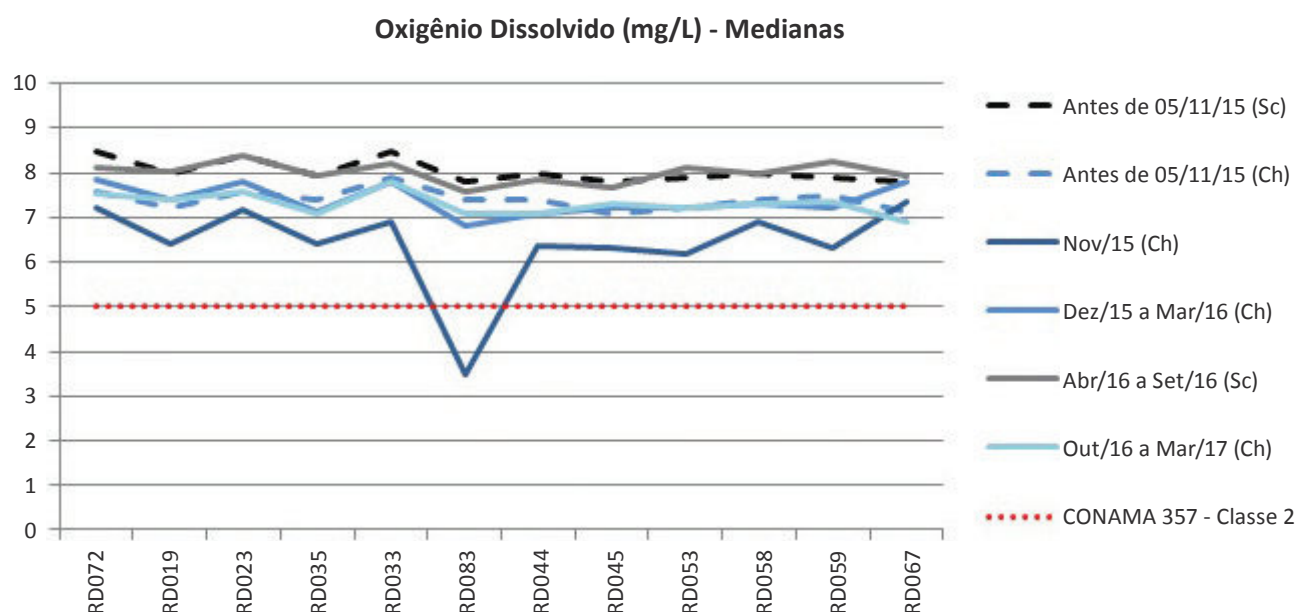
Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A **Figura 10** apresenta as concentrações de oxigênio dissolvido ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, em quatro períodos distintos, em relação à situação pretérita ao desastre. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana. Convém ressaltar que para o oxigênio dissolvido, ao contrário dos demais parâmetros, concentrações mais baixas indicam degradação da qualidade da água.

Quando comparados os períodos pós-desastre entre si, observou-se maior depleção das concentrações de oxigênio dissolvido no primeiro período pós-desastre (novembro/2015). Em especial na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), registrou-se concentração mediana inferior a 4,0 mg/L. Para o período subsequente, foi registrado aumento nas concentrações de oxigênio dissolvido em relação a novembro/2015. As concentrações do período de outubro/2016 a março/2017 mostraram-se inferiores às concentrações do período de abril/2016 a setembro/2016, tendendo ao retorno da condição pré-desastre para a maioria das estações, quando considerada a estação chuvosa.

Figura 10 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana.

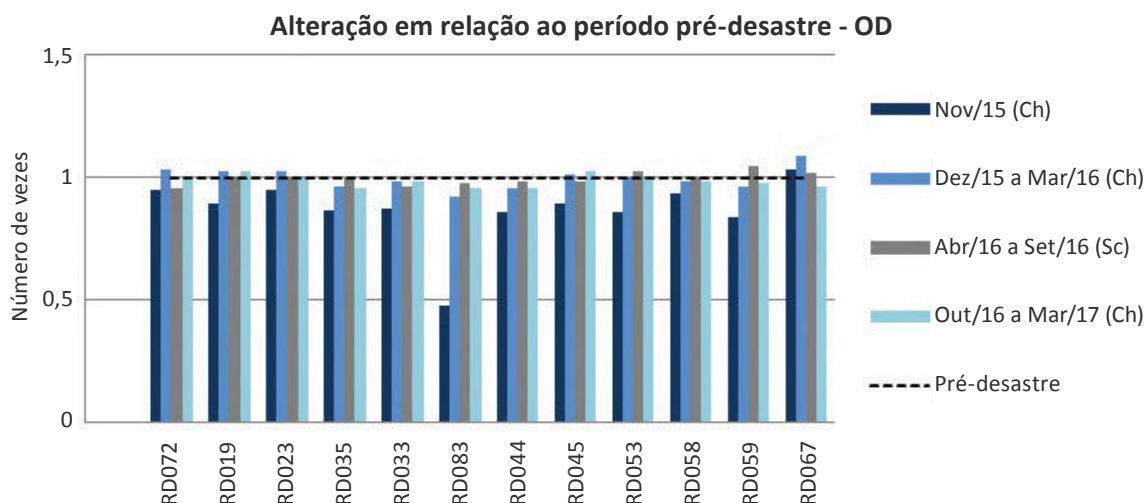


A **Figura 11** mostra a alteração do parâmetro oxigênio dissolvido, em número de vezes, em relação à condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação. Ressalta-se que ao contrário dos demais parâmetros, para o oxigênio dissolvido, valores abaixo da linha “pré-desastre” indicam degradação na qualidade da água, no tocante a essa variável.

Logo após o desastre (período de novembro/2015), ocorreram as alterações mais relevantes. Na estação RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito, registrou-se um decréscimo em mais da metade da concentração de oxigênio dissolvido comparativamente à condição de linha-base. Para os demais períodos pós-desastre, ainda foram observadas alterações ao longo das estações, contudo menos relevantes do que as observadas para novembro/2015, sendo as alterações mais acentuadas na estação RD083.

Para a estação RD044 (no município de Governador Valadares), mesmo para o período de outubro/2016 a março/2017, ainda foi encontrada diferença estatística de acordo com o teste de permutação.

Figura 11 – Alteração do parâmetro oxigênio dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



A **Tabela 9** mostra a avaliação de conformidades do rio Doce em relação às concentrações de oxigênio dissolvido com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 (≥ 5 mg/L) para os períodos pré e pós-desastre. Foram destacados em vermelho os percentuais de desacordo pós-desastre que se mostraram superiores aos percentuais do período pré-desastre. Nota-se que, no período anterior ao desastre, não foram registrados percentuais de desacordos ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce.

Com o rompimento da barragem, no mês de novembro/2015, as concentrações de oxigênio dissolvido no rio Doce estiveram em desacordo com o disposto pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Percentual de não conformidades de 57% foi registrado na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), sendo que não conformidades foram registradas em todas as estações avaliadas no rio Doce. Nos períodos subsequentes, as concentrações de oxigênio dissolvido retornaram às condições da linha-base, em termos de percentuais de desacordos.

Tabela 9 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para oxigênio dissolvido (MG).

Percentual de desacordos – Oxigênio Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0%	0%	4%	0%	0%	0%
RD019	0%	0%	13%	0%	0%	0%
RD023	0%	0%	13%	0%	0%	0%
RD035	0%	0%	17%	0%	0%	0%
RD033	0%	0%	13%	0%	0%	0%
RD083	0%	0%	57%	0%	0%	0%
RD044	0%	0%	13%	0%	0%	0%

Percentual de desacordos – Oxigênio Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD045	0%	0%	13%	0%	0%	0%
RD053	0%	0%	10%	0%	0%	0%
RD058	0%	0%	14%	0%	0%	0%
RD059	0%	2%	29%	0%	0%	0%
RD067	0%	0%	5%	0%	0%	0%

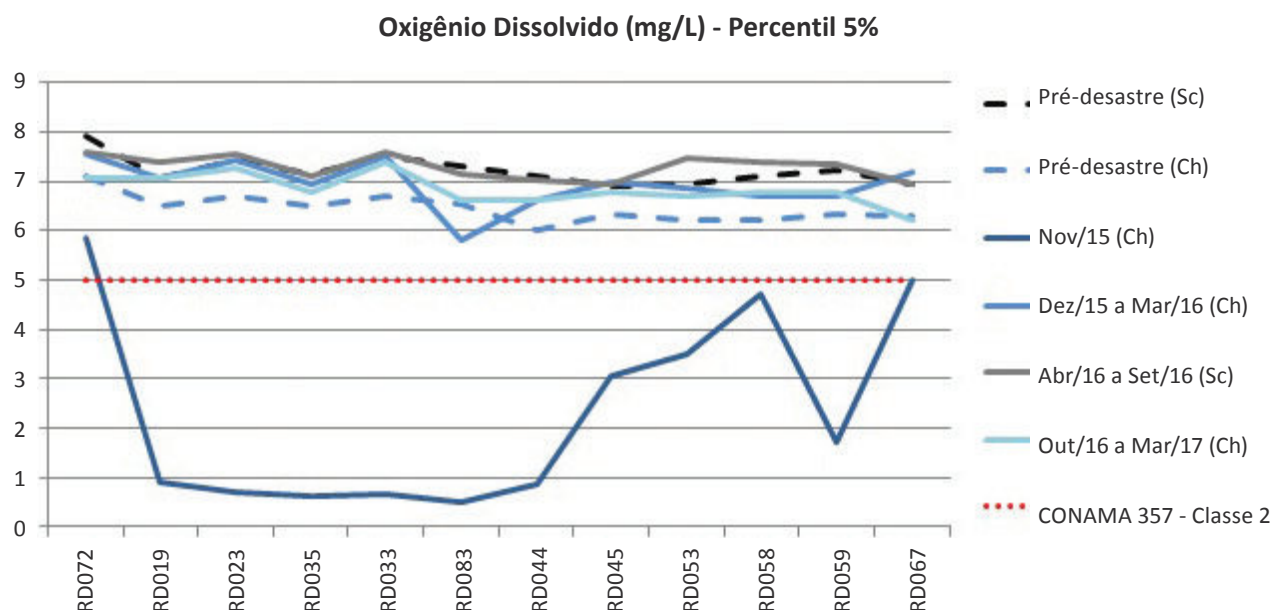
A Figura 12 apresenta a evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido, antes e após o desastre, considerando o percentil de 5%. Nesse caso, 5% dos dados da série apresentam valor inferior ao referido percentil, enquanto 95% dos dados da série apresentam valor superior a ele.

Em relação aos períodos pós-desastre, quando considerado o percentil de 5%, a maior depleção de oxigênio dissolvido ocorreu no período de novembro/2015, chegando a valores inferiores a 1 mg/L entre as estações RD019 e RD044. Para esse período, de modo geral, os valores foram inferiores ao limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 (5 mg/L).

Para a estação RD072, no dia 07/11/2015, registrou-se concentração de oxigênio dissolvido de 0,6 mg/L, mas a partir de então os valores se apresentaram superiores a 5 mg/L. A referida estação situa-se justamente na confluência dos rios do Carmo e Piranga, que formam o rio Doce. Assim, mesmo que a lama de rejeitos tenha passado pela calha do rio do Carmo após a confluência deste com o rio Gualaxo do Norte, a entrada do rio Piranga pode ter impactado positivamente as concentrações de oxigênio dissolvido no rio Doce, na estação RD072.

Temporalmente, observou-se uma tendência à recuperação da condição pré-desastre, visto que, para os três últimos períodos pós-desastre avaliados, os percentis de 5% já se mostraram semelhantes àqueles da linha-base para a maioria das estações.

Figura 12 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 5%.



Afluentes do rio Doce (MG)

A Figura 13 apresenta as concentrações de oxigênio dissolvido em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão.

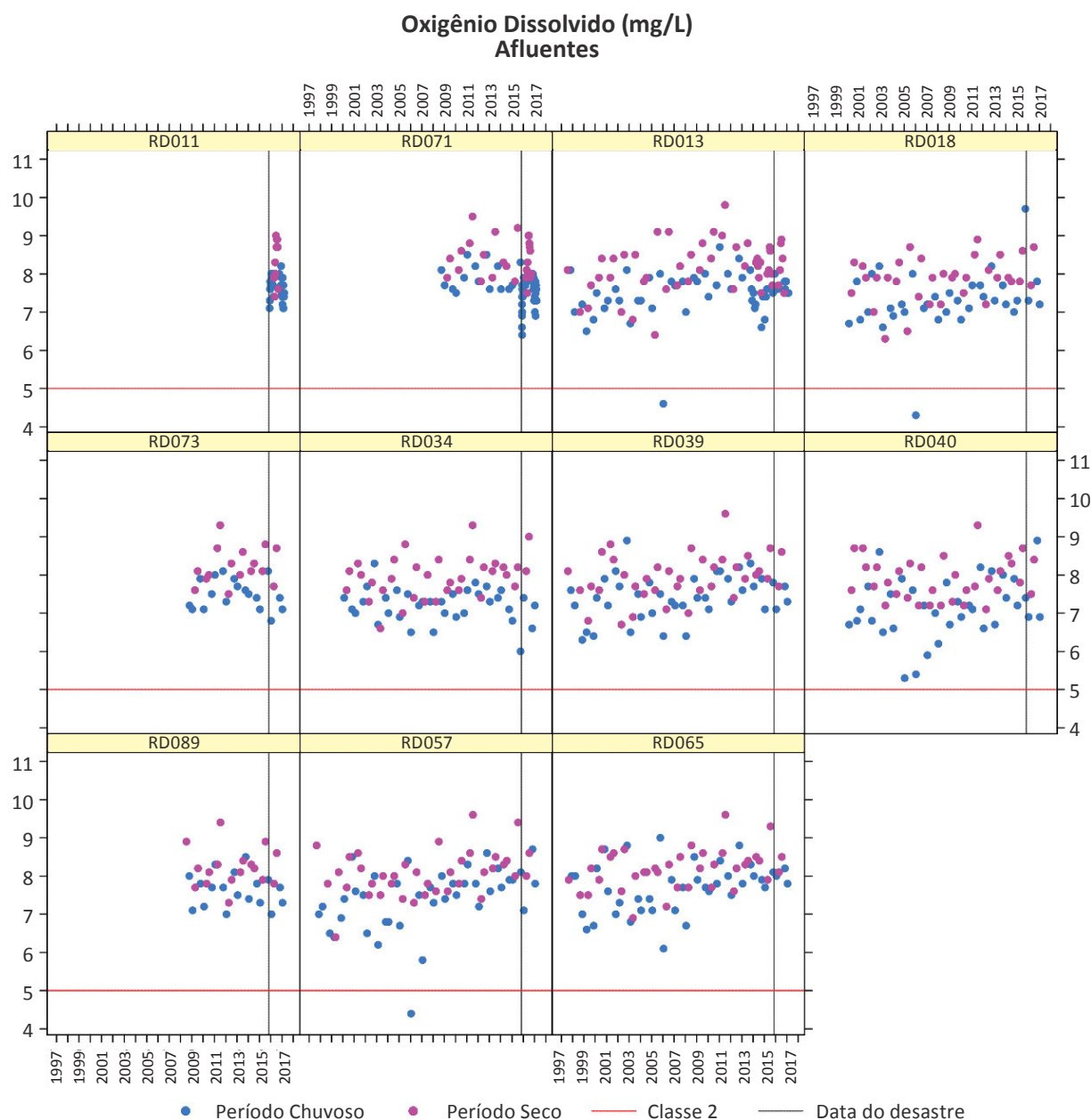
Complementarmente, a **Tabela 10** apresenta as concentrações mínimas e máximas de oxigênio dissolvido para quatro diferentes períodos pós-desastre. Além dessas medidas, para o período anterior à ruptura da barragem, foram calculadas as medianas para a estação seca e a chuvosa.

Em relação ao número de observações de oxigênio dissolvido, cabe destacar que a estação RD011, no rio Gualaxo do Norte, foi instalada após o desastre, de modo que não possui dados pré-teritos a novembro/2015. Com exceção das estações RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo), as demais estações de monitoramento de afluentes do rio Doce possuem um número reduzido de observações após o desastre, visto que seu monitoramento ocorreu de modo menos frequente.

Temporalmente, os valores de turbidez no rio Doce após o desastre tenderam a diminuir, de modo geral. Para os períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016, as medianas apresentaram-se superiores às da linha-base (estação chuvosa). Para o período de abril/2016 a agosto/2016, as medianas aproximaram-se daquelas da condição pré-desastre (estação seca). Visto que o monitoramento na porção capixaba, por parte do IEMA, cessou a partir de agosto/2016, não foi possível observar se com o retorno da estação chuvosa os valores de turbidez voltaram a se elevar, como notado para a porção mineira.

Espacialmente, os valores de turbidez pós-rompimento apresentaram-se em modo decrescente de montante para jusante, principalmente na estação chuvosa. Para a estação seca, os valores apresentaram-se um pouco mais homogêneos, sendo os maiores valores observados a jusante.

Figura 13 – Evolução temporal do oxigênio dissolvido em afluentes do rio Doce (MG).



Para a estação RD071 (rio do Carmo), observaram-se concentrações mínimas de oxigênio dissolvido inferiores aos mínimos históricos em todos os períodos pós-desastre, indicando possíveis alterações.

Em relação à estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), a concentração mínima registrada foi de 7,1 mg/L, ocorrendo nos períodos de novembro/2015 e de outubro/2016 a março/2017, sendo que não há histórico de dados para a referida estação.

De acordo com a **Figura 13**, para as demais estações avaliadas, observou-se de maneira geral que as concentrações de oxigênio dissolvido após o desastre mantiveram-se de acordo com o padrão histórico. De acordo com a **Tabela 10**, para a maioria das estações, registraram-se valores mínimos inferiores às medianas históricas nos períodos pós-desastre.

Tabela 10 – Valores mínimos e máximos de oxigênio dissolvido em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Oxigênio Dissolvido (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	7,8	6,4	6,3	7,5	6,6	6,7	7,1	7,3	6,4	6,9
	Med.	-	8,4	8,2	7,9	8,1	8,0	7,9	7,8	8,2	8,1	8,2
	Máx.	-	9,5	9,8	8,9	9,3	9,3	9,6	9,3	9,4	9,6	9,6
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	7,5	4,6	4,3	7,1	6,0	6,3	5,3	7,0	4,4	6,1
	Med.	-	7,8	7,5	7,2	7,5	7,3	7,4	7,2	7,7	7,5	7,7
	Máx.	-	8,5	8,7	9,7	8,1	8,3	8,9	8,6	8,5	8,6	9,0
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	7,1	6,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	7,1	7,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	3	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	7,3	7,0	7,6	7,3	6,8	7,4	7,1	6,9	7,0	7,1	8,0
	Máx.	8,0	7,9	8,0	7,3	6,8	7,4	7,1	6,9	7,0	7,1	8,0
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	6	2	2	2	2	2	2	2	2
	Mín.	7,4	7,5	7,5	7,7	7,7	8,1	7,7	7,5	7,8	8,0	8,1
	Máx.	9,0	9,0	8,9	8,7	8,7	9,0	8,6	8,4	8,6	8,6	8,5
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	5	2	2	2	2	2	2	2	2
	Mín.	7,1	6,9	7,5	7,2	7,1	6,6	7,3	6,9	7,3	7,8	7,8
	Máx.	8,2	8,0	7,8	7,8	7,4	7,2	7,7	8,9	7,7	8,7	8,2

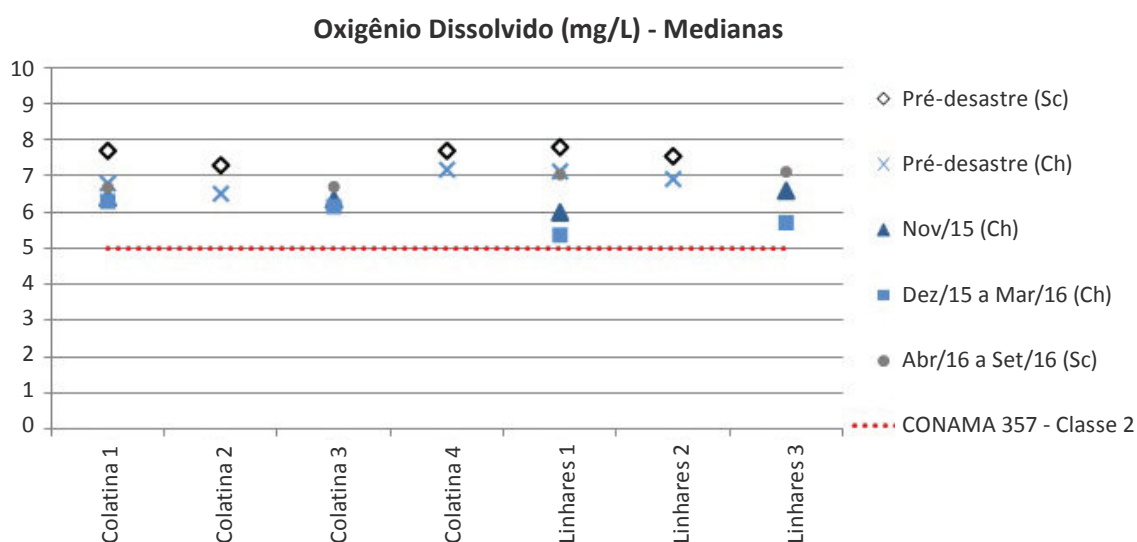
Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A **Figura 14** apresenta as concentrações de oxigênio dissolvido ao longo do rio Doce na porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em relação à situação pretérita ao desastre, em três períodos distintos. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana. Em virtude da alteração da localização das amostragens de água após o desastre, algumas estações de monitoramento possuem somente dados anteriores ao desastre (Colatina 2, Colatina 4 e Linhares 2) enquanto outras só possuem dados posteriores ao rompimento (Colatina 3 e Linhares 3).

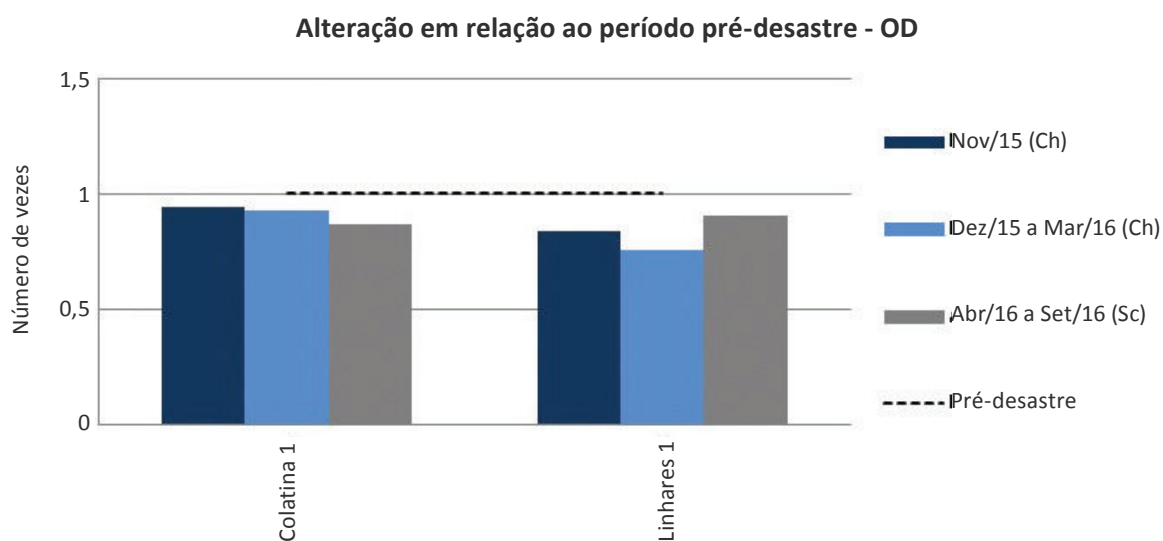
Após o desastre, concentrações de oxigênio dissolvido mais baixas foram observadas no período de dezembro/2015 a março/2016, inclusive inferiores às concentrações do período de novembro/2015. Contudo, há de se destacar que, para o período de novembro/2015, houve menos observações do que para o período de dezembro/2015 a março/2016, o que pode ter influenciado tal resultado. Entre abril/2016 e agosto/2016, observaram-se valores mais elevados de oxigênio dissolvido do que os observados nos últimos períodos, porém ainda inferiores aos valores de linha-base.

Figura 14 – Evolução temporal e espacial para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce (ES), em termos de mediana.



Na **Figura 15**, observam-se possíveis alterações do parâmetro oxigênio dissolvido, em número de vezes, em relação à condição pré-desastre. De maneira geral, nota-se que as concentrações de oxigênio dissolvido nos três períodos pós-desastre apresentaram-se inferiores à situação de linha-base, indicando uma qualidade de água mais degradada. Para o último período, o teste de permutação indicou diferença estatística significativa em relação ao período pré-desastre.

Figura 15 – Alteração do parâmetro oxigênio dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (ES).



A **Tabela 11** mostra a avaliação de conformidades do rio Doce, na porção capixaba, para o oxigênio dissolvido com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 ($\leq 5,0$ mg/L), considerando os períodos pré e pós-desastre. Foram destacados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre. Tal destaque ocorreu somente para as estações Colatina 1 e Linhares 1, que possuem dados de linha-base. Para estações de monitoramento sem referencial histórico, não conformidades com a referida resolução foram destacadas em laranja.

Tabela 11 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para oxigênio dissolvido (ES).

Percentual de Desacordos – Oxigênio Dissolvido					
Estações IEMA	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	0%	0%	0%	16%	0%
Colatina 2	0%	0%			
Colatina 3			0%	13%	0%
Colatina 4	0%	0%			
Linhares 1	6%	0%	0%	29%	0%
Linhares 2	6%	14%			
Linhares 3			0%	23%	0%

Em relação aos períodos pós-desastre, somente para o período de dezembro/2015 a março/2016 foram observados aumentos nos percentuais de desacordos em relação à condição pré-desastre. Para as estações Colatina 3 e Linhares 3, que não apresentam dados anteriores ao desastre, foram registrados percentuais de desacordo de 13% e 23%, respectivamente. No período de abril/2016 a agosto/2016, estação seca, não foram registrados desacordos.

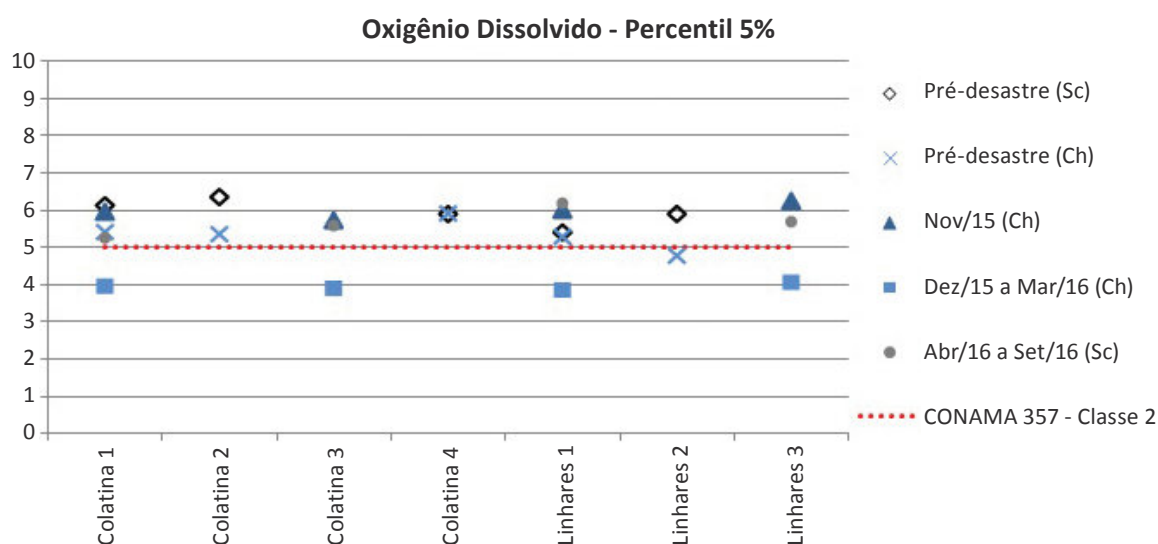
A Figura 16 apresenta a evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido, antes e após o rompimento da barragem de Fundão, considerando o percentil de 5%.

A maior depleção de oxigênio dissolvido foi observada no período de dezembro/2015 a março/2016, com concentrações em torno de 4,0 mg/L nas quatro estações monitoradas após o desastre. Tais valores são inferiores ao limite mínimo disposto pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2.

Para o período de abril/2016 a agosto/2016, os percentis de 5% mostraram-se superiores ao limite mínimo da referida resolução e mais próximos dos valores de linha-base.

Em novembro/2015, as concentrações foram sempre superiores a 5 mg/L. Contudo, o número de observações desse período foi inferior (entre 7 e 8 observações para as quatro estações) em comparação com o período de dezembro/2015 a março/2016 (entre 31 e 32 observações para as quatro estações), que apresentou ao longo do tempo concentrações inferiores ao limite legislado. Assim, a diferença entre o número de observações pode ter influenciado tal resultado.

Figura 16 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro oxigênio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 5% (ES).



pH

Resultados para o estado de Minas Gerais

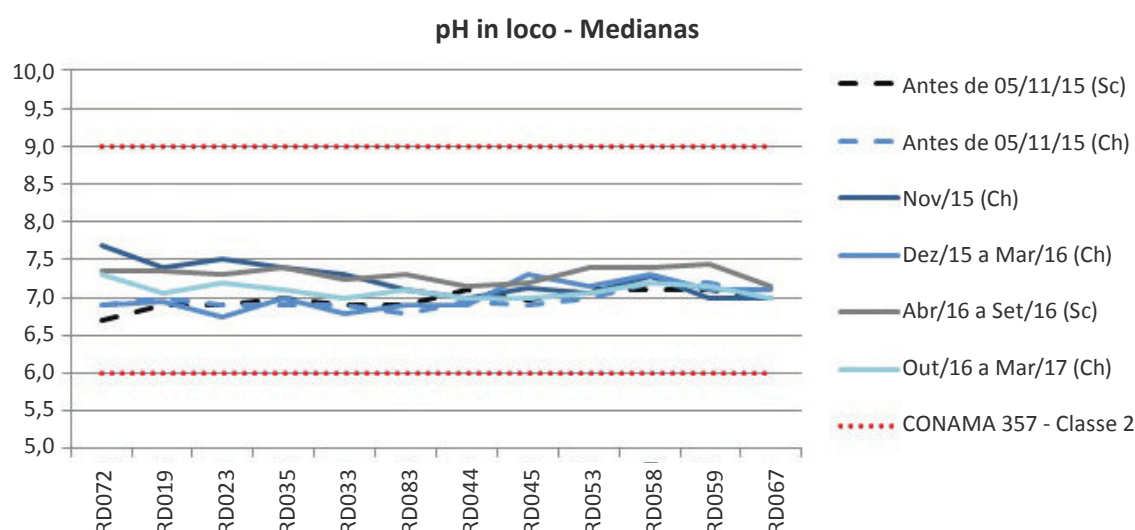
Rio Doce

A **Figura 17** apresenta os valores de pH ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, em quatro períodos distintos, em relação à situação pretérita ao desastre. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana.

De modo geral, com o rompimento da barragem de Fundão, alterações de pH mais relevantes foram observadas até a estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito). Após esse ponto, os valores de pH tornaram-se mais semelhantes àqueles da condição pré-desastre.

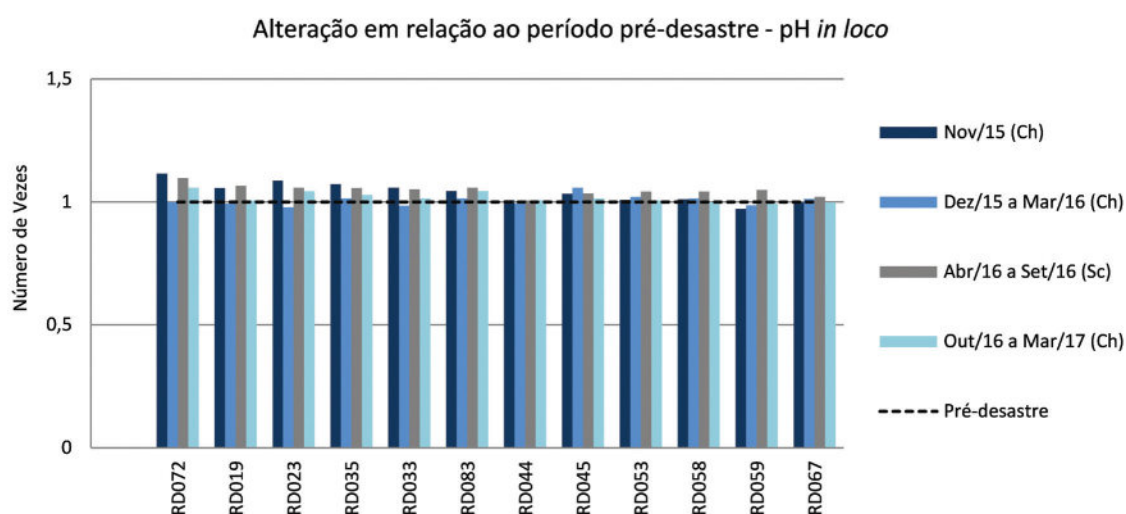
Logo após o desastre (novembro/2015), a tendência foi de elevação do pH na água até a estação RD083. Entre dezembro/2015 e março/2016, estação chuvosa, os valores de pH diminuíram, ficando próximos da linha-base. Para o período de abril/2016 a setembro/2016 (estação seca), contudo, os valores ainda se mostraram superiores aos da linha-base. No último período pós-desastre avaliado (outubro/2016 a março/2017), os valores se elevaram em relação à linha-base, mas se apresentaram inferiores aos períodos de novembro/2015 e abril/2016 a setembro/2016.

Figura 17 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce (MG), em termos de mediana.



A **Figura 18** mostra possíveis alterações do parâmetro pH, em número de vezes, quando confrontados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação. Conforme o gráfico, alterações mais relevantes de pH ocorreram nos períodos de novembro/2015 e abril/2016 a setembro/2016, em especial, até a estação RD083.

Figura 18 – Alteração do parâmetro pH em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



A **Tabela 12** mostra a avaliação de conformidades dos valores de pH, em estações do rio Doce, com o limite disposto pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 (6,0 a 9,0), para os períodos pré e pós-desastre. Foram destacados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre.

Tabela 12 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para pH (MG).

Percentual de desacordos – pH						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0%	4%	0%	0%	0%	0%
RD019	0%	0%	0%	7%	0%	6%
RD023	0%	0%	0%	7%	0%	6%
RD035	0%	2%	0%	7%	0%	0%
RD033	0%	0%	0%	8%	0%	0%
RD083	0%	4%	0%	8%	0%	0%
RD044	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD045	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD053	0%	2%	0%	0%	0%	11%
RD058	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD059	0%	0%	5%	8%	0%	0%
RD067	2%	0%	10%	8%	0%	0%

No período anterior ao desastre, para a estação seca, os percentuais de desacordos variaram de 0% a 2% ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce. Na estação chuvosa, os percentuais de não conformidades variaram de 0% a 4%. Após o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 aumentou em algumas estações nos períodos de novembro/2015, de dezembro/2015 a março/2016 e de outubro/2016 a março/2017, todos de característica chuvosa.

A **Figura 19** e a **Figura 20** apresentam a evolução espacial e temporal para o parâmetro pH, antes e após o desastre, considerando o percentil de 5% e 95%, respectivamente. Em relação ao percentil de 5%, os valores dos diversos períodos avaliados apresentaram-se semelhantes entre si. Diferença mais perceptível foi observada para o período de novembro/2015, que apresentou valores mais elevados até a estação RD083.

Figura 19 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 5% (MG).

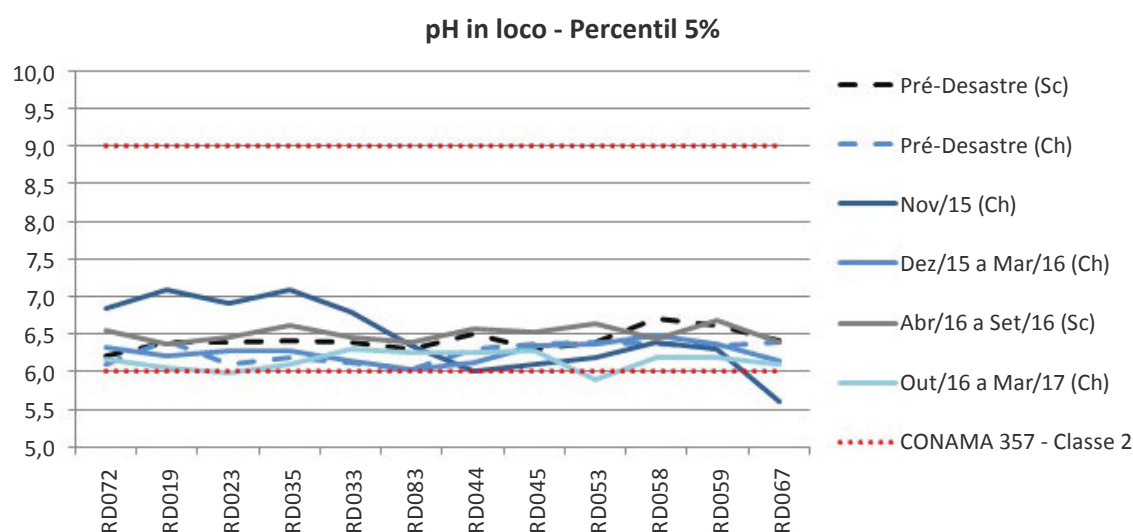
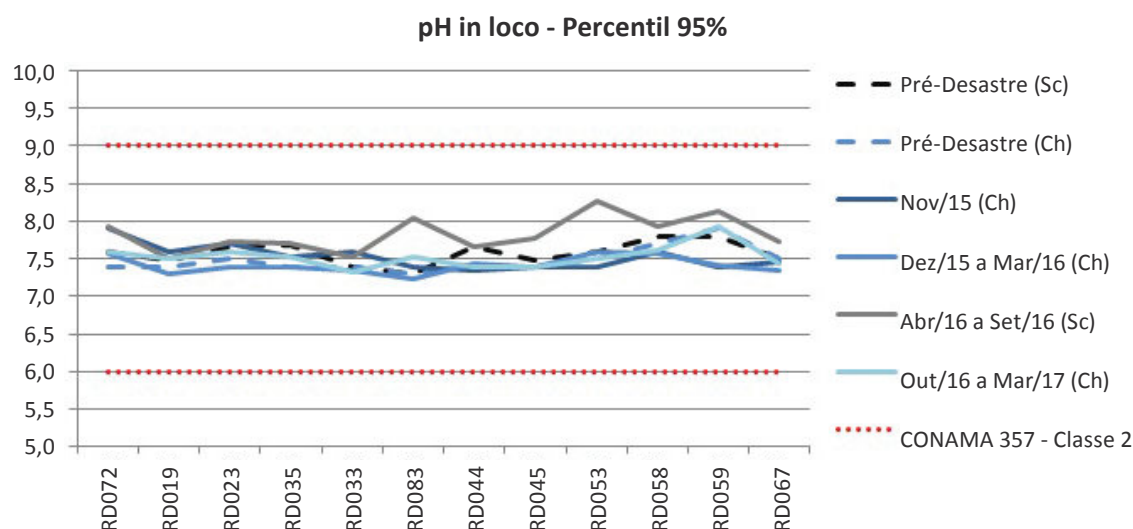


Figura 20 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).



Para o percentil de 95%, os dados gerados após o desastre apresentaram-se semelhantes às anteriores ao rompimento. No período de abril/2016 a setembro/2016 (estação seca), os valores de pH a partir da estação RD083 apresentaram-se mais alcalinos em relação à linha-base.

Afluentes do rio Doce

A **Figura 21** apresenta os valores de pH em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão.

Complementarmente, a Tabela 13 apresenta os valores mínimos e máximos de pH para quatro diferentes períodos pós-desastre. Além dessas medidas, para o período anterior à ruptura da barragem, foram calculadas as medianas para a estação seca e a chuvosa.

De acordo com a **Figura 21**, para o período pós-desastre, pode-se observar apenas uma não conformidade registrada na estação RD011 (5,8 unidades de pH). Nessa estação, os valores variaram entre 5,8 e 8,2 unidades de pH.

Para as estações RD071 a RD073, os valores de pH pós-desastre tenderam a se apresentar mais elevados. A estação RD040 (rio Corrente Grande) também apresentou um valor de pH máximo de 9,0 superior à série histórica.

Para as demais estações em afluentes do rio Doce avaliadas, os valores de pH mantiveram-se de acordo com o padrão da série histórica.

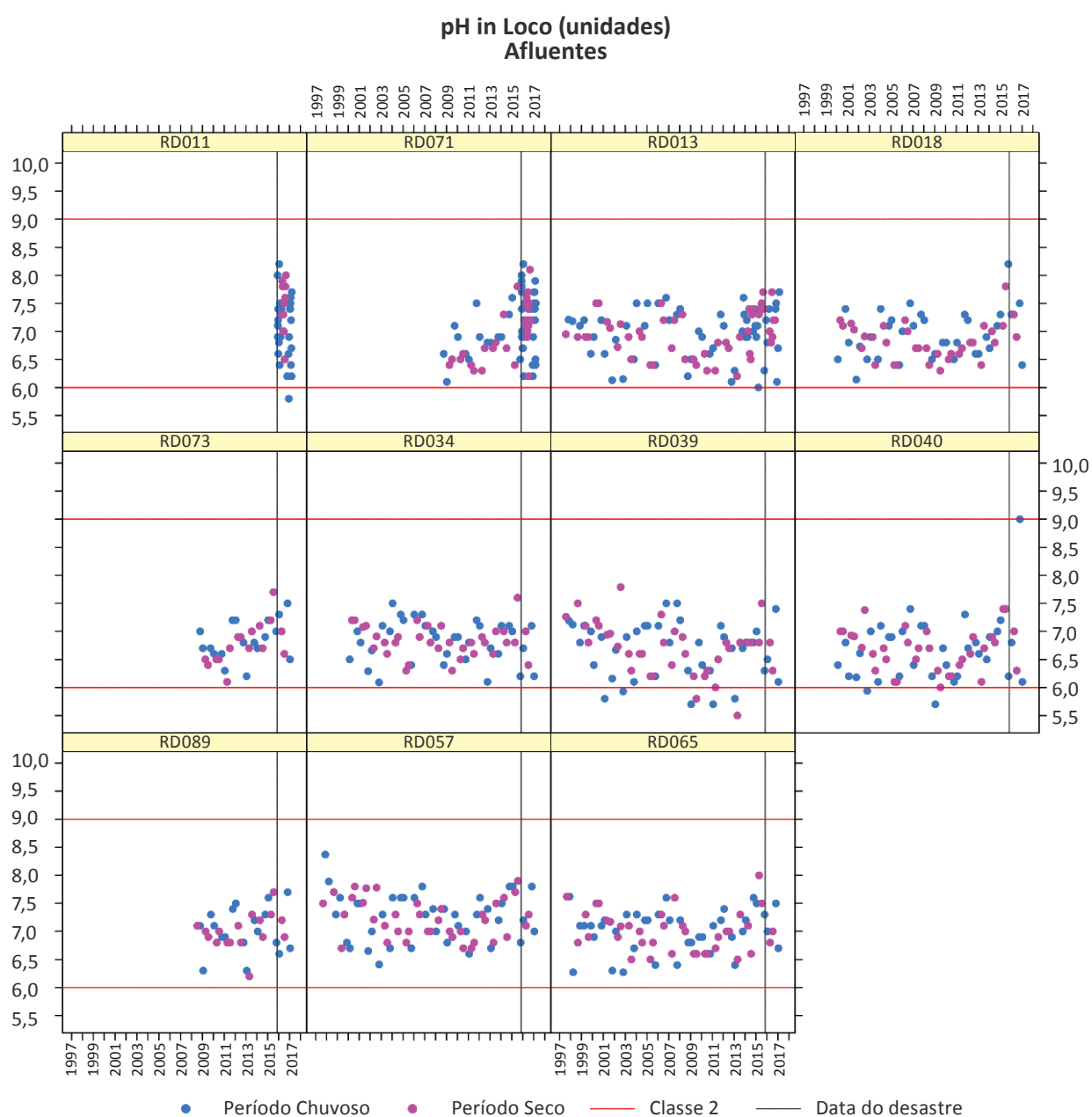
Figura 21 – Evolução temporal do pH em afluentes do rio Doce (MG).

Tabela 13 – Valores mínimos e máximos de pH em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		pH <i>in loco</i>										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	6,3	6,2	6,3	6,1	6,3	5,5	6,0	6,2	6,7	6,5
	Med.	-	6,6	6,9	6,8	6,7	6,8	6,8	6,7	7,0	7,2	7,0
	Máx.	-	7,8	7,7	7,8	7,7	7,6	7,8	7,4	7,7	7,9	8,0
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	6,1	6,0	6,1	6,2	6,1	5,7	5,7	6,3	6,4	6,3
	Med.	-	6,9	7,0	6,9	6,8	6,9	6,8	6,7	7,1	7,3	7,1
	Máx.	-	7,6	7,6	8,2	7,2	7,5	7,5	7,4	7,6	8,4	7,6
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	8,0	6,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	8,0	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	3	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	6,4	6,2	6,8	7,3	7,3	6,7	6,5	6,8	6,6	7,2	7,0
	Máx.	8,2	8,2	7,4	7,3	7,3	6,7	6,5	6,8	6,6	7,2	7,0
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	6	2	2	2	2	2	2	2	2
	Mín.	6,5	6,2	6,8	6,9	6,6	6,4	6,3	6,3	6,9	7,1	6,8
	Máx.	8,0	8,1	7,7	7,3	7,0	7,0	6,8	7,0	7,2	7,3	7,0
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	5	2	2	2	2	2	2	2	2
	Mín.	5,8	6,2	6,1	6,4	6,5	6,2	6,1	6,1	6,7	7,0	6,7
	Máx.	7,7	7,9	7,7	7,5	7,5	7,1	7,4	9,0	7,7	7,8	7,5

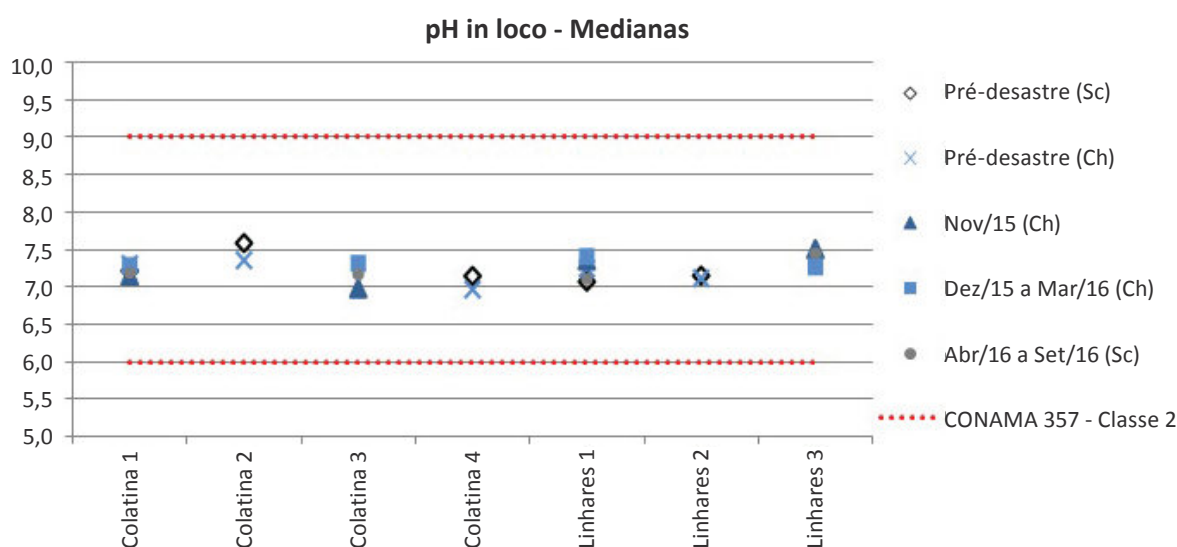
Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A **Figura 22** apresenta os valores de pH registrados ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão (em três períodos distintos) em relação à situação pretérita ao desastre. No gráfico, os valores estão representados em termos de mediana.

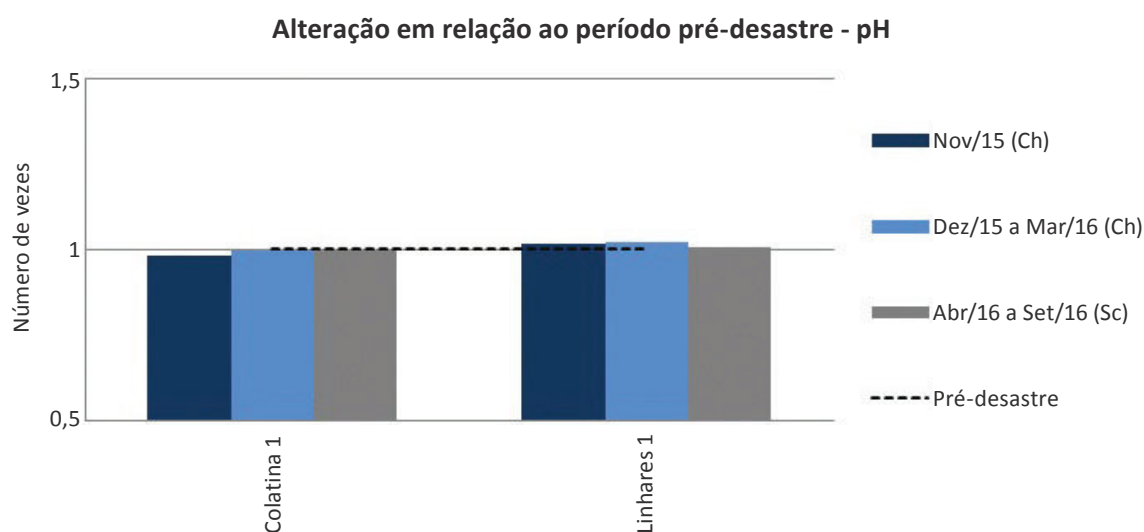
Para as estações Colatina 1 e Linhares 1, que possuem dados de linha-base, observa-se que as medianas dos períodos pós-desastre são semelhantes àquelas do período pré-desastre. Para as estações Colatina 3 e Linhares 3, as medianas pós-desastre não apresentaram diferenças relevantes entre si.

Figura 22 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce (ES), em termos de mediana.



A Figura 23 apresenta a alteração do parâmetro pH, em número de vezes, quando comparados os períodos pré e pós-desastre. Observa-se que as medianas de pH antes e após o desastre apresentam semelhança entre si, sem indicar grandes alterações.

Figura 23 – Alteração do parâmetro pH em relação ao período pré-desastre em número de vezes (ES).



A Tabela 14 apresenta os percentuais de desacordos para os valores de pH em relação ao limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 (6,0 a 9,0), para os períodos pré e pós-desastre. Foram destacados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre. Para estações de monitoramento sem referencial histórico, não conformidades com a referida resolução foram destacadas em laranja.

No período anterior ao desastre, na estação seca, os percentuais de desacordo variaram de 0% a 11% entre as estações. Na estação chuvosa, não havia na série histórica valores em desacordo com os limites legislados.

Com o rompimento da barragem, percentuais de desacordos mais elevados ocorreram entre dezembro/2015 e março/2016, sendo, inclusive, superiores aos percentuais de desacordos referentes ao período pré-desastre, quando consideradas as estações Colatina 1 e Linhares 1.

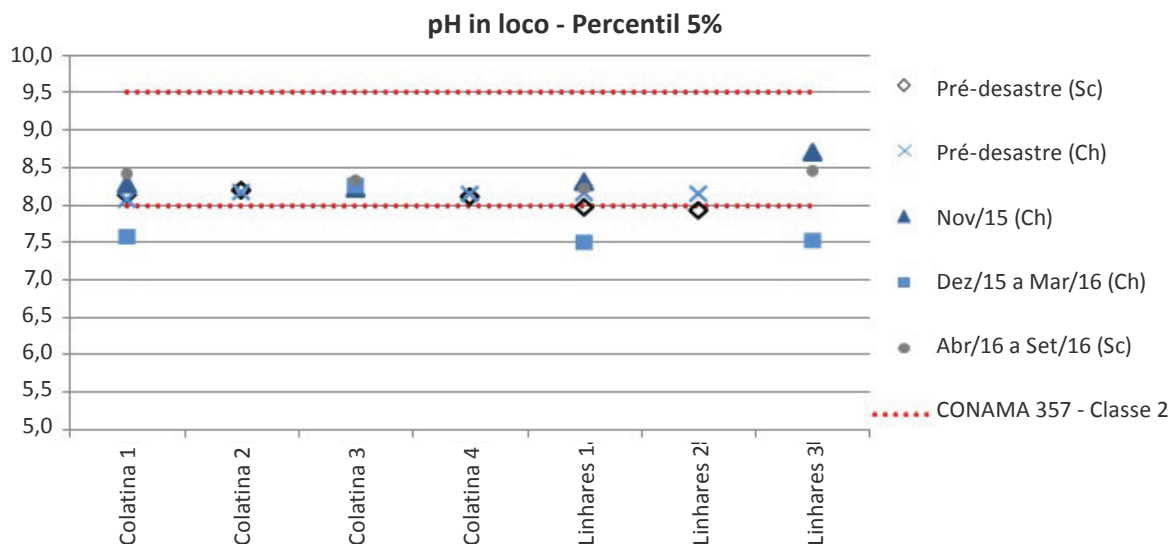
No período subsequente, de abril/2016 a agosto/2016, não foram registrados desacordos de pH com os limites legislados.

Tabela 14 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para pH (ES).

Percentual de Desacordos – pH					
Estações IEMA	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	0%	0%	0%	9%	0%
Colatina 2	0%	0%			
Colatina 3			0%	3%	0%
Colatina 4	5%	0%			
Linhares 1	6%	0%	0%	16%	0%
Linhares 2	11%	0%			
Linhares 3			0%	13%	0%

A **Figura 24** e a **Figura 25** apresentam a evolução espacial e temporal para o parâmetro pH, antes e após o rompimento da barragem de Fundão, considerando o percentil de 5% e 95%, respectivamente.

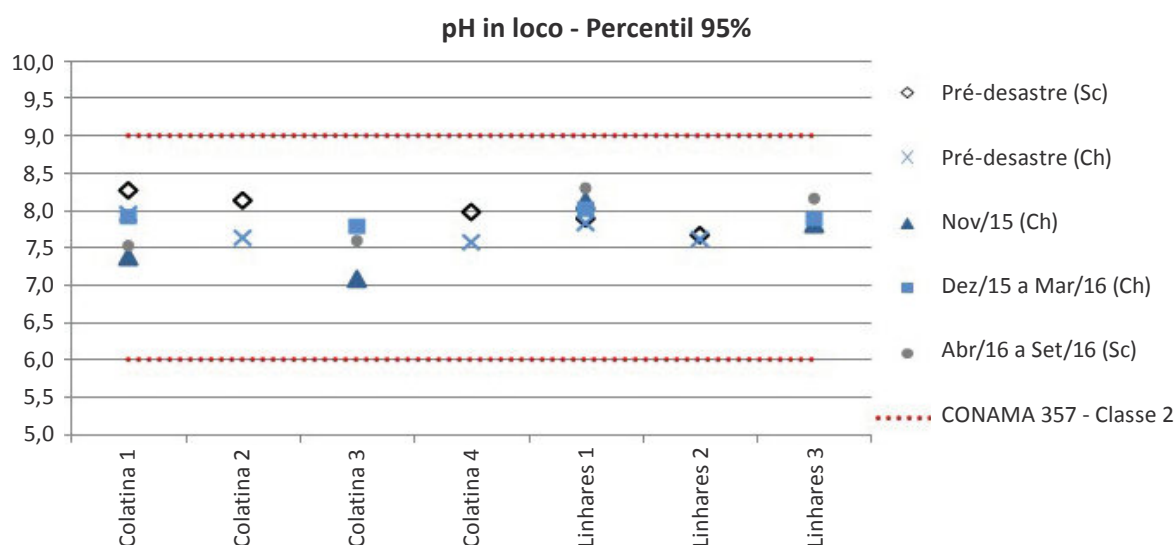
Figura 24 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 5% (ES).



Em relação aos percentis de 5%, valores inferiores foram observados para o período de dezembro/2015 a março/2016. Nas estações Colatina 1 e Linhares 1, foram inferiores, inclusive, aos valores de linha-base e estiveram abaixo do limite mínimo legislado. Nas estações avaliadas após o desastre (Colatina 1, Colatina 3, Linhares 1 e Linhares 3), os percentis de 5% dos períodos de novembro/2015 e abril/2016 a agosto/2016 foram similares.

Para os percentis de 95%, diferenças mais perceptíveis entre os períodos avaliados ocorreram nas estações Colatina 1 e Colatina 3, com valores mais baixos observados no período de novembro/2015. Os valores estiveram de acordo com os limites legislados.

Figura 25 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro pH no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



Alumínio dissolvido

Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A **Figura 26** e a **Figura 27** (em detalhes) apresentam as concentrações de alumínio dissolvido ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (em quatro períodos distintos) em relação à situação que se tinha previamente. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana. Convém destacar que, para as séries de dados pré-desastre (estação seca e chuvosa), os valores de mediana são próximos ao limite da classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 ($\leq 0,100$ mg/L).

Quando avaliados os quatro períodos pós-desastre entre si, observou-se tendência à redução das concentrações ao longo do tempo. Especialmente, valores mais elevados foram registrados nas estações de jusante. Para os dois últimos períodos pós-desastre avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), os valores de mediana se aproximaram da condição pré-desastre.

Figura 26 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana.

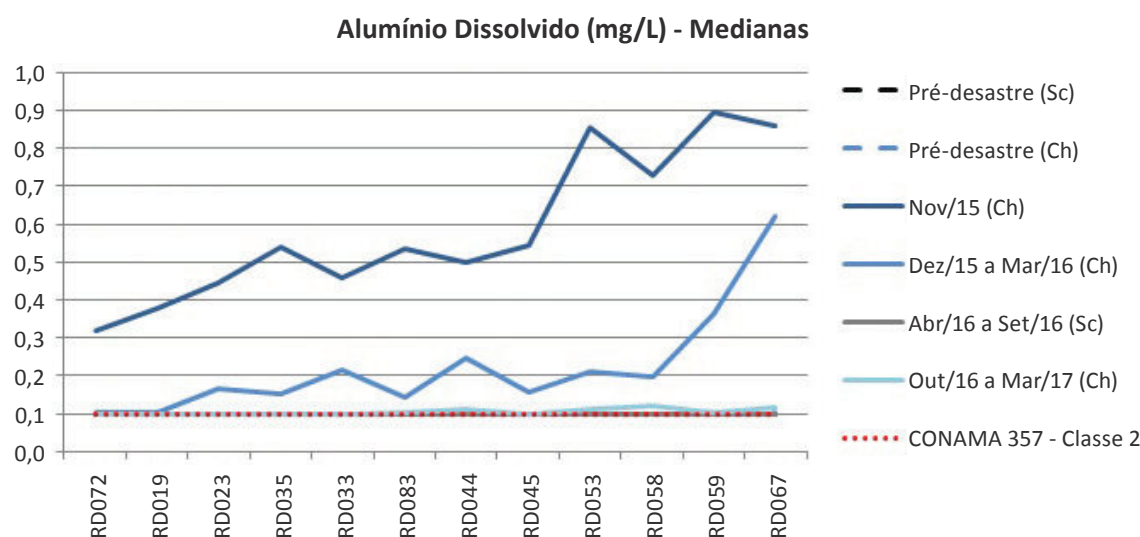
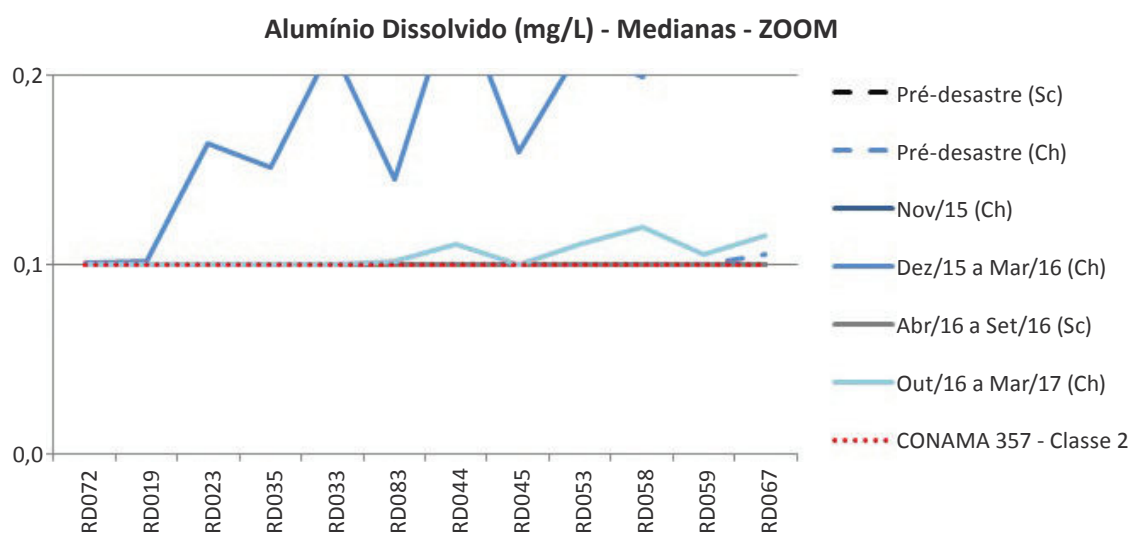


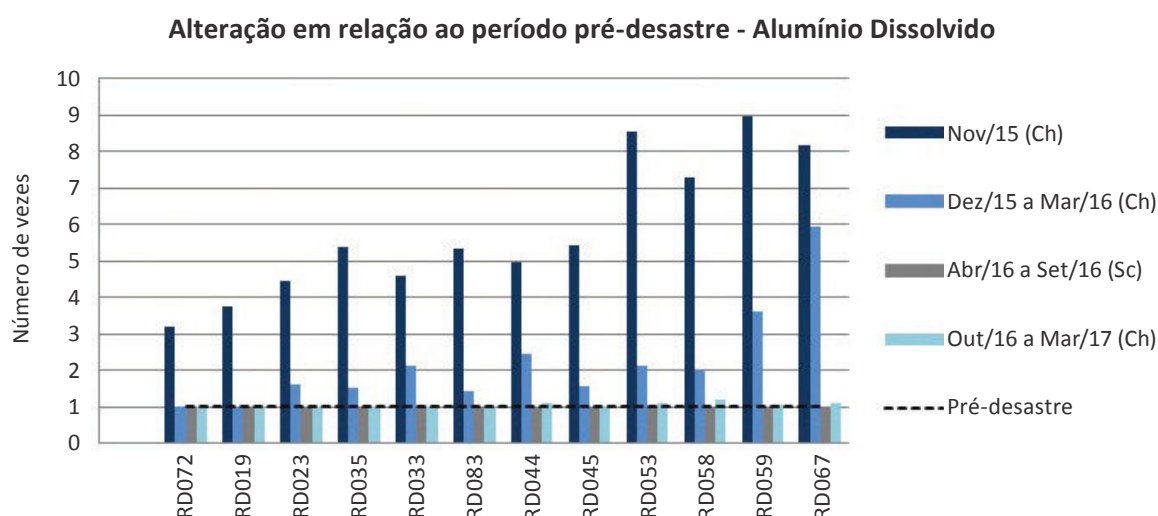
Figura 27 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana, com detalhamento.



A **Figura 28** mostra a alteração do parâmetro alumínio dissolvido, em número de vezes, quando confrontados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação.

No período de novembro/2015, ocorreram as alterações mais significativas, sendo que, nas estações situadas mais a jusante, foram observadas alterações mais elevadas: entre 7 e 9 vezes superior em relação à condição pré-desastre. Entre dezembro/2015 e março/2016, a alteração máxima foi observada na estação RD067 (entre os municípios de Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES), sendo 6 vezes superior ao que se tinha na linha-base. Nos períodos subsequentes (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), o número de vezes em que a situação pré-desastre foi superada não passou de 1,2, sendo na maioria igual a 1, ou seja, uma condição semelhante àquela anterior do rompimento da barragem.

Figura 28 – Alteração do parâmetro alumínio dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



A **Tabela 15** mostra a avaliação de conformidades do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre.

No período anterior ao desastre, para a estação seca, os percentuais de desacordos variaram de 0% a 11% ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce. Na estação chuvosa, os percentuais de não conformidades variaram de 12% a 44% ao longo do rio Doce. Após o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 ($\leq 0,3$ mg/L) aumentou de modo mais significativo nos dois primeiros períodos avaliados (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016). Para o período de abril/2016 a setembro/2016, notou-se para a maioria das estações uma redução nos percentuais de desacordo em relação ao período de dezembro/2015 a março/2016. Nas estações de monitoramento situadas mais a jusante, inclusive, os percentuais foram inferiores à condição pré-desastre (estação seca). Para o período de outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa), os percentuais de desacordo voltaram a se elevar, salvo para as estações RD035 e RD067, nas quais os percentuais ficaram próximos ou inferiores aos da condição pré-desastre.

Tabela 15 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para alumínio dissolvido (MG).

Percentual de desacordos – Alumínio Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	7%	20%	96%	50%	7%	22%
RD019	0%	30%	96%	50%	0%	17%
RD023	9%	30%	96%	57%	0%	17%
RD035	0%	30%	100%	64%	15%	39%
RD033	9%	30%	100%	69%	15%	44%
RD083	0%	7%	96%	69%	7%	50%
RD044	0%	30%	91%	69%	15%	53%

Percentual de desacordos – Alumínio Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD045	0%	20%	91%	77%	23%	47%
RD053	0%	30%	100%	75%	15%	67%
RD058	0%	40%	90%	69%	0%	56%
RD059	0%	30%	86%	92%	8%	56%
RD067	0%	50%	76%	77%	0%	67%

A **Figura 29** e a **Figura 30** (em detalhes) apresentam a evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%.

Figura 29 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).

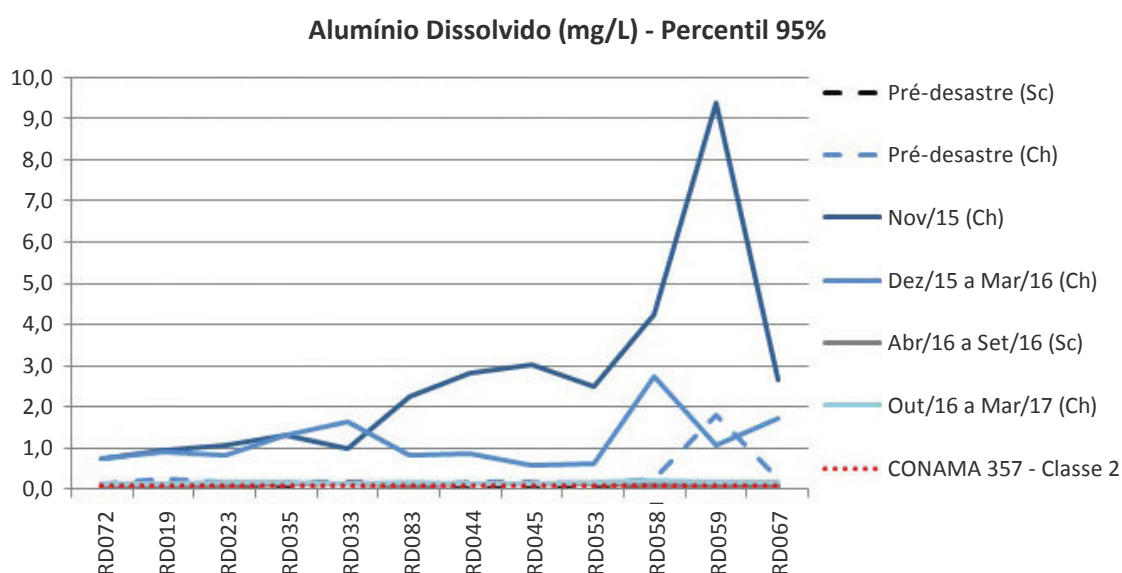
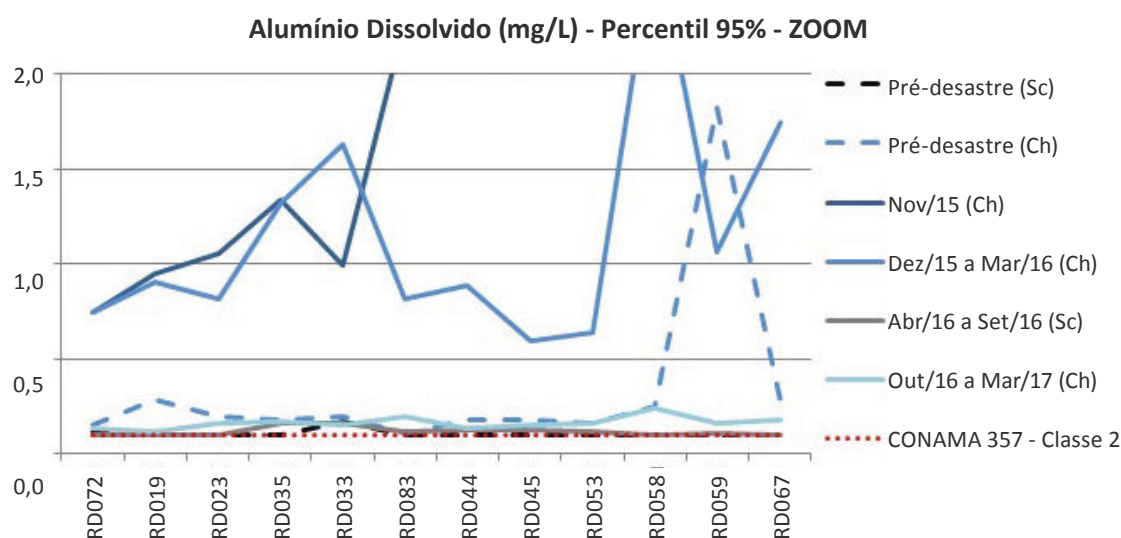


Figura 30 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.



Nos dois primeiros períodos pós-desastre (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016), foram observados os valores mais elevados e distantes da situação pré-desastre. Para o período de novembro/2015, quando considerado o percentil de 95%, o valor mais elevado foi registrado na estação RD059 (município de Resplendor), sendo igual a 9,361 mg/L. Na condição anterior ao rompimento, o percentil de 95% era de aproximadamente 2,0 mg/L.

Para os dois últimos períodos pós-desastre avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), os percentis de 95% apresentaram-se semelhantes à situação pré-desastre.

Afluentes do rio Doce

A **Figura 31** apresenta as concentrações de alumínio dissolvido em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão. A escala do gráfico é logarítmica, dada a amplitude dos dados.

Complementarmente, a **Tabela 16** apresenta os valores mínimos e máximos de alumínio dissolvido para quatro diferentes períodos pós-desastre. Além dessas medidas, para o período anterior à ruptura da barragem, foram calculadas as medianas para a estação seca e a chuvosa.

Antes do rompimento da barragem de Fundão, as concentrações de alumínio dissolvido nas estações de monitoramento em afluentes do rio Doce tendiam ao limite de quantificação do método ($\leq 0,1$ mg/L), de modo geral (**Figura 31**). Ainda, conforme o relatório de linha-base (INSTITUTOS LACTEC, 2017), percentuais mais relevantes de desacordos com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2, foram registrados no Ribeirão Sacramento (RD073), sendo igual a 21%.

A despeito do baixo número de observações do período pós-desastre, para alguns afluentes localizados a jusante do município de Periquito, observaram-se valores superiores aos registrados com maior frequência no período anterior ao desastre, indicando possíveis alterações.

Nas estações mais próximas à barragem de Fundão, RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo), observaram-se valores mais elevados com maior constância no período posterior ao desastre. Para a estação RD071, que possui histórico de dados anterior ao desastre, é possível observar a ocorrência de alterações no padrão da série após o rompimento da barragem (**Figura 31**). Na referida estação, os valores máximos de alumínio dissolvido nos períodos pós-desastre (0,141 mg/L a 1,035 mg/L) mostraram-se superiores ao valor de referência do período pré-desastre (0,105 mg/L), quando considerada a estação chuvosa (Tabela 16). Para o período de abril/2016 a setembro/2016, estação seca, as concentrações de alumínio dissolvido foram inferiores ao máximo histórico e iguais à mediana histórica.

Para a estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), os valores máximos variaram de 0,100 a 0,362 mg/L, na estação chuvosa (Tabela 16). Não há referência de linha-base para essa estação na base de dados do IGAM.

Para os rios Piracicaba (RD034), Corrente Grande (RD040) e Caratinga (RD057), as maiores alterações foram registradas no período de dezembro/2015 a março/2016, com concentrações máximas superiores às daquelas do período pré-desastre (**Tabela 16**). Nos demais períodos, os valores máximos foram semelhantes àsqueles de maior frequência na série histórica. Exceção se fez na estação RD057, que, após apresentar valor condizente com a situação pré-desastre entre abril/2016 e setembro/2016,

apresentou elevação na concentração de alumínio dissolvido com o retorno da estação chuvosa. O valor foi inferior ao máximo histórico, mas superior à mediana histórica, indicando alguma alteração.

Para os demais afluentes, não foram observadas alterações relevantes. Contudo, ressalta-se que, com exceção dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, os tributários possuem poucos dados relativos ao período posterior ao desastre, além do que algumas estações de monitoramento estão localizadas a mais de 10 km do rio Doce, de modo que não se tem como precisar o que ocorreu no trecho anterior no período avaliado.

Figura 31 – Evolução temporal do alumínio dissolvido em afluentes do rio Doce (MG).

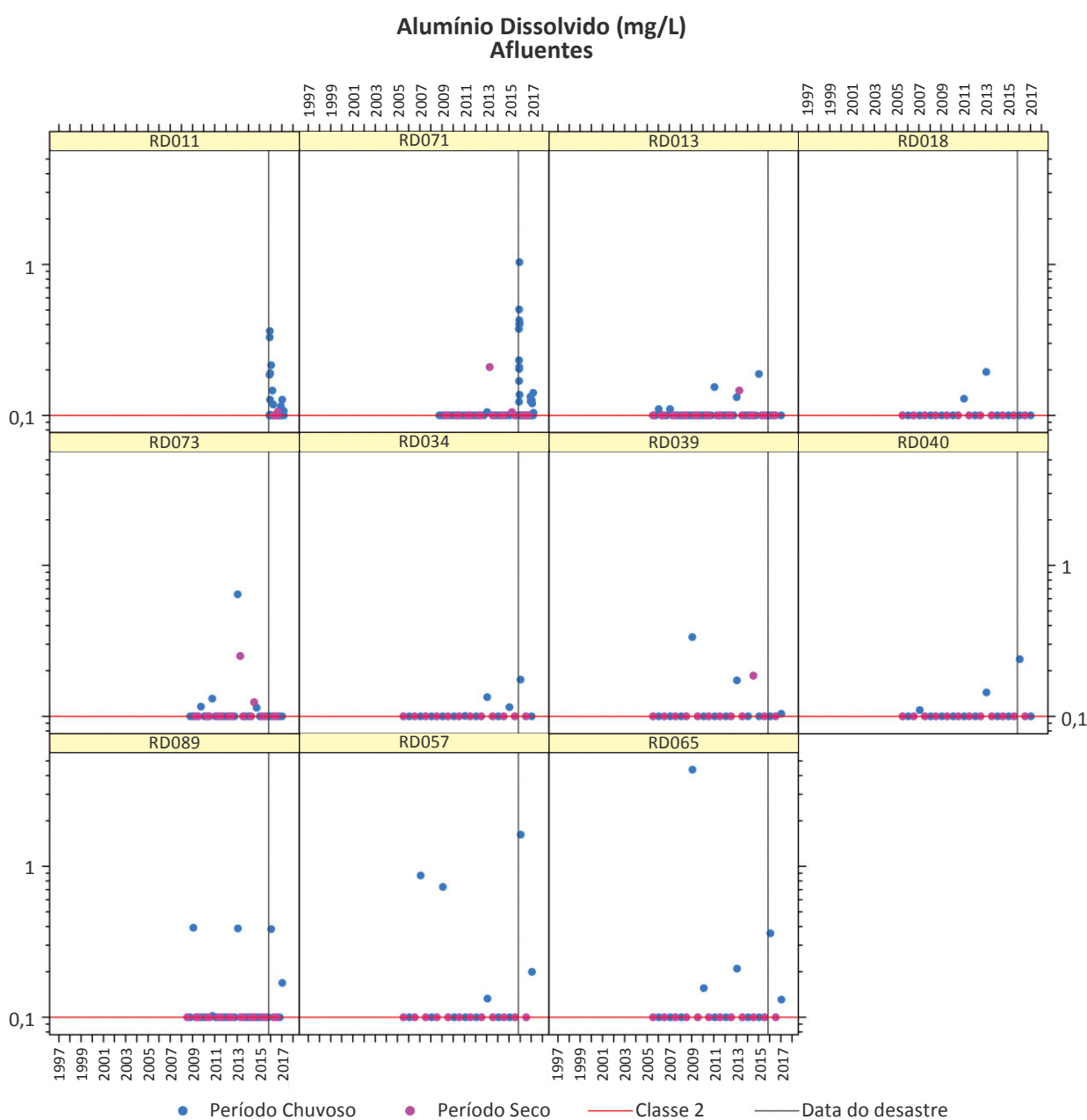


Tabela 16 – Valores mínimos e máximos de alumínio dissolvido em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

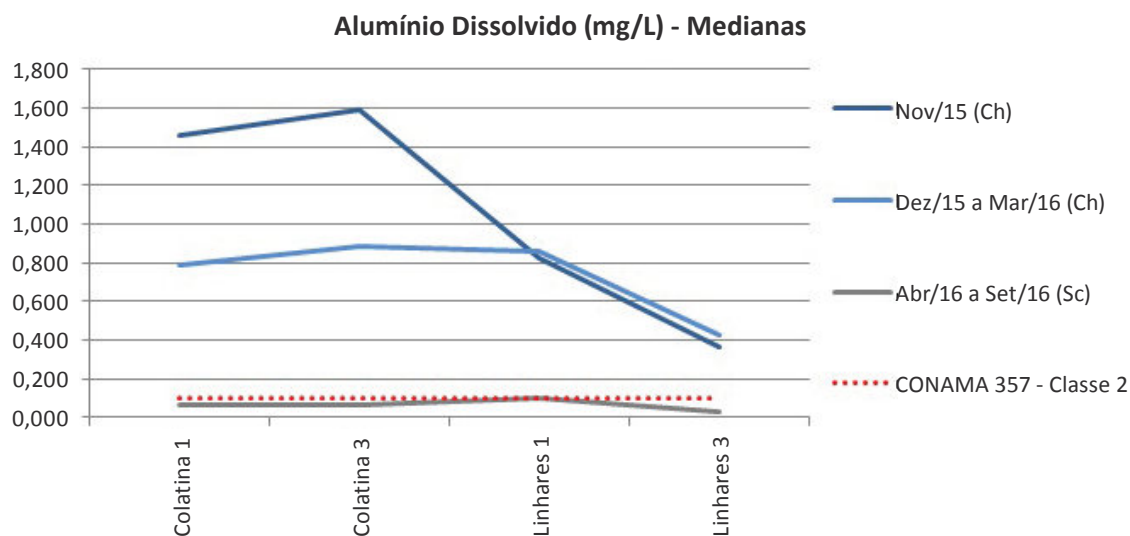
		Alumínio Dissolvido (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	Med.	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	Máx.	-	0,209	0,146	0,100	0,251	0,100	0,186	0,100	0,100	0,100	0,100
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	Med.	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	Máx.	-	0,105	0,188	0,194	0,643	0,134	0,335	0,144	0,392	0,870	4,370
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	0,100	0,123	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	0,100	0,503	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,175	0,100	0,239	0,384	1,623	0,360
	Máx.	0,362	1,035	0,100	0,100	0,100	0,175	0,100	0,239	0,384	1,623	0,360
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	2	1	2	1	1	1	2	1	1
	Mín.	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
	Máx.	0,106	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	1	1	2	1	1	1	2	1	1
	Mín.	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,104	0,100	0,100	0,200	0,131
	Máx.	0,127	0,141	0,100	0,100	0,100	0,100	0,104	0,100	0,169	0,200	0,131

Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A **Figura 32** apresenta, em termos de mediana, as concentrações de alumínio dissolvido para quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em três períodos distintos.

Figura 32 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce (ES), em termos de mediana.



Temporalmente, observou-se redução das concentrações de alumínio dissolvido, com valores mais elevados para o período de novembro/2015 e mais baixos para o período de abril/2016 a agosto/2016. Na estação Linhares 3, na foz do rio Doce, foram observadas as concentrações mais baixas. Para o período de abril/2016 a agosto/2016, as medianas das concentrações de alumínio dissolvido encontraram-se de acordo com o limite legislado ($\leq 0,1$ mg/L).

A **Tabela 17** apresenta os percentuais de não conformidades com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para as quatro estações de monitoramento avaliadas após o rompimento da barragem de Fundão. Foram destacados em laranja os percentuais que se mostraram superiores ao limite legislado ($\leq 0,1$ mg/L).

Tabela 17 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para alumínio dissolvido (ES).

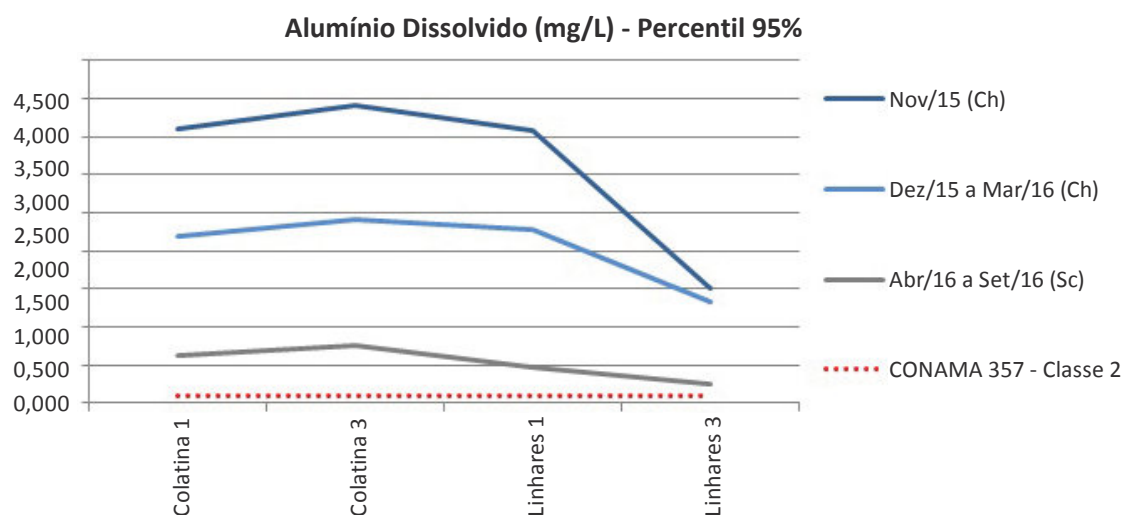
Percentual de desacordos – Alumínio Dissolvido			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	83%	100%	33%
Colatina 3	67%	100%	33%
Linhares 1	60%	97%	58%
Linhares 3	60%	87%	25%

Para o período de novembro/2015, os percentuais de não conformidades observados para as estações avaliadas foram de 60% a 83%. Ou seja, em no mínimo 60% das campanhas de monitoramento realizadas nesse período, registraram-se concentrações acima do limite.

Para dezembro/2015 a março/2016, os percentuais chegaram a ser ainda mais elevados, mas tais resultados podem estar atrelados ao maior número de observações relativas ao período mencionado. Entre abril/2016 e agosto/2016, os percentuais de desacordos decresceram.

Na **Figura 33** é possível observar os valores dos percentis de 95% para as quatro estações de monitoramento avaliadas ao longo do período pós-desastre.

Figura 33 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro alumínio dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



De acordo com a **Figura 32**, a mediana máxima registrada para novembro/2015 foi de 1,60 mg/L. Em relação ao percentil de 95%, o valor máximo registrado foi de 4,0 mg/L. Temporalmente, assim como para as medianas, ocorreu decréscimo dos valores.

Arsênio total

Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

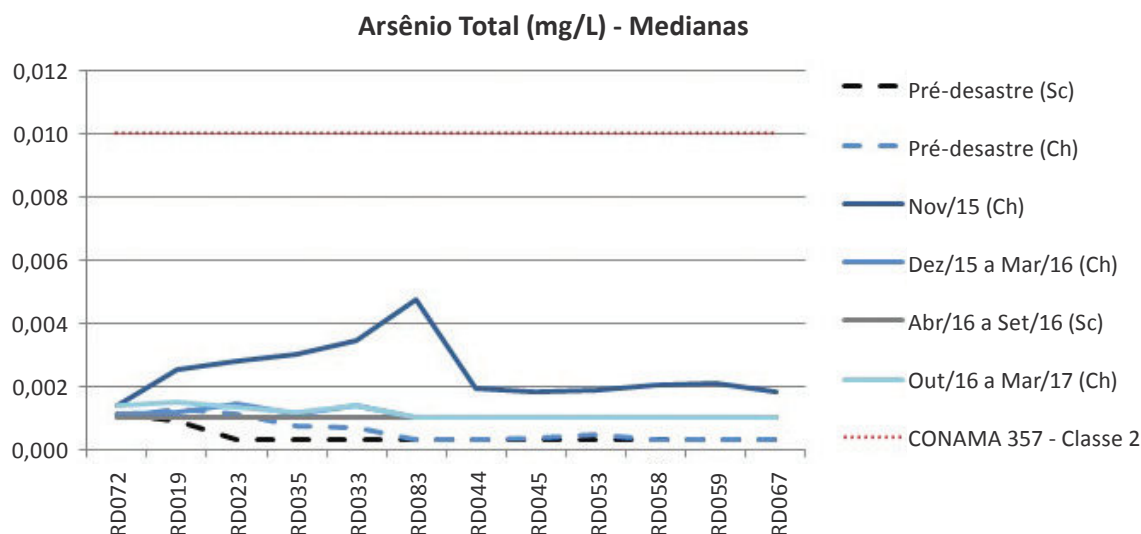
A **Figura 34** apresenta as concentrações de arsênio total ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (em quatro períodos distintos) em relação à situação que se tinha previamente. No gráfico, os valores estão representados em termos de mediana.

Convém destacar que em relação ao período pré-desastre, antes de julho/2013, o limite de quantificação do método utilizado era de 0,0003 mg/L. A partir dessa data, o limite de quantificação aumentou, passando a ser de 0,001 mg/L. Esse limite permaneceu até a última campanha de monitoramento avaliada neste documento. Ressalta-se que o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 é de até 0,01 mg/L, estando ambos os limites de quantificação empregados consonantes com a referida resolução.

Temporalmente, o período de novembro/2015 se sobressaiu entre os demais, apresentando os valores mais elevados. Nos períodos seguintes, foram observados valores menores, convergindo para o limite de quantificação de 0,001 mg/L. Alterações ainda foram registradas nas estações situadas a montante da estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito) nos períodos de dezembro/2015 a março/2016 e de outubro/2016 a março/2017, ambos de característica chuvosa.

Em relação à condição pré-desastre, os valores dos dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017) ainda se apresentaram alterados. Contudo, a diferença entre os limites de quantificação empregados antes e depois de julho/2013 pode ter influenciado esse resultado.

Figura 34 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce (MG), em termos de mediana.



A Figura 35 mostra a alteração do parâmetro arsênio total, em número de vezes, quando confrontados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação.

Figura 35 – Alteração do parâmetro arsênio total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



No período de novembro/2015, registrou-se um aumento de mais de 15 vezes em relação à condição pré-desastre na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), a montante da UHE Baguari. A partir dessa localidade, a linha-base foi superada entre 4 e 7 vezes entre as estações de monitoramento avaliadas. Nos três períodos seguintes analisados, as alterações foram de até 3 vezes superiores à condição pré-desastre. Ressalta-se novamente que a mudança nos limites de quantificação pode ter influenciado tais resultados.

A **Tabela 18** mostra a avaliação de conformidades do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre.

No período anterior ao desastre, para a estação seca, não havia desacordos de arsênio total em relação ao limite legislado ($\leq 0,01$ mg/L), com exceção da estação RD072, onde o percentual de desacordo era de 14%. A estação RD072 recebe contribuições da sub-bacia do rio do Carmo, região onde ocorre a exploração histórica de ouro. Na estação chuvosa, para a maioria das estações do rio Doce não se observavam desacordos com o limite legislado, com exceção das estações RD019 (11%) e RD023 (6%).

Após o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 ($\leq 0,01$ mg/L) aumentou no período de novembro/2015, com percentuais de desacordos variando entre 0% e 10%. Nos períodos seguintes, as concentrações foram inferiores a 0,01 mg/L, estando em conformidade com o limite da classe 2.

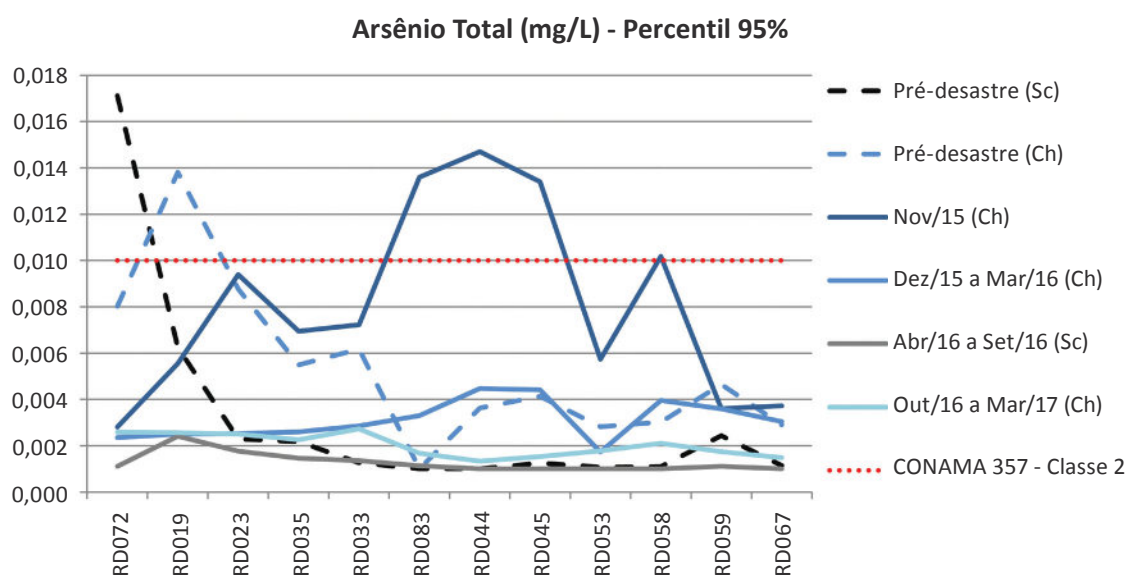
Tabela 18 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para arsênio total (MG).

Percentual de desacordos – Arsênio Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14%	0%	0%	0%	0%	0%
RD019	0%	11%	0%	0%	0%	0%
RD023	0%	6%	4%	0%	0%	0%
RD035	0%	0%	4%	0%	0%	0%
RD033	0%	0%	4%	0%	0%	0%
RD083	0%	0%	9%	0%	0%	0%
RD044	0%	0%	10%	0%	0%	0%
RD045	0%	0%	10%	0%	0%	0%
RD053	0%	0%	5%	0%	0%	0%
RD058	0%	0%	5%	0%	0%	0%
RD059	0%	0%	0%	0%	0%	0%
RD067	0%	0%	0%	0%	0%	0%

A **Figura 36** apresenta a evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%.

No período de novembro/2015, foram registrados valores superiores àqueles da condição pré-desastre (estação chuvosa) a partir da estação RD035 (no município de Santana do Paraíso). Nos três períodos subsequentes, os percentis de 95% mostraram-se semelhantes aos da linha-base ou até mesmo inferiores.

Figura 36 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).

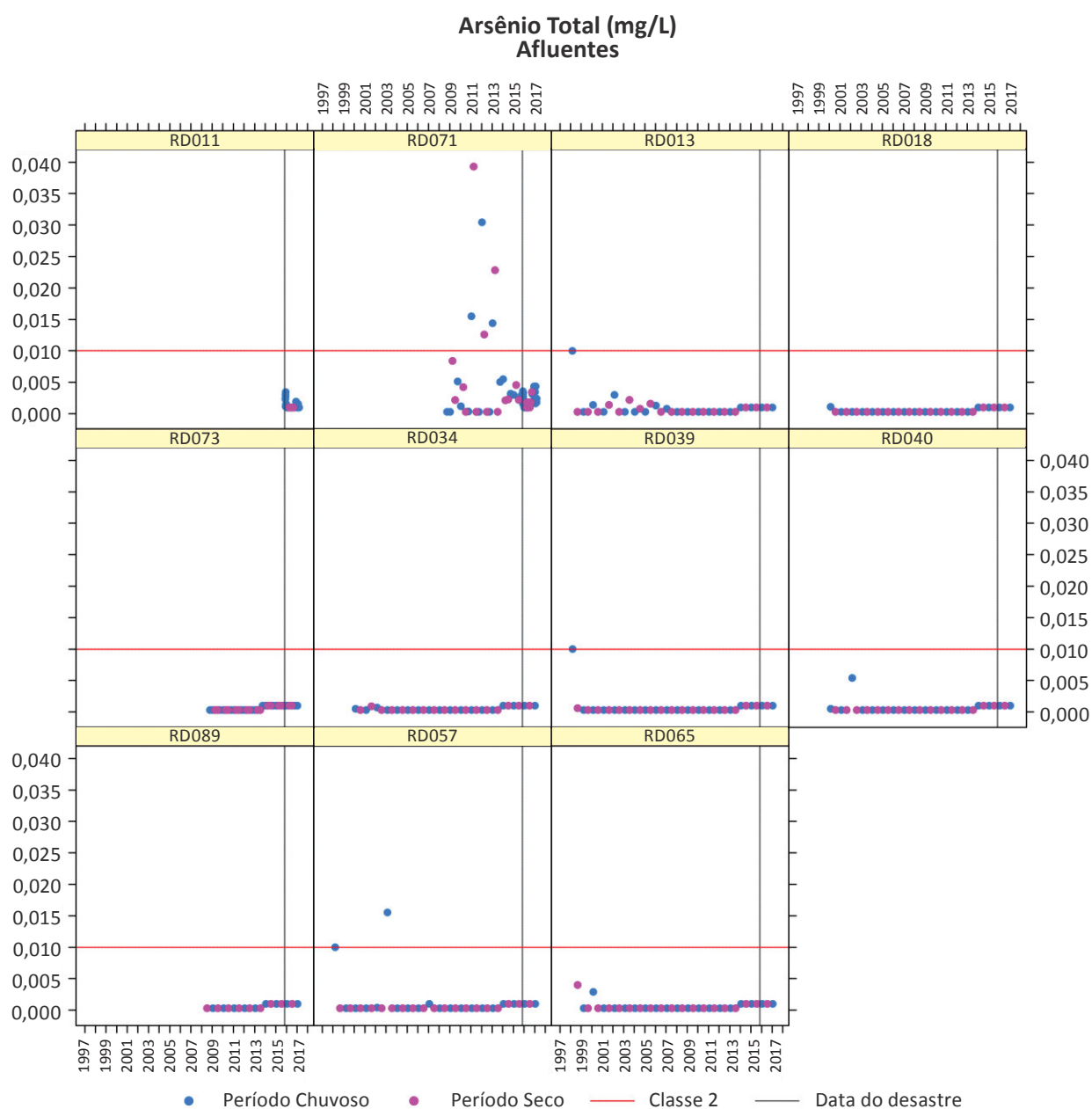


Afluentes do rio Doce

A **Figura 37** apresenta as concentrações de arsênio total em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão.

Complementarmente, a **Tabela 19** apresenta os valores mínimos e máximos de arsênio total para quatro diferentes períodos pós-desastre. Para o período anterior à ruptura da barragem, além dessas medidas também se calculou a mediana para a estação seca e a chuvosa.

Figura 37 – Evolução temporal do arsênio total em afluentes do rio Doce (MG).



No período pós-desastre, com exceção das estações RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo), as demais estações localizadas em tributários do rio Doce apresentaram concentrações de arsênio total que tenderam ao limite de quantificação do método ($\leq 0,001$ mg/L), estando condizentes com os valores registrados depois de julho/2013, visto que, antes desse período, o limite de quantificação do método utilizado era de 0,0003 mg/L.

Para a estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), em relação ao período posterior à ruptura da barragem, valores mais elevados de arsênio ocorreram nos períodos chuvosos (0,0019 a 0,0034 mg/L), sendo o valor máximo registrado entre dezembro/2015 e março/2016 (Tabela 19). No período seco, a concentração de arsênio tendeu ao limite de quantificação do método.

Na estação RD071 (rio do Carmo), depois do rompimento da barragem, a concentração máxima de arsênio total foi observada entre outubro/2016 e março/2017 (0,0044 mg/L), sendo inferior à máxima histórica (0,0304 mg/L). A mediana de outubro/2016 e março/2017 (0,003 mg/L) foi idêntica à mediana histórica considerando a estação chuvosa.

Tabela 19 – Valores mínimos e máximos de arsênio total em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Arsênio Total (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
	Med.	-	0,0022	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
	Máx.	-	0,0393	0,0022	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0040
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
	Med.	-	0,0030	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
	Máx.	-	0,0304	0,0100	0,0011	0,0010	0,0010	0,0100	0,0054	0,0010	0,0155	0,0029
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	0,0024	0,0016	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	0,0024	0,0036	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	Máx.	0,0034	0,0033	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	Máx.	0,0010	0,0035	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,0010	0,0016	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
	Máx.	0,0019	0,0044	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010

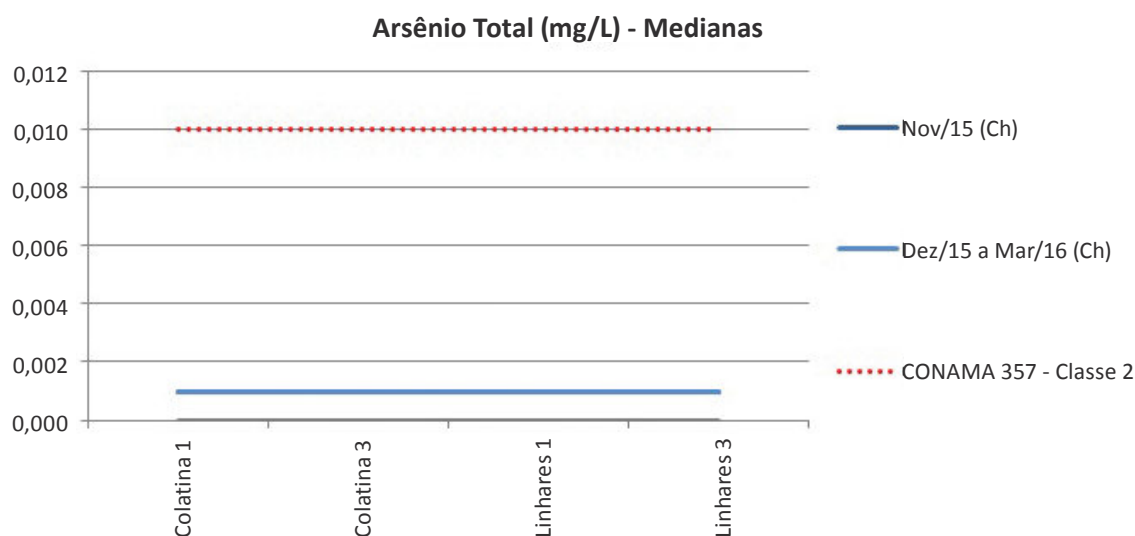
Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A **Figura 38** apresenta, em termos de mediana, as concentrações de arsênio total para quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em dois períodos.

Para ambos os períodos avaliados, novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016, as medianas tenderam ao limite de quantificação do método (0,001 mg/L). Não foram observadas alterações ao longo do tempo, nem espacialmente.

Figura 38 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce (ES), em termos de mediana.



A **Tabela 20** apresenta os percentuais de não conformidades com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para as quatro estações de monitoramento avaliadas após o rompimento da barragem de Fundão. Foram destacados em laranja os percentuais que se mostraram superiores ao limite legislado ($\leq 0,01$ mg/L).

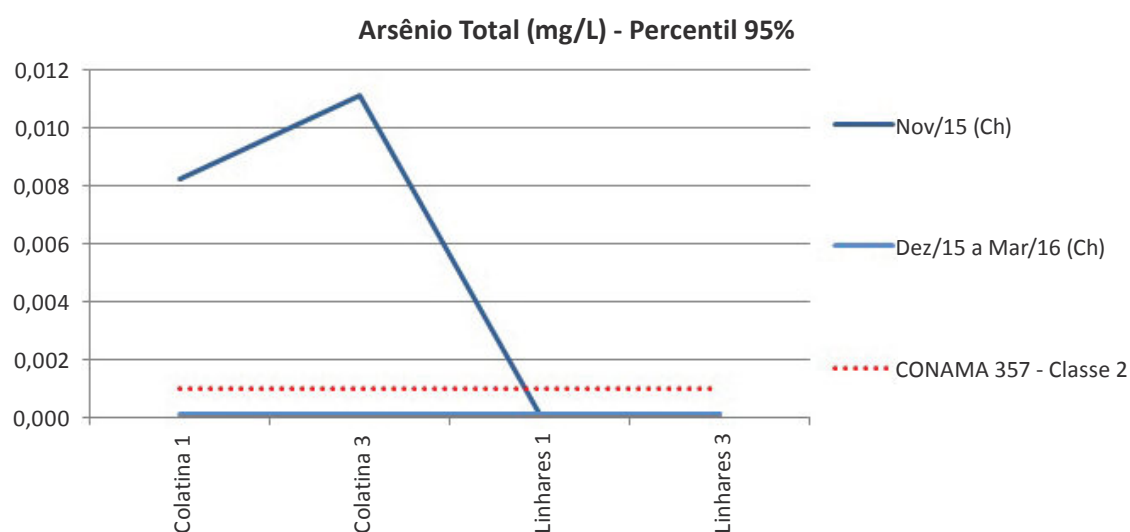
Percentuais de não conformidades foram observados somente no período de novembro/2015 nas estações Colatina 1 e Colatina 3, sendo igual a 17%.

Tabela 20 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para arsênio total (ES).

Percentual de desacordos – Arsênio Total			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	17%	0%	-
Colatina 3	17%	0%	-
Linhares 1	0%	0%	-
Linhares 3	0%	0%	-

Na **Figura 39** apresentam-se os valores dos percentis de 95% para as quatro estações de monitoramento avaliadas ao longo do período pós-desastre. De acordo com a **Figura 38**, as medianas para o período de novembro/2015 não passaram de 0,001 mg/L. Em relação ao percentil de 95%, para as estações de jusante, os valores tenderam ao limite de quantificação do método. Para as estações Colatina 1 e Colatina 3, os percentis de 95% foram de 0,082 mg/L e 0,111 mg/L, respectivamente, sendo superiores ao limite legislado.

Figura 39 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro arsênio total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



Chumbo total

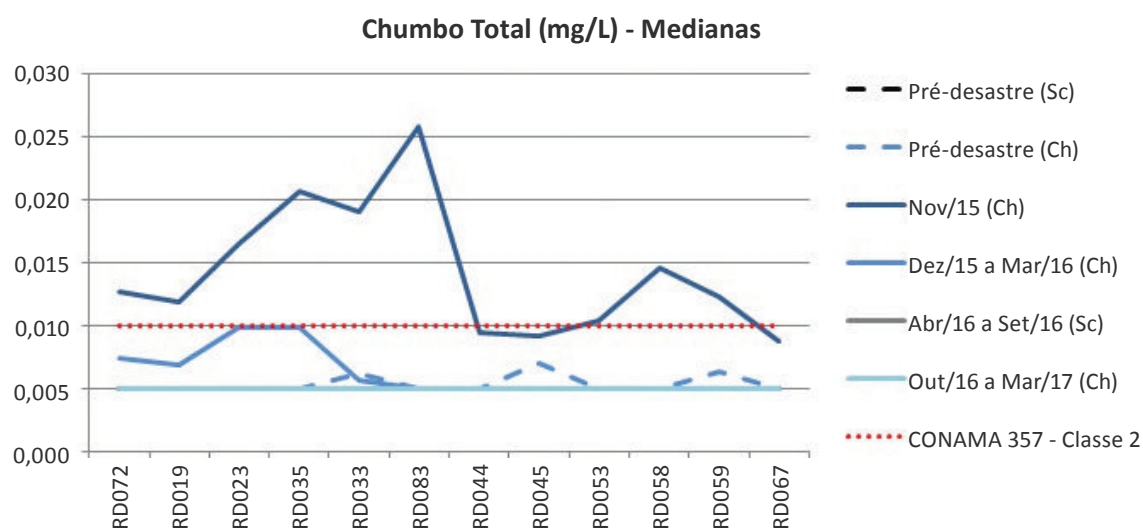
Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A **Figura 40** apresenta as concentrações de chumbo total ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (em quatro períodos distintos) em relação à situação que se tinha previamente. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana.

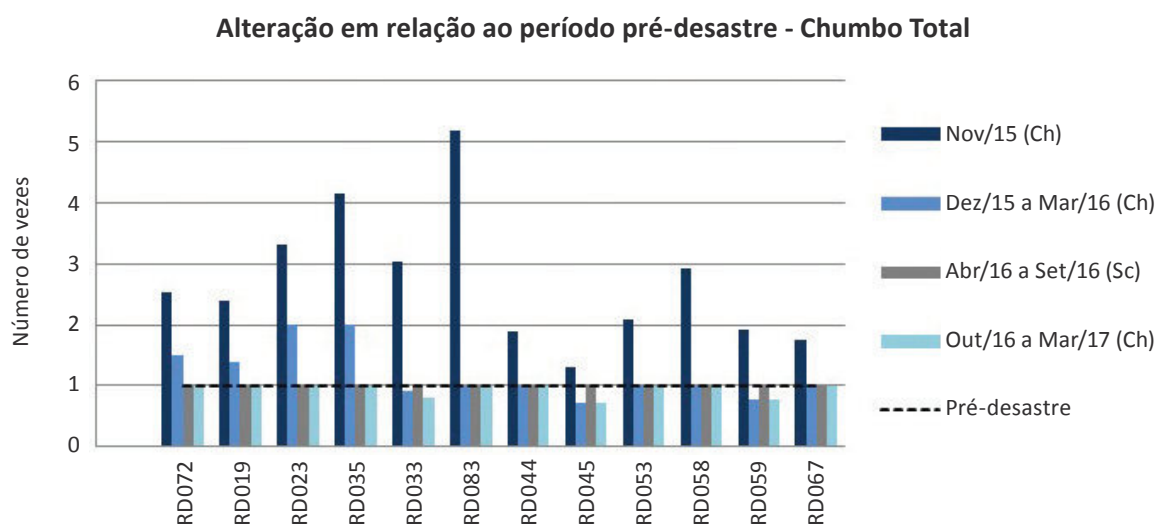
Ao longo do tempo, observou-se redução das concentrações de chumbo total, com valores mais elevados para os dois primeiros períodos avaliados (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016). Para os dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), os valores de mediana atingiram o limite de quantificação do método (0,005 mg/L), sendo iguais ou inferiores às condições pré-desastre (estação seca e a chuvosa).

Figura 40 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce (MG), em termos de mediana.



A **Figura 41** mostra a alteração do parâmetro chumbo total, em número de vezes, quando confrontados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação.

Figura 41 – Alteração do parâmetro chumbo total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



No período de novembro/2015, registrou-se um aumento de até 5 vezes em relação à condição pré-desastre. Tal alteração foi observada na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito).

Entre dezembro/2015 e março/2016, maiores variações foram observadas até a estação RD035 (no município de Santana do Paraíso), sendo que nesse local registrou-se um aumento de 2 vezes em relação à linha-base. A partir dessa localidade, os valores apresentaram-se de acordo com a condição pré-desastre.

Para os dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), os valores foram iguais ou inferiores às condições pré-desastre.

A **Tabela 21** mostra a avaliação de conformidade do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre.

No período anterior ao desastre, para a estação seca, os percentuais de desacordos variaram de 0% a 21% ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce. Na estação chuvosa, os percentuais de não conformidades variaram de 0% a 41% ao longo do rio Doce. Após o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 ($\leq 0,01$ mg/L) aumentou nos dois primeiros períodos avaliados de 36% a 87% e de 8% a 50% (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016), respectivamente.

Para os dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), os percentuais foram inferiores à condição pré-desastre, de um modo geral, de 0% a 15% e de 0% a 22%, respectivamente.

Tabela 21 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para chumbo total (MG).

Percentual de desacordos – Chumbo Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	21%	0%	57%	43%	0%	0%
RD019	5%	24%	78%	29%	15%	0%
RD023	11%	15%	87%	50%	0%	6%
RD035	10%	27%	87%	43%	0%	0%
RD033	6%	41%	83%	31%	0%	6%
RD083	0%	14%	77%	15%	0%	0%
RD044	6%	25%	43%	23%	0%	6%
RD045	0%	41%	48%	15%	0%	6%
RD053	6%	35%	60%	8%	0%	6%
RD058	5%	24%	74%	15%	0%	22%
RD059	6%	29%	61%	23%	0%	6%
RD067	9%	23%	36%	8%	0%	6%

A **Figura 42** e a **Figura 43** (em detalhes) apresentam a evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%.

Figura 42 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).

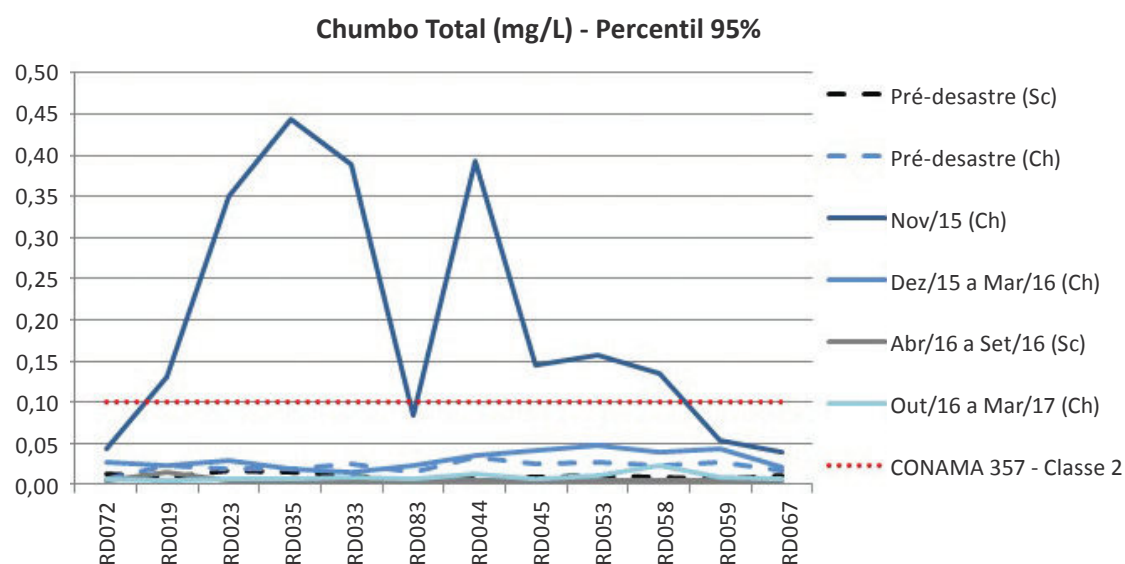
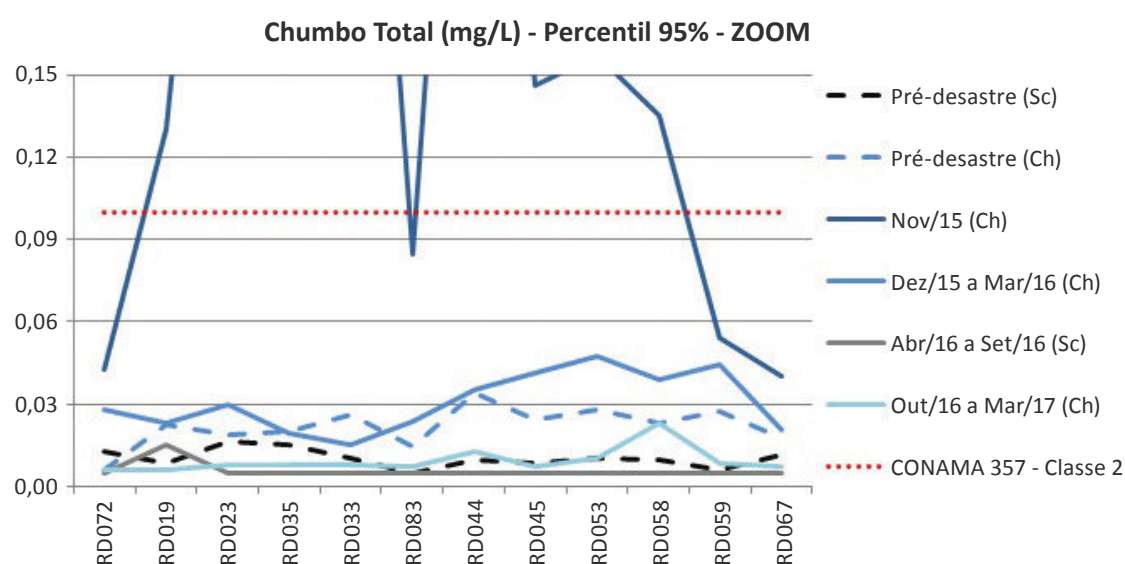


Figura 43 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.



No período de novembro/2015, foram registrados valores bastante elevados para o chumbo total em comparação com aqueles relativos ao período pré-desastre (estação chuvosa), chegando à concentração de 0,45 mg/L na estação RD035 (no município de Santana do Paraíso).

Entre dezembro/2015 e março/2016, os percentis de 95% já se apresentaram em valores mais baixos, mas ainda superiores aos da linha-base.

Para os dois últimos períodos pós-desastre avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), os percentis de 95% apresentaram-se iguais ou inferiores à situação pré-desastre. Ou seja, para a grande maioria dos dados gerados nesses períodos já se tinham condições semelhantes àquelas observadas antes do desastre.

Afluentes do rio Doce

A **Figura 44** mostra as concentrações de chumbo total em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão. O gráfico está apresentado em escala logarítmica, dada a amplitude dos dados.

Complementarmente, a **Tabela 22** apresenta os valores mínimos e máximos de chumbo total para quatro diferentes períodos pós-desastre. Para o período anterior à ruptura da barragem, além dessas medidas também se calculou a mediana para a estação seca e a chuvosa.

No período posterior ao rompimento da barragem, os valores mais elevados foram registrados nas estações RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo). Esses rios contribuem para a formação do rio Doce, estando suas estações localizadas a 74,9 km e a 79,8 km da barragem de Fundão, respectivamente.

Para a estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), na estação chuvosa, as concentrações máximas de chumbo total variaram entre 0,0013 e 0,446 mg/L, sendo o valor mais elevado registrado entre dezembro/2015 e março/2016 e o mais baixo entre outubro/2016 e março/2017. Entre abril/2016 e setembro/2016, estação seca, as concentrações tenderam ao limite de quantificação do método (0,005 mg/L) (**Figura 44**).

Para a estação RD071 (rio do Carmo), as concentrações máximas de chumbo total na estação chuvosa foram de 0,039 mg/L (em novembro/2015); 0,177 mg/L (entre dezembro/2015 e março/2016) e 0,007 mg/L (entre outubro/2016 e março/2017). No período anterior ao desastre, a concentração máxima registrada foi de 0,019 mg/L (**Tabela 22**) e a mediana foi de 0,005 mg/L (INSTITUTOS LACTEC, 2017). Desse modo, pode-se dizer que alterações mais significativas foram registradas entre novembro/2015 e março/2016. Na estação seca, no período posterior ao rompimento, as concentrações tenderam ao limite de quantificação do método (0,005 mg/L) (**Figura 44**), estando condizentes com os valores que ocorreram com maior frequência na série histórica.

Nas estações RD039 (rio Santo Antônio) e RD057 (rio Caratinga), concentrações mais elevadas foram registradas no período de dezembro/2015 a março/2016, mas foram inferiores aos valores máximos históricos da estação chuvosa (**Tabela 22**). Para as demais estações, as concentrações de chumbo após o desastre tenderam ao limite de quantificação (0,005 mg/L) ou estiveram de acordo com a série histórica.

Figura 44 – Evolução temporal do chumbo total em afluentes do rio Doce (MG).

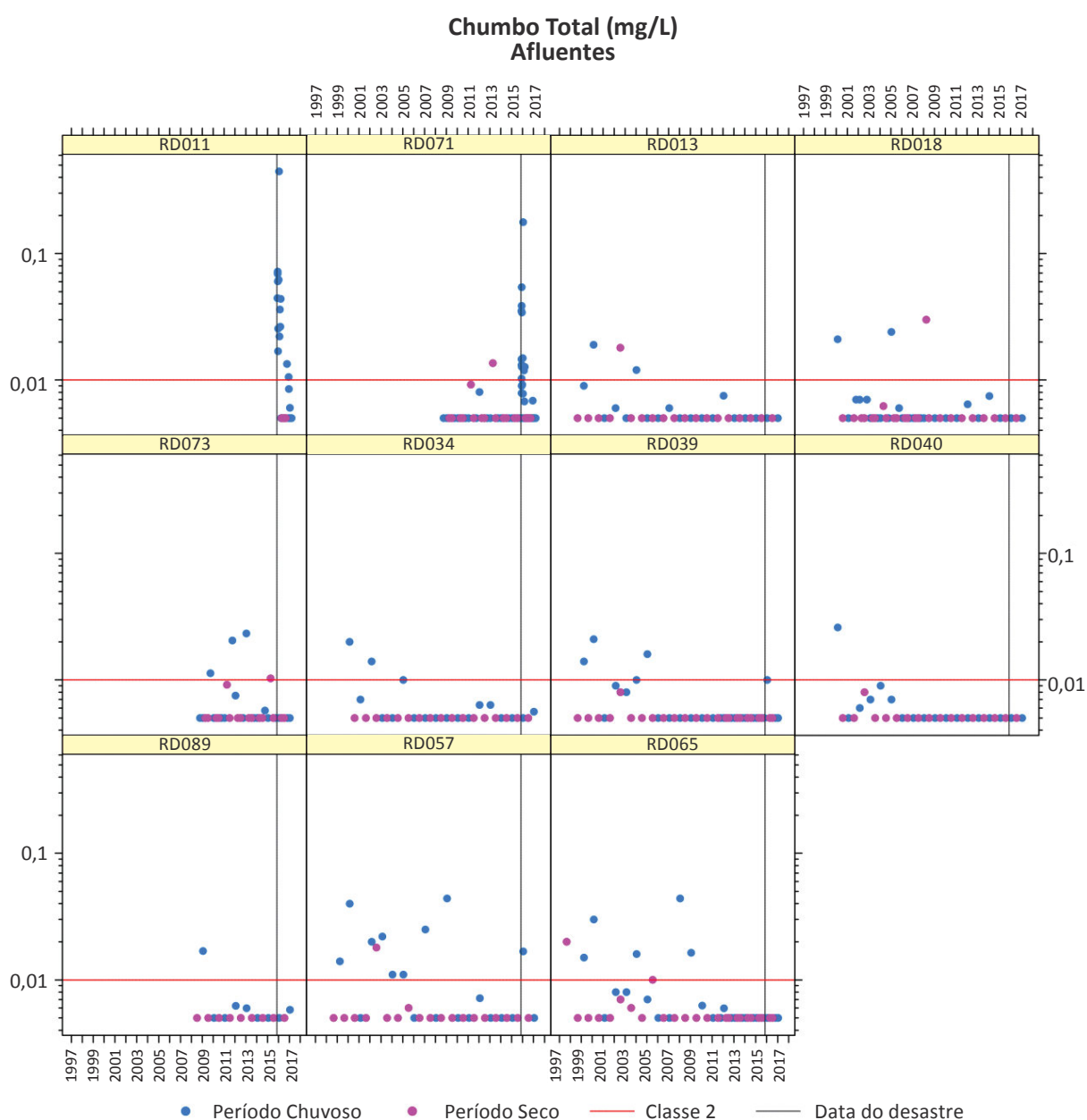


Tabela 22 – Valores mínimos e máximos de chumbo total em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Chumbo Total (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Med.	-	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Máx.	-	0,014	0,018	0,030	0,010	0,005	0,008	0,008	0,005	0,018	0,020
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Med.	-	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,007	0,005
	Máx.	-	0,008	0,019	0,024	0,023	0,020	0,021	0,026	0,017	0,044	0,044

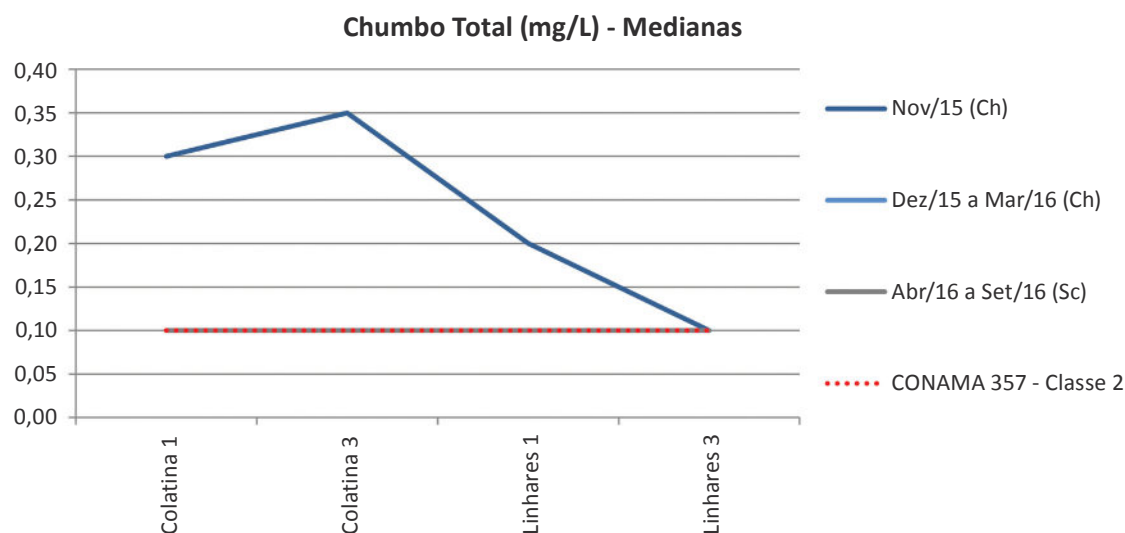
Chumbo Total (mg/L)												
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	0,044	0,008	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	0,044	0,039	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,010	0,005	0,005	0,017	0,005
	Máx.	0,446	0,177	0,005	0,005	0,005	0,005	0,010	0,005	0,005	0,017	0,005
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	1	1	2	1	2	1	1	1	2
	Mín.	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Máx.	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	1	1	2	1	2	1	1	1	2
	Mín.	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005
	Máx.	0,013	0,007	0,005	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005	0,006	0,005	0,005

Nota: "N" é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A Figura 45 apresenta, em termos de mediana, as concentrações de chumbo total para quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em três períodos distintos.

Figura 45 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce (ES), em termos de mediana.



No período de novembro/2015, foram observados os valores mais elevados de chumbo total, com exceção da estação Linhares 3, para a qual a mediana tendeu ao limite de quantificação do método (0,010 mg/L). Para os demais períodos, as medianas tenderam ao limite de quantificação do método nas quatro estações de monitoramento avaliadas.

A **Tabela 23** apresenta os percentuais de não conformidades com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para as quatro estações de monitoramento avaliadas após

o rompimento da barragem de Fundão. Foram destacados em laranja os percentuais que se mostraram superiores ao limite legislado ($\leq 0,01$ mg/L).

Percentuais de não conformidades foram observados nos períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016, sendo que, para o último período, os percentuais de desacordos diminuíram. Para o período de abril/2016 a agosto/2016, não foram observados desacordos com o limite legislado.

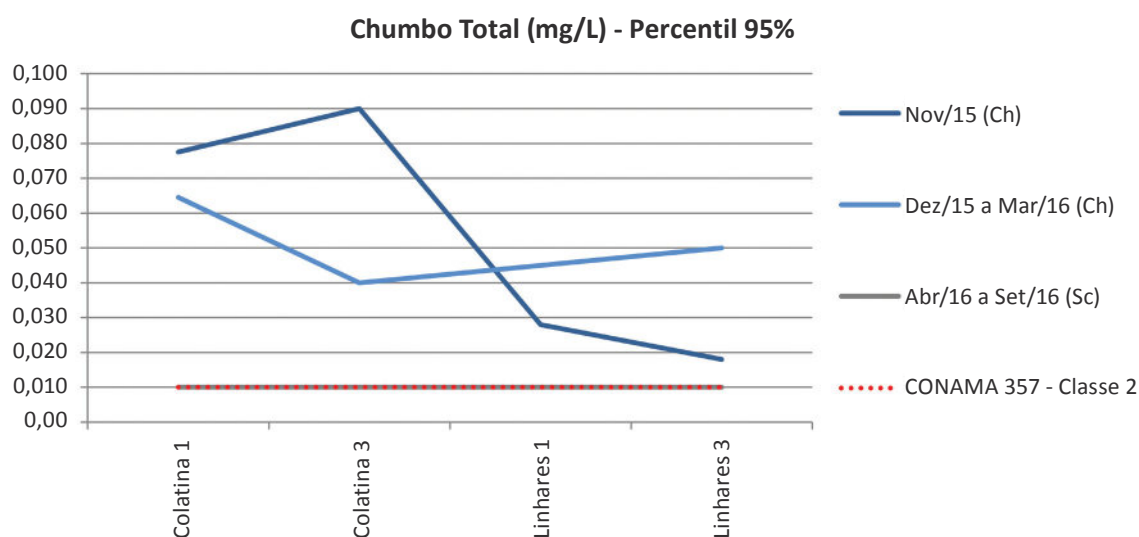
Tabela 23 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para chumbo total (ES).

Percentual de desacordos - Chumbo Total			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	67%	34%	0%
Colatina 3	67%	28%	0%
Linhares 1	60%	35%	0%
Linhares 3	20%	26%	0%

Na **Figura 46** apresentam-se os valores dos percentis de 95% para as quatro estações de monitoramento avaliadas ao longo do período pós-desastre.

De uma maneira geral, observou-se ao longo do tempo tendência à redução de valores, sendo que, para o último período avaliado, os percentis de 95% tenderam ao limite de quantificação do método, que coincide com o limite legislado. Para o período de dezembro/2015 a março/2016, observou-se elevação de valores nas estações de Linhares para além daqueles referentes a novembro/2015, mês do desastre. A ocorrência de chuvas mais intensas pode ter influenciado tal resultado.

Figura 46 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro chumbo total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



Ferro dissolvido

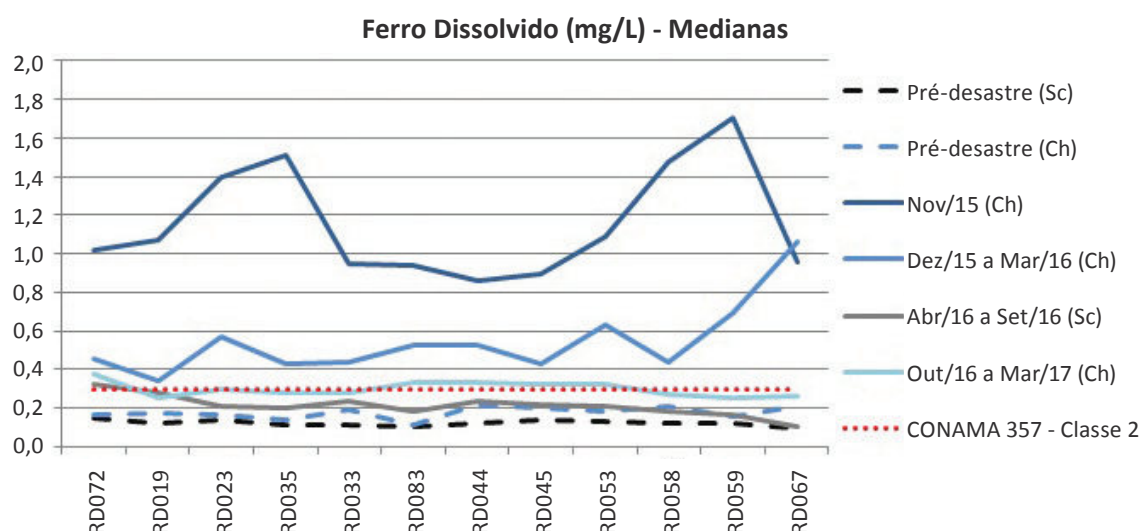
Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A **Figura 47** apresenta as concentrações de ferro dissolvido ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (em quatro períodos distintos) em relação à situação que se tinha previamente. Destaca-se que no gráfico os valores estão representados em termos de mediana.

Temporalmente, observou-se tendência à redução das concentrações até o período de abril/2016 a setembro/2016 (estação seca). No período subsequente, outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa), as concentrações de ferro dissolvido voltaram a se elevar.

Figura 47 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce (MG), em termos de mediana.

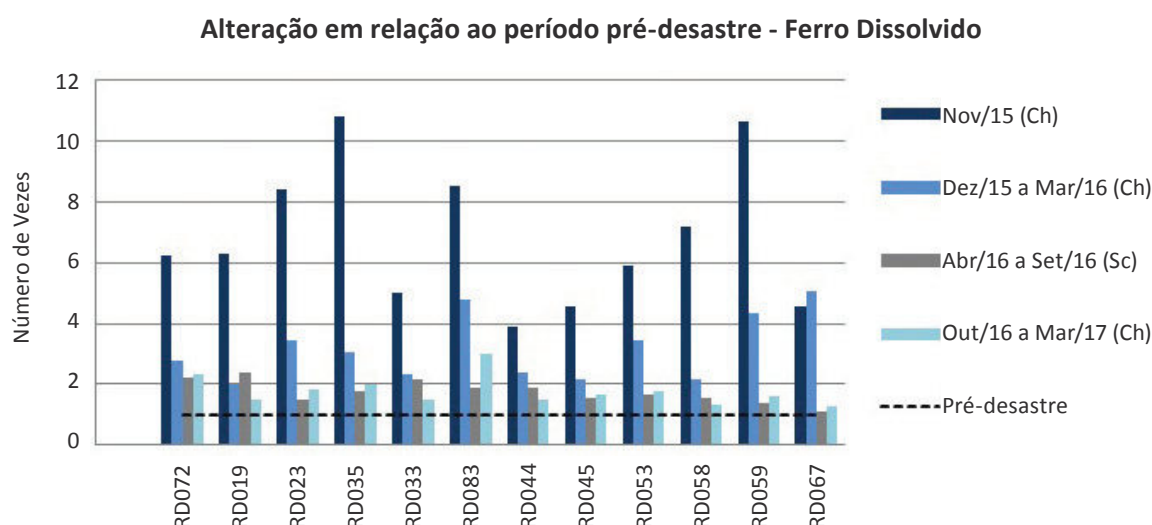


A **Figura 48** mostra a alteração do parâmetro ferro dissolvido, em número de vezes, quando confrontados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação.

No período de novembro/2015, ocorreram as alterações mais significativas. Nas estações RD035 (no município de Santana do Paraíso/MG) e RD059 (no município de Resplendor/MG), por exemplo, registrou-se um aumento de mais de 10 vezes em relação à condição pré-desastre. Entre dezembro/2015 e março/2016, as alterações foram inferiores ao período anterior, sendo que, na estação RD083, observou-se a maior alteração (5 vezes superior à condição de linha-base). Nos períodos subsequentes, o número de vezes em que a situação pré-desastre foi superada não passou de 3.

A partir da **Figura 48**, é possível observar que estações localizadas a jusante do município de Tumiritinga/MG (RD058) apresentaram algum indicativo de retomada à condição de linha-base, considerando-se os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017.

Figura 48 – Alteração do parâmetro ferro dissolvido em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



A Tabela 24 mostra a avaliação de conformidade do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre. No período anterior ao desastre, para a estação seca, os percentuais de desacordos variaram de 0% a 11% ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce. Na estação chuvosa, os percentuais de não conformidades variaram de 12% a 44% ao longo do rio Doce. Após o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 ($\leq 0,3$ mg/L) aumentou de modo mais significativo nos dois primeiros períodos avaliados (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016) de 67% a 100% e de 62% a 85%, respectivamente. Para o período de abril/2016 a setembro/2016, notou-se para a maioria das estações uma redução nos percentuais de desacordo em relação ao período de dezembro/2015 a março/2016, de 0% a 57%. Nas estações de monitoramento situadas mais a jusante, inclusive, os percentuais foram inferiores à condição pré-desastre (estação seca). Para o período de outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa), os percentuais de desacordo voltaram a se elevar (de 28% a 67%), salvo para as estações RD035 e RD067, nas quais os percentuais ficaram próximos ou inferiores aos da condição pré-desastre (de 33% e de 28%, respectivamente).

Tabela 24 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para ferro dissolvido (MG).

Percentual de desacordos – Ferro Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0%	27%	96%	79%	57%	67%
RD019	0%	19%	96%	71%	50%	28%
RD023	0%	21%	96%	79%	29%	50%

Percentual de desacordos – Ferro Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD035	5%	33%	100%	71%	14%	33%
RD033	0%	21%	96%	69%	15%	44%
RD083	0%	13%	87%	85%	14%	61%
RD044	0%	44%	83%	62%	8%	65%
RD045	0%	15%	87%	85%	7%	53%
RD053	11%	12%	95%	83%	15%	56%
RD058	4%	20%	90%	69%	0%	50%
RD059	7%	15%	86%	69%	0%	39%
RD067	7%	33%	67%	69%	0%	28%

A **Figura 49** e a **Figura 50** (em detalhes) apresentam a evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%. Nos dois primeiros períodos pós-desastre (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016), foram observados os valores mais elevados e distantes da situação pré-desastre. Para o período de novembro/2015, quando considerado o percentil de 95%, o valor mais elevado foi registrado na estação RD059 (8,5 mg/L), a jusante de Resplendor.

Para os dois últimos períodos pós-desastre avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), a jusante do município de Tumiritinga/MG (RD053), os percentis de 95% apresentaram-se iguais ou inferiores à situação pré-desastre.

Figura 49 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).

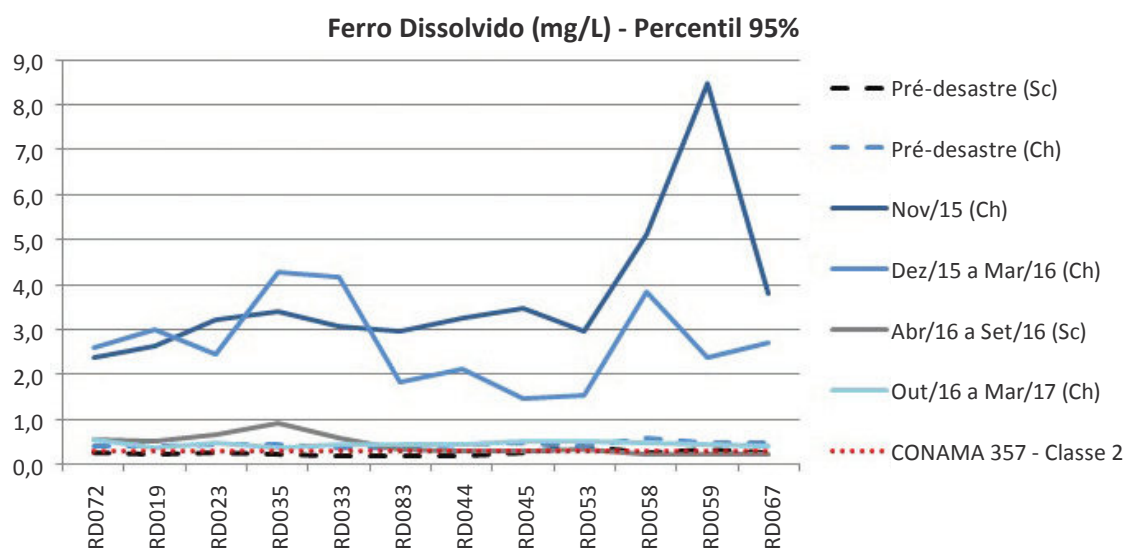
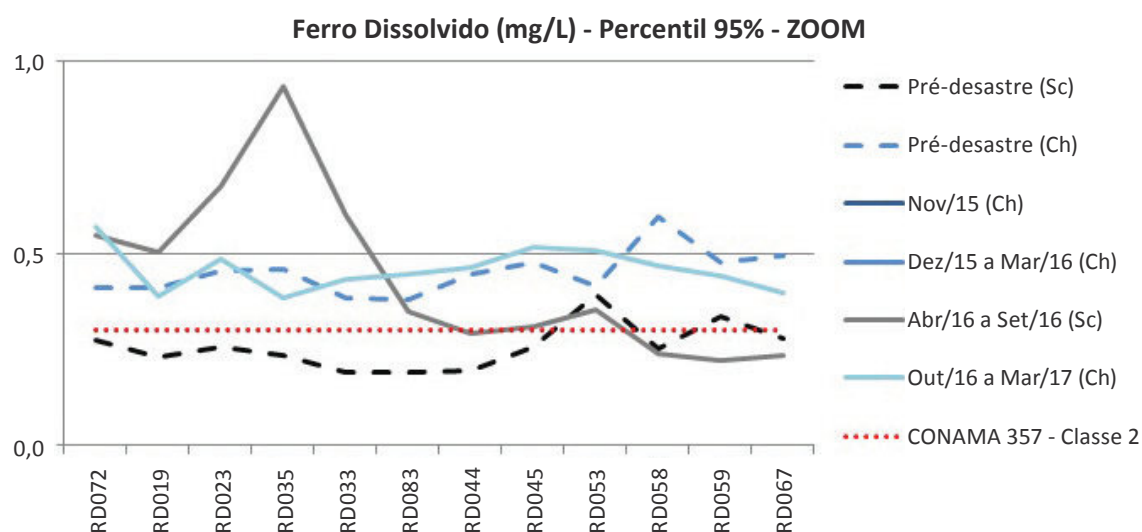


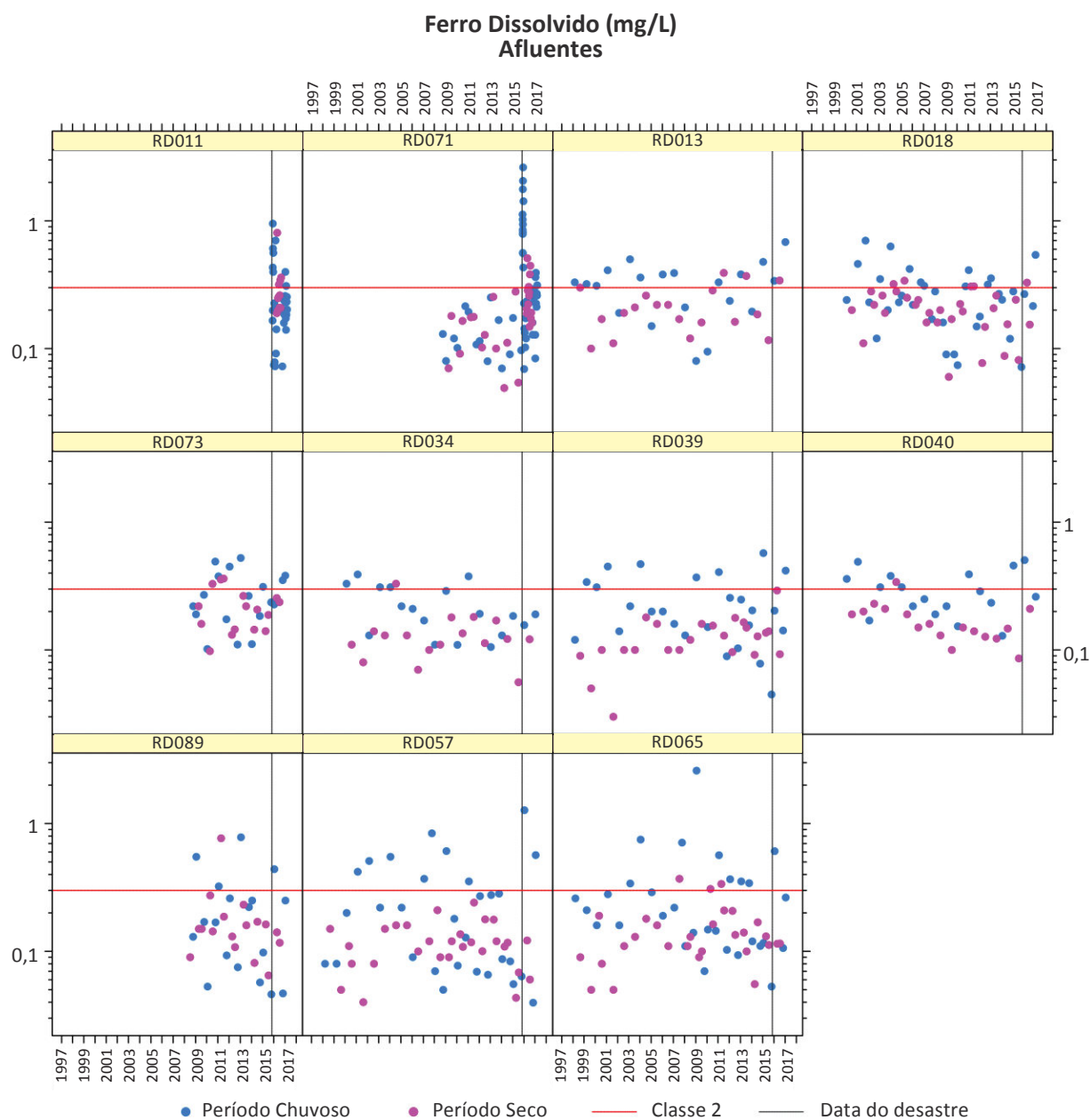
Figura 50 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.



Afluentes do rio Doce

A **Figura 51** mostra as concentrações de ferro dissolvido em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão. O gráfico está apresentado em escala logarítmica, dada a amplitude dos dados.

Complementarmente, a **Tabela 25** apresenta os valores mínimos e máximos de ferro dissolvido para quatro diferentes períodos pós-desastre. Para o período anterior à ruptura da barragem, além dessas medidas também se calculou a mediana para a estação seca e a chuvosa.

Figura 51 – Evolução temporal do ferro dissolvido em afluentes do rio Doce (MG).

No período posterior ao rompimento da barragem, os valores mais elevados foram registrados nas estações RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo), localizadas a 74,9 km e a 79,8 km da barragem de Fundão, respectivamente.

Para a estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), na estação chuvosa, as concentrações máximas de ferro dissolvido variaram entre 0,166 e 0,951 mg/L, sendo o valor mais elevado registrado entre dezembro/2015 e março/2016 e o mais baixo no período de outubro/2016 a março/2017. Entre abril/2016 e setembro/2016, estação seca, a concentração máxima foi de 0,806 mg/L (**Figura 44**). Nos três últimos períodos pós-desastre avaliados, em algum momento, valores superiores ao limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 ($\leq 0,3$ mg/L) foram observados.

Para a estação RD071 (rio do Carmo), no período anterior ao rompimento da barragem, não foram registrados desacordos com o limite legislado em momento algum (INSTITUTOS LACTEC, 2017). Após o desastre, foram observados desacordos em diversos momentos, inclusive no último período avaliado. Para os quatro períodos pós-desastre avaliados, as concentrações máximas foram superiores àquelas do período pré-desastre (**Tabela 25**).

Para as demais estações em afluentes do rio Doce, de modo geral, as concentrações máximas de ferro dissolvido dos diferentes períodos pós-desastre mostraram-se inferiores aos máximos históricos, porém superiores às medianas históricas (**Tabela 25**). Nas estações RD013 (rio Piranga) e RD057 (rio Caratinga), foram registradas em algum momento concentrações máximas superiores àquelas do período anterior ao rompimento da barragem.

Tabela 25 – Valores mínimos e máximos de ferro dissolvido em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Ferro Dissolvido (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	0,049	0,100	0,060	0,098	0,056	0,030	0,086	0,065	0,040	0,050
	Med.	-	0,119	0,188	0,204	0,198	0,126	0,124	0,150	0,150	0,117	0,130
	Máx.	-	0,279	0,391	0,340	0,362	0,330	0,180	0,340	0,768	0,241	0,370
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	0,070	0,080	0,072	0,102	0,105	0,045	0,129	0,046	0,050	0,053
	Med.	-	0,114	0,325	0,241	0,236	0,201	0,200	0,269	0,169	0,180	0,190
	Máx.	-	0,251	0,500	0,700	0,525	0,390	0,573	0,490	0,782	0,840	2,600
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	0,166	0,561	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	0,166	1,767	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,073	0,069	0,339	0,267	0,227	0,157	0,203	0,505	0,440	1,274	0,609
	Máx.	0,951	2,620	0,339	0,267	0,227	0,157	0,203	0,505	0,440	1,274	0,609
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	1	2	2	1	2	1	2	2	2
	Mín.	0,189	0,148	0,341	0,154	0,237	0,121	0,093	0,210	0,117	0,060	0,115
	Máx.	0,806	0,510	0,341	0,328	0,255	0,121	0,292	0,210	0,141	0,122	0,115
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	1	2	2	1	2	1	2	2	2
	Mín.	0,073	0,084	0,682	0,215	0,352	0,190	0,142	0,261	0,047	0,040	0,106
	Máx.	0,398	0,392	0,682	0,541	0,382	0,190	0,418	0,261	0,250	0,567	0,264

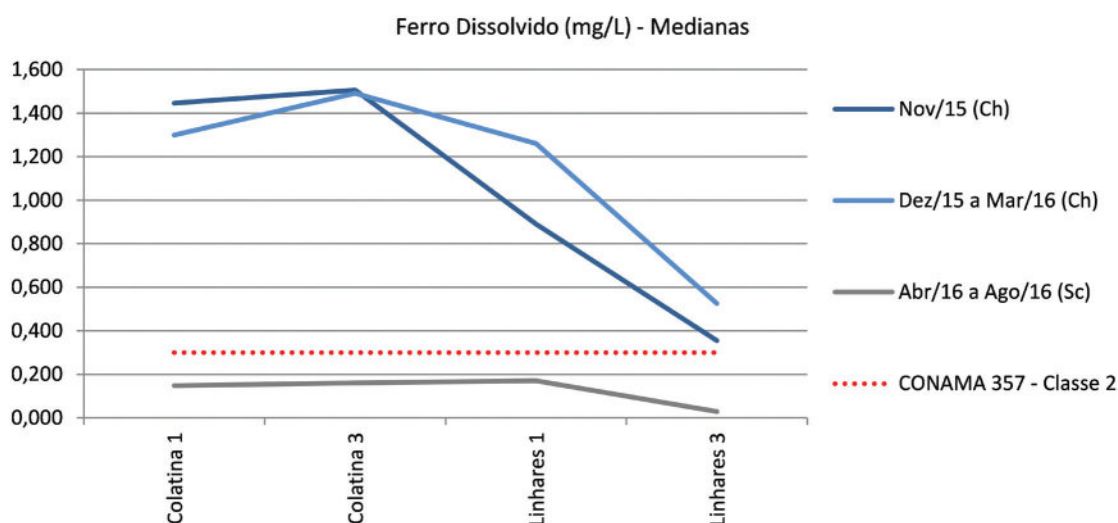
Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A **Figura 52** apresenta, em termos de mediana, as concentrações de ferro dissolvido para quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em três períodos distintos.

Nos períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016 ocorreram os valores mais elevados de ferro dissolvido. Para o último período, os valores das medianas apresentaram-se inferiores aos períodos anteriores.

Figura 52 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce (ES), em termos de mediana.



A **Tabela 26** apresenta os percentuais de não conformidades com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para as quatro estações de monitoramento avaliadas após o rompimento da barragem de Fundão. Foram destacados em laranja os percentuais que se mostraram superiores ao limite legislado ($\leq 0,3$ mg/L).

Tabela 26 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para ferro dissolvido (ES).

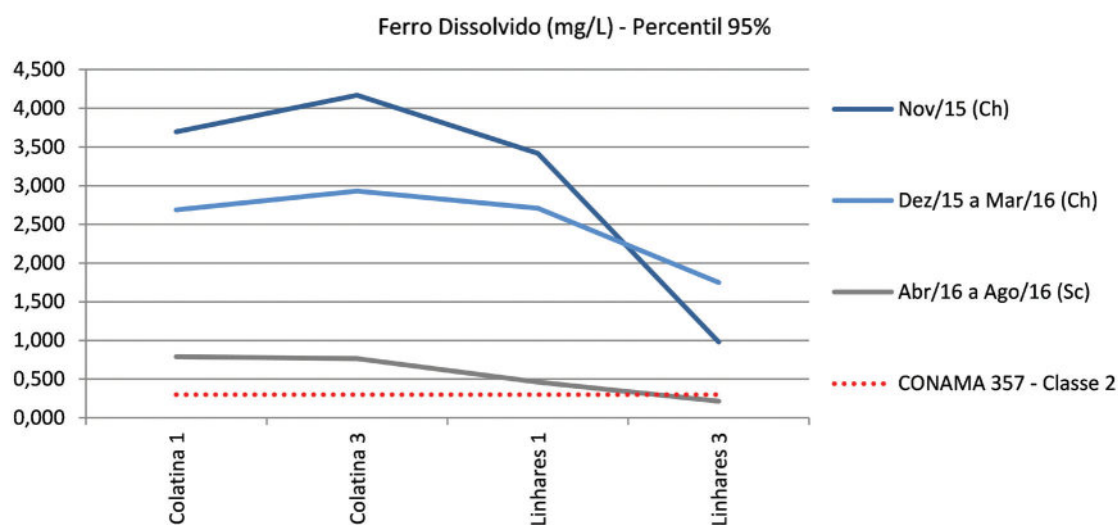
Percentual de desacordos – Ferro Dissolvido			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	83%	100%	33%
Colatina 3	67%	100%	33%
Linhares 1	60%	97%	42%
Linhares 3	60%	61%	0%

Percentuais de não conformidades foram observados nos três períodos pós-desastre avaliados, sendo que, para o período de abril/2016 a agosto/2016, os percentuais de desacordo foram inferiores aos dos períodos anteriores.

Na **Figura 53** apresentam-se os valores dos percentis de 95% para as quatro estações de monitoramento avaliadas ao longo do período pós-desastre.

De uma maneira geral, observou-se ao longo do tempo tendência à redução de valores, sendo os valores máximos dos percentis para cada período: 4,2 mg/L (novembro/2015); 3,0 mg/L (dezembro/2015 a março/2016); 0,8 mg/L (abril/2016 a agosto/2016). Enquanto que, para as medianas, os valores máximos foram: 1,5 mg/L (novembro/2015); 1,5 mg/L (dezembro/2015 a março/2016); 0,2 mg/L (abril/2016 a agosto/2016).

Figura 53 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro ferro dissolvido no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



Manganês total

Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A Figura 54 e a Figura 55 (em detalhes) apresentam os valores de manganês total ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (em quatro períodos distintos) em relação à situação que se tinha previamente. Destaca-se que nos gráficos os valores estão representados em termos de mediana.

No período posterior ao desastre, observou-se ao longo do tempo uma tendência à redução das concentrações de manganês total. Contudo, no período de outubro/2016 a março/2017, os valores voltaram a se elevar, em virtude do período chuvoso. Especialmente, têm-se de modo geral valores mais elevados nas estações de montante e mais baixos nas estações de jusante. A partir da estação RD044 (no município de Governador Valadares), as concentrações apresentaram-se semelhantes àsquelas do período pré-desastre para os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017 (Figura 55).

Figura 54 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce (MG), em termos de mediana.

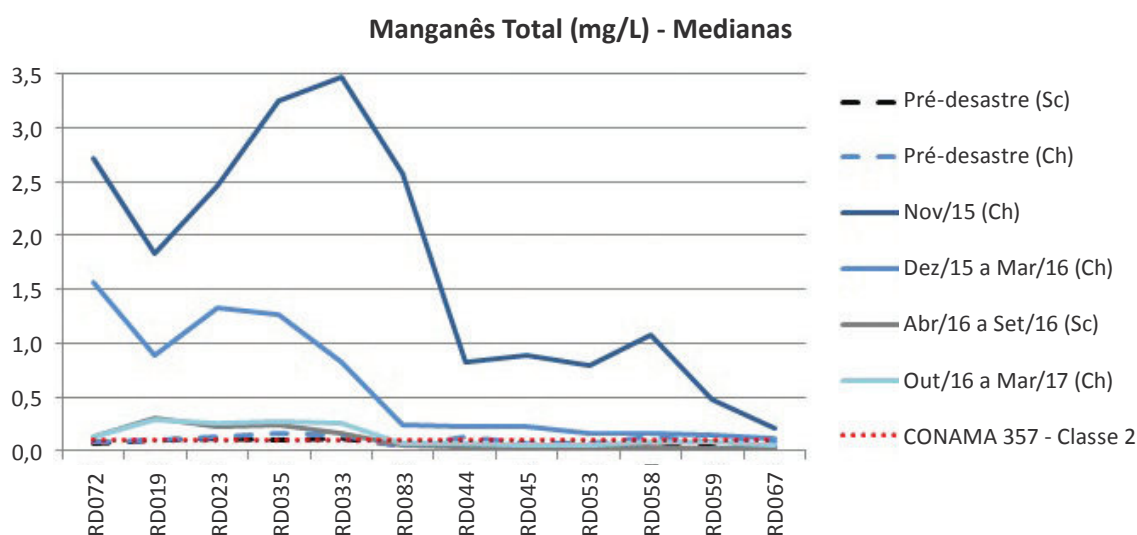
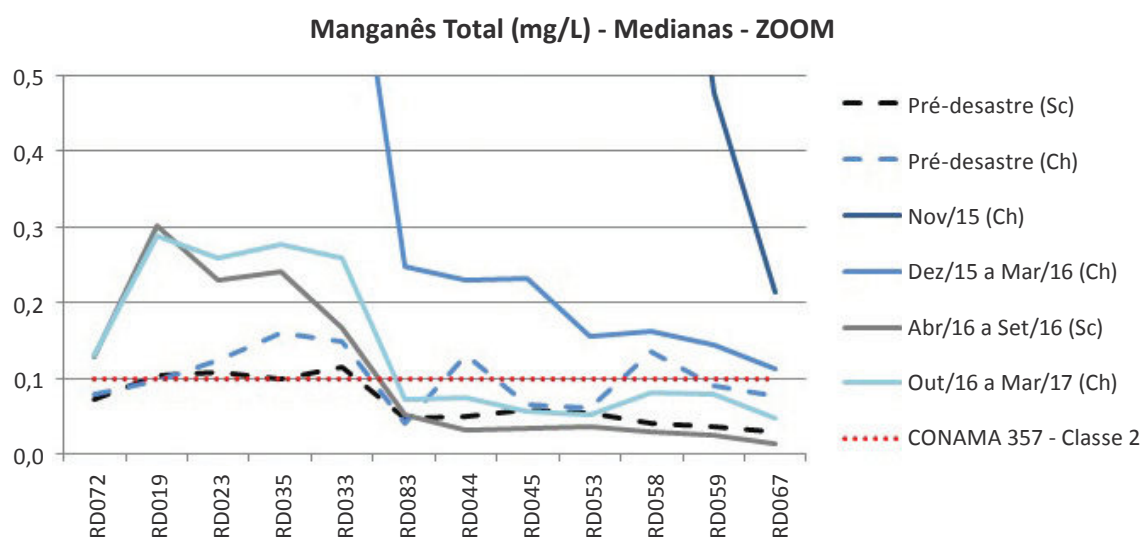


Figura 55 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce (MG), em termos de mediana, com detalhamento.



A Figura 56 e a Figura 57 (em detalhes) mostram a alteração do parâmetro manganês total, em número de vezes, quando comparados os quatro períodos pós-desastre com a condição pré-desastre. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação.

Logo após o desastre (período de novembro/2015), ocorreram as alterações mais significativas. Até a estação RD083 (entre os municípios Fernandes Tourinho e Periquito), registrou-se um aumento entre 20 e 60 vezes ao longo das estações em comparação com a condição pré-desastre. A jusante desse trecho as alterações foram menores, variando de 2 a 14 vezes ao longo das estações avaliadas.

No período seguinte, dezembro/2015 a março/2016, as alterações variaram para mais de 1,2 (RD058 – no município de Conselheiro Pena) a 20 vezes (RD072 – entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado) em relação à situação anterior ao rompimento, sendo que as maiores variações ocorreram até a estação RD083.

Para os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017, a partir da estação RD044 (no município de Governador Valadares), as concentrações apresentaram-se inferiores às do período pré-desastre. Nas estações a montante da RD044, para os referidos períodos, as alterações foram de até 3 vezes superiores à condição pré-desastre.

Figura 56 – Alteração do parâmetro manganês total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).

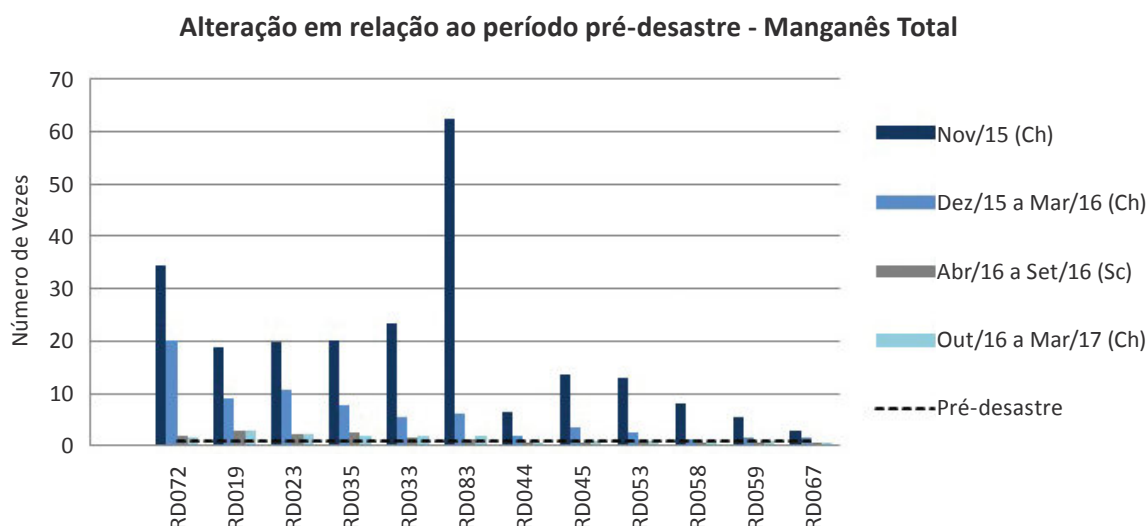
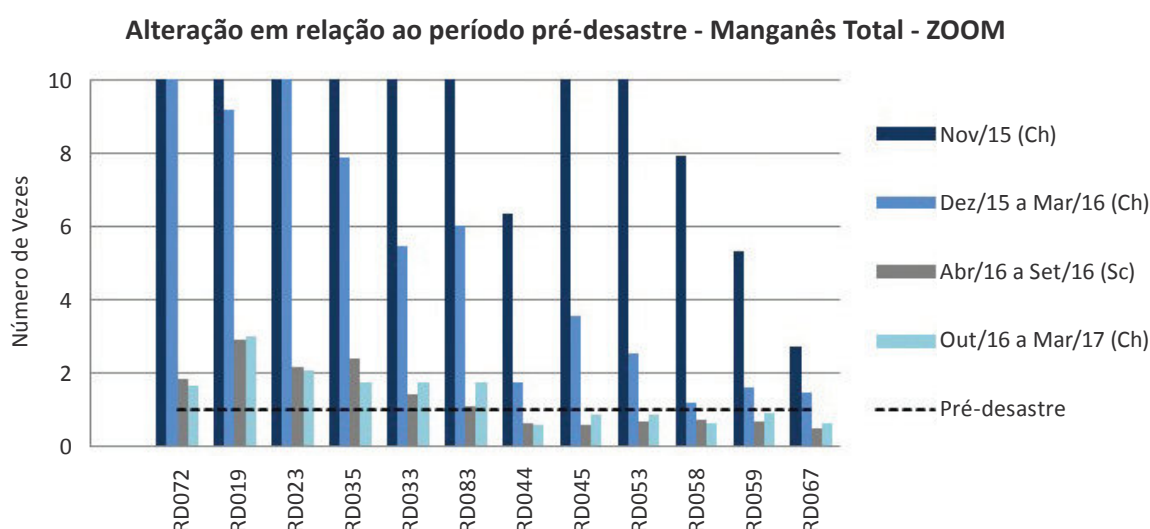


Figura 57 – Alteração do parâmetro manganês total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG), com detalhamento.



A Tabela 27 mostra a avaliação de conformidade do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre. No período anterior ao desastre, para a estação seca, os percentuais de desacordos variaram de 6% a 56% ao longo das estações de monitoramento do IGAM no rio Doce. Na estação chuvosa, os percentuais de não conformidades variaram de 13% a 82% ao longo do rio Doce.

Com o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades em relação ao limite da classe 2 ($\leq 0,1$ mg/L), de modo geral, aumentou, atingindo percentuais de desacordos de até 100%. Para os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017, a partir da estação RD044, notou-se uma redução nos percentuais de desacordo, estando em sua maioria abaixo da condição de linha-base, de 0% a 100% e de 17% a 100%, respectivamente.

Tabela 27 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para manganês total (MG).

Percentual de desacordos – Manganês Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	36%	40%	100%	100%	57%	83%
RD019	50%	47%	100%	100%	100%	100%
RD023	56%	65%	100%	100%	100%	100%
RD035	48%	82%	100%	100%	100%	100%
RD033	56%	65%	100%	92%	86%	94%
RD083	7%	13%	100%	85%	29%	33%
RD044	26%	64%	100%	92%	0%	41%
RD045	26%	38%	100%	92%	7%	35%
RD053	26%	42%	100%	92%	0%	39%
RD058	13%	63%	100%	85%	0%	50%
RD059	6%	39%	100%	69%	0%	50%
RD067	6%	44%	100%	54%	0%	17%

A Figura 58 e a Figura 59 (em detalhes) apresentam a evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%.

Assim como registrado previamente para as medianas, observou-se temporalmente uma tendência à redução dos percentis de 95% do manganês total. Para o período de abril/2016 a setembro/2016, a partir da estação RD044 (município de Governador Valadares), a condição apresentou-se, inclusive, melhor do que aquela da linha-base (estação seca). No último período avaliado (outubro/2016 a março/2017), os valores dos percentis de 95% estão próximos daqueles da condição pré-desastre, mas ainda superiores.

Figura 58 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).

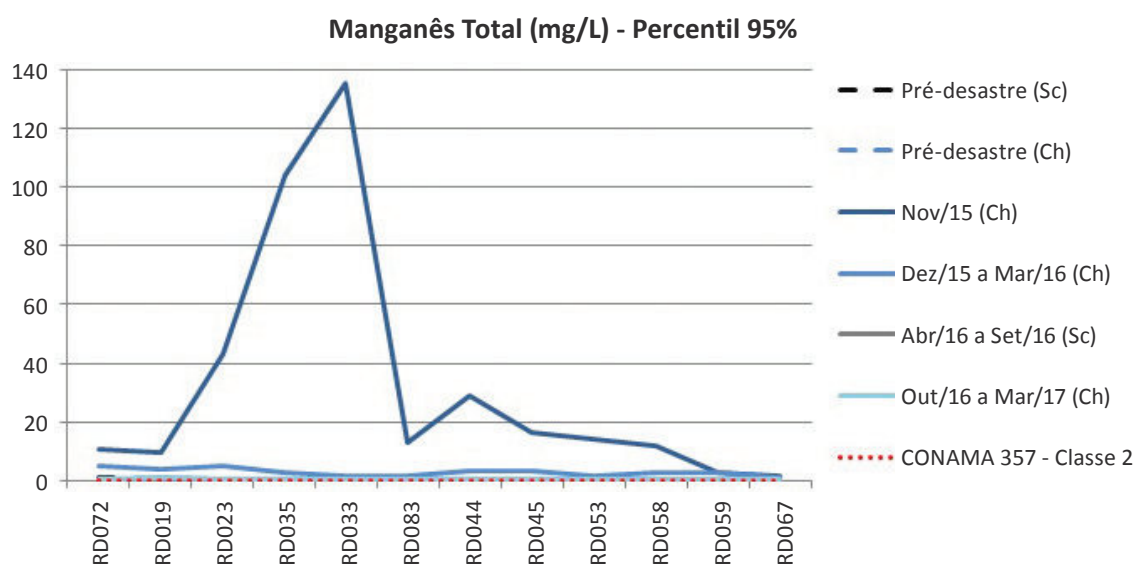
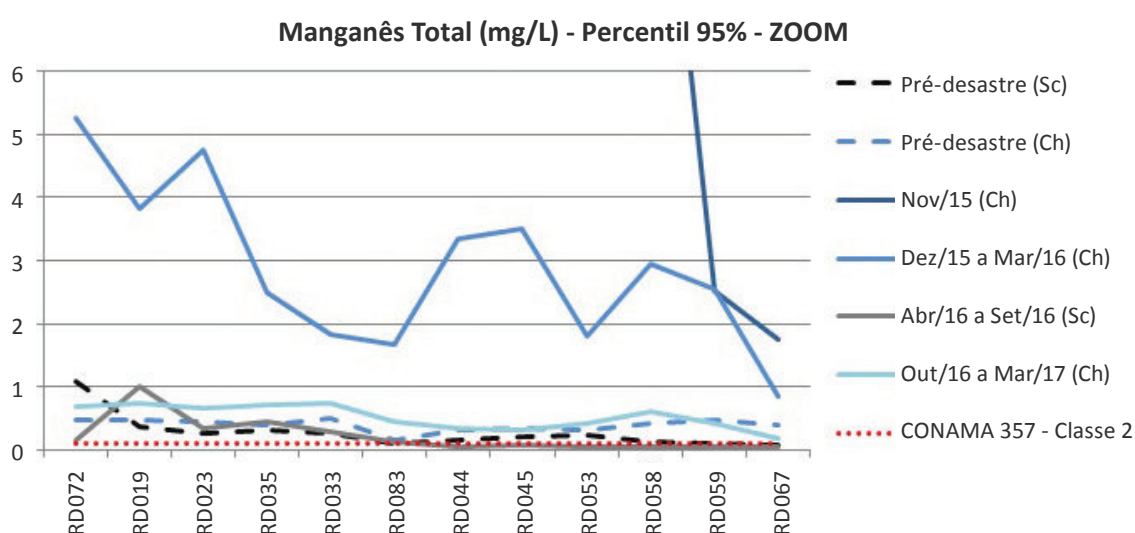


Figura 59 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG), com detalhamento.



Afluentes do rio Doce

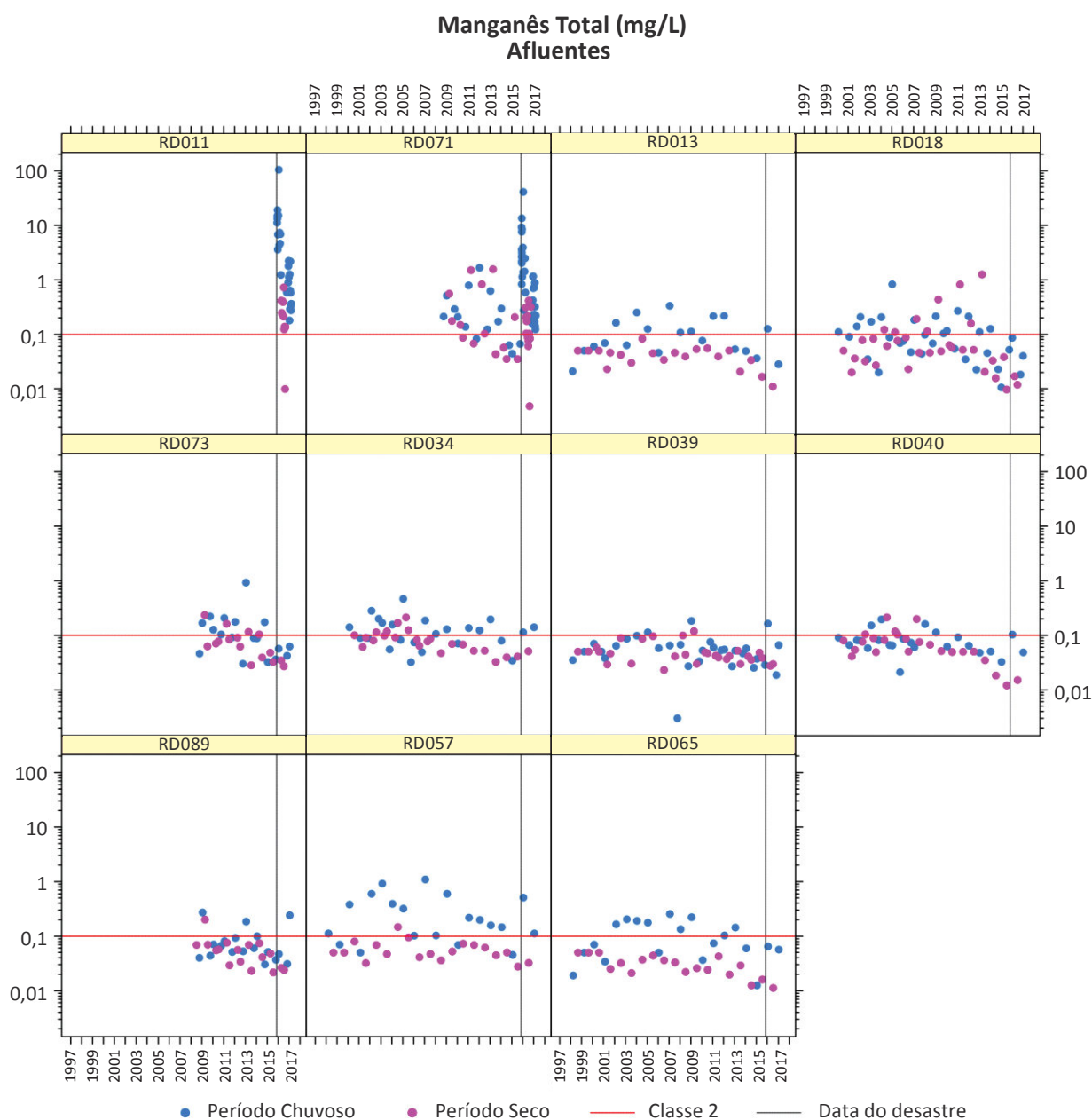
A **Figura 60** mostra as concentrações de manganês total em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão. O gráfico está apresentado em escala logarítmica, dada a amplitude dos dados.

Complementarmente, a **Tabela 28** apresenta os valores mínimos e máximos de manganês total para quatro diferentes períodos pós-desastre. Para o período anterior à ruptura da barragem, além dessas medidas também se calculou a mediana para a estação seca e a chuvosa.

No período posterior ao rompimento da barragem, as concentrações mais elevadas de manganês total foram registradas nas estações RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo). Esses rios contribuem para a formação do rio Doce, sendo suas estações localizadas a 74,9 km e a 79,8 km da barragem de Fundão, respectivamente.

Para a estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), de acordo com a **Tabela 28**, as concentrações máximas registradas nos diferentes períodos da estação chuvosa variaram de 2,214 mg/L (outubro/2016 a março/2017) a 103,800 mg/L (dezembro/2015 a março/2016). Na estação seca (abril/2016 a setembro/2016), o valor máximo encontrado foi de 0,724 mg/L. Assim, concentrações mais elevadas foram registradas até o período de dezembro/2015 a março/2016. Para a estação seca, abril/2016 a setembro/2016, as concentrações já se mostraram inferiores, contudo, voltaram a se elevar na última estação chuvosa avaliada (outubro/2016 a março/2017). Os valores se apresentaram, de modo geral, acima do limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 ($\leq 0,1$ mg/L). A estação RD011 teve seu monitoramento iniciado após o desastre, de modo que não existe série histórica de dados.

Figura 60 – Evolução temporal do manganês total em afluentes do rio Doce (MG).



Para a estação RD071 (rio do Carmo), no período anterior ao rompimento da barragem, já se observavam valores em desacordo com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2, contudo, após o desastre, foram observadas concentrações ainda mais elevadas (**Figura 60**). Nos dois primeiros períodos avaliados após o desastre (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016), as concentrações máximas (9,170 e 40,700 mg/L, respectivamente) foram superiores à máxima histórica para a estação chuvosa (1,655 mg/L). Nos últimos períodos avaliados, as concentrações máximas já se mostraram inferiores aos máximos históricos, porém superiores às medianas históricas.

Para as demais estações em afluentes do rio Doce, de modo geral, as concentrações máximas de manganês total, no período de dezembro/2015 a março/2016, mostraram-se inferiores aos máximos históricos, mas superiores ou próximas às medianas históricas. Para todas as estações avaliadas em afluentes, as concentrações máximas relativas ao período de outubro/2016 a março/2017 (estação chuvosa) foram superiores às concentrações máximas registradas entre abril/2016 e setembro/2016 (estação seca). Ou seja, com a estação chuvosa, os valores tenderam a aumentar.

Tabela 28 – Valores mínimos e máximos de manganês total em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Manganês Total (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	0,035	0,017	0,010	0,028	0,032	0,023	0,012	0,022	0,028	0,013
	Med.	-	0,126	0,045	0,052	0,074	0,080	0,045	0,067	0,056	0,050	0,031
	Máx.	-	1,558	0,083	1,249	0,234	0,212	0,118	0,212	0,201	0,147	0,050
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	0,044	0,021	0,011	0,030	0,032	0,003	0,021	0,030	0,045	0,013
	Med.	-	0,209	0,073	0,090	0,104	0,115	0,053	0,070	0,060	0,178	0,089
	Máx.	-	1,655	0,333	0,824	0,923	0,464	0,183	0,195	0,272	1,092	0,255
Nov/15 (Ch)	N	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	11,130	0,830	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	11,130	9,170	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	13	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	1,224	0,277	0,126	0,086	0,057	0,113	0,163	0,103	0,047	0,509	0,065
	Máx.	103,800	40,700	0,126	0,086	0,057	0,113	0,163	0,103	0,047	0,509	0,065
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	1	2	2	1	2	1	2	1	1
	Mín.	0,010	0,005	0,011	0,012	0,027	0,051	0,028	0,015	0,024	0,032	0,011
	Máx.	0,724	0,415	0,011	0,017	0,035	0,051	0,030	0,015	0,026	0,032	0,011
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	1	2	2	1	2	1	2	1	1
	Mín.	0,179	0,123	0,028	0,018	0,042	0,140	0,019	0,049	0,031	0,112	0,057
	Máx.	2,214	1,158	0,028	0,040	0,062	0,140	0,066	0,049	0,241	0,112	0,057

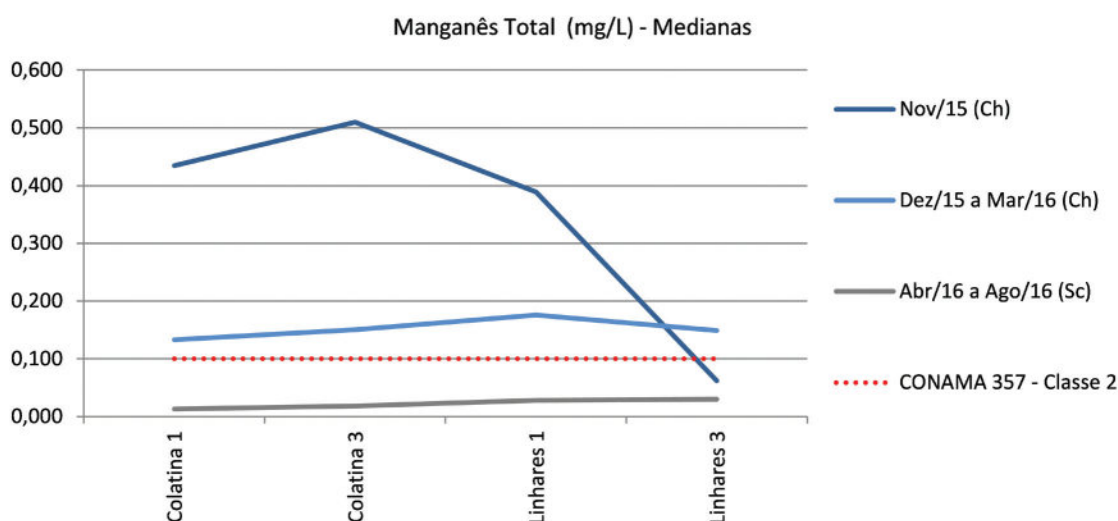
Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

A **Figura 61** apresenta, em termos de mediana, as concentrações de manganês total para quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em três períodos distintos.

Temporalmente, observou-se tendência à redução de valores quando comparados os três períodos. Para novembro/2015, as medianas chegaram a 0,5 mg/L na estação Colatina 3. Para o último período avaliado, as medianas apresentaram valor máximo de 0,03 mg/L.

Figura 61 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce (ES), em termos de mediana.



A **Tabela 29** apresenta os percentuais de não conformidades com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para as quatro estações de monitoramento avaliadas após o rompimento da barragem de Fundão. Foram destacados em laranja os percentuais que se mostraram superiores ao limite legislado ($\leq 0,1$ mg/L).

Percentuais de não conformidades foram observados principalmente nos dois primeiros períodos pós-desastre avaliados. Para novembro/2015, os percentuais de desacordos chegaram a 83% nas estações de Colatina. No período de dezembro/2015 a março/2016, os percentuais de desacordo chegaram a ser superiores nas estações de jusante. Para o período de abril/2016 a agosto/2016, foram observados desacordos somente em Linhares 3, sendo igual a 8%.

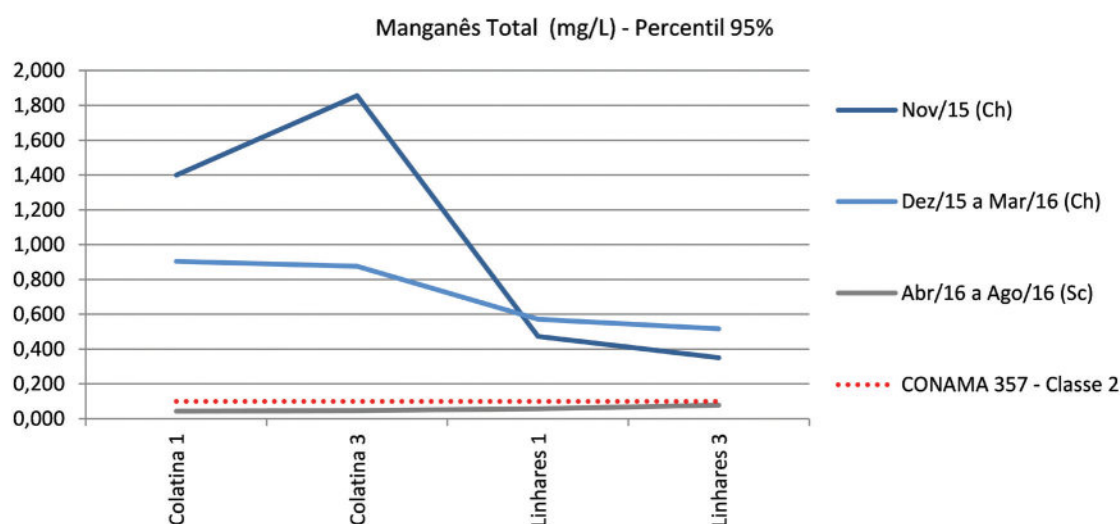
Tabela 29 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para manganês total (ES).

Percentual de desacordos – Manganês Total			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	83%	66%	0%
Colatina 3	83%	59%	0%
Linhares 1	60%	84%	0%
Linhares 3	20%	61%	8%

Na **Figura 62** apresentam-se os valores dos percentis de 95% para as quatro estações de monitoramento avaliadas ao longo do período pós-desastre.

De uma maneira geral, observou-se ao longo do tempo tendência à redução de valores, sendo os valores máximos dos percentis para cada período: 4,2 mg/L (novembro/2015); 3,0 mg/L (dezembro/2015 a março/2016); 0,8 mg/L (abril/2016 a agosto/2016). Enquanto que, para as medianas, os valores máximos foram: 1,5 mg/L (novembro/2015); 1,5 mg/L (dezembro/2015 a março/2016); 0,2 mg/L (abril/2016 a agosto/2016).

Figura 62 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro manganês total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



Zinco total

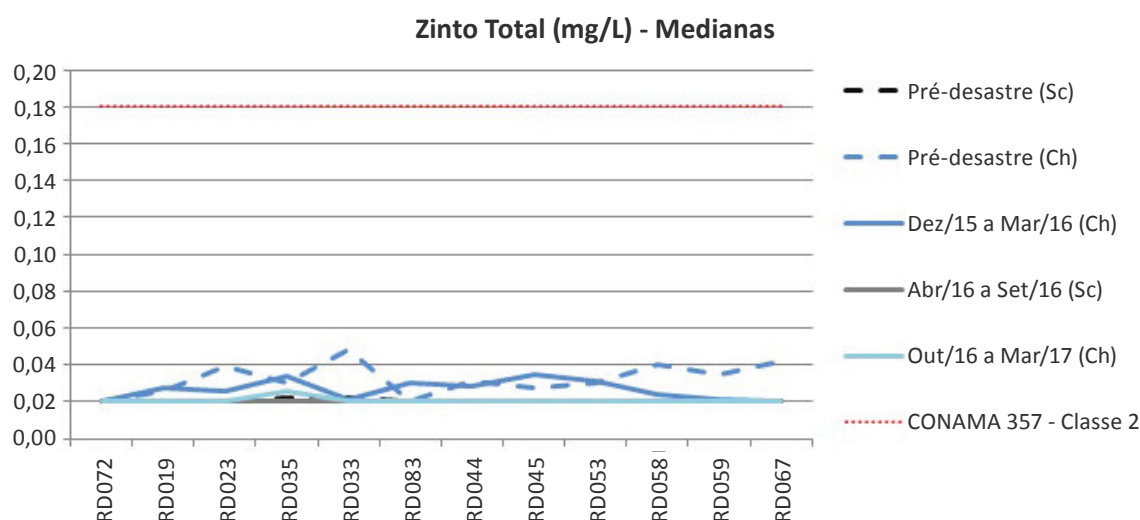
Resultados para o estado de Minas Gerais

Rio Doce

A **Figura 63** apresenta os valores de zinco total ao longo do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão em relação à situação que se tinha previamente. No gráfico, os valores estão representados em termos de mediana. Destaca-se que o referido parâmetro, após o desastre, teve seu monitoramento iniciado somente no mês de dezembro/2015. O limite de quantificação do método foi de 0,02 mg/L tanto no período anterior quanto posterior ao desastre.

No que se refere ao período posterior ao rompimento da barragem, o período de dezembro/2015 a março/2016 apresentou concentrações de zinco total mais elevadas do que os dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017). Em comparação à condição anterior ao rompimento, o período de dezembro/2015 a março/2016 apresentou concentrações semelhantes. Nos dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), as concentrações foram condizentes ou até mesmo inferiores àquelas da linha-base, tendendo ao limite de quantificação do método.

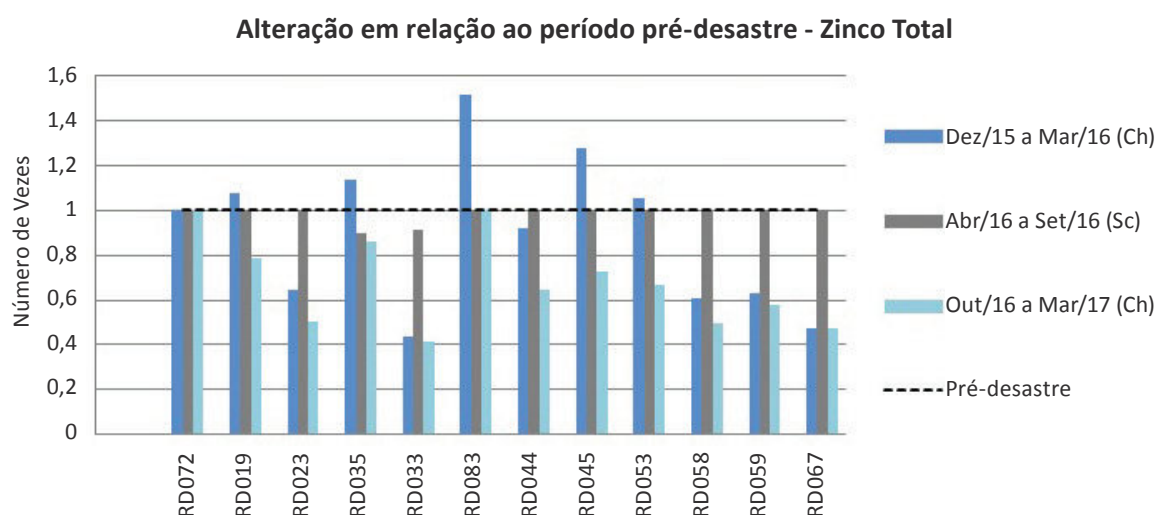
Figura 63 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce (MG), em termos de mediana.



A **Figura 64** mostra a alteração do parâmetro zinco total, em número de vezes, quando comparados os três períodos pós-desastre com a condição anterior ao rompimento da barragem. Para tanto, foram utilizadas as medianas como base de comparação.

De modo geral, pode-se dizer que as condições de linha-base foram mantidas, com exceção do período de dezembro/2015 a março/2016, no qual para algumas estações foram registrados aumentos de concentração. Na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), a montante da UHE Baguari, notou-se a maior elevação (1,5 vez superior à condição anterior ao desastre). Ressalta-se que não houve a realização de análises de zinco total no mês em que ocorreu a ruptura da barragem de Fundão (novembro/2015), dessa forma, a avaliação logo após o desastre ficou comprometida.

Figura 64 – Alteração do parâmetro zinco total em relação ao período pré-desastre em número de vezes (MG).



A **Tabela 30** mostra a avaliação de conformidade do rio Doce com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para os períodos pré e pós-desastre. Foram marcados em vermelho os percentuais pós-desastre que se mostraram superiores aos do período pré-desastre.

No período anterior ao desastre, considerando a estação seca, não havia desacordos de zinco total em relação ao limite legislado ($\leq 0,18$ mg/L). Na estação chuvosa, para a maioria das estações do rio Doce não se observavam desacordos com o limite legislado. Para aquelas estações em que se registraram não conformidades, os percentuais não passaram de 6%.

Com o rompimento da barragem de Fundão, o número de não conformidades no período de dezembro/2015 a março/2016 aumentou na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), a montante da UHE Baguari, e na estação RD053 (entre os municípios de Tumiritinga e Galileia), atingindo percentuais de desacordos de 17%. Para outras estações, houve redução nos percentuais de não conformidades.

Para o período de abril/2016 a setembro/2016, houve aumento nos percentuais de desacordos na última estação do estado de Minas Gerais (RD067), de 0% para 8%.

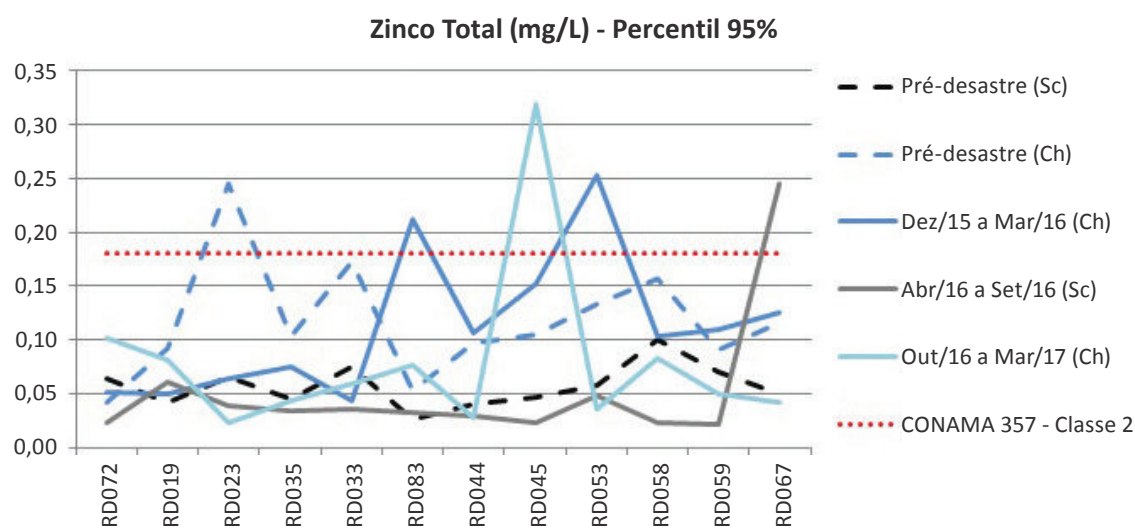
Entre outubro/2016 e março/2017, estação chuvosa, os percentuais de desacordos se elevaram nas estações de montante em relação à condição anterior ao rompimento, de 0% a 6%. Para as demais estações, os percentuais foram mantidos ou então foram inferiores aos da linha-base.

Tabela 30 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para zinco total (MG).

Percentual de desacordos – Zinco Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0%	0%	-	0%	0%	6%
RD019	0%	0%	-	0%	0%	6%
RD023	0%	6%	-	0%	0%	0%
RD035	0%	6%	-	0%	0%	0%
RD033	0%	6%	-	0%	0%	0%
RD083	0%	0%	-	17%	0%	0%
RD044	0%	0%	-	0%	0%	0%
RD045	0%	6%	-	0%	0%	6%
RD053	0%	6%	-	17%	0%	0%
RD058	0%	0%	-	0%	0%	0%
RD059	0%	0%	-	0%	0%	0%
RD067	0%	0%	-	0%	8%	0%

A **Figura 65** apresenta a evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total, antes e após o desastre, considerando o percentil de 95%.

Figura 65 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce considerando o percentil de 95% (MG).



Para o período de dezembro/2015 a março/2016, foram observados valores mais elevados do que aqueles da linha-base entre as estações RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito) e RD053 (entre os municípios de Tumiritinga e Galileia).

Para o período de abril/2016 a setembro/2016, os valores foram semelhantes àqueles da condição anterior ao rompimento, de modo geral, com exceção para a estação RD067 (entre os municípios de Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES).

No último período avaliado (outubro/2016 a março/2017), os valores dos percentis de 95% estiveram abaixo daqueles da condição pré-desastre de modo geral. Na estação RD045 (Governador Valadares), contudo, o valor foi superior.

Afluentes do rio Doce

A **Figura 66** mostra as concentrações de zinco total em afluentes do rio Doce ao longo do tempo, considerando o período anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão.

Complementarmente, na **Tabela 31** estão disponibilizados os valores mínimos e máximos de zinco total para quatro diferentes períodos pós-desastre. Além dessas medidas, também para o período anterior à ruptura da barragem, para a estação seca e a chuvosa, foram calculadas as medianas.

No período posterior ao rompimento da barragem, os valores mais elevados foram registrados nas estações RD011 (rio Gualaxo do Norte) e RD071 (rio do Carmo). Esses rios contribuem para a formação do rio Doce, estando suas estações localizadas a 74,9 km e a 79,8 km da barragem de Fundão, respectivamente.

Para a estação RD011 (rio Gualaxo do Norte), de acordo com a **Tabela 31**, as concentrações máximas registradas variaram de 0,028 mg/L (outubro/2016 a março/2017) a 0,127 mg/L (dezembro/2015 a março/2016). Ou seja, observou-se um decréscimo dos valores máximos ao longo do tempo.

Para a estação RD071 (rio do Carmo), as concentrações máximas dos diferentes períodos pós-desastre mostraram-se superiores aos máximos históricos. Entre outubro/2016 e março/2017, registrou-se a concentração mais elevada (0,440 mg/L), a qual inclusive foi superior ao limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 ($\leq 0,18$ mg/L). Anteriormente ao desastre, tal limite nunca havia sido ultrapassado segundo o histórico analisado.

Para as demais estações em afluentes do rio Doce, de modo geral, concentrações mais elevadas de zinco total foram observadas entre dezembro/2015 e março/2016 considerando todo o período posterior ao rompimento avaliado. Os referidos valores mostraram-se inferiores aos máximos históricos, mas superiores ou próximos às medianas históricas.

Figura 66 – Evolução temporal do zinco total em afluentes do rio Doce (MG).

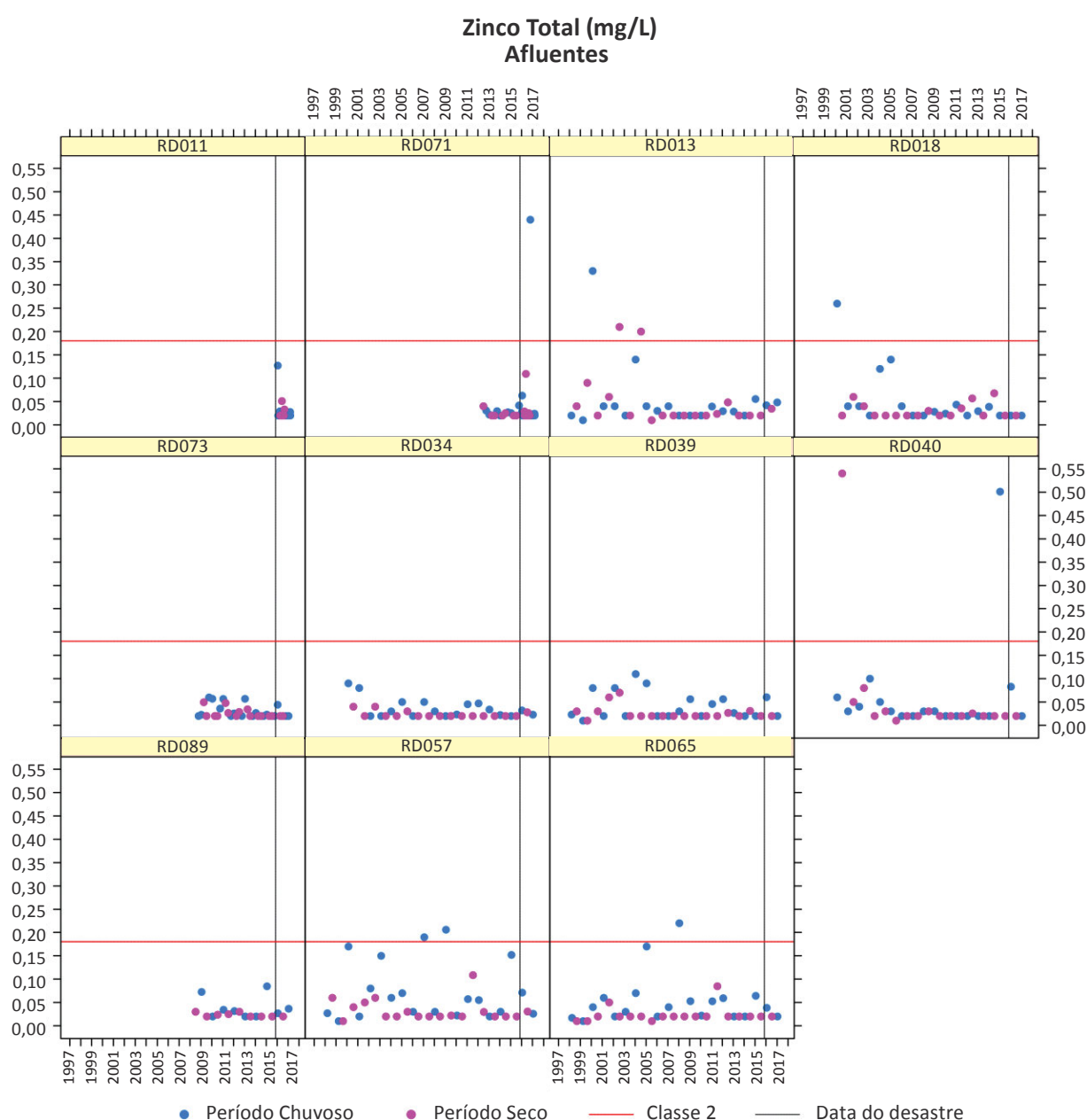


Tabela 31 – Valores mínimos e máximos de zinco total em afluentes do rio Doce após o desastre e valores de referência da série histórica (MG).

		Zinco Total (mg/L)										
Estações IGAM		RD011	RD071	RD013	RD018	RD073	RD034	RD039	RD040	RD089	RD057	RD065
Pré-desastre (Sc)	Mín.	-	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010
	Med.	-	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,022	0,020	0,020
	Máx.	-	0,040	0,210	0,068	0,050	0,040	0,070	0,540	0,030	0,109	0,085
Pré-desastre (Ch)	Mín.	-	0,020	0,010	0,020	0,020	0,020	0,010	0,020	0,020	0,010	0,010
	Med.	-	0,027	0,030	0,034	0,023	0,030	0,025	0,030	0,032	0,056	0,040
	Máx.	-	0,042	0,330	0,260	0,060	0,090	0,110	0,501	0,085	0,206	0,220
Nov/15 (Ch)	N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mín.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Máx.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dez/15 a Mar/16 (Ch)	N	6	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,020	0,020	0,042	0,020	0,044	0,032	0,060	0,083	0,027	0,071	0,039
	Máx.	0,127	0,063	0,042	0,020	0,044	0,032	0,060	0,083	0,027	0,071	0,039
Abr/16 a Set/16 (Sc)	N	11	14	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,020	0,020	0,035	0,020	0,020	0,028	0,020	0,020	0,020	0,031	0,020
	Máx.	0,051	0,109	0,035	0,020	0,020	0,028	0,020	0,020	0,020	0,031	0,020
Out/16 a Mar/17 (Ch)	N	15	18	1	1	2	1	1	1	1	1	1
	Mín.	0,020	0,020	0,048	0,020	0,020	0,023	0,020	0,020	0,037	0,026	0,020
	Máx.	0,028	0,440	0,048	0,020	0,020	0,023	0,020	0,020	0,037	0,026	0,020

Nota: “N” é o número de observações.

Resultados para o estado do Espírito Santo

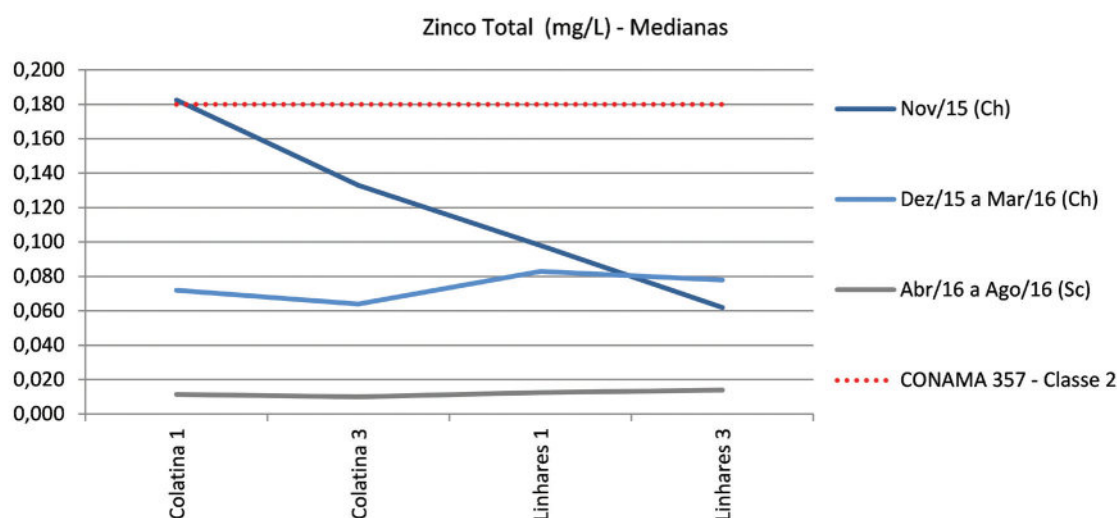
Na **Figura 67** estão apresentadas, em termos de mediana, as concentrações de zinco total para quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, em sua porção capixaba, após o rompimento da barragem de Fundão em três períodos distintos.

De modo geral, observou-se tendência à redução de valores ao longo dos três períodos. No período de novembro/2015, na estação Colatina 1, observou-se a mediana mais elevada, chegando a 0,18 mg/L. A partir de então, os valores diminuíram ao longo das estações de monitoramento, com mediana de 0,06 mg/L na estação Linhares 3.

Em relação ao período de dezembro/2015 a março/2016, os valores apresentaram-se inferiores ao período anterior. Contudo, para a estação Linhares 3, na foz do rio Doce, observou-se elevação da mediana.

Para o último período avaliado, as medianas apresentaram valor em torno de 0,01 mg/L.

Figura 67 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce (ES), em termos de mediana.



A **Tabela 32** apresenta os percentuais de não conformidades com o limite da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2 para as quatro estações de monitoramento avaliadas após o rompimento da barragem de Fundão. Foram destacados em laranja os percentuais que se mostraram superiores ao limite legislado ($\leq 0,18$ mg/L).

Percentuais de não conformidades mais relevantes foram observados, principalmente, no período de novembro/2015, no qual os percentuais de desacordos variaram de 0% a 50%, sendo os percentuais mais elevados registrados nas estações de Colatina.

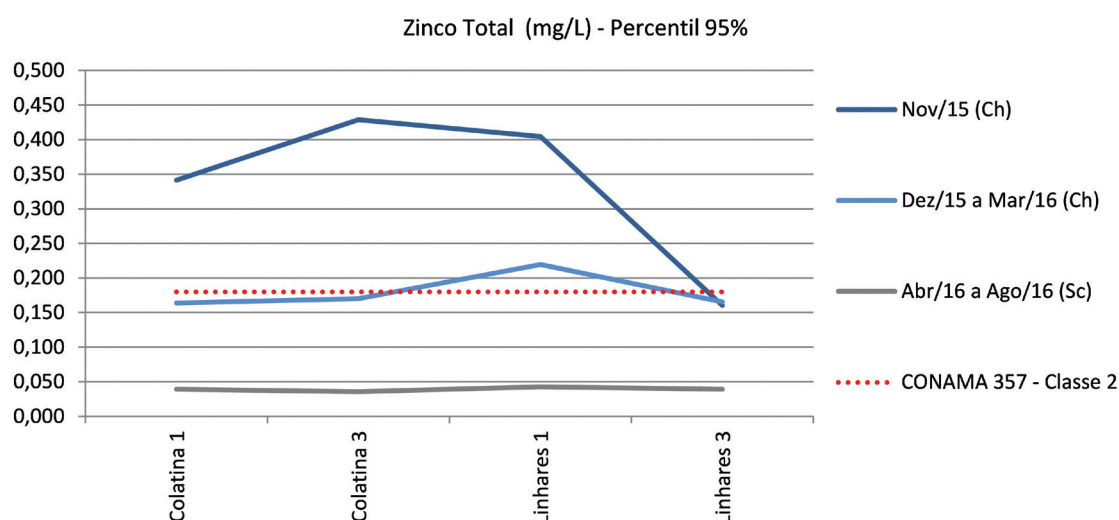
No período de dezembro/2015 a março/2016, os percentuais de desacordo diminuíram, não passando de 10%. Para o período de abril/2016 a agosto/2016, não foram observados desacordos.

Tabela 32 – Percentuais de desacordos com a classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para zinco total (ES).

Percentual de desacordos – Zinco Total			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	50%	6%	0%
Colatina 3	33%	6%	0%
Linhares 1	20%	10%	0%
Linhares 3	0%	6%	0%

Na **Figura 68** apresentam-se os valores dos percentis de 95% para as quatro estações de monitoramento avaliadas ao longo do período pós-desastre.

Figura 68 – Evolução espacial e temporal para o parâmetro zinco total no rio Doce considerando o percentil de 95% (ES).



De uma maneira geral, observou-se ao longo do tempo tendência à redução de valores, sendo os valores máximos dos percentis para cada período: 0,43 mg/L (novembro/2015); 0,22 mg/L (dezembro/2015 a março/2016); 0,04 mg/L (abril/2016 a agosto/2016). Enquanto que, para as medianas, os valores máximos foram: 0,18 mg/L (novembro/2015); 0,08 mg/L (dezembro/2015 a março/2016); 0,01 mg/L (abril/2016 a agosto/2016).

SÍNTESE DOS RESULTADOS

Rio Doce

Antes de se apresentar a síntese dos resultados obtidos, há de se considerar alguns aspectos dos dados avaliados neste documento. No estado do Espírito Santo, após o rompimento da barragem, houve alteração no posicionamento de algumas estações, de modo que nem todas possuíam dados históricos. Antes do desastre, também nessa porção, foram monitorados parâmetros somente para o cálculo do Índice de Qualidade da Água, que não contempla a avaliação de metais. Além disso, o monitoramento pós-desastre realizado pelo IEMA ocorreu até agosto/2016, não sendo possível avaliar a influência do período chuvoso de 2016/2017 no Espírito Santo.

A intenção desta síntese foi a de classificar os parâmetros de qualidade de água avaliados como “alterado” ou com “tendência ao retorno da linha-base”. Para tanto, foram levados em conta os resultados de todas as análises apresentadas.

O critério para a classificação do parâmetro como “alterado” foi o de se observar alteração para ao menos uma das análises empregadas para a avaliação dos resultados, mesmo que somente em uma estação de monitoramento.

Os parâmetros com “tendência ao retorno da linha-base”, por outro lado, deveriam apresentar com o passar do tempo decaimento de valores sem que estes voltassem a se elevar com o retorno da estação chuvosa. Com ressalva para os parâmetros oxigênio dissolvido, para o qual concentrações mais elevadas são algo positivo, e pH, que deve se manter dentro de uma faixa de valores.

Assim, entre a **Tabela 33** e a **Tabela 41**, encontram-se disponibilizadas algumas das principais considerações resultantes da avaliação dos parâmetros físicos e químicos relacionados à qualidade de água do rio Doce, em decorrência do rompimento da barragem de Fundão e liberação de rejeitos minerários.

Tabela 33 – Síntese dos resultados: turbidez.

Parâmetro: Turbidez	Status: Alterado
Valores de turbidez elevados e superiores às condições de linha-base foram observados principalmente nos períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016, ocorrendo ao longo de todo o rio Doce. No período de abril/2016 a setembro/2016, a partir do município de Governador Valadares, observou-se tendência ao retorno das condições anteriores ao rompimento. Contudo, no período subsequente, outubro/2016 a março/2017, com o retorno da estação chuvosa, os valores de turbidez voltaram a se elevar, sendo superiores aos do período anterior e às condições de linha-base.	

Tabela 34 – Síntese dos resultados: oxigênio dissolvido.

Parâmetro: Oxigênio dissolvido	Status: Alterado
No estado de Minas Gerais, maiores depleções de oxigênio dissolvido foram observadas no período de novembro/2015, com ocorrência de não conformidades com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 em todas as estações avaliadas. Para os demais períodos pós-desastre, observou-se tendência ao retorno das condições de linha-base, mas ainda foram registradas alterações. Para a estação RD044 (no município de Governador Valadares), para o período de abril/2016 a setembro/2016, ainda foi encontrada diferença estatística significativa.	
No estado do Espírito Santo, concentrações mais baixas foram observadas para o período de dezembro/2015 a março/2016 em relação ao período de novembro/2015, o que pode estar relacionado ao menor número de observações obtido no mês do desastre. Diferença estatística significativa entre os períodos pré e pós-desastre ainda foi observada para o período de abril/2016 a agosto/2016 nas estações Colatina 1 e Linhares 1.	

Tabela 35 – Síntese dos resultados: pH.

Parâmetro: pH	Status: Alterado
Em relação às medianas, nos períodos de novembro/2015 e abril/2016 a setembro/2016, foram observadas alterações mais significativas em relação à linha-base, com valores de pH superiores ao encontrado na série histórica, em especial até a estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), a montante da UHE Baguari. Para o período de outubro/2016 a março/2017, a tendência foi de retorno à linha-base, sendo que não houve diferença estatística significativa. Contudo, no tocante à conformidade com os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2, foi observado aumento nos percentuais em comparação com aqueles da linha-base para algumas estações em todos os períodos pós-desastre, com exceção do período de abril/2016 a setembro/2016. Desse modo, para o período de abril/2016 a setembro/2016, apesar de se ter aumento dos valores de pH em relação às condições anteriores ao rompimento, estes permaneceram dentro dos limites legislados. De modo geral, os percentuais de desacordo pós-desastre não passaram de 10%, sendo que antes do rompimento o percentual de desacordo máximo era de 4%. Na porção relativa ao Espírito Santo, alterações foram notadas em relação aos percentuais de desacordos com os limites legislados no período de dezembro/2015 a março/2016. Para o período de abril/2016 a agosto/2016, não houve desacordos com o limite legislado e também não foi observada diferença estatística significativa.	

Tabela 36 – Síntese dos resultados: alumínio dissolvido.

Parâmetro: Alumínio dissolvido	Status: Alterado
Alterações mais pronunciadas de alumínio dissolvido, em relação à condição de linha-base, ocorreram nos primeiros períodos pós-desastre (novembro/2015 e dezembro/2015 e março/2016). Para os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017, a avaliação de não conformidades mostrou que para esses períodos ainda ocorreram percentuais de desacordo mais elevados do que se tinha anteriormente ao rompimento. Para o trecho do rio Doce situado no estado do Espírito Santo, alterações mais relevantes de alumínio dissolvido também ocorreram nos primeiros períodos pós-desastre (novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016). Em relação à avaliação de não conformidades, percentuais menos elevados foram observados para o último período avaliado, variando de 33% a 58%.	

Tabela 37 – Síntese dos resultados: arsênio total.

Parâmetro: Arsênio total	Status: Alterado
Para o período de novembro/2015, foram observadas as concentrações mais elevadas de arsênio total no rio Doce. Na estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), a montante da UHE Baguari, a concentração chegou a ser 15 vezes superior à da condição anterior ao desastre. Nesse período, também ocorreu aumento dos percentuais de desacordo com o limite legislado em relação ao que se tinha na linha-base para a maioria das estações de monitoramento avaliadas. Os demais períodos ainda apresentaram alguma alteração, com a indicação de diferença estatística significativa. Ressalta-se, porém, que a diferença entre os limites de quantificação empregados antes e depois de julho/2013 pode ter influenciado nesse resultado. Apesar da indicação de diferença estatística, nos últimos períodos, não ocorreram mais desacordos com o limite legislado. Para o trecho do rio Doce situado no estado do Espírito Santo, concentrações mais elevadas de arsênio total foram observadas em novembro/2015, sendo que, de dezembro/2015 a março/2016, as concentrações diminuíram, tendendo ao limite de quantificação do método. A partir desse período, não foram mais realizadas análises de arsênio total.	

Tabela 38 – Síntese dos resultados: chumbo total.

Parâmetro: Chumbo total	Status: Tendência ao retorno da linha-base
Alterações mais significativas em relação às condições anteriores ao desastre foram observadas para os períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016, com maior magnitude para o primeiro período. Para os dois últimos períodos avaliados (abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017), a tendência foi de retorno às condições da linha-base. No último período avaliado, não foram mais observados desacordos com o limite legislado superiores aos registrados para a linha-base.	

Tabela 39 – Síntese dos resultados: ferro dissolvido.

Parâmetro: Ferro dissolvido	Status: Alterado
No trecho mineiro, apesar de ao longo do tempo ter se observado decaimento das concentrações de ferro dissolvido, os resultados para o referido parâmetro ainda indicam alterações em relação à condição pré-desastre. No estado do Espírito Santo, para o período de abril/2016 a agosto/2016, os percentuais de desacordo com o limite legislado diminuíram em relação aos períodos anteriores, mas ainda foram observados, variando entre 33% e 42% ao longo das estações. Na estação Linhares 3 (na foz do rio Doce), contudo, não foram registradas não conformidades com a Resolução CONAMA nº 357/2005, no último período avaliado.	

Tabela 40 – Síntese dos resultados: manganês total.

Parâmetro: Manganês total	Status: Alterado
Para os períodos de novembro/2015 e dezembro/2015 a março/2016 foram observadas as maiores alterações. Para o primeiro período, a concentração mediana chegou a ser mais de 60 vezes superior ao referencial da linha-base. No período seguinte, a diferença observada foi de até 20 vezes superior à condição anterior ao rompimento. Para os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017, alterações ainda foram observadas até a estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), a montante da UHE Baguari, com medianas até 3 vezes superiores às da linha-base. A partir desse local, a tendência foi de retomada da linha-base. Convém ressaltar que, no trecho capixaba, o rio Doce foi avaliado até agosto/2016, de modo que não foi possível avaliar a estação chuvosa 2016/2017.	

Tabela 41 – Síntese dos resultados: zinco total.

Parâmetro: Zinco total	Status: Alterado
No estado de Minas Gerais, análises para a determinação das concentrações de zinco total na água foram iniciadas em dezembro/2015. No período de dezembro/2015 a março/2016, foram observadas as alterações mais elevadas em relação à condição anterior ao rompimento (até 1,5 vez mais do que a concentração que havia sido registrada previamente). Para os períodos de abril/2016 a setembro/2016 e outubro/2016 a março/2017, para a maioria das estações de monitoramento avaliadas, a tendência foi de retomada das condições de linha-base. Em relação aos percentuais de não conformidades, para os dois últimos períodos foram registrados ainda valores superiores aos da linha-base, mas de modo pontual. No estado do Espírito Santo, as análises de zinco total na água foram iniciadas no mês do desastre. De modo geral, após o rompimento da barragem, houve uma elevação dos valores no período de novembro/2015. Após esse período, observou-se redução dos valores ao longo do tempo, sendo os valores mais baixos referentes ao período de abril/2016 a agosto/2016. Para esse último período avaliado, não foram mais observadas não conformidades com o limite legislado.	

Afluentes e rios formadores do rio Doce

Os resultados obtidos para os afluentes foram apresentados separadamente, visto que, conforme mencionado anteriormente, as estações localizadas em tributários possuem um número reduzido de observações, tendo sido avaliadas de modo distinto.

Turbidez: os valores mais elevados de turbidez, inclusive com diversos desacordos com o limite legislado, foram registrados nas estações do rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo, rios formadores do rio Doce. Para o rio do Carmo, que possui histórico de dados, os resultados pós-desastre foram superiores aos da condição pré-desastre para todos os períodos avaliados. Para a maioria das estações situadas em afluentes, os valores máximos superaram as medianas históricas, em alguns casos até mesmo o máximo histórico. Na estação seca (abril/2016 a setembro/2016), houve redução de valores, mas, com o retorno da estação chuvosa (outubro/2016 a março/2017), os valores voltaram a se elevar, sendo superiores às medianas históricas, mas inferiores aos máximos históricos.

Oxigênio dissolvido: maior depleção de oxigênio dissolvido em relação ao histórico de dados foi observada na estação do rio do Carmo. Para a maioria dos demais afluentes, as concentrações mínimas de oxigênio apresentaram-se abaixo das medianas históricas, considerando os três últimos períodos pós-desastre avaliados.

pH: a princípio houve tendência a valores mais elevados de pH, com valores superiores às medianas históricas, mas inferiores aos máximos históricos.

Alumínio dissolvido: no rio do Carmo, observaram-se valores superiores aos máximos históricos em todos os períodos pós-desastre de estação chuvosa. Para a maioria dos demais afluentes, entre dezembro/2015 e março/2016, foram observados valores superiores às medianas pré-desastre e até mesmo máximos históricos. No último período avaliado (outubro/2016 a março/2017), os valores tenderam às medianas históricas, de modo geral. Para as estações localizadas mais a jusante, contudo, observaram-se valores superiores às medianas históricas.

Arsênio total: para a maioria dos afluentes, as concentrações de arsênio total tenderam ao limite de quantificação do método. Concentrações mais elevadas foram registradas nos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, sendo que, para este último, as concentrações máximas foram superiores às medianas históricas em todos os períodos pós-desastre.

Chumbo total: concentrações mais elevadas de chumbo total foram registradas nas estações do rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo. Para este último, alterações mais relevantes em relação ao período pré-desastre ocorreram entre novembro/2015 e março/2016, sendo que, na última estação chuvosa, os valores estiveram próximos da linha-base. Nos períodos de dezembro/2015 a março/2016 e outubro/2016 a março/2017, para a minoria das estações ainda foram observados valores superiores às medianas históricas.

Ferro dissolvido: concentrações mais elevadas de ferro dissolvido foram registradas nas estações do rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo. Para o rio do Carmo, as concentrações foram superiores às do período pré-desastre em todos os períodos avaliados. Para as demais estações em afluentes do rio Doce, de modo geral, as concentrações máximas de ferro dissolvido dos diferentes períodos pós-desastre mostraram-se inferiores aos máximos históricos, porém superiores às medianas históricas,

inclusive no último período avaliado. Nos rios Piranga e Caratinga, foram registradas concentrações máximas superiores às aquelas do período anterior ao rompimento da barragem para os períodos de outubro/2016 a março/2017 e dezembro/2015 a março/2016, respectivamente.

Manganês total: concentrações mais elevadas de manganês total foram registradas nas estações do rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo. Para a estação do rio do Carmo, foram observadas concentrações ainda mais elevadas do que no período anterior ao desastre entre novembro/2015 e março/2016. Nos últimos períodos avaliados, as concentrações máximas já se mostraram inferiores aos máximos históricos, porém superiores às medianas históricas. Para as demais estações em afluentes do rio Doce, de modo geral, as concentrações máximas de manganês total, no período de dezembro/2015 a março/2016, mostraram-se inferiores aos máximos históricos, mas superiores ou próximas às medianas históricas. Apesar de na estação seca se observar redução das concentrações, com o retorno da estação chuvosa, os valores voltaram a se elevar.

Zinco total: valores mais elevados de zinco total foram observados nas estações do rio Gualaxo do Norte e do Carmo. No rio do Carmo, mesmo no período de outubro/2016 a março/2017, foram observados valores superiores ao máximo histórico, com o registro de não conformidades. Para as demais estações, de modo geral, concentrações mais elevadas de zinco total foram observadas no período de dezembro/2015 a março/2016, sendo que, com o tempo, a tendência foi de redução de concentrações.

CONCLUSÕES

No presente documento foram analisados dados de qualidade de água gerados após o rompimento da barragem de Fundão tomando-se como referencial os resultados obtidos na linha-base (INSTITUTOS LACTEC, 2017).

Foram realizados diferentes tipos de análise de modo que seus resultados se complementassem. A partir dos resultados dessas análises, foi possível identificar no conjunto de parâmetros de qualidade de água avaliado quais apresentaram, entre novembro/2015 e março/2017, alterações em relação à condição anterior ao rompimento e quais apresentaram tendência ao retorno da linha-base.

Para o rio Doce, as análises realizadas acerca do período pós-desastre indicaram alterações para oito dos nove parâmetros avaliados: oxigênio dissolvido, turbidez, pH, alumínio dissolvido, arsênio total, ferro dissolvido, manganês total e zinco total. Quanto ao arsênio total, faz-se a ressalva de que a troca de limites de quantificação do método pode ter influenciado tal resultado. O parâmetro chumbo total foi o único a apresentar uma tendência ao retorno das condições da linha-base.

Convém ressaltar, no entanto, que, como a análise dos dados abrangeu o período de novembro/2015 a março/2017, quando dados posteriores a esse período estiverem disponíveis, uma nova análise será realizada para que os resultados aqui obtidos possam ser ratificados, visando principalmente à avaliação do retorno da próxima estação chuvosa (2017/2018).

Em relação aos resultados obtidos para os afluentes, há de se considerar primeiramente que estes foram monitorados com menor frequência do que o rio Doce, tendo-se, assim, um menor número

de observações no período pós-desastre. Com exceção dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, os demais corpos hídricos tiveram seu monitoramento retomado a partir de janeiro/2016.

Nos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, que contribuem para a formação do rio Doce e foram monitorados mais intensamente, registraram-se os valores mais elevados dos parâmetros de qualidade de água, de modo geral. É importante lembrar que, para o oxigênio dissolvido, a interpretação deve ser inversa, visto que concentrações mais elevadas indicam boa oxigenação do corpo hídrico, enquanto concentrações mais baixas indicam degradação. Já para o pH, este deve apresentar valores dentro de uma faixa (6,0 a 9,0 unidades de pH).

Para o rio do Carmo, que possui série histórica de dados, foram registrados valores superiores aos máximos históricos para a maioria dos parâmetros de qualidade de água, até mesmo no último período avaliado, indicando maiores alterações. Para o oxigênio dissolvido, as concentrações foram inferiores aos mínimos históricos.

Para os demais afluentes, os parâmetros avaliados apresentaram valores superiores às medianas históricas, em algum momento, sendo que valores superiores aos máximos históricos foram raros e quando ocorrentes observados para o período de dezembro/2015 a março/2016.

É importante destacar, também, que, uma vez que se obteve um número reduzido de observações para os afluentes do rio Doce, conclusões efetivas no tocante à alteração ou tendência ao retorno da linha-base podem se mostrar sensíveis ao tamanho reduzido da amostra avaliada. Além disso, algumas estações de monitoramento estão localizadas a mais de 10 km do rio Doce. Desse modo, não se pode descartar que, em alguma localidade desses tributários com distância inferior a esta, possa ter ocorrido alguma alteração.

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

INTRODUÇÃO

CONTEXTUALIZAÇÃO

O ambiente natural, sobre o qual o homem cada vez mais exerce sua influência modificadora, se comporta como um todo, em que as afetações sofridas por cada um dos componentes desse sistema se manifestam direta ou indiretamente nos outros, mais ou menos significativamente.

O desastre foi desencadeado pelo rompimento de uma barragem de rejeitos, o que liberou um fluxo de água supersaturada em material particulado, que percorreu a calha do rio Doce e tributários até atingir o oceano Atlântico. Nesse percurso, afetou todo o ambiente natural, já impactado pela ocupação humana desde muitos séculos e a população dependente da água para atender às suas necessidades básicas.

Pelas características do desastre de Mariana, o meio hídrico foi o mais diretamente afetado, irradiando impactos para todos os outros meios. Com o intuito de quantificar os impactos ocorridos, dentro de uma escala de prioridades, para a subárea em questão, adotou-se o critério de analisar inicialmente os mais significativos.

Em uma hierarquização de prioridades, tendo como foco a população humana, os impactos mais relevantes se referem ao abastecimento de água para centros urbanos e consumidores individuais.

Conforme mencionado, a este capítulo cabe a análise concernente à água subterrânea. No que se refere a ela, os danos aprioristicamente julgados como mais significativos desencadeados pela massa de lama que fluiu pela calha do rio Doce foram e ainda são, principalmente, indiretos e localizados nos maiores núcleos de demanda. Indiretos, pois a água dos rios afetados tem na carga em suspensão os contaminantes tidos como os mais impactantes, principalmente o ferro e o manganês, em grande parte componentes do material particulado, fase que tem muita dificuldade de acesso aos aquíferos. Assim sendo, a água subterrânea está relativamente protegida de contaminantes que não estão na fase solúvel. Por outro lado, a incapacidade dos sistemas de tratamento de água de localidades ribeirinhas, em tratar a água dos rios excessivamente carregada de material particulado, levou a que houvesse uma superexploração de fontes alternativas que são os aquíferos.

De acordo com informações do Ministério Público Federal, em condições emergenciais muitos poços teriam sido implantados sem um projeto e avaliação hidrogeológica adequados e um devido acompanhamento técnico das perfurações. Tal assertiva é corroborada pelo fato de que os estudos hidrogeológicos necessários para o projeto e a implantação de um sistema de captação tecnicamente demandam de um tempo que não está disponível em situações de emergência. O desejável para essas situações seria a existência de projetos pré-elaborados, uma vez que a probabilidade de situações de emergência que comprometam a qualidade de água de um rio, entre os quais o rio Doce, não é desprezível.

Quando das avaliações para o estabelecimento da linha-base para referenciar o conhecimento da água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), foram considerados, sobretudo, os dados obtidos anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão, todavia trabalhos relevantes posteriores ao citado evento foram realizados.

METODOLOGIA

Este documento se ocupará principalmente dos dados gerados em trabalhos desenvolvidos posteriormente ao desastre. Ao se tentar estabelecer uma linha-base para referência do impacto do fluxo de lama, ficou evidenciada a grande lacuna relativa a esse segmento do ciclo hidrológico, principalmente quanto à hidrogeoquímica do sistema. Visto isso, esta será a ênfase dada nesta abordagem, acrescida de considerações sobre informações obtidas de bancos de dados de água subterrânea, como o SIAGAS/CPRM, além das necessárias avaliações da geologia estrutural que estão sendo realizadas também no âmbito deste projeto.

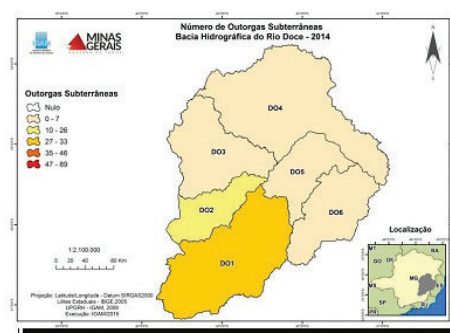
DIAGNÓSTICO

DISTRIBUIÇÃO DE POÇOS

A base mais importante para a obtenção de dados sobre a água subterrânea são os bancos de dados, entre eles cabe destaque o SIAGAS. Nesse banco, mantido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, de abrangência nacional, estão as informações mais relevantes sobre os pontos de água, principalmente poços tubulares profundos. Cabe destacar que a CPRM está implantando em todo o território nacional um ambicioso programa de monitoramento dos aquíferos denominado RIMAS (CPRM), todavia a BHRD não conta ainda com poços desse programa.

O IGAM, responsável direto pela outorga e gerenciamento dos recursos hídricos de Minas Gerais, está implantando uma rede de monitoramento, para a qual estabeleceu uma hierarquização das bacias hidrográficas do estado, priorizando a região abrangida pelo clima semiárido, ao norte da BHRD. A bacia em questão conta ainda com um número pequeno de captações outorgadas para a água subterrânea conforme pode ser observado na Figura 69.

Figura 69 – Número de unidades de captação de água subterrânea outorgadas nas sub-bacias da BHRD em Minas Gerais.



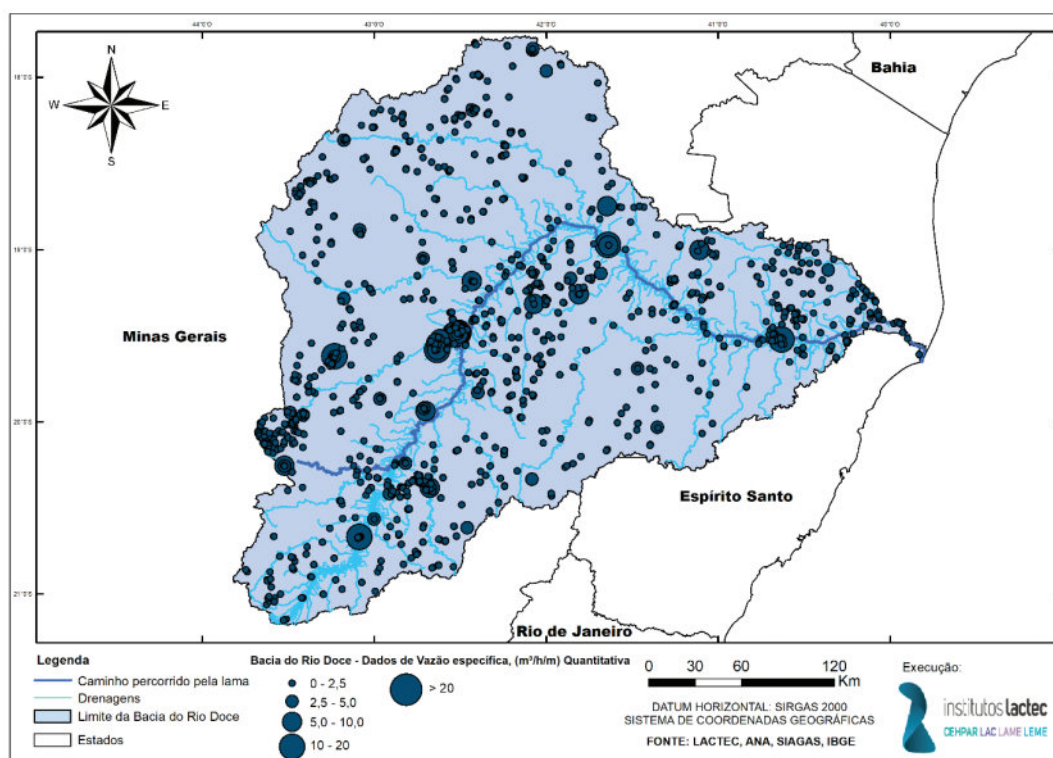
Fonte: IGAM (2014).

Apesar das iniciativas em curso por parte do IGAM, em parceria com o CPRM, em cobrir todo o estado com uma rede permanente de controle dos mananciais subterrâneos, o banco de dados do SIAGAS ainda é o mais acessível para avaliações abrangentes dos aproveitamentos dos aquíferos na BHRD.

A distribuição dos poços na BHRD com cadastro no SIAGAS é apresentada na Figura 70. Na imagem se observa uma distribuição heterogênea de poços, com núcleos de adensamento de oeste para leste nas regiões de: Ouro Preto, Santa Cruz do Escalvado; uma vasta área no centro da bacia principalmente na bacia do rio Piracicaba; na divisa norte entre Minas Gerais e Espírito Santo; na região entre São Gabriel da Palha e Colatina; e em Linhares. Essa distribuição é controlada pela concentração da demanda, principalmente pelo fato de muitos poços terem seu cadastro implantado pela Copasa, responsável pelo abastecimento de grande parte dos núcleos urbanos do estado mineiro.

O elenco de poços cadastrados é muito grande, porém a maioria dos registros não apresenta dados químicos de qualquer espécie ou mesmo perfis litológicos, apesar de serem uma importante fonte de informações da localização das demandas de água.

Figura 70 – Poços com cadastro no SIAGAS situados na BHRD até setembro de 2017 com as respectivas vazões específicas.



VAZÕES DOS POÇOS CADASTRADOS

O registro dos poços profundos cadastrados no SIAGAS dentro da bacia do rio Doce envolve 1.767 unidades, das quais 1.044 têm registros de vazão. Independentemente de possíveis inconsistências no preenchimento do cadastro, é possível se observar o panorama geral da disponibilidade de água subterrânea na bacia. Do total de poços registrados, pouco mais de 40% não foram aproveitados, principalmente por vazões nulas. Praticamente 90% dos poços apresentaram vazões inferiores a 50 m³.

h^{-1} e 50% até $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Tabela 42). Esses dados atestam a importância de estudos hidrogeológicos na região, para otimização da gestão dos recursos hídricos.

Tabela 42 – Número de poços da BHRD conforme intervalos de vazão de exploração. Fonte: SIAGAS acessado em 10/2017.

Intervalos de vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	Nº de poços	Fração do total (%)
0,25 a 10	506	48,6
10,1 a 50	424	40,7
50,1 a 100	39	3,7
100,1 a 200	36	3,5
200,1 a 280	37	3,6
	Total 1.042	

Também indicadas na Figura 70, estão as vazões específicas, que correspondem ao volume extraído por cada metro de rebaixamento do nível de água. Os valores elevados desse parâmetro correspondem a uma maior possibilidade de influência da água dos rios próximos nos aquíferos, sob um regime de exploração sem um bom controle.

Regiões de grande demanda, onde se encontram Coronel Fabriciano, Ipatinga e Timóteo e outros núcleos populacionais, são abastecidas por poços perfurados no aquífero aluvionar estabelecido na planície de inundação de grandes rios, entre os quais destaca-se o rio Piracicaba e o próprio rio Doce. Cabral e Loureiro (2002), fazendo uma modelagem do aquífero Amaro Lanari na citada área, apontaram que na ocasião eram explotados 22 poços com uma produção total de $600 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$. Naquelas condições foi demonstrado que o principal contribuinte do aquífero é o rio Piracicaba. Apesar de o rio apresentar um nível elevado de poluição, a água captada apresentaria boas condições, não necessitando o tratamento convencional de decantação e filtração, evidenciando a alta capacidade de depuração exercida pelo aquífero. A modelagem dos citados autores indicou que, para uma vazão extraída de $600 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, o tempo mínimo necessário para a água do rio chegar a um poço situado a 16 m da margem seria de 3 dias. Citando literalmente uma das conclusões de Cabral e Loureiro (2002, pg 20.):

A quantidade de água que se circula pelo aquífero na condição sem bombeamento é de 27 L/s , sendo 12 L/s (44%) provenientes da infiltração pluviométrica e 15 L/s (66%) da carga hidráulica do rio. Ao se bombear 600 L/s , a quantidade devida à carga hidráulica do rio passa para 588 L/s (98%) e, bombeando 1200 L/s , ela vai para 1188 L/s (99%).

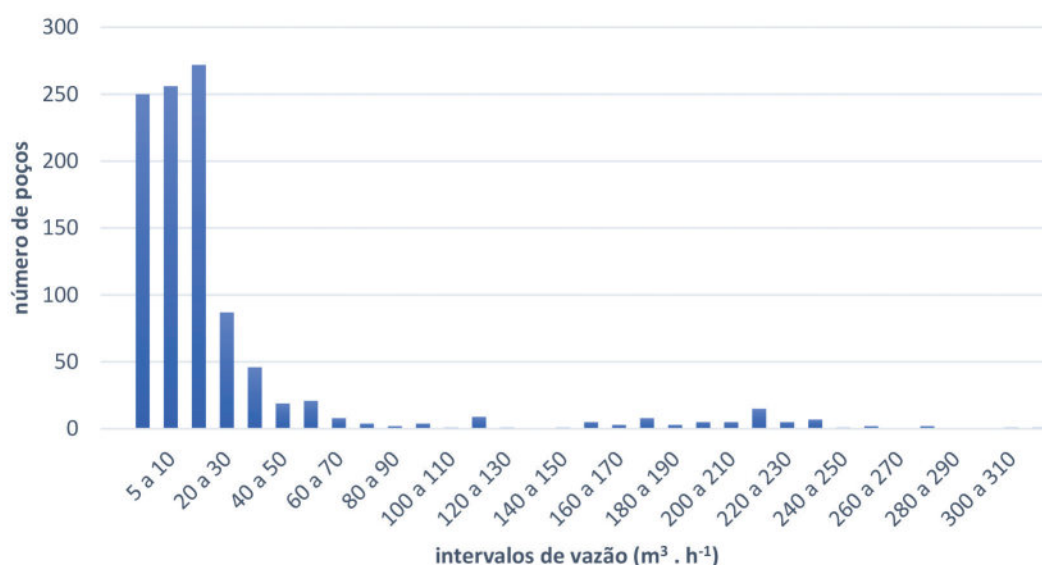
Essa situação, em termos gerais, se repete em outros segmentos dos aquíferos sedimentares porosos distribuídos ao longo do curso do rio Doce, onde são frequentes os poços de produção muito próximos à calha do rio. Nessas condições, ao que tudo indica, o acesso de material particulado

proveniente do rio é barrado pelo aquífero, mas a carga dissolvida não. Assim sendo, ressalta-se a importância do conhecimento da qualidade da água tanto em termos dos parâmetros delimitadores de suas possibilidades de uso quanto dos constituintes hidroquímicos majoritários e os presentes em menor quantidade.

O elenco de poços cadastrados na BHRD é relativamente grande, porém a maioria dos registros não apresenta dados químicos de qualquer espécie ou mesmo perfis litológicos, no entanto são importante fonte de informações da localização das demandas de água.

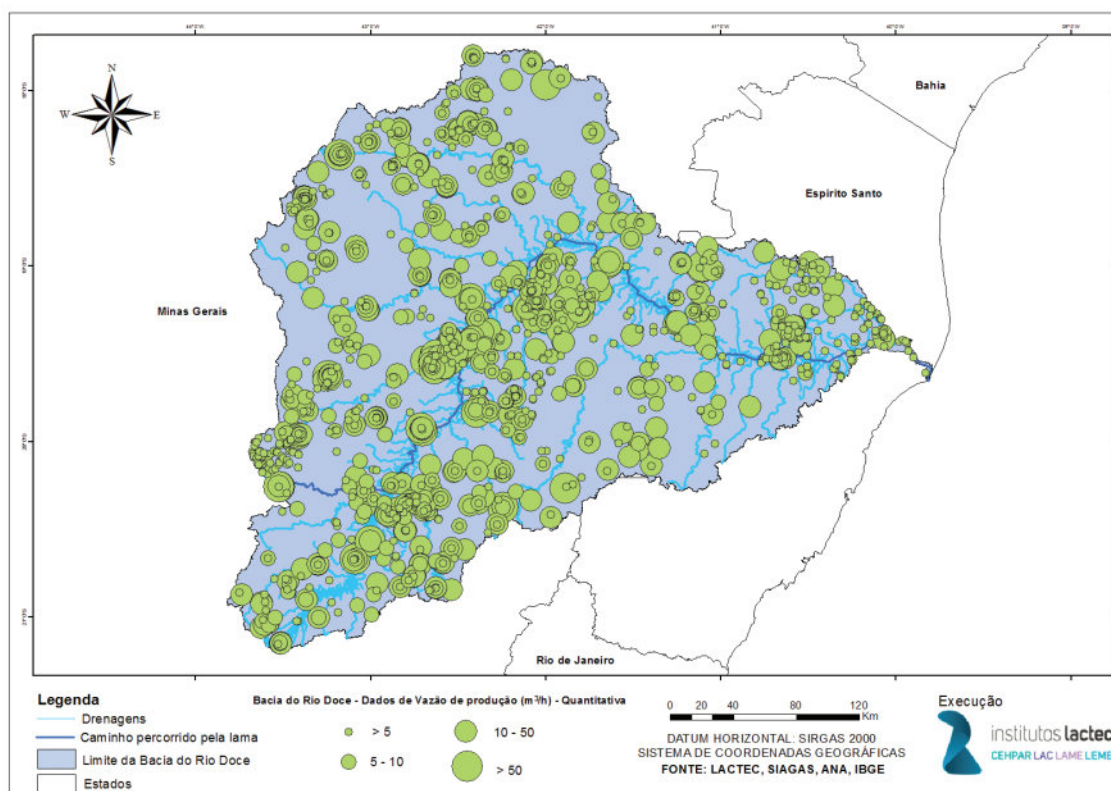
O diagrama da Figura 71 complementa com mais detalhes o registrado na Tabela 42, evidenciando o predomínio de vazões entre 10 e 20 m³.h⁻¹, mas também a ocorrência de algumas classes de vazão superiores a 150 m³.h⁻¹. Quanto a estas últimas, há dúvidas sobre sua real condição, o que deverá ser verificado com estudos mais detalhados.

Figura 71 – Intervalos de vazão registrados no SIAGAS para poços perfurados na BHRD.



Na Figura 72 estão representadas as vazões de produção registradas no banco de dados do SIAGAS. Nessa figura fica evidenciado que, em algumas regiões, incluindo a região imediatamente a noroeste de Ouro Preto, há conjuntos de registros de poços sem informações hidrogeológicas e hidroquímicas. O número elevado de poços não produtivos ressalta a importância de estudos prévios aprofundados e detalhados para a locação de poços na BHRD. Essa dificuldade está relacionada às características intrínsecas dos aquíferos, pertencentes maciçamente ao domínio fraturado, sendo os reservatórios instalados nos restritos corpos sedimentares porosos aluvionares, localmente importantes, porém exceções à regra geral.

Figura 72 – Mapa da vazão de produção de poços da BHRD registrados no SIAGAS/CPRM.



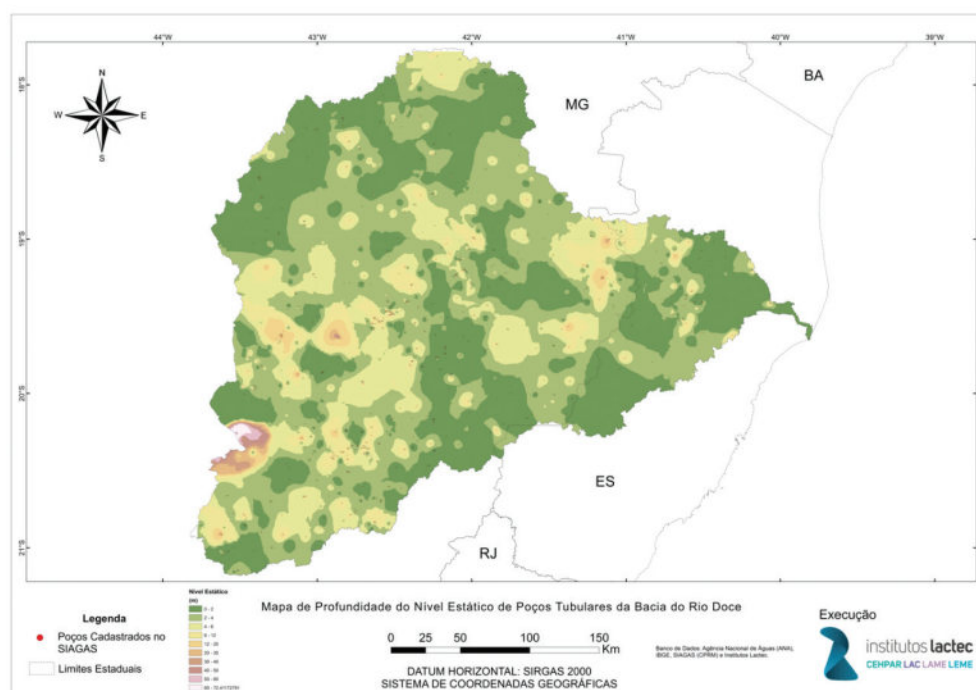
As vazões de estabilização apresentadas na Tabela 43 correspondem a 1.051 anotações, com uma média de $27,84 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, máxima de $396 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e mínima de $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Trata-se de uma amplitude muito grande entre as máximas e mínimas, porém há que se considerar o conjunto de poços tubulares profundos e poços cacimba, estes em menor número.

Tabela 43 – Parâmetros hidrogeológicos médios e extremos calculados com base em informações contidas no SIAGAS, acessado em outubro de 2017 para poços perfurados na BHRD.

	Profundidade (m)	Vazão de estabilização ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	Vazão específica ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Sólidos suspensos ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Turbidez (JTU)
Nº de anotações	1575	1051	1042	704	217	39	474
Média	95,97	27,84	14,55	183,55	26,48	24,45	4,80
máximo	1000	396	3000	3439	34,1	330	240
mínimo	1	0,25	0,005	0,22	13,6	0,02	0,1

Elaborou-se tentativamente um mapa para dar uma ideia dos níveis da água subterrânea da BHRD (Figura 73), porém o resultado de uma plotagem simples não apresentou resultados claros. O fato dos dados dos poços terem sido obtidos em épocas e estações diferentes, certamente influenciou para que o mapa apresente um baixo nível de informações.

Figura 73 – Mapa da profundidade do nível estático dos poços relacionados no SIAGAS.



Fonte: SIAGAS/CPRM (2017).

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BHRD

Aspectos gerais

As análises em poços da BHRD às quais se teve acesso, realizadas pela Copasa em determinadas cidades para controle da água a ser disponibilizada aos usuários de núcleos urbanos do vale do rio Doce, desde muito tempo evidenciam a presença eventual de concentrações de ferro e manganês superiores aos valores máximos permissíveis para distribuição. Poços com alta concentração de ferro e também de manganês já teriam apresentado essas características anteriormente à passagem da onda de lama com rejeitos. Visto isso, estão sendo realizados estudos complementares com o propósito de determinar a eventual presença de outros elementos potencialmente tóxicos, mesmo que em menor quantidade.

A presença de ferro e manganês em aquíferos tem mais a ver com o potencial de oxidação e pH do ambiente do que de aportes episódicos de origem fluvial. Essa dependência do ferro e manganês é conhecida desde muito tempo, conforme inúmeros autores, entre os quais destacam-se Garrels e Christ (1965), Hem (1970) e Hem (1973). O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre e, como tal, ubíquo nas rochas e solos. Basta que a água em condições físico-químicas adequadas entre em contato com materiais naturais ou não, contendo ferro, para que ele entre em solução com facilidade. Com o manganês acontece algo semelhante.

Ademais dos dados químicos disponibilizados pelo SIAGAS e também diretamente da Copasa, são relevantes os trabalhos desenvolvidos pela MDGEO (2017), na região de Linhares (ES), e um realizado para o Greenpeace (TORRES et al., 2017) em Belo Oriente, Governador Valadares e Colatina, para avaliar o impacto do fluxo de lama na agricultura familiar.

Ambos os trabalhos não chegam a conclusões definitivas sobre o impacto da corrida de lama originária na barragem rompida de Fundão, sobre mananciais de água subterrânea ao longo do curso do rio Doce. Por outro lado, enriquecem o necessário conhecimento sobre características dos aquíferos potencialmente afetados.

Aspectos hidrogeológicos da região de Linhares

Os trabalhos realizados na região de Linhares pela MDGEO (2016) fornecem uma boa ideia do caráter hidroquímico da água subterrânea nos aquíferos porosos granulares no segmento de jusante do rio Doce. Trata-se de um estudo visando determinar a superfície potenciométrica da zona saturada na área próxima ao curso do rio Doce. O trabalho foi realizado com base em um cadastro de 95 poços para diversos usos, e 34 lagoas abastecidas por água subterrânea e pluvial. Os autores apontam que:

o fluxo ocorre preferencialmente em direção ao Rio Doce, sendo, posteriormente, destinado ao oceano (oeste para leste). Localmente, em algumas porções, devido ao intenso bombeamento dos poços, verificou-se a convergência do fluxo em direção aos mesmos, ocasionando um rebaixamento local do nível de água.

O trabalho levantou, além de variáveis hidrogeológicas indispensáveis para a elaboração do mapa potenciométrico, um elenco adequado à caracterização hidrogeoquímica dos aquíferos locais, incluindo os macroconstituintes iônicos e elementos metálicos e não metálicos constantes das normas (CONAMA nº 396/2008). São apresentadas sumariamente cada uma das variáveis determinadas, quanto a suas possíveis origens, condicionantes de sua presença e conformidade ou não em relação ao preconizado pelo CONAMA. Em pontos de água esparsos na área, foram constatados valores de ferro dissolvido e manganês acima do permitido por essa resolução. Fica também evidenciada a influência de contaminação de água oceânica em alguns poços próximos ao estuário do rio Doce no distrito de Regência.

Conforme os estudos mencionados, de um total de 34 poços cuja água foi analisada, foram identificadas 16 amostras com concentração de ferro dissolvido superior ao preconizado pela norma para consumo humano e recreação, das quais seis com concentração superior ao permitido para irrigação. Foi observado que dois desses poços estão situados próximo ao curso do rio Doce, enquanto os outros estão distribuídos desde próximo à linha costeira até mais para o interior. Foi concluído pelos autores que o contexto observado descaracteriza a presença de uma pluma de contaminação originada no fluxo de rejeitos pelo rio Doce.

Outro parâmetro que apresentou desconformidades com respeito aos limites do CONAMA nº 396, foi o manganês. Dezesseis amostras apresentaram concentrações superiores a $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$, limite para dessedentação animal, sendo 14 destas desconformes quanto ao limite de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ para consumo humano e recreação. Apenas oito superaram o valor máximo permitido para irrigação.

Assim como o ferro, o manganês tem suas concentrações elevadas em pontos de água dispersos, o que não seria de se esperar no caso do acesso de uma pluma de contaminação com origem no rio Doce.

Os dados físico químicos obtidos deram indicações sobre o caráter químico das águas amostradas, evidenciando a diversidade encontrada no pacote sedimentar que forma os aquíferos da região. Foram apresentadas tabelas e produzidos mapas e diagramas explicitando características hidroquímicas dos aquíferos. No trabalho foram utilizadas em conjunto algumas variáveis heterogêneas, como é o caso dos metais que ora foram analisados sob a forma total e ora dissolvida. Esse aspecto, no entanto, provavelmente não influenciou nas conclusões obtidas. No total das amostras analisadas, foi apontado que 23 são bicarbonatadas, 10 cloretadas e 2 mistas quanto aos ânions. Com respeito aos cátions, 21 são sódicas, 3 cálcicas e 11 mistas. É apresentado um diagrama de Piper (1944) ilustrando essa distribuição.

Metais pesados e não metais em Belo Oriente, Governador Valadares e Colatina

Uma outra fonte de informações importantes sobre as características químicas de corpos de água de áreas que estiveram sob a influência direta do fluxo de rejeitos é o trabalho realizado por acadêmicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) (TORRES et al., 2017), sob os auspícios da organização supranacional Greenpeace.

O objetivo principal do trabalho foi:

avaliar o impacto do rompimento da barragem de Fundão, na agricultura familiar, por meio de entrevistas e determinação da concentração de metais pesados na água utilizadas por agricultores familiares da região do Rio Doce. E assim fornecer suporte científico para que os segmentos da sociedade civil organizada envolvidos, possam tomar decisões sobre o gerenciamento das regiões afetadas.

Além do trabalho levantar aspectos referentes ao uso da água pelas comunidades visitadas, teve como um dos objetivos específicos: “Determinar a presença dos metais pesados (Cd, Fe, Mn, Pb, Sn, Hg) e metaloide (As) na água de irrigação e consumo animal nas propriedades de agricultores familiares em Belo Oriente-MG, Governador Valadares-MG e Colatina-ES.”

No trabalho realizado por Torres et al. (2017), entre 4 e 16 de julho de 2016 foram coletadas 48 amostras da água utilizada de um modo ou de outro por agricultores familiares, distribuídas igualmente em três localidades: Belo Oriente, Governador Valadares e Colatina. As amostras analisadas envolveram poços, água de rio e também amostras da água que teria sido distribuída pela Samarco para a população.

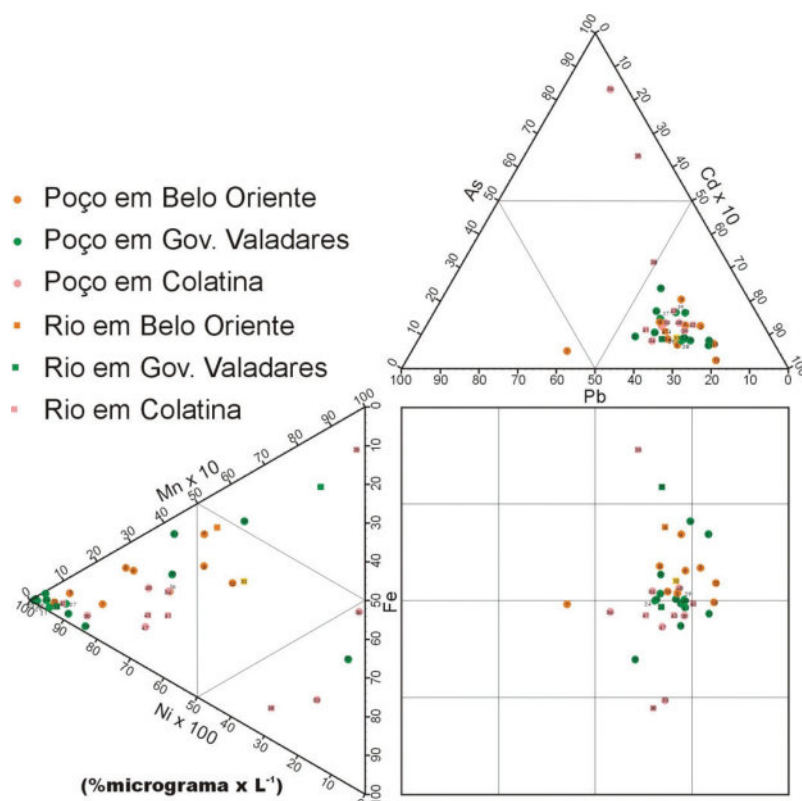
Entre as amostras analisadas, foram detectados valores de concentrações de analitos superiores ao Valor Máximo Permitido (VMP) para consumo humano apenas para o ferro e manganês na água de alguns poços. O ferro teve valores excedendo ao VMP em cinco poços em Cachoeira Escura, Belo Oriente, doze poços em Governador Valadares e dez poços em Colatina. O manganês excedeu ao VMP em Governador Valadares e Colatina.

Considerações sobre os dados levantados por Torres et al. (2017) e MDGEO (2016)

Com os dados obtidos por Torres et al. (2017) foi construído um diagrama composto por dois diagramas triangulares e um campo de integração quadrado, procurando evidenciar características particulares que poderiam diferenciar as amostras de água coletadas nas três localidades (Figura 74). Um dos triângulos foi composto com os elementos ferro, manganês e níquel, com comportamentos geoquímicos apresentando semelhanças em ambientes superficiais. Em outro triângulo foram selecionados os elementos arsênio, cádmio e chumbo, que apresentaram valores detectados em todas as amostras. É importante salientar que no conjunto de elementos siderófilos ou afins ao ferro, o manganês e o níquel foram tomados multiplicados pelos fatores 10 e 100, respectivamente, para melhor discriminar as amostras dentro do campo triangular. Esse tipo de diagrama não é afetado pela concentração absoluta dos parâmetros considerados, o que aconteceria pela diluição por água de chuva, por exemplo, dando ênfase às relações entre as variáveis.

A composição da água nas três regiões consideradas evidencia águas agrupadas próximo ao polo correspondente ao cádmio, porém quatro amostras se destacam. Três, coletadas em rio e em poço de Colatina, estão relativamente muito mais concentradas em arsênio e uma, de poço em Belo Oriente, se destaca pelo conteúdo em chumbo bem maior do que o conjunto das outras.

Figura 74 – Diagramas triangulares associados representando o comportamento conjunto de Fe, Mn, Ni, As, Cd e Pb em pontos de água de Belo Oriente, Governador Valadares e Colatina.



Fonte: Torres et al. (2017).

A análise integrada do ferro, manganês e níquel mostra um conjunto relativamente pobre em ferro e quatro amostras nitidamente mais ricas em ferro. Das quatro citadas, três são de poços e rio em Colatina e um de poço em Governador Valadares.

Outro ponto notável é o fato da maior parte das amostras coletadas em Governador Valadares mostrar uma concentração de níquel relativamente mais elevada. Isso sugere uma contribuição litológica, pois contaminações industriais teriam um efeito mais pontual e o níquel, por suas características geoquímicas, não tem tendência de formar corpos minerais muito isolados, em veios, por exemplo.

Uma interpretação mais detalhada dos dados de composição de elementos minoritários carecerá de um estudo mais abrangente da distribuição litológica e situação de cada um dos sítios estudados por Torres et al. (2017), o que não é pretendido pela presente abordagem.

O posicionamento da média dos poços e da água de rio, em cada localidade, dá indicações sobre a possível influência do rio Doce na água subterrânea captada.

O elenco de variáveis levantado na campanha de coleta de Torres et al. (2017) não privilegiou a análise dos macroconstituintes em solução, dessa forma não foi possível incluir dados dos pontos de água considerados por eles na mesma base gráfica dos parâmetros levantados em MDGEO (2016). Em contrapartida, no trabalho de Torres et al. (2017) os limites de detecção da metodologia utilizada para análise dos metais e não metais foram inferiores ao do trabalho da MDGEO, onde muitos analitos não foram detectados.

Para uma primeira avaliação da composição química da água, foi elaborado um diagrama de Durov modificado (**Figura 75**) com os dados extraídos de MDGEO (2017). Esse tipo de diagrama é semelhante ao diagrama de Piper, ambos representando a composição da água em termos de seus componentes iônicos majoritários. As composições são locadas no diagrama expressas como % de equivalentes por litro, dos cátions em um triângulo e dos ânions em outro. As características catiônicas e aniônicas se integram em um quadrado, evidenciando o caráter hidroquímico das amostras. Para expressar a concentração iônica da água, foi inserido outro campo quadrado abaixo, com a condutividade. Esse quadrado mostra a dependência da concentração com a proporção entre cálcio e magnésio. No diagrama foi também acrescentado abaixo um outro quadrado representando a concentração de zinco em mg.L^{-1} . O zinco é um metal muito móvel nas águas e sua presença é registrada em muitas análises de água, e, em conjunto com outras variáveis, pode vir a ser um traçador da origem da água.

Como é característica de qualquer representação gráfica que considera o percentual relativo das variáveis, os efeitos de diluição são abstraídos, evidenciando a relação entre elas e facilitando a considerações sobre a origem da água considerada.

Com relação aos ânions, fica clara a baixa concentração relativa de sulfato da maioria das amostras. Considere-se que esse componente tem nos sulfetos sua fonte mais comum, e as rochas sedimentares que formam o Grupo Barreiras e a Formação Linhares foram estabelecidas em ambientes inadequados para a formação maciça desse mineral. Nunes et al. (2011) apontam evidências dessas rochas serem formadas por material submetido a ambientes favoráveis a intenso intemperismo e eliminação precoce dos minerais mais solúveis, entre os quais destacamos os sulfetos.

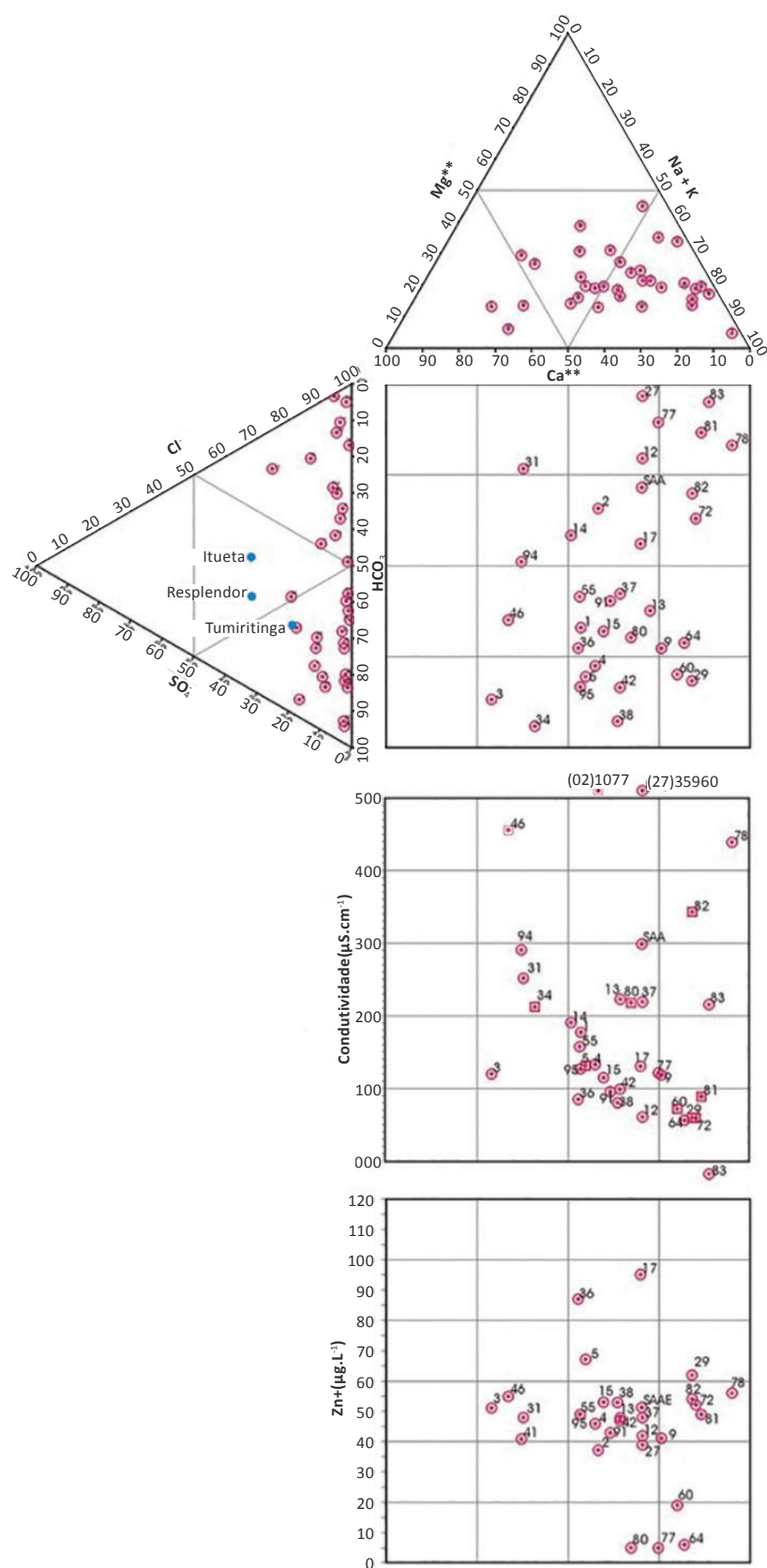
Com respeito aos cátions, se evidencia a ausência de amostras com altas concentrações de magnésio e apenas três representantes de águas cálcicas. Este e outros aspectos foram igualmente destacados em Mourão et al. (2002).

No diagrama de Durov a concentração das amostras de água é evidenciada pela condutividade iônica, representada no campo quadrado intermediário. As tendências não são muito claras devido à dispersão de pontos, porém são sugeridos dois tipos de tendência, sendo mais evidente uma que aponta uma diminuição na concentração para águas mais sódicas e outra que tem nas águas mais cálcicas as concentrações mais baixas e as sódicas com maiores concentrações, ou condutividades. Esse segundo comportamento seria devido ao processo de mistura com solutos marinhos.

A concentração de zinco, metal dos mais solúveis entre os metais de transição, representada no campo quadrado inferior do diagrama, indica o predomínio de concentrações do elemento em uma faixa de 35 a 70 microgramas por litro. São destacados também um grupo isolado de amostras mais sódicas com baixo zinco e duas amostras com concentrações mais elevadas.

Para comparação com o caráter hidroquímico de águas superficiais e algumas subterrâneas cujos dados foram obtidos de estudos realizados na porção mineira da BHRD, com os dados de Linhares (ES), foi elaborada a Figura 76. Nota-se que a distribuição das amostras registradas no diagrama triangular das proporções entre os cátions majoritários apresenta vários casos com muito baixa concentração de sódio (COSTA, 2001), o que não ocorre nas amostras de Linhares (MDGEO, 2016).

Figura 75 – Distribuição da composição da água de poços na região de Linhares e mais poços em Itueta, Resplendor e Tumiritinga, operados pela Copasa em um diagrama de Durov modificado.

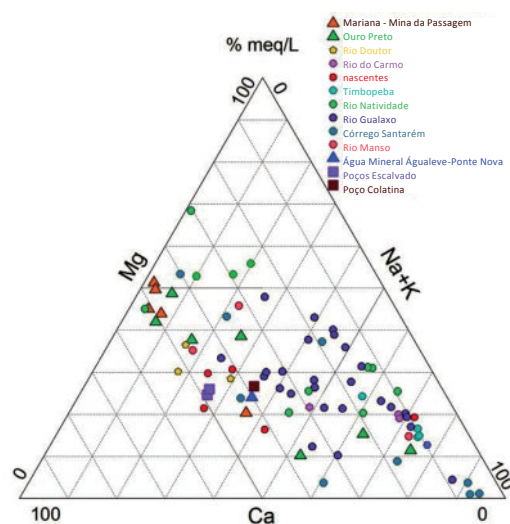


Fonte: MDGEO (2017) e Copasa (2017).

Nas águas superficiais dos rios representados na Figura 76 a relação Ca/Mg é sempre superior a 0,25, enquanto na região de Linhares ocorrem muitas amostras com essa relação mais baixa. Esse fato está relacionado com o predomínio de rochas com composição de cálcio-magnésiana a magnésiana, havendo pouca contribuição de rochas com predomínio cálcico. As rochas que contribuem maciçamente para a composição das águas na porção superior da BHRD estão em plena alteração intemperística, ao passo que, na porção inferior da bacia, as rochas do arcabouço do aquífero são compostas por minerais mais alterados pelo intemperismo.

Os elementos dissolvidos na água, normalmente, não se deslocam individualmente, a não ser em processos de difusão em meios aquosos estacionários. Seu deslocamento se dá junto com a massa de água. Sendo assim, cabe um estudo do contexto hidroquímico dos aquíferos, levando em conta o maior número possível de variáveis, para a compreensão da origem dos valores acima dos limites normativos para alguns parâmetros avaliados.

Figura 76 – Distribuição de amostras de água superficial coletadas em rios da porção mineira da BHRD, em três poços tubulares e uma água mineral.

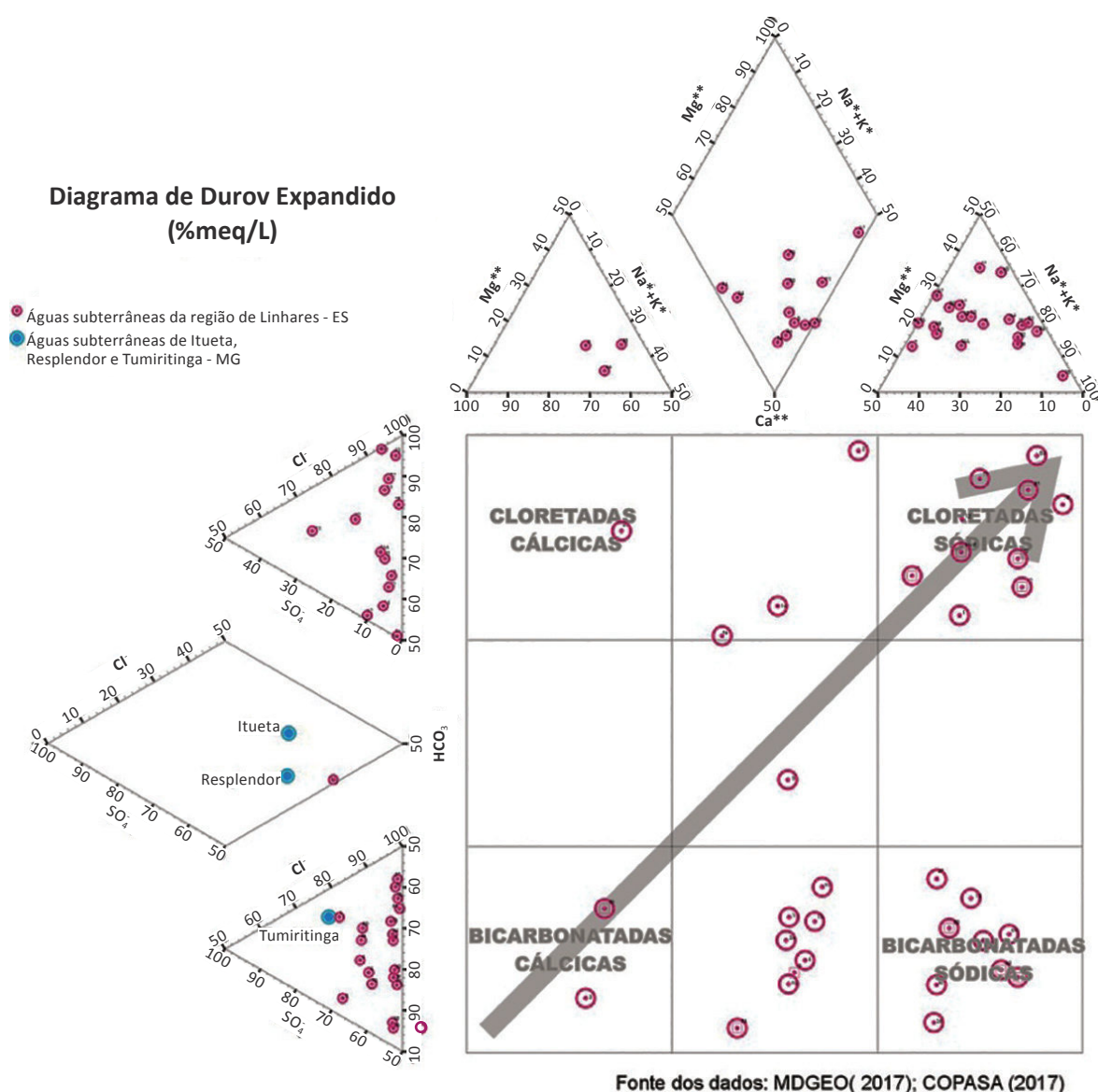


Fonte: Costa (2001) e SIAGAS (2017).

Outro dispositivo gráfico que se está utilizando é um diagrama de Durov expandido (LLOYD; HEATHCOTE, 1985), onde os triângulos dos cátions e dos ânions são divididos em três segmentos, para melhor evidenciar o caráter hidroquímico das amostras (Figura 77). No segmento quadrado do diagrama, são configurados nove campos: 1) inferior esquerdo correspondendo a águas bicarbonatadas cálcicas; 2) inferior central; 3) inferior direito; 4) intermediário direito; 5) intermediário central; 6) intermediário direito; 7) superior esquerdo; 8) superior central; e 9) superior direito.

Uma tendência geral de mistura de águas locada nesse tipo de diagrama seguiria a seta, do campo 1 ao campo 9, ao passo que a passagem do campo 1 ao campo 3 corresponderia a uma troca iônica reversa, onde uma água de intemperismo de rocha de composição granito-gnáissica, predominante na BHRD, teria o cálcio dissolvido trocado por sódio. A mistura direta entre uma água típica continental do campo 1, com uma água oceânica, culminaria no campo 9.

Figura 77 – Situação de amostras de água da região de Linhares, Itueta, Resplendor e Tumiritinga em um diagrama de Durov expandido.



Fonte: MDGEO (2017) e Copasa (2017).

Em uma primeira análise, a Figura 77 evidencia em Linhares um predomínio de águas sódicas com caráter bicarbonatado, cloretado sódico e misto. O caráter sulfatado é raro na região da foz do rio Doce. Por outro lado, esse caráter sulfatado se manifesta com maior evidência em águas de Itueta, Resplendor e Tumiritinga, fornecidas pela Copasa, que foram tomadas aqui como simples referência. Na medida em que amostras que estão sendo obtidas no âmbito deste trabalho, as análises serão incorporadas nos diagramas para melhor caracterização do quimismo das águas subterrâneas da BHRD.

A representação de água dos poços de Itueta, Resplendor e Tumiritinga se restringe aos ânions pelo fato das análises fornecidas pela Copasa não conterem dados dos cátions. Uma representação mais completa de águas da porção mineira da BHRD será feita posteriormente.

Essa abordagem interpretativa dos dados químicos é apenas ilustrativa de algumas potencialidades do uso dos diagramas apresentados, que serão também muito úteis ao se incorporar análises de águas superficiais para elucidar possíveis misturas de águas.

O diagnóstico relativo à água subterrânea da BHRD está sendo atualmente incrementado por campanhas de obtenção de dados primários. Cabe destacar que já foi realizada uma campanha de coleta de amostras para análises laboratoriais e medições *in situ* da temperatura, pH e condutividade iônica em oito poços situados entre as minas do Quadrilátero Ferrífero (QF) e a cidade de Periquito, a sul de Ipatinga (MG). Os dois primeiros são poços de abastecimento para as instalações das empresas Vale e Samarco e os demais fazem parte do sistema de abastecimento público de núcleos urbanos.

Tabela 44 – Determinações realizadas em campo de temperatura, pH e condutividade elétrica em amostras de água de poços de abastecimento na BHRD.

Ponto		Data	Coordenadas		Temperatura (°C)	Condutividade ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	pH
Ti (PPR-07)	Mina Alegria Norte - Vale	06/11/2017	656467	7769620	20,3	7,99	5,09
T2 (PTR-05)	Prox. Mina Alegria Sul - Samarco	06/11/2017	655774	7766675	22,3	8,57	4,94
T3 (quadra 4)	Nova Soberbo - MG	06/11/2017	721639	7759354	25	73,5	6,22
T4 (poço 2)	Nova Soberbo - MG	06/11/2017	721334	7759117	25	206	7,92
T5 (C-01)	Periquito	07/11/2017	789803	7880195	24,6	124,1	6,75
T6 (C-05)	Ipaba	07/11/2017	771306	7852635	24,6	138,4	6,75
T7 (C-06))	Ipaba	07/11/2017	771424	7852827	24,0	137,2	6,77
T8 (C-07)	Ipaba	07/11/2017	771617	7853186	23,7	153,3	6,92

As determinações realizadas *in situ*, quando da coleta de amostras para análise de água, constantes da Tabela 44, fornecem indicações preliminares das condições físico-químicas dos aquíferos acessados.

Um primeiro ponto que chama a atenção é o baixo valor da condutividade iônica dos poços das minas Alegria. Na Tabela 43, elaborada com dados do SIAGAS, é apresentado um valor mínimo da condutividade iônica, $0,22 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, que aparentemente é demasiado baixo e deve ser tomado com restrições. De qualquer modo, um valor de condutividade inferior a $10 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ é realmente baixo e indica água proveniente de um aquífero com arcabouço mineral pouco solúvel.

O manancial que abastece ambos os poços das minas Alegria é o aquífero Cauê, tido como o melhor manancial subterrâneo do QF (MOURÃO, 2007). Trata-se de um aquífero com diversidade de fácies geoquímicas. A condutividade elétrica média é de $13,22 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$, entre um máximo de $81,9 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ e mínima de $2,0 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ (MOURÃO, 2007).

O pH, ainda segundo a citada autora, varia entre 4,68 e 7,74, com uma média de 5,93. Nas determinações executadas neste trabalho, o pH anotado, no entorno de 5, indica, para o segmento do aquífero que abastece os poços das minas Alegria, um ambiente ácido e agressivo a minerais mais solúveis, o que privilegiou a sua dissolução prévia. Restaram os minerais menos solúveis essencialmente o quartzo e a hematita, levando à baixa condutividade medida em campo, ou seja, no entorno de 8 e 8,6 $\mu\text{S.cm}^{-1}$

A zona de descarga do aquífero Cauê na região das minas Alegria é na bacia do rio Piracicaba, não afetado diretamente pelo fluxo de rejeitos, todavia as citadas características do referido aquífero sugerem uma baixa solubilidade natural para os rejeitos, que são uma fração do minério extraído daquelas minas e acumulado na barragem rompida de Fundão. Daí a importância de se conhecer em mais detalhes a composição do manancial amostrado.

Outro ponto que se destaca, na análise da condutividade dos pontos analisados, é o contraste na condutividade observada nos poços de Nova Soberbo, distrito de Santa Cruz do Escalvado. Um ponto de água apresenta condutividade de 73,5 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ e outro 206 $\mu\text{S.cm}^{-1}$, contraste que pode estar relacionado à contaminação por efluentes urbanos, o que poderá ser esclarecido quando se estiver de posse dos resultados laboratoriais.

Os pontos de água amostrados em Ipaba estão situados aparentemente no mesmo segmento da planície de inundação o rio Doce, apresentando condutividades, em grandes linhas, muito semelhante. Os resultados analíticos viabilizarão a evolução no conhecimento da composição da água desse manancial, para avaliar a vulnerabilidade quanto ao acesso da água do rio Doce.

As características já conhecidas da água do poço de Periquito são muito semelhantes às dos poços de Ipaba, e os dados servirão para melhor embasar as avaliações dos mananciais explorados na faixa lindeira ao rio Doce.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta etapa dos trabalhos, levando-se em consideração, sobretudo, os dados preexistentes sobre a água subterrânea explorada na bacia hidrográfica do rio Doce, algumas conclusões e recomendações podem ser apresentadas.

Conclusões:

- Os aquíferos próximos à calha do rio Doce e afluentes por onde transitou o fluxo de rejeitos são vulneráveis a componentes em solução provenientes do escoamento fluvial.
- Quanto a componentes químicos ligados a material particulado, seu acesso aos aquíferos granulares porosos das planícies de inundação nas margens do rio Doce é muito restrito devido à capacidade de retenção mecânica por filtração, de todo modo não pode ser descartado.
- A lama que fluiu com os rejeitos e que foi retida em fissuras ou nos poros dos primeiros metros dos aquíferos granulares com contato direto com os rios, mesmo não acessando diretamente os poços de produção, pode posteriormente liberar seus componentes para a solução mediante alteração no ambiente físico-químico.

- O fluxo de rejeitos e lama proveniente da denudação da bacia do rio Doce influenciou indiretamente os aquíferos, induzindo, em diversos locais, a uma exploração sem o devido controle daqueles mananciais.
- As análises químicas da água dos poços devem incluir não apenas os parâmetros que possuem limites de concentração ou valor de referência, mas também ao menos um conjunto completo dos constituintes majoritários em solução, viabilizando análises hidrogeoquímicas consistentes. Tais análises são de grande valia em uma bacia que abriga atividades altamente influentes no meio natural, como é o caso da mineração.

PESCA

A pesca é uma atividade que contribui desde a antiguidade como uma importante fonte de recursos alimentícios, emprego e benefícios econômicos (SANCHEZ, 1989). No passado, era considerada como um recurso ilimitado, porém, com o avanço do conhecimento e do desenvolvimento tecnológico da atividade, demonstrou-se que, apesar de serem renováveis, esses recursos são limitados e necessitam de um planejamento e ações adequados para sua manutenção (FAO, 1995). É um recurso natural à disposição daqueles que a utilizam para a satisfazer suas necessidades básicas de subsistência e também, por outro lado, utilizadas para atividade de lazer como a pesca esportiva (DROGUETT; FONSECA, 2005).

A relação do pescador com o ambiente é notoriamente profunda, dessa forma surge um sentimento afetivo com o ambiente no qual está inserido, atribuindo-lhe valores sociais e culturais. Porém, o pescador também está inserido num conflito entre as condições ambientais dos rios, disputa pelos territórios e pela necessidade de aumento da produção pesqueira. Essas questões podem levar a escassez de recursos e a desvalorização cultural do pescador (THÉ, 2006).

Além da importância dentro das comunidades aquáticas e das cadeias tróficas dos ecossistemas, os peixes são recursos alimentares e econômicos para muitas comunidades tradicionais (PAULY et al., 2002).

As espécies de peixes são bioindicadores, pois suas funções biológicas são relacionadas com os fatores ambientais do local no qual residem. O monitoramento dos padrões ecológicos e biológicos das espécies é uma ferramenta importante para a identificação de impactos ambientais e proporcionar medidas corretivas.

METODOLOGIA

Para a caracterização da pesca na região foram levantados dados primários, como entrevistas e conversas com os pescadores da área e dados secundários em bibliografias, órgãos ambientais públicos e privados. As bases de dados utilizadas para o levantamento e sistematização dos dados secundários da fauna da região foram: extinto Ministério da Pesca, Ibama, ICMBio, dados governamentais de agências dos estados de Minas Gerais e do Espírito Santo.

RESULTADOS

Segundo os dados levantados anteriormente para a elaboração do relatório de linha-base do tema Ictiologia, revelou-se a existência de 501 espécies de peixes na bacia do rio Doce e ambiente marinho adjacente.

O grupo com maior representatividade foi o das pescadas, robalo, garoupas e vermelhos com 48,3% das espécies encontradas. Essas espécies são de importância para as atividades pesqueiras relacionadas à subsistência, recursos econômicos e atividades de lazer.

Somente para água doce foi estimada a existência de 102 espécies de peixes, o que representa em torno de 40% das espécies encontradas em toda Mata Atlântica (ABILHOA et al., 2011). De forma geral, as espécies encontradas no rio Doce são de médio e grande porte na calha principal do rio Doce e nos grandes afluentes. Nos riachos da bacia, há predominância de espécies de pequeno porte. Grande parte das espécies são migradoras, ou seja, utilizam a calha do rio para deslocamentos reprodutivos, alimentares e desenvolvimento.

No ambiente estuarino e marinho composto pelas zonas de arrebentação e ambientes recifais, identificaram-se pelo menos 399 espécies. Esse número representa 30,8% de todas as espécies de peixes marinhos encontrados no Brasil segundo estudo de Menezes et al. (2003).

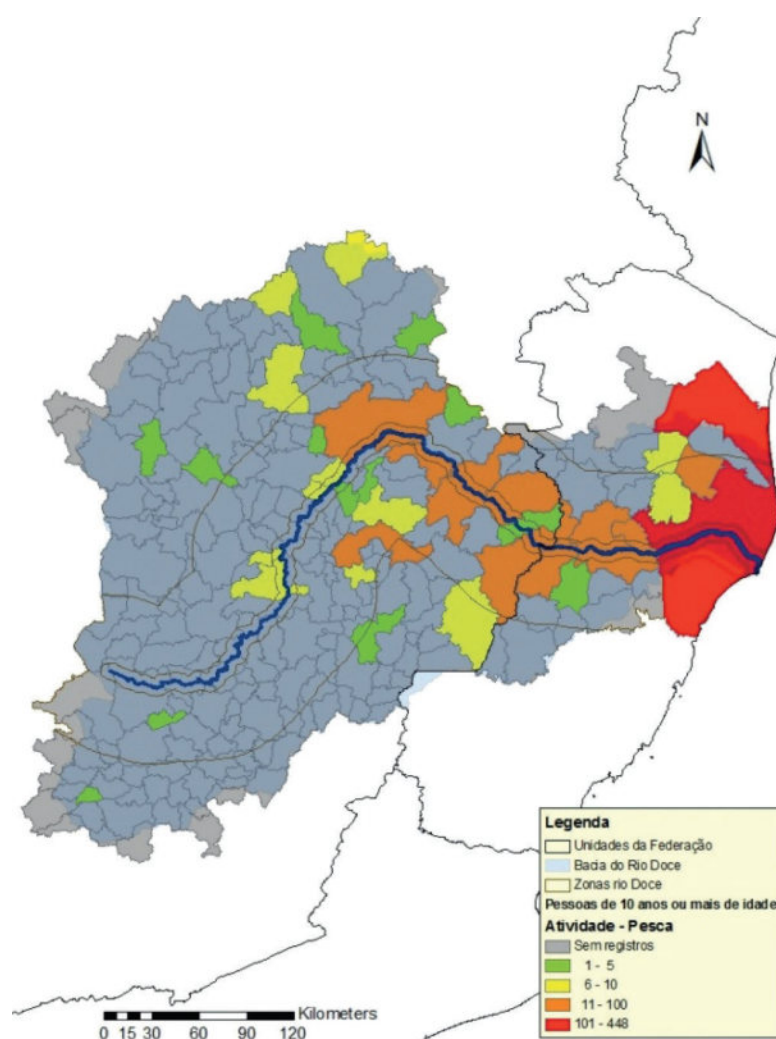
A ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana (MG) causou diversos impactos de ordem social, econômica e ambiental em toda extensão da bacia do rio Doce e a região marinha adjacente (GIAIA, 2015; BRASIL, 2016).

As atividades pesqueiras se distribuem desigualmente ao longo da bacia do rio Doce. Nas porções do Alto e Médio rio Doce, encontra-se mais pesca de subsistência, lazer e criação de espécies em tanques redes nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Na porção do Baixo rio Doce e região marinha adjacente, há atividade pesqueira mais estruturada com associações de pescadores.

As consequências foram mais graves para as pessoas que são dependentes diretas dos recursos naturais como pescadores profissionais e de subsistência e a população ribeirinha (VIANA, 2017). A pesca era uma importante atividade para subsistência de pessoas com baixo nível de qualificação profissional e população ribeirinha (VIANA, 2017).

A pesca, além de ser uma atividade econômica, é uma alternativa importante para a subsistência para a população carente e de baixa qualificação profissional. A atividade pesqueira concentrava-se, principalmente, nas proximidades da calha do rio e, devido a isso, há uma maior probabilidade de ter sofrido impacto pela passagem da lama.

Segundo o IBGE (2010), as atividades de pesca e aquicultura se encontram em 39 e 19 municípios, respectivamente (Figura 78).

Figura 78 – Distribuição dos pescadores da bacia do rio Doce.

Fonte: IBGE (2010).

Nas porções do Alto e Médio rio Doce, as atividades de aquicultura são distantes da calha do rio, e devido a isso não sofreram impactos diretos da ruptura. Porém, as áreas do Baixo rio Doce, pela proximidade das atividades com a calha do rio, sofreram mais impactos (VIANA, 2017). A pesca concentra-se, principalmente, nos municípios próximos à calha do rio e, por isso, o impacto foi maior em decorrência da ruptura da barragem (VIANA, 2017).

Segundo o relatório do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em 2010, as atividades de aquicultura e pesca na bacia do rio Doce geraram em torno de R\$ 18 milhões, sendo 76% da pesca e 24% da aquicultura.

No distrito de Regência, pertencente ao município de Linhares (ES), localizado às margens do rio Doce, havia como principais atividades a pesca e o turismo (FELIPPE et al., 2016).

Relatos dos moradores afirmam que nessa porção do rio Doce ao longo dos anos houve uma diminuição na quantidade do pescado e intensificação do assoreamento da calha do rio (FELIPPE et al., 2016).

Segundo os dados do Registro Geral da Pesca, em 2010, havia na bacia do rio Doce 216 pessoas que desenvolviam atividades com aquicultura e 1.699 pessoas que desenvolviam atividades pesqueiras (IPEA, 2017). Em 2016, esse número passou para 3.800 (VIANA, 2016). O aumento no número de trabalhadores pode ser devido à discrepância entre os pescadores artesanais e os beneficiários do seguro-defeso (CAMPOS; CHAVES, 2014).

Houve um aumento nas áreas de ocupação de aquicultura e pesca, o que sugere que uma elevação na existência de negócios estruturados na região. O impacto gerado pela passagem do rejeito, além de causar danos à qualidade da água e aos recursos pesqueiros, pode também afetar toda a cadeia de comercialização dos produtos gerados pela aquicultura e pesca (IPEA, 2017).

O valor da produção referente à atividade de aquicultura na bacia do rio Doce teve mais da metade originada nos municípios com até um quilômetro da calha do rio. Nas áreas mais distantes da calha encontram-se mais atividades de reprodução das espécies, já nas áreas mais próximas encontram-se atividades de engorda e venda. Dessa forma, os impactos teriam sido menos graves para a produção dos alevinos e reprodução. Com isso, pode-se destacar a possibilidade de repovoamento e recuperação utilizando as espécies produzidas nos locais menos atingidos (VIANA, 2016).

A região do Baixo rio Doce destaca-se por apresentar espécies dulcícolas e marinhas devido ao contato com o mar pela foz. Essa condição é considerada importante recurso para a atividade de pesca profissional e esportiva (LEEM, 2016). A preservação das espécies e/ou estoques pesqueiros requerem o conhecimento sobre a ecologia e biologia destas e as questões socioeconômicas, culturais e ambientais da região (COWX; GERDEAUX, 2004).

O conhecimento empírico dos pescadores fornece uma importante fonte de informações sobre as condições do recurso pesqueiro (CAMARGO; PETRERE, 2001). De acordo com os pescadores da região e o inventário do Museu de Biologia Mello Leitão, foram catalogadas 44 espécies nativas e exóticas na região do Baixo rio Doce. As famílias mais comuns da ordem Characiformes são Anostomidae, Characidae, Curimatidae e Prochilodontidae. Da ordem Siluriformes são Loricariidae (cascudos), Ariidae (bagres), Auchenipteridae e Pseudopimelodidae (LEEM, 2016). Espécies marinhas também são comumente encontradas nessa região, como sardinha (*Sardinella janeiro*), manjuba (*anchioviella lepidentostole*), tainha (*Mugil curema* e *Mugil liza*), robalo (*Centropomus* sp.) e corvina (*Plagioscion* sp.) (MACKINSON; NOTTESTAD, 1998).

Há pescas sazonais na região marinha e estuarina, durante esse período são capturadas espécies das famílias Sciaenidae (pescadas), Sphyrnidae e Carcharhynidae (cações) e Ariidae (bagres) (PINHEIRO; JOYEUX, 2007).

Os ambientes litorâneos, como estuários e lagunas, são locais com alta produtividade de recursos, porém apresentam fragilidade (BAZAIRI et al., 2013). Devido à elevada e insustentável demanda do recurso pesqueiro, as comunidades litorâneas têm relatado uma diminuição quantitativa e qualitativa do pescado (CHAVES et al., 2002).

Segundo informações da Agência Minas (2016), a produção de peixes total do estado foi de 22,1 mil toneladas no ano de 2015, gerando uma renda de R\$ 211 milhões.

A atividade pesqueira no estado do Espírito Santo, entre os anos de 2011 e 2012, registrou uma estimativa de 12 toneladas de pescados. Foram registradas diversas modalidades de pesca, como linhas, varas, redes de emalhar, redes de arrasto, espinhel, entre outras (BOLETIM, 2011).

O levantamento realizado nos dados de pesca evidenciou a exploração de 118 espécies como recurso pesqueiro na bacia do rio Doce e área marinha adjacente. As espécies são divididas em uma espécie de lula e polvo, cinco espécies de camarão, duas espécies de lagosta, uma de siri e 108 espécies de peixes ósseos e cartilagosos (Tabela 45).

Tabela 45 – Lista de espécies utilizadas como recurso pesqueiro na bacia do rio Doce e área marinha adjacente.

Nome	Família	Espécie
Cação	Alopiidae	-
Bagre	Ariidae	-
Bagre bandeira	Ariidae	<i>Bagre bagre</i>
Bagre bandeira	Ariidae	<i>Bagre marinus</i>
Caçari	Ariidae	<i>Aspitor luniscutis</i>
Calafate	Ariidae	<i>Notarius grandicassis</i>
Peroá	Balistidae	<i>Balistes caprisus</i>
Peroá Preta	Balistidae	<i>Balistes vetula</i>
Guaivira	Carangidae	<i>Oligoplites saliens</i>
Olho de Boi	Carangidae	<i>Seriola dumerili</i>
Pampo	Carangidae	<i>Trachinotus spp.</i>
Peixe Galo	Carangidae	<i>Selene spp.</i>
Xaréu	Carangidae	<i>Caranx spp.</i>
Xixarro	Carangidae	<i>Caranx crysos</i>
Cação	Carcharhinidae	-
Cação Azul	Carcharhinidae	<i>Prionace glauca</i>
Cação Tigre	Carcharhinidae	<i>Galeocerdo cuvier</i>
Robalo Flecha	Centropomidae	<i>Centropomus undecimalis</i>
Robalo Peva	Centropomidae	<i>Centropomus parallelus</i>
Dourado	Coryphaenidae	<i>Coryphaena hippurus</i>
Falso Voador	Dactylopteridae	<i>Dactylopterus volitans</i>
Arraia	Dasyatidae	-
Ubarana	Elopidae	<i>Elops saurus</i>
Manjuba	Engraulidae	<i>Anchoviella lepidontostole</i>
Parú	Ephippidae	<i>Chaetodupterus faber</i>

Nome	Família	Espécie
Badejo	Epinephelidae	<i>Mycteroperca bonaci</i>
Catuá	Epinephelidae	<i>Cephalophis fulva</i>
Cherne	Epinephelidae	<i>Hyporthodus spp.</i>
Garoupa	Epinephelidae	<i>Ephinephelus morio</i>
Gostosa	Epinephelidae	<i>Dermatolepis inermis</i>
Peixe-prego	Gempylidae	<i>Ruventus pretiosus</i>
Peixe-rato	Gempylidae	<i>Lepdpcybuim flavobrunneum</i>
Carapeba	Gerreidae	<i>Diapterus auratus</i>
Carapeba	Gerreidae	<i>Diapterus rhombeus</i>
Cação Lixa	Ginglymostomatidae	<i>Ginglymostoma cirratum</i>
Biquara	Haemulidae	<i>Heamulon plumieri</i>
Coró-coró	Haemulidae	<i>Haemulon steindachneri</i>
Roncador	Haemulidae	<i>Conodon nobilis</i>
Sargo	Haemulidae	<i>Anisotremus surinamensis</i>
Jaguariça	Holocentridae	<i>Holocentrus adencionis</i>
Marlim	Istiophoridae	-
Sabonete	Labridae	<i>Halichoeres dimidiatus</i>
Sabonete	Labridae	<i>Bodianus rufus</i>
Sabonete	Labridae	<i>Bodianus pulchellus</i>
Cação	Lamnidae	-
Cação Anequim	Lamnidae	<i>Isurus oxyrunchus</i>
Dorminhoco	Lobotidae	<i>Lobotes surinamensis</i>
Lula	Loliginidae	-
Ariacó	Lutjanidae	<i>Lutjanus synagris</i>
Cioba	Lutjanidae	<i>Ocyurus chrysurus</i>
Cirioba	Lutjanidae	<i>Lutjanus analis</i>
Dentão	Lutjanidae	<i>Lutjanus jocu</i>
Realito	Lutjanidae	<i>Rhomboplites aurorubens</i>
Vermelho	Lutjanidae	-
Batata	Malacanthidae	<i>Lopholatilus villarii</i>
Merluza	Merlucciidae	<i>Merluccius hubbsi</i>
Peroá Cação	Monocanthidae	<i>Aluterus monoceros</i>
Tainha	Mugilidae	<i>Mugil spp.</i>
Arraia	Myliobatidae	-
Polvo	Octopodidae	<i>Octopus vulgaris</i>
Congo rosa	Ophidiidae	-
Lagosta Cabo Verde	Panuliridae	<i>Panulirus laevicauda</i>
Lagosta Vermelha	Panuliridae	<i>Panulirus argus</i>
Linguado	Paralichthyidae	<i>Paralichthys patagonicus</i>
Camarão	Penaeidae	-
Camarão-de-sete-barbas	Penaeidae	<i>Xiphopenaeus kroyeri</i>
Camarão-branco	Penaeidae	<i>Litopenaeus schmitti</i>
Camarão-rosa	Penaeidae	<i>Farfantepenaeus paulensis</i>

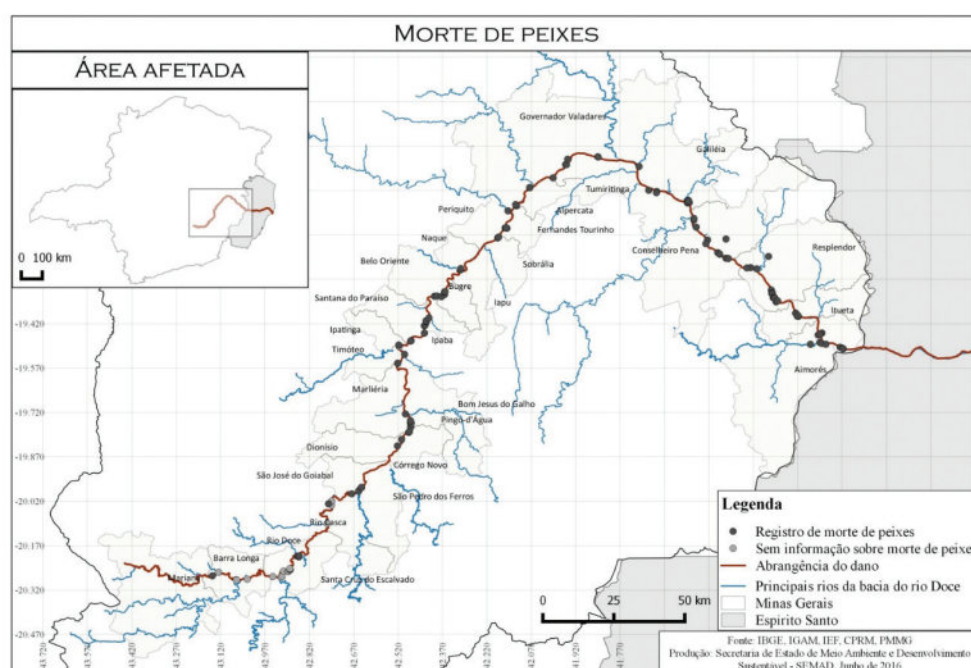
Nome	Família	Espécie
Camarão-rosa	Penaeidae	<i>Farfantepenaeus brasiliensis</i>
Namorado	Pinguipedidae	<i>Pseudopercis numida</i>
Namorado	Pinguipedidae	<i>Pseudopercis semifasciatus</i>
Cherne poveiro	Polyprionidae	<i>Polyprion americanus</i>
Parú	Pomacanthidae	<i>Pomacanthus paru</i>
Anchova	Pomotomidae	<i>Pomatus saltatrix</i>
Siri	Portunidae	-
Olho de Cão	Priacanthidae	<i>Priacanthus arenatus</i>
Vermelho	Priacanthidae	-
Olhudo	Pristigasteridae	<i>Pellona harroweri</i>
Bijupirá	Rachycentridae	<i>Rachycentron canadum</i>
Arraia	Rajidae	-
Arraia	Rhinobatidae	-
Cação Viola	Rhinobatidae	<i>Rhinobatos</i> spp.
Bacamarte	Scianidae	<i>Cynoscion virescens</i>
Budião	Scianidae	<i>Scarus tripsnosus</i>
Corvina	Scianidae	<i>Micropogonias furnieri</i>
Fofa	Scianidae	<i>Ctenosciaena gracilicirrus</i>
Papa-terra	Scianidae	<i>Menticirrus americanus</i>
Papa-terra	Scianidae	<i>Menticirrus littoralis</i>
Pescada	Scianidae	<i>Cynoscion virescens</i>
Pescada	Scianidae	<i>Cynoscion jamaicensis</i>
Pescada	Scianidae	<i>Cynoscion microlepidotus</i>
Pescada	Scianidae	<i>Isopisthus parvipinnis</i>
Pescada	Scianidae	<i>Nebris microps</i>
Albacora-bandolim ou Atum	Scombridae	<i>Thunnus obesus</i>
Albacora-branca ou Atum Voador	Scombridae	<i>Thunnus alalunga</i>
Albacora-laje ou Atum Gralha	Scombridae	<i>Thunnus albacares</i>
Atum	Scombridae	<i>Thunnus</i> spp.
Atum do Atlântico	Scombridae	<i>Thunnus atlanticus</i>
Bonito	Scombridae	<i>Katsuwonus pelamis</i>
Bonito	Scombridae	<i>Euthynnus alletteratus</i>
Bonito	Scombridae	<i>Auxis thazard</i>
Cavala	Scombridae	<i>Acanthocybium solandri</i>
Cavalinha	Scombridae	<i>scomber japonicus</i>
Sarda	Scombridae	<i>Scomberomorus brasiliensis</i>
Sapateira	Scyllaridae	-
Pargo	Sparidae	<i>Pagrus pagrus</i>
Pargo Coivara	Sparidae	-
Pargo Pena	Sparidae	<i>Calamus pennatula</i>
Cação	Sphyrnidae	-
Cação martelo	Sphyrnidae	<i>Sphyrna</i> spp.
Gordinho	Stromoteidae	<i>Peprilus paru</i>

Nome	Família	Espécie
Parú	Stromoteidae	-
Baiacu	Tetraodontidae	<i>Lagocephalus leavigatus</i>
Cação	Triakidae	-
Peixe-espada	Trichiuridae	<i>Trichiurus lepturus</i>
Cabrinha	Triglidae	<i>Prionotus punctatus</i>
Espadarte	Xiphiidae	<i>Xiphias gladius</i>

Segundo relatos dos pescadores, em tempos passados, a atividade pesqueira possuía um destaque mais relevante nos locais atingidos, uma vez que o rio não se encontrava tão degradado, onde era possível encontrar uma grande quantidade de espécies de peixes.

Com a passagem da lama, houve um grande impacto sobre os peixes e, consequentemente, sobre a pesca. No Relatório Técnico da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais, encontra-se uma imagem da área afetada e do registro de peixes encontrados mortos após a passagem da lama (Figura 79).

Figura 79 – Área afetada e peixes encontrados mortos



A contabilização das espécies com valor pesqueiro, seja ele comercial, subsistência ou por lazer, que foram atingidas diretamente pela passagem da lama representa as espécies mais comuns em detrimento das mais raras. Logo, após o rompimento da barragem foi dado início a uma série de expedições ao longo do rio Doce para identificação e quantificação da ictiofauna diretamente afetada. Esses levantamentos encontraram diversas carcaças de 39 espécies de peixes. Os locais com mais riqueza de espécies foi a região próxima à foz

No mesmo relatório, a quantidade de peixe mortos contabilizou 224.632,8 kg. Foram afetadas 90 espécies de 27 famílias, destas 12 ameaçadas de extinção e 11 endêmicas da região. Diversas espécies forneciam recursos alimentares e econômicos à população e aos pescadores.

A morte e/ou diminuição do estoque pesqueiro causou impactos significativos nas comunidades de pescadores visitadas.

CONSIDERAÇÕES

A bacia do rio Doce apresenta uma grande riqueza de espécies de peixes importantes para a manutenção da estrutura trófica dos ecossistemas e para as comunidades que dependem da pesca para obter recursos de subsistência e econômicos.

Há uma grande demanda pelo recurso pesqueiro, porém essa distribuição é desigual ao longo do rio. Nas regiões do Alto e Médio rio Doce, há criação de espécies em tanques-rede nos reservatórios das usinas hidrelétricas e no Baixo rio Doce, e região marinha há a pesca profissional mais estruturada. Ambas as situações foram atingidas pelo desastre, causando diversos impactos de ordem social, econômica e ambiental.

ECOTOXICOLOGIA

CONTEXTUALIZAÇÃO

POLUIÇÃO DO AMBIENTE AQUÁTICO E O USO DE BIOMARCADORES

A poluição ambiental, especialmente nos ambientes aquáticos, tem aumentado sensivelmente em decorrência do aumento do crescimento industrial e demográfico, os quais contribuem de modo significativo para alterações físicas, químicas e biológicas nesses ambientes (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008). Tais alterações são decorrentes de descargas diretas de fontes de contaminação, como a deposição de efluentes domésticos, agrícolas, industriais; ou por contaminação indireta, quando os contaminantes presentes no solo são carregados aos rios ou infiltrados em lençóis freáticos ou, ainda, quando estes atingem a atmosfera e retornam à água por meio de processos hidrológicos e atmosféricos (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; PORTZ; WOODLEY; CECH, 2006). Assim, além de uma variedade de compostos químicos (orgânicos e inorgânicos), o ambiente aquático tem acumulado grande quantidade de matéria orgânica, que, juntos, são responsáveis pela redução na qualidade da água (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003).

A qualidade da água é um dos fatores mais importantes para o bem-estar de organismos aquáticos. No entanto, diferentes fontes de contaminação têm, cada vez mais, alterado o ambiente aquático e, conseqüentemente, ameaçado as condições adequadas ao desenvolvimento e sobrevivência desses organismos (SCOTT; SLOMAN, 2004; PORTZ; WOODLEY; CECH, 2006; LÜRLING; SCHEFFER, 2007). Os peixes são os vertebrados mais diversos e abundantes na Terra (NELSON, 2006), e são totalmente dependentes da qualidade da água para sua sobrevivência. Estes estão cada vez mais sujeitos a águas contaminadas ou de baixa qualidade, nos mais variados *habitats* (de água doce, estuarino e marinho) em que se distribuem e em diferentes estágios do seu ciclo de vida (e.g. EVANS, 1987; EVANS; PERMARINI; CHOE, 2005). Devido a essa exposição, abundância, diversidade e ao vasto conhecimento das respostas fisiológicas e bioquímicas desses organismos, os peixes têm sido cada vez mais utilizados como bioindicadores em estudos de avaliação dos efeitos decorrentes da contaminação e da alteração na qualidade da água. Essa relevância se torna ainda maior pelo fato destes interagirem em diversos níveis tróficos da cadeia biológica, apresentando, assim, grande importância ecológica (e.g. WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003).

Bioindicadores são organismos ou sistemas biológicos que respondem a alterações ambientais através da modificação de suas funções vitais normais e/ou de sua composição química, refletindo, desse modo, a situação ambiental vigente (VAN GESTEL; VAN BRUMMELEN, 1996; WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003). Essas respostas detectáveis são denominadas biomarcadores, e são manifestadas em vários níveis da organização biológica e utilizadas para indicar exposição, efeito e/ou susceptibilidade de um organismo ao fator estressor. Os biomarcadores são classificados em moleculares, genéticos, bioquímicos, fisiológicos, comportamentais ou estruturais, e são quantificados em tecidos e fluidos corpóreos do organismo (VAN GESTEL; VAN BRUMMELEN, 1996;

WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008).

Os biomarcadores fornecem informações biológicas da exposição dos organismos a contaminantes ambientais mesmo que a baixas concentrações e por curto período de tempo. Assim, a capacidade estressora ou a toxicidade de um determinado composto pode ser determinada de acordo com as disfunções causadas por este ao organismo ou às suas funções celulares. Desse modo, servem satisfatoriamente como indicadores de alterações subletais manifestadas em diferentes níveis da organização biológica, permitindo uma melhor compreensão dos efeitos da poluição sobre o animal, bem como antecipando efeitos subsequentes sobre as populações e comunidades dos ecossistemas impactados. Sendo assim, e em conjunto com a avaliação química da qualidade da água (que identificam e quantificam as substâncias presentes em amostras ambientais), são considerados indispensáveis para a avaliação da poluição hídrica, tornando-se importante instrumento não só para a avaliação da qualidade da água, mas, também, para o entendimento da dinâmica do sistema e para escolhas de medidas de manejo e recuperação de um determinado ecossistema (VAN GESTEL; VAN BRUMMELEN, 1996; WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008).

METAIS: CARACTERÍSTICAS E EFEITOS

Metais são encontrados normalmente em baixas concentrações no ambiente aquático (GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; SOUZA et al., 2015; LIMA, 2016; MAIA, 2017), especialmente na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), a qual está inserida em uma região reconhecidamente rica em minérios (RAMOS, 2005; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014; LIMA, 2016). No entanto, estes podem adentrar ao ambiente aquático por meio de diferentes atividades antropogênicas, principalmente as atividades industriais e de mineração, mas também pelo escoamento superficial de águas das chuvas, emissão de gases por chaminés ou fontes difusas (como veículos automotivos, por exemplo), as quais contribuem significativamente para aumentar as concentrações desses contaminantes (JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; RHODES, 2010; SILVA, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; SOUZA et al., 2015; FAURG, 2016 a; ICMBio, 2016d; HATJE et al., 2017), assim como vem sendo evidenciado na BHRD (ANDRADE, 2003; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; ARANTES et al., 2009; MORAIS, 2009; ANDRADE et al., 2010; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014; LIMA, 2016; MAIA, 2017).

A denominação metal-traço, ou mais popularmente metais pesados, é dada para elementos persistentes no meio, ou seja, elementos que não se degradam facilmente e que permanecem por longo período de tempo no ambiente. Estão inseridos nessa denominação elementos como o arsênio, alumínio, cádmio, chumbo, mercúrio, níquel e urânio. No entanto, metais essenciais (ou seja, importantes para a fisiologia e como constituintes de organismos vivos), como cobalto, cobre, cromo, manganês, selênio, ferro e zinco, também podem ser considerados tóxicos, uma vez que em elevadas concentrações podem causar diferentes alterações aos organismos (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA

FILHO; JESUS, 2004; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; SOUZA, 2007; VAREJÃO, 2008; MORAIS, 2009; SILVA, 2010; SALES, 2013; MAIA, 2017).

Ao adentrarem o ambiente aquático os metais passam por diferentes transformações químicas, especialmente a complexação destes com outros elementos e substâncias presentes na coluna de água. Materiais particulados em suspensão são importantes meios de transporte de metais pesados em ecossistemas aquáticos. Porém, quando ocorre redução na velocidade da corrente de água, o material em suspensão é gradualmente depositado, sendo os sedimentos o destino final desses elementos (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; CHAPMAN et al., 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; SOUZA, 2007; VAREJÃO, 2008; RHODES, 2010; SILVA, 2010; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; SOUZA et al., 2015; IBAMA, 2016). Ao serem incorporados aos sedimentos, os metais tornam-se menos biodisponíveis, ou seja, quando em fase aquosa, os metais são mais facilmente absorvidos pelos organismos. No entanto, é válido ressaltar que o sedimento é um compartimento ativo que não somente acumula esses elementos, mas também tem papel fundamental na reposição, redistribuição e biodisponibilização destes para a coluna de água e, conseqüentemente, à biota aquática (BEVILACQUA, 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; PUPPIM, 2014; SOUZA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016; IBAMA, 2016; MAIA, 2017; JUNCÁ et al., 2017), atuando como fonte potencial de poluição difusa no ambiente aquático (SILVA, 2010).

Mudança nos padrões de concentração de metais ou semimetais nos corpos hídricos tem impacto significativo à biota (PUPPIM, 2014). No entanto, a presença de um contaminante no ambiente aquático não significa que este irá produzir danos aos organismos que ali habitam (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d), pois a potencialidade tóxica dos metais sobre a biota aquática é dependente não somente da concentração química total no meio, mas da forma como estão fixados ao sedimento, das condições abióticas do ambiente aquático analisado, do tempo e nível de exposição, da rota de absorção (oral, cutânea, branquial), da capacidade absorptiva e defesa dos organismos e, também, de como a especificidade química do elemento afeta a distribuição do metal no organismo (ANDRADE, 2003; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; MORAIS, 2009; RHODES, 2010; PEREIRA et al., 2010; SOUZA et al., 2015; FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d).

Os efeitos agudos de metais e semimetais ocorrem rapidamente, são claramente definidos, geralmente fatais e raramente reversíveis. Os efeitos crônicos ou subletais levam ao comprometimento orgânico-funcional de todo o organismo, com alterações em funções osmorregulatórias, bioquímicas, comportamentais, entre outros (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; QUEIROZ, 2006; MORAIS, 2009; FERNANDES et al., 2016; FAURG, 2016a; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016d). De modo geral, os chamados metais-traço apresentam elevada toxicidade, uma vez que interferem no funcionamento orgânico de diferentes maneiras, especialmente em reações enzimáticas de todo o organismo. Por possuírem grande afinidade por moléculas que contenham átomos de nitrogênio e enxofre,

ligam-se facilmente a proteínas e macromoléculas celulares, bloqueando, deslocando o íon essencial ou alterando a conformação estrutural ativa de biomoléculas (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; QUEIROZ, 2006; MORAIS, 2009).

Além disso, devido à baixa mobilidade apresentada por esses elementos, estes podem ser facilmente acumulados. Ligam-se covalentemente a átomos de carbono em grupos orgânicos, como, por exemplo, o metil ($-\text{CH}_3$), originando compostos organometálicos, que, quando neutros, tendem a ser lipossolúveis e, portanto, atravessam facilmente as membranas biológicas, atingindo, consequentemente, vários compartimentos orgânicos e interferindo no funcionamento de todo o organismo. Está bem documentado na literatura que animais que vivem em ambientes aquáticos quimicamente poluídos irão, cedo ou tarde, adquirir uma carga desses poluentes (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d). Muitos organismos tendem a acumular metais-traço (e outros contaminantes) em seus tecidos, mesmo quando a água possui níveis desses compostos abaixo da concentração máxima tolerada pela legislação (NIENCHESKI et al., 2014). Desse modo, concentrações aparentemente baixas na coluna de água e sedimento não indicam ausência de absorção e efeitos destes sobre a biota. Ao serem absorvidos e, consequentemente, acumulados pelos organismos, atingem níveis altamente tóxicos e, até mesmo, fatais. É válido ressaltar que os metais pesados podem atingir altas concentrações na biota devido ao aumento progressivo das concentrações ao longo dos diferentes níveis da cadeia trófica. Nessa condição, denominada de biomagnificação, organismos que se posicionam no topo da cadeia alimentar apresentariam concentrações mais significativas e tóxicas desses elementos (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; MORAIS, 2009; NIENCHESKI et al., 2014; FERNANDES et al., 2016). Dessa forma, o conhecimento sobre a concentração, mobilidade, disponibilidade, bioacumulação e efeitos desses elementos tóxicos é de extrema importância para caracterização dos riscos, impactos e danos causados por estes ao ecossistema. Adicionalmente, devido ao tempo de permanência no ambiente e à forma como esses elementos se comportam ao longo da cadeia trófica, o estudo desses elementos passa, também, a apresentar relevância quanto ao acúmulo no ambiente, recursos pesqueiros e, consequentemente, à saúde humana.

O ROMPIMENTO DA BARRAGEM

O rompimento da barragem de rejeitos minerais de Fundão, pertencente ao complexo de Germano, da empresa Samarco Minerações S/A, ocorreu às 15h30 do dia 5 de novembro de 2015. Essa barragem era situada em uma região de cabeceira da BHRD, na cidade de Mariana, estado de Minas Gerais. Com o rompimento, ocorreu a liberação de um volume estimado de 55 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração (minério de ferro), água e materiais utilizados em sua construção (IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; SEDRU, 2016; SEGURA et al., 2016; SILVA et al., 2016; UFES, 2016a; VARGAS et al., 2016; CARMO et al., 2017; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017; LEONARDO et al., 2017; MAIA, 2017; SARTORI et al., 2017; UFES, 2017; UFVJM, 2017) (Figura 80).

Figura 80 – Imagem da barragem de Fundão após o rompimento.



Fonte: IBAMA (2015).

O material atingiu os rios Gualaxo do Norte e Carmo, bem como o distrito de Bento Rodrigues e o centro urbano de Barra Longa, causando inúmeros danos ambientais, mortes humanas e de animais domésticos e silvestres, além da mobilização da população para evacuação de cidades, paralisação de usinas hidrelétricas, danos em áreas de conservação da biodiversidade e patrimônios histórico-culturais. Na divisa dos municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, o material atingiu o rio Doce. O rejeito foi sendo transportado por toda a extensão deste, ao longo de 17 dias, até alcançar a foz do rio Doce no oceano Atlântico, na localidade de Regência, município de Linhares, estado do Espírito Santo (IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; SEDRU, 2016; SEGURA et al., 2016; SILVA et al., 2016; UFES, 2016a; VARGAS et al., 2016; CARMO et al., 2017; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017; LEONARDO et al., 2017; MAIA, 2017; SARTORI et al., 2017; UFES, 2017; UFVJM, 2017) (Figura 81).

Figura 81 – Imagem aérea da pluma de lama ao atingir a Foz do rio Doce, Regência (ES).



Fonte: Brasil (2015).

Na região costeira, ainda não existe um consenso da extensão acometida pela pluma de sedimentos proveniente do desastre, uma vez que ainda existe uma grande quantidade de rejeito ao longo da calha do rio Doce, o qual, por muito tempo, será remobilizado e disponibilizado para o ambiente por influência da sazonalidade, em especial ao regime de chuvas na região (IBAMA, 2015; FERNANDES et al., 2016; UERJ, 2016; HATJE et al., 2017; UFES, 2017) (Figura 82). Além disso, uma vez no ambiente marinho, a pluma de rejeitos sofrerá a influência de vários fatores sobre sua dispersão, como, por exemplo, ventos superficiais, correntes, ondas, vazão e turbidez do rio Doce (IBAMA, 2016; UERJ, 2016; ICMBio, 2017; UFES, 2017), e, por apresentar características particulares quanto à granulometria (muito fina), esse material pode ser transportado a longas distâncias (UFES, 2017). Estudos indicam que a pluma

de lama atingiu uma área de 392 km², se consideradas regiões com maior concentração de rejeito, e 6.197 km², se considerada a pluma de rejeitos com menor concentração de sedimento (FAURG, 2016a; ICMBio 2016d). Carmo et al. (2017) sugerem que um ano após o desastre a pluma se espalhou por mais de 770 km² da região marinha, com cerca de 170 km de praias atingidas, tanto ao norte quanto ao sul da foz do rio Doce. De acordo com dados compilados e apresentados pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (2017), a pluma atingiu toda a costa do estado do Espírito Santo, além do extremo sul da Bahia e extremo norte do Rio Janeiro, em proporções, concentrações e momentos distintos (ICMBio, 2017).

Figura 82 – Imagem da foz do rio Doce, área da Rebio Comboios e vila de Regência, Linhares (ES) no dia 05/05/2017 (um ano e meio após o desastre).



Fonte: ICMBio (2017).

Esse desastre foi considerado o maior desastre socioambiental da história do Brasil e classificado pela Defesa Civil como desastre de nível IV, o qual corresponde a um “desastre de muito grande porte”, cujos danos são importantes e consideráveis (ESCOBAR, 2015; IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; SILVA et al., 2016; LEONARDO et al., 2017; SARTORI et al., 2017). Adicionalmente, pode ser considerado como o maior desastre ambiental do setor minerário do mundo, tanto em termos de volume drenado quanto em magnitude de dano causado (POEMAS, 2015; FERNANDES et al., 2016; SILVA et al., 2016; CARMO et al., 2017; SARTORI et al., 2017).

A descarga de resíduos de processos minerários é uma ameaça grave para a qualidade da água e dos sedimentos e para a vida de organismos aquáticos e pessoas que vivem a jusante, devido à presença de elementos potencialmente tóxicos (HORA et al., 2012; POEMAS, 2015; FERNANDES et al., 2016; LOTTERMOSER, 2010 apud GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017). Contaminantes químicos associados aos resíduos podem ser acumular nos sedimentos e tornarem-se fontes recorrentes de contaminação ao longo do tempo (IBAMA, 2015; POEMAS, 2015; HATJE et al., 2017). Além disso e, especificamente no caso da barragem de Fundão, estudos apontam que a ocorrência da perda da “memória ecológica” sob os rejeitos e o vasto período de permanência e a ação dos metais pesados liberados pela tragédia

sob os ecossistemas demandarão extenso tempo de recuperação, o qual poderá variar entre décadas a cerca de um século (POEMAS, 2015; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016). Nesse sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de amplos estudos ambientais, sistemáticos e de monitoramento, para que se possa conhecer, exatamente, a composição e os efeitos desses rejeitos sobre a biota, bem como fazer uma previsão sobre o tempo de depuração e de recuperação do ambiente atingido.

OBJETIVO E METODOLOGIA

Muitos estudos foram, e ainda estão sendo, desenvolvidos por instituições públicas e privadas, desde o rompimento da barragem de Fundão, há dois anos. Nesse sentido, este relatório objetiva compilar os dados gerados por essas diferentes instituições, quanto aos impactos ecotoxicológicos, agudos e crônicos, causados à biota aquática pelo rompimento da barragem de Fundão em 5 de novembro de 2015. Para tanto, foram utilizadas nos levantamentos bibliográficos diferentes plataformas de pesquisas científicas nacionais e internacionais, a saber: Science Direct, Web of Science, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Portal periódicos Capes, Google Acadêmico. A busca pelos artigos científicos foi realizada por meio da combinação de diferentes palavras-chave, tanto em inglês quanto em português, tais como: BHRD, ecotoxicologia, impacto ambiental, Fundão *iron mining dam*, *mining disaster*, *ecotoxicological evaluation*, Mariana/MG, *Doce River impacts*, *effects of Fundão disaster*, impacto de metais, respostas de estresse, respostas fisiológicas, bioacumulação, toxicologia ambiental, foz do rio Doce, estuário do rio Doce, Regência, indicadores biológicos, entre outras. Adicionalmente, foram utilizadas informações obtidas de relatórios técnicos-científicos de diferentes instituições que atuaram na região atingida pelo desastre, tais como: Ibama, ICMBio, Marinha do Brasil, instituições de ensino como UNESP, UFES, UFMG, FURG, entre outras. A área estabelecida para esses levantamentos incluiu os rios da BHRD atingidos pela passagem da lama (mais especificamente, rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce) e toda a área do delta do rio Doce, o qual estende-se sobre os municípios de Conceição da Barra, São Mateus, Jaguaré, Linhares e Aracruz, com extrapolação ao norte – Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, que se encontra na área de Abrolhos, localizada, pela costa, entre as cidades de Prado e Nova Viçosa no extremo sul da Bahia e ao sul até a região de Anchieta.

RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS PÓS-DESASTRE E COMPARAÇÃO EM RELAÇÃO AOS RESULTADOS DE LINHA-BASE

BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

Resíduos de minério são particularmente preocupantes, especialmente devido à presença de elementos potencialmente tóxicos em sua composição (HORA et al., 2012; POEMAS, 2015; LOTTERMOSER, 2010 apud GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017). Estes representam uma ameaça grave para a qualidade da água, sedimentos, solo, organismos aquáticos e pessoas que vivem a jusante de barragens (POEMAS, 2015; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017). No entanto, as características químicas dos rejeitos variam de acordo com o mineral de interesse e substâncias utilizadas em seu processo de extração e beneficiamento (HORA et al., 2012). A composição mineralógica dos rejeitos do

beneficiamento do minério de ferro é, essencialmente, sílica (quartzo), óxidos de ferro (hematita FeO e magnetita Fe_2O_3) e argilominerais (SILVA et al., 2016; UERJ, 2016). Entretanto, podem estar associados e relacionados ao aumento da disponibilidade ambiental dos elementos ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), magnésio (Mg) e manganês (Mn) (PEREIRA et al., 2008; SILVA et al., 2016; VERONEZ et al., 2016).

Segundo estudos realizados, o rejeito de minério de ferro que extravasou da barragem de Fundão e acometeu toda a extensão do rio Doce e sua foz foi classificado como não perigoso e inerte com base na classificação da NBR 10.004 da ABNT (2004), uma vez que este é composto, basicamente, de óxido de silício, óxido de ferro e óxido de alumínio (SAMARCO, 2016; SILVA et al., 2016). Apesar disso, Pires et al. (2003) destacaram que, devido ao fato desse rejeito conter altos níveis de goethita, este apresenta elevada capacidade de complexação, adsorção e retenção de metais pesados. Sartori et al. (2017) relatam que as associações minerais presentes nos depósitos explorados são ricas em minerais de alta potencialidade tóxica, como: arsênio (As), cádmio (Cd), níquel (Ni), cromo (Cr), cobalto (Co), mercúrio (Hg), vanádio (V), Zn, chumbo (Pb), Cu e lítio (Li). A caracterização química dos rejeitos de beneficiamento de minério da mina Alegria, vizinha à da Samarco, indicou a presença de traços de Zn, Cu e Pb (UERJ, 2016). Juncá et al. (2017), por sua vez, afirmam que a presença de ferro, em altas concentrações nos compartimentos ambientais, possibilita o aumento na concentração de elementos denominados siderófilos, como, por exemplo, Mn, Ni e Pb, os quais têm seu potencial toxicológico bastante conhecido. Corroborando essas informações, análises realizadas com o rejeito proveniente da barragem de Fundão indicaram a presença de alguns elementos-traço, como antimônio (Sb), As, bário (Ba), Pb, Co, Cr, Hg, molibdênio (Mo), Ni, prata (Ag), alumínio (Al), V e Zn, em sua composição, embora, em baixas concentrações (GOLDER ASSOCIATES, 2016b; c; revisado em INSTITUTOS LACTEC, 2017a, dados não publicados). Do mesmo modo, Silva et al. (2016) encontraram, em amostras de rejeito coletadas na cidade de Barra Longa dias após o desastre, elevadas concentrações de Fe e Mn e baixas concentrações de Zn, Cd, Cu, Pb e Ni.

É válido ressaltar, ainda, que a região do Quadrilátero Ferrífero é reconhecida quanto a presença mineralógica de arsenopirita, composta por aproximadamente 45% de arsênio (HORA et al., 2012; HATJE et al., 2017; UFVJM, 2017). Nessa região, há a histórica presença de atividades minerárias para extração, além de ferro, de ouro e manganês, principalmente, nos municípios que compõem a cabeceira da BHRD (HORA et al., 2012; SEGURA et al., 2016; HATJE et al., 2017; MAIA, 2017). Especificamente nos rios do Carmo e Gualaxo do Norte, historicamente impactados por diferentes atividades antrópicas (INSTITUTOS LACTEC, 2017b, item 4.4 ecotoxicologia, dados não publicados), destaca-se a atividade de garimpo de ouro, responsável pela disponibilização ambiental, em mais de 100 anos de exploração, de grande quantidade de mercúrio (HORA et al., 2012; HATJE et al., 2017). Tal atividade ainda se fazia presente em vários pontos desses rios quando estes foram atingidos pela onda de rejeito (IBAMA, 2015; HATJE et al., 2017; UFVJM, 2017).

Logo após a passagem da onda de lama, diferentes estudos têm apresentado evidências sobre a presença de metais e semimetais em vários trechos dos rios do Carmo, Gualaxo do Norte e Doce, tanto em amostras de água quanto de sedimento e solo (CPRM, 2015; ORGANON, 2015; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; ICMBio, 2016d; GIAIA, 2016; SAMARCO, 2016; SEGURA et al., 2016; GUERRA et al., 2017; MAIA, 2017). As análises de água indicaram que as concentrações de vários elementos

químicos ultrapassaram os limites normativos e, até mesmo, médias históricas descritas para o rio Doce (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; SAMARCO, 2016; UFVJM, 2017). As concentrações foram significativamente altas nos pontos mais próximos ao local do rompimento da barragem (entre 95 e 279 km) com gradativa redução dos valores à medida que a lama foi sendo carregada para a foz do rio Doce (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016). No entanto, com valores significativamente altos, apesar da distância da barragem, da diluição e da retenção de grande quantidade de rejeito ao longo de toda a extensão do rio Doce (HATJE et al., 2017).

É importante ressaltar que as condições de qualidade das águas do rio Doce e de seus principais afluentes não estavam ideais anteriormente à passagem da onda de rejeitos, em novembro de 2015. Muitos desses rios já recebiam considerável carga de poluentes das mais diferentes naturezas, tais como de atividades minerárias, industriais e descargas *in natura* de esgotos domésticos, assim como já havia sido descrito no relatório de linha-base (INSTITUTOS LACTEC, 2017b, item 4.4 ecotoxicologia, dados não publicados). No entanto, a força da lama de rejeitos causou erosão nas margens dos rios, revolvimento/remobilização e carregamento dos sedimentos devido à alta velocidade do fluxo, sendo, desse modo, provavelmente responsável pela ressuspensão de metais pesados e outros contaminantes presentes nos sedimentos e solo dos cursos d'água e áreas afetadas, resultando em uma mistura complexa de contaminantes que, com a força do deslocamento, foi sendo carregada ao longo de toda a extensão do rio Doce e contaminando outros pontos a jusante dos focos de poluição (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; FERNANDES et al., 2016; GOLDER ASSOCIATES 2016a; SAMARCO, 2016; UFES, 2016b; HATJE et al., 2017; MAIA, 2017; SARTORI et al., 2017; UFES, 2017; UFVJM, 2017).

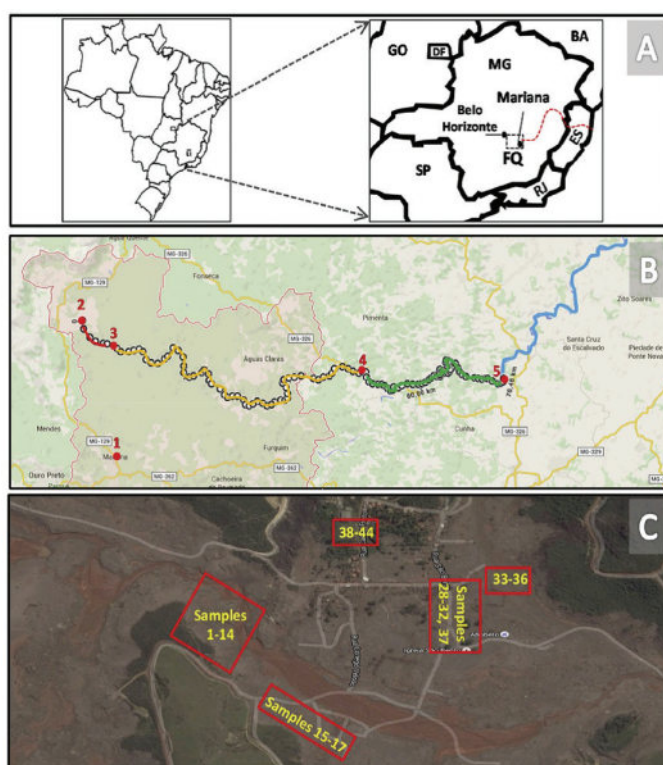
A Samarco (2016) afirma que o rejeito não apresenta riscos à biota, saúde humana, bem como não libera metais que possam contaminar o meio ambiente. Porém, a lama de rejeitos, em associação com a elevada carga de sedimentos e outros elementos carregados ao longo do rio Doce, causou a morte de inúmeras espécies de peixes, muitas delas endêmicas da bacia do rio Doce (para mais detalhes ver dados de ictiologia no presente relatório). Segundo o laudo técnico emitido pela empresa Brandt Meio Ambiente (2016), a morte dos peixes em toda a extensão acometida pela lama de rejeitos aconteceu por asfixia, devido ao excesso de material em suspensão e à redução drástica nos níveis de oxigênio na água, resultado este corroborado pela exposição, inchaço e colapso das brânquias dos peixes encontrados mortos (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; SARTORI et al., 2017). A ocorrência da asfixia se deu, em grande parte, pelo reduzido tamanho das partículas do rejeito, as quais apresentam entre 1 a 200 μm e, por conseguinte, elevado potencial para adsorção de elementos-traços conferindo a essas partículas alta toxicidade (SEGURA et al., 2016; UFES, 2016a; HATJE et al., 2017). Além de peixes, foram registradas mortalidade, em período inferior a 24 horas, de animais domésticos (galinhas) que beberam a água do rio contaminado nas cidades de Periquito e Barra Longa, MG (FELIPPE et al., 2016), bem como de outras espécies que direta ou indiretamente dependiam da água do rio Doce (IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; LEONARDO et al., 2017).

Apesar da gravidade do desastre e do desconhecimento sobre a presença de metais pesados na composição do rejeito e da toxicidade deste ou de elementos e compostos carregados por ele sobre a biota da área atingida, foram realizados apenas cinco estudos para avaliação da potencialidade tóxica, bioacumulação e efeitos do rejeito sobre a biota aquática local (VARGAS et al., 2016; SEGURA et al., 2016; JUNCÁ et al., 2017; SARTORI et al., 2017; UFVJM, 2017). Destes, quatro foram realizados com peixes (VARGAS et al., 2016; SEGURA et al., 2016; SARTORI et al., 2017; UFVJM, 2017) e um com estágios larvais de anfíbios, comumente denominados girinos (JUNCÁ et al., 2017).

Vargas et al. (2016) avaliaram os possíveis efeitos genotóxicos e mutagênicos do sedimento recoberto por rejeito obtido em diferentes pontos do rio Doce, utilizando como bioindicador a espécie *Oreochromis niloticus* (tilápia). Para isso, no dia 22 de novembro de 2015, os pesquisadores percorreram o leito principal do rio Doce acometido pelo desastre e realizaram amostragens de sedimento em seis pontos: em Minas Gerais, nos municípios de Ipatinga, Governador Valadares, Tumiritinga e Aimorés; e no Espírito Santo, em Colatina e Regência. O material coletado foi levado ao laboratório e, após a diluição em água decolorada (proporção 1:16), os autores submeteram 35 espécimes de tilápia em tanques de 40 litros correspondente a cada uma das condições experimentais (= tanques com amostras dos pontos de coleta), por um período de 7 dias. Adicionalmente, os animais foram submetidos a um controle negativo (tanque somente com água decolorada, livre de sedimento de qualquer natureza, n=35) e um controle positivo (onde os peixes foram injetados com uma solução de colchicina 0,005% e mantidos em água decolorada, n=35) pelo mesmo período experimental. Ao final do período de exposição, todos os animais tiveram amostras de sangue analisadas quanto às alterações genéticas. Não foram encontrados eritrócitos micronucleados nos animais expostos ao sedimento de Regência e Ipatinga. Muito embora tenham sido encontrados micronúcleos nos peixes submetidos aos sedimentos dos demais pontos, os valores encontrados não foram significativamente diferentes do controle negativo. Outras anormalidades nucleares foram encontradas nos peixes de todos os pontos ao longo do rio Doce. Nos peixes submetidos ao sedimento de Regência e Ipatinga, essas anormalidades foram, inclusive, superiores às encontradas para os peixes submetidos ao controle positivo. Com base nesses resultados, os pesquisadores concluem que o rejeito de minério despejado sobre a calha do rio Doce apresenta potencial genotóxico, ou seja, apresenta a capacidade de causar alterações na estrutura do DNA e induzir a formação de anormalidades nucleares.

Segura et al. (2016) também realizaram um estudo na região do desastre, menos de um mês após a ocorrência deste, no dia 28 de novembro de 2015, onde coletaram 44 amostras, incluindo água, solo e rejeito na região de Bento Rodrigues, a mais afetada pela onda de lama (Figura 83). Os autores realizaram a caracterização química das amostras coletadas, além da avaliação dos efeitos citotóxico, genotóxico e mutagênico em dois modelos para estudos *in vitro*: células humanas do epitélio do carcinoma hepatocelular (HepG2) e células vegetais de cebola (*Allium cepa*). Para isso, estes prepararam amostras de água e extratos das amostras de lama (rejeito) e solo e submeteram as células a essas condições por períodos entre 3 e 24 horas, dependendo do teste a ser realizado.

Figura 83 – Área amostrada: (A) Localização da cidade de Mariana. A linha tracejada indica o caminho percorrido pela lama desde o local do desastre até a foz do rio Doce. (B) Município de Mariana e a extensão dos rios afetados: vermelho (2 a 3, ± 6 km), amarelo (3 a 4, ± 50 km, rio Gualaxo do Norte), verde (4 a 5, ± 20 km, rio do Carmo) e azul (5 até o final, ± 600 km, rio Doce até o mar, não mostrado). Pontos 1, 2, 3, 4, 5 significam: Mariana, Barragem de Fundão, Bento Rodrigues, Barra Longa, Rio Doce. (C) C: Vista aérea dos principais locais de amostragem do estudo (amostras 1 e 17 estão localizadas no sul de Bento Rodrigues).



Fonte: Segura et al. (2016).

Os autores identificaram que tanto as amostras de água quanto as de solubilizado de solo e lama inibiram a capacidade de crescimento das células humanas HepG2, além de causarem aumento significativo nos danos ao DNA. Especificamente, o solubilizado da amostra de lama obtida do ponto 04 causou aumento no número de micronúcleos. No entanto, não houve indícios dessas alterações em células submetidas às amostras de água desse ponto.

As análises das células vegetais de *A. cepa*, por sua vez, indicaram redução nos índices de germinação e redução do processo de divisão celular. Além disso, foram observadas alterações genotóxicas em células submetidas às amostras de solo e de água coletadas no pequeno rio no norte de Bento Rodrigues (amostra 33), na estrada para Bento Rodrigues (amostra 19) e no rio da barragem da Samarco (amostra 07). Mutagenicidade foi observada em células expostas às amostras obtidas na colina e ao sul de Bento Rodrigues (amostras 15, 06, 05 e 04). Com base nesses resultados, os autores concluem que a alta fração mobilizável de metais e metalóides (Ba, As, Cd, Sr, Fe, Mn, Al e Pb) presentes nas amostras de rejeito, especialmente alumínio (Al), bário (Ba), ferro (Fe), estrôncio (Sr) e manganês (Mn), podem impactar diferentes compartimentos ambientais e causar danos à biota, conforme corroborado pelos danos citotóxicos, genotóxicos e mutagênicos encontrados tanto para amostra animal quanto vegetal.

Sartori et al. (2017) buscaram comparar o potencial tóxico da água e do sedimento atingido pelo rejeito através da amostragem desses materiais em quatro localidades ao longo da calha do rio Doce: Regência, Colatina, Aimorés e Bento Rodrigues. Para isso, os pesquisadores realizam duas coletas dessas matrizes ambientais, sendo a primeira um dia após a chegada do rejeito na foz do rio Doce (22/11/2015) e outra, seis meses após o rompimento da barragem (15/05/2016). Imediatamente após a chegada do material coletado no laboratório, os pesquisadores realizaram ensaios de toxicidade aguda, tanto com a água bruta (exatamente a mesma obtida dos pontos de coleta) quanto sedimentos (elutriato preparado com diluição 1:16, sedimento: água para diluição) dos locais amostrados, através da exposição por 96 horas da espécie de peixe bioindicadora *Danio rerio*. Não houve mortalidade dos peixes ao longo de todo o período experimental (96 horas), consequentemente, não foi possível determinar a concentração letal (CL 50) para as amostras de água e sedimentos obtidas dos locais acometidos pelo desastre. Apesar disso, os autores identificaram que apenas 96 horas de exposição já é mais do que suficiente para que os peixes acumulem metais. O acúmulo de metais, especificamente Zn>Fe>Al>Ba>Mn>Cu, foi muito similar entre os peixes submetidos tanto às amostras de água quanto às de sedimento. No entanto, o acúmulo de Al, Fe e Cu foi maior nos peixes submetidos às amostras de água. Além disso, os peixes expostos às amostras coletadas dos pontos mais próximos da foz (Regência e Colatina) apresentaram maiores concentrações dos metais Al, Ba e Cu, enquanto os peixes submetidos às amostras obtidas de pontos mais próximas à barragem (Bento Rodrigues e Aimorés) acumularam maiores concentrações de Fe, Zn e Mn. Desse modo, os autores concluem que embora a exposição às amostras de água e os sedimento dos locais acometidos pelo desastre não tenham sido capazes de induzir a mortalidade dos peixes, estas possuem elevadas concentrações de metais que, em curto período de exposição (apenas 96 horas), já se acumularam neles. E, embora as concentrações acumuladas estejam abaixo da legislação brasileira (ANVISA, 2013), esses resultados não indicam ausência de impactos a esta e outras espécies, especialmente, se ampliado o tempo de exposição. É válido destacar que, nesse contexto, estudos ecotoxicológicos realizados com a água do rio apontaram para a existência de toxicidade crônica, identificada pela redução da capacidade reprodutiva de microcrustáceos da espécie *Ceriodaphnia dubia* (IBAMA, 2016).

O estudo realizado pela Universidade Federal do Vale do Jequitinhonha e Mucuri (2017), em parceria com a Associação de Pescadores e Amigos do rio Doce (APARD), avaliou sete espécies de peixes capturadas na porção média do rio Doce, região de Governador Valadares, nove meses após o desastre. Para isso, durante o mês de agosto de 2016, pescadores da APARD coletaram 14 exemplares de peixes em três pontos, sendo: (1) lago da Usina Hidrelétrica de Baguari (UHE); (2) rio Doce, cerca de 2 km a jusante da UHE Baguari, e (3) rio Corrente Grande, afluente do rio Doce (ponto controle, cerca de 1 km do ponto de encontro do rio com o lago da UHE Baguari). O tecido muscular (porção utilizada como alimento pelos seres humanos) das sete espécies de peixes avaliadas (*Pygocentrus nattereri* – piranha; *Cichia ocellaris* – tucunaré; *Pimelodus maculatus* – mandi; *Plagioscion squamosissimus* – corvina; *Salminus maxillosus* – dourado; *Hypostomus affinis* – cascudo; *Prochilodus vimboides* – curimatã) foi analisado em duplicata quanto à presença de contaminantes químicos (arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio) e comparados com a Resolução da Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013, a qual dispõe sobre o Regulamento Técnico Mercosul sobre “Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos” (Tabela 46).

Tabela 46 – Limites máximos de contaminantes inorgânicos em pescado. Dados baseados no limite estabelecido para alimentos (mg/kg) pela Resolução da Diretoria Colegiada da Anvisa RDC nº 42/2013, Mercosul.

Elemento	Alimento						
	Peixes crus, congelados ou refrigerados	Peixes bonito, carapeba, enguia, tainha, jurel, imperador, cavala, sardinha, atum e linguado	Peixe melva	Peixes espada e anchova	Moluscos cefalópodes	Moluscos bivalves	Crustáceos
Arsênio (As)	1,0	-	-	-	1,0	1,0	1,0
Cádmio (Cd)	0,05	0,1	0,2	0,3	2,0	2,0	0,5
Chumbo (Pb)	0,3	-	-	-	1,0	1,5	0,5
Mercúrio (Hg)	Predadores	1,0	-	-	0,5	0,5	0,5
	Não predadores	0,5	-	-	-	-	-

Segundo dados apresentados pelo relatório da UFVJM (2017), duas das sete espécies avaliadas (28,6%) apresentaram concentrações acima da estabelecida pela legislação RDC nº 42 (ANVISA, 2013) quanto à presença de contaminantes inorgânicos (metais e semimetais) (Tabela 46). A espécie que mais acumulou elementos foi *Pimelodus maculatus* (mandi), a qual apresenta hábito de fundo e, conseqüentemente, maior contato com o material sedimentado no rio. Espécimes dessa espécie coletados no rio Doce apresentaram contaminação por arsênio e mercúrio, 38,5% e 8% acima do estabelecido pela legislação, respectivamente, enquanto exemplares dessa mesma espécie coletados no rio Corrente Grande (área sob influência de contaminação por metais, mas não afetada pelo desastre) apresentaram apenas contaminação por chumbo, 8% acima da legislação (ANVISA, 2013). Exemplares de *Salminus maxillosus* (dourado), também coletados no rio Doce, apresentaram contaminação por cádmio 718% acima do estabelecido pela RDC nº 42 (ANVISA, 2013) (Tabela 46).

Tabela 47 – Média das concentrações (mg/kg) dos elementos encontrados em tecido muscular de diferentes espécies de peixes coletadas na região de Governador Valadares (MG).

Média das concentrações dos elementos avaliados (mg/kg)						
Pontos de coleta	Espécies amostradas	Hábito alimentar	Arsênio	Cádmio	Chumbo	Mercúrio
Lago	Mandi	Omnívoro	0,638	0,007	0,123	0,484
	Piranha	Carnívoro	0,754	0,005	0,096	0,717
	Tucunaré	Carnívoro	0,322	0,018	0,104	0,749
Rio Doce	Corvina	Carnívoro	0,326	0,016	0,235	0,386
	Dourado	Carnívoro	0,364	0,409*	0,114	0,349
	Mandi	Omnívoro	1,385*	0,009	0,113	0,540*
	Piranha	Carnívoro	0,529	0,005	0,098	0,944

Pontos de coleta	Espécies amostradas	Hábito alimentar	Média das concentrações dos elementos avaliados (mg/kg)			
			Arsênio	Cádmio	Chumbo	Mercúrio
Rio Corrente Grande	Cascudo	Detritívoro	0,598	0,022	0,117	0,172
	Curimbatá	Detritívoro	0,519	0,007	0,138	0,123
	Mandi	Omnívoro	0,260	0,021	0,324*	0,427
	Tucunaré	Carnívoro	0,548	0,007	0,080	0,701

Nota: Dados apresentados em negrito e acompanhados de asteriscos representam valores acima dos limites máximos estabelecidos pela Resolução ANVISA (RDC nº 42/2013).

Fonte: Adaptado de UFVJM (2017).

Se levar em consideração os limites máximos de ingestão semanal ou mensal estabelecidos pela *Codex Alimentarius Commission*, comissão composta pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, em conjunto com a Organização Mundial de Saúde (FAO/OMS, 2016), as porcentagens de violação são ainda maiores e alarmantes. Os valores encontrados para arsênio seriam de 9.133% acima do permitido para ingestão semanal desse elemento, os valores encontrados para cádmio seriam de 5.743% e 1.536% acima do permitido para consumo desse elemento por semana ou por mês, respectivamente, e os valores determinados para mercúrio seriam de 13.400% acima do permitido para consumo semanal desse elemento. É válido ressaltar que tanto *Salminus maxillosus* (dourado) quanto *Pimelodus maculatus* (mandi) são espécies introduzidas na bacia do rio Doce (VIEIRA 2009, 2010; FROESE; PAULY, 2017). Espécies introduzidas (sejam alóctones ou exóticas) foram liberadas para a pesca através da Portaria nº 40, de 11 de maio de 2017, do Instituto Estadual de Florestas (2017). No entanto, o estudo realizado por Maia (2017) indica que tanto o rio Doce quanto o rio do Carmo estão inaptos para pesca e aquicultura, exatamente por apresentarem valores de As superiores aos limites máximos estabelecidos para essas atividades. Desse modo, a liberação da pesca pode se caracterizar como uma forte fonte de contaminação e risco para a saúde da população local, uma vez que a ingestão de alimentos contendo metais pesados é a principal forma de contaminação humana para populações expostas de forma não ocupacional (DENOBILE, 2007; FERNANDES et al., 2016). Ainda, conforme descrito no relatório da UFVJM (2017), na época em que foi realizada a coleta, o rio apresentava baixa vazão e profundidade, o que pode ter potencializado o contato dos peixes com o material e, consequentemente, ampliado os índices de contaminação nos espécimes. Apesar de o lago da UHE Baguari ter retido grande quantidade de rejeito, não há indícios de contaminação nos peixes obtidos no lago. De acordo com os autores, esse resultado pode estar relacionado com o fato de o lago apresentar grande profundidade e volume de água, o que reduziria o contato dos animais com o fundo, principalmente com o rejeito, minimizando os efeitos deste sobre a biota.

Estudos anteriores ao desastre já indicavam acúmulo de diferentes elementos nos tecidos de peixes coletados em afluentes e ao longo do rio Doce (JORDÃO et al., 1996; PALMIERI; LEONEL, 2000; ANDRADE, 2003; RAMOS, 2005; PALMIERI, 2006; QUEIROZ, 2006; VEADO et al., 2008; ARANTES et al., 2009; MORAIS, 2009; ANDRADE et al., 2010). Porém, a maior parte desses estudos (JORDÃO et al., 1996; QUEIROZ, 2006; VEADO et al., 2008; ARANTES et al., 2009; MORAIS, 2009; ANDRADE et al., 2010)

foi realizada exclusivamente no rio Piracicaba, o qual não foi atingido pelo desastre. Entre as referências bibliográficas restantes, apenas o estudo de Andrade (2003) possui algum ponto de amostragem no rio Doce, o qual foi diretamente afetado pela passagem da onda de lama, assim, somente esses resultados serão utilizados para comparação com os dados obtidos pós-desastre pela UFVJM (2017). No entanto, é importante ressaltar que o ponto de coleta dessa fonte bibliográfica não é exatamente o mesmo amostrado no estudo desenvolvido pela UFVJM (2017), do mesmo modo que também não foram amostradas as mesmas espécies de peixes. É importante indicar, ainda, que Andrade (2003) determinou concentrações de outros elementos que não somente os estabelecidos pela RDC nº 42 (ANVISA, 2013), os quais apresentaram elevadas concentrações (INSTITUTOS LACTEC, 2017b, dados não publicados). No entanto, apenas cádmio e chumbo serão utilizados para comparação, uma vez que são os únicos determinados tanto por Andrade (2003) quanto por UFVJM (2017). Ao compararmos os valores máximos obtidos para cada um dos elementos (Tabela 47), é possível identificar aumento na bioacumulação de cádmio, o qual passou de 0,172 mg/kg, no estudo de Andrade (2003), para 0,409 mg/kg, no estudo da UFVJM (2017), e redução na bioacumulação de chumbo, que passou de 2,146 mg/kg para 0,235 mg/kg. Porém, faz-se ressalvas a esses valores, uma vez que estes correspondem a análises pontuais e representam as concentrações máximas de cada elemento independente do período amostral. Além disso, os estudos foram realizados em um intervalo de tempo muito longo (14 anos). Sendo assim, e devido à escassez de dados obtidos tanto pré quanto pós-desastre, reforça-se a necessidade da realização de um monitoramento para melhor caracterização da bioacumulação de elementos e dos danos causados pela incorporação destes pelos peixes sobreviventes à passagem da lama.

Tabela 48 – Concentrações mínimas e máximas dos elementos arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) determinados em músculo de peixes coletados em pontos no rio Doce antes e após o desastre do rompimento da barragem de Fundão.

	Concentração dos elementos (mg/kg)								Referências bibliográficas
	As		Cd		Hg		Pb		
	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	
Pré-desastre	nd	nd	0,065*	0,172	nd	nd	0,721*	2,146*	Andrade (2003)
Pós-desastre	0,529	1,385	0,005	0,409*	0,349	0,944	0,096	0,235	UFVJM (2017)

Nota: Dados apresentados em negrito e acompanhados de asterisco representam as maiores concentrações encontradas; nd: não determinado

Juncá et al. (2017), por sua vez, avaliaram os impactos do rejeito sobre o estágio larval de anfíbios, mais comumente denominados girinos. Para isso, os pesquisadores realizaram coleta de girinos em 25 pontos (poças, lagos, rios), divididos entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, para a determinação da capacidade de bioacumulação dos elementos Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti, V e Zn nesses organismos. Entre os 25 pontos de coleta, apenas 14 possuíam girinos, embora esses organismos fossem, no passado, comumente amostrados em todos os pontos selecionados. Desses 14 pontos, sete foram considerados controles, uma vez que não haviam sido acometidos pelo rejeito. Os pesquisadores identificaram que nos pontos atingidos pela lama houve menor diversidade e

disponibilidade de girinos em relação aos pontos controle. Apesar disso, as análises de bioacumulação realizadas nos girinos indicaram altas concentrações de metais em todos os pontos avaliados, corroborando a ocorrência de metais pesados em toda a extensão a bacia hidrográfica do rio Doce e a existência de contaminação pretérita ao desastre. No entanto, foi em dois dos pontos que tiveram contato com a lama que foram registradas as maiores concentrações de metais nas amostras de girinos. Entre os metais mais acumulados, estão: Fe (concentrações entre 344,03 a 4,673 mg/kg), Al (concentrações entre 150,32 a 3,308 mg/kg), Mn (concentrações entre 20,32 a 821,87 mg/kg) e Zn (concentrações entre 26,83 a 117,71 mg/kg). Girinos não servem de alimento à população humana. Porém, segundo os autores, foram excelentes bioindicadores, uma vez que permanecem por um período de tempo muito curto na água (apenas 30 dias) e já acumularam elevadas concentrações de metais. Assim, os autores concluem que houve grave comprometimento da fauna exposta ao rejeito.

Veronez et al. (2016), em estudo realizado em laboratório, já haviam identificado danos genotóxicos em girinos da espécie *Lithobates catesbeianus* expostos, por 30 dias, a minério de ferro ou a tratamentos com Fe e Mn, individualmente. Os dados obtidos por esses pesquisadores corroboram a ocorrência de quebras nos cromossomos e de alterações em processos de divisão celular em girinos expostos a esses contaminantes, exatamente como identificado nos estudos realizados com peixes (SEGURA et al., 2016; VARGAS et al., 2016). Adicionalmente, esses autores identificaram que a exposição a minério de ferro ou a Fe e Mn isoladamente pode causar alterações bioquímicas, como estresse oxidativo, bioacumulação de metais, especificamente Fe e Mn, além de retardo na metamorfose. Todos esses fatores podem impactar esses organismos e contribuir para um declínio da população de anfíbios, tanto de forma direta, através de prejuízos causados por esses elementos em funções orgânicas essenciais, ou de forma indireta, por manter os anfíbios em uma fase de desenvolvimento geralmente mais sensível a ataques de predadores.

Como há, ainda, grande quantidade de material em toda a extensão da calha do rio Doce, esse material pode sofrer processos erosivos e constituir-se, portanto, numa fonte contínua de alimentação dos cursos d'água com sedimentos, especialmente durante o período chuvoso, elevando os níveis de contaminantes no ambiente, ampliando as possibilidades de bioacumulação e/ou agravando os efeitos tóxicos sobre a biota (IBAMA, 2015; FERNANDES et al., 2016; HATJE et al., 2017; UFES, 2017). Além disso, metais como Fe e Mn não se degradam e permanecem solubilizados na água e/ou precipitado no sedimento de fundo por longo período de tempo (SARTORI et al., 2017). Assim, não é possível descartar, até o presente momento, que a biota que sobreviveu e se encontra na calha do rio Doce ou em afluentes próximos à área afetada pelo desastre não será impactada pela presença do rejeito acumulado em toda a extensão do rio.

FOZ DO RIO DOCE

No dia 21 de novembro de 2015, a lama de rejeitos chegou à foz do rio Doce. O material que atingiu essa região foi caracterizado como muito fino, seguindo o mesmo padrão descrito para o material encontrado na calha do rio Doce (SEGURA et al., 2016; UFES, 2016a; b; HATJE et al., 2017; JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017), no entanto, com características bastante diferentes do material que normalmente

ocorre na foz do rio Doce, mesmo em épocas de cheia (UFES, 2016 a; b; UERJ, 2016; UFES 2017). Cabe lembrar que existe uma grande preocupação com materiais de características granulométricas tão finas, pois, normalmente, contaminantes se associam mais facilmente a essas partículas constituídas, basicamente, de grânulos de silte ou argila, devido às características de ligações químicas que estas propiciam (PIRES et al., 2003; PUPPIM, 2014; SEGURA et al., 2016; UFES, 2016b; HATJE et al., 2017; JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017). Além disso, metais pesados apresentam elevada correlação com a presença de ferro, metal abundante no rejeito (PIRES et al., 2003; JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017).

Corroborando essa informação foi identificado aumento nas concentrações totais de metais e semimetais em amostras de água e sedimentos coletadas na foz do rio Doce (FAURG, 2016a; b; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016 a; b; d; f; NETO et al., 2016; UFES, 2016 a; b; 2017). Nas amostras de água, houve aumento nas concentrações dos elementos arsênio (As), alumínio (Al), bário (Ba), ferro (Fe), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni), vanádio (V) e zinco (Zn) (FAURGa; b; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; ICMBio, 2016a; b; d; f; NETO et al., 2016; UFES, 2016a; b; 2017). Nas amostras de sedimento, houve aumento nas concentrações de Al, As, Ba, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni e Zn (ICMBio, 2016b; UFES, 2016b; 2017). Segundo pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo (2016a; b; 2017), esse aumento pode ser resultado do sinergismo das diferentes alterações que aconteceram em toda a extensão do rio Doce e região costeira adjacente em decorrência da passagem da lama, como, por exemplo, alterações em processos de adsorção e dessorção, os quais regulam a mobilidade de metais em ambientes aquáticos.

Ao compararmos os resultados obtidos através das análises de água, com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas de classe 1, identificam-se concentrações, especialmente as totais, excessivamente elevadas em relação à legislação (ICMBio, 2016a; b; d; f; UFES, 2016a; b; 2017), bem como superiores às concentrações determinadas antes da chegada do rejeito na foz do rio Doce (FAURG, 2016a; b; ICMBio, 2016d; f; UFES, 2017). Do mesmo modo, os resultados obtidos para sedimentos também foram superiores aos regulamentados pela Resolução CONAMA nº 454/2012 (UFES, 2017) e ao descrito por Puppim (2014) em estudo pretérito ao desastre. Nesse estudo, onde foram monitoradas as concentrações de Cu, Cr, Fe, Ni e Zn, em amostras de sedimento da região da foz do rio Doce, foi identificada maior ocorrência e concentração de Cu, Cr, Ni e Zn na foz do rio Doce e de Fe mais ao sul desta. Porém, as médias das concentrações desses elementos descartaram, na época, a ocorrência de contaminação por esses metais ao longo da extensão monitorada. Diferentemente, os dados apresentados sobre as concentrações de metais e semimetais após a chegada da onda de lama na foz do rio Doce sugerem que a ocorrência do evento provocou a mobilização significativa de metais não associados à atividade de mineração, bem como elevou os níveis daqueles metais diretamente relacionados a essa atividade (FAURG, 2016b; ICMBio, 2016a; b; d; f; UFES, 2016a; b). É importante indicar que foram observados padrões temporais distintos na concentração dos diferentes elementos analisados tanto em água quanto em sedimentos, bem como uma redução nas concentrações dos elementos em pontos mais distantes da foz em decorrência da diluição da pluma. Apesar disso, as análises físico-químicas da água evidenciam a contribuição da foz do rio Doce para o aumento das concentrações desses elementos nas águas costeiras (FAURG, 2016a; b; ICMBio, 2016a; b; d; f; UFES, 2016a; b; 2017).

Além do incremento nas concentrações de metais e semimetais, a chegada da onda de lama de rejeitos na região marinha-estuarina desencadeou significativo aumento nas concentrações de nutrientes nitrogenados (nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal), especialmente nitrato, mesmo que apenas em uma campanha ou em pontos isolados, provavelmente resultantes da oxidação de éter mono e diaminas, compostos utilizados na flotação de minério de ferro (UFES, 2017). Houve, ainda, registro de aumento nas concentrações de ortofosfato, silício reativo e hidrocarbonetos alifáticos e policíclicos aromáticos na região da foz do rio Doce, os quais, provavelmente, tenham acompanhado a onda de rejeitos de minérios (UFES, 2017). Todos esses compostos, em conjunto com os metais e semimetais, contribuiriam para diferentes alterações na dinâmica da região costeira adjacente, sejam elas alterações físicas, químicas ou biológicas, como, por exemplo, alterações nas comunidades fito e zooplanctônica e, conseqüentemente, em toda a cadeia alimentar (BRASIL, 2015; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016f; UFES, 2016a; b; 2017), ou, ainda, aumento no crescimento de determinadas algas, produtoras de toxinas, devido à elevada disponibilidade de ferro e de nutrientes, as quais podem contribuir para alterações no ecossistema costeiro da região afetada (ICMBio, 2016f; 2017; UFES, 2017).

Diferentemente do que ocorreu no rio Doce, desde a chegada da lama na região da foz, a pesca foi legalmente interrompida pela Justiça Federal do Espírito Santo, processo nº 0002571-13.2016.4.02.5004 (2016.50.04.002571-0) datada de 17/02/2016, em uma faixa delimitada ao sul pela Barra do Riacho, no município de Aracruz, ao norte pela praia de Degredo, no município de Linhares, e ao leste até onde a plataforma continental alcança 25 metros (GOLDER ASSOCIATES, 2016a; ICMBio, 2016b; c; LEONARDO et al., 2017). Do mesmo modo, estudos de bioacumulação em amostras de organismos (zooplâncton, moluscos, crustáceos e peixes) da biota aquática da região (ECONSERVATION, 2016; FAURG, 2016a; b; ICMBio 2016a; b; d; e; f; SAMARCO, 2016) e de avaliação de estresse fisiológico (peroxidação lipídica) em amostras de zooplâncton e corais (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016a; b; d; e; f) estão sendo realizados desde a primeira semana pós-desastre na região marinha-estuarina.

Os estudos realizados pela Econservation (2016) entre os meses de dezembro/2015 e fevereiro/2016 avaliaram a bioacumulação de metais e metalóides (arsênio, alumínio, bário, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, níquel, prata, selênio e zinco) em espécimes de moluscos (ostra, *Crassostrea rhizophorae*), crustáceos (camarão, *Xiphopenaeus kroyeri*) e peixes (*Rhizoprionodon porosus* – cação, *Lycengraulis grossidens* – manjubão, *Aspistor luniscutis* – bagre, *Bagre bagre* – bagre bandeira, *Bagre marinus* – bagre bandeira, *Cathorops spixii* – bagre amarelo, *Genidens barbatus* – bagre, *Genidens genidens* – bagre, *Notarius grandicassis* – bagre, *Centropomus undecimalis* – robalo flecha, *Eugerres brasiliensis* – carapeba, *Conodon nobilis* – roncador, *Polydactylus virginicus* – barbudo, *Cynoscion jamaicensis* – pescada, *Larimus breviceps* – cangoá, *Macrodon ancylodon* – pescadinha, *Macrodon atricauda* – pescadinha, *Menticirrhus americanus* – pé de banco, *Nebris microdon* – pescada mole, *Paralichthys brasiliensis* – roncador do norte ou Maria Luiza, *Stellifer brasiliensis* – cangoá, *Stellifer rastrifer* – cangoá, *Scomberomorus cavala* – sarda, *Scomberomorus regalis* – sarda, *Peprilus paru* – gordinho) coletados, quando presentes, em cinco diferentes regiões (Barra Seca, Barra Nova, Regência, Barra do Riacho, Santa Cruz) entre os municípios de São Mateus e Aracruz. As espécies investigadas foram escolhidas por serem as de maior interesse comercial ou as mais consumidas pela população local. A seguir, são apresentados os dados referentes à média dos valores obtidos

para ostras (Tabela 48), camarões (Tabela 49) e peixes (Tabela 50) em cada uma das regiões avaliadas. Cabe ressaltar que os resultados apresentados para peixes representam médias ou medianas, as quais incluem dados de todos os organismos encontrados em cada uma das localidades amostradas, sem distinção de espécie ou hábito alimentar. Essas informações são importantes para a discussão dos dados tanto em relação às concentrações máximas permitidas pelas legislações quanto em relação à possibilidade/ocorrência de biomagnificação. Ou seja, segundo estabelecido pela legislação vigente no Brasil (ANVISA RDC nº 42/2013¹), o limite máximo de cádmio para peixes crus, congelados ou refrigerados é de 0,05 mg/kg, com as seguintes exceções: 0,10 mg/kg para bonito, carapeba, enguia, tainha, jurel, imperador, cavala, sardinha, atum e linguado; 0,20 para melva; e 0,30 mg/kg para anchova e peixe-espada. No caso do mercúrio, os limites são de 0,5 ou 1,0 mg/kg para peixes não predadores e predadores, respectivamente. Assim, como no relatório da Econservation (2016) não foram apresentadas as médias/medianas obtidas para cada uma das espécies amostradas, essas peculiaridades deixaram de ser consideradas.

Tabela 49 – Média $\pm$ desvio padrão dos valores de bioacumulação (mg/kg de peso úmido - PU) obtidos de moluscos (ostras, *Crassostrea rhizophorae*) coletados em cinco diferentes localidades ao longo da costa do estado do Espírito Santo durante oito semanas após a chegada da lama à foz do rio Doce (entre dez./2015 e fev./2016).

Elementos (mg/kg PU)	Localidades amostradas					
	Regência					
	Barra Nova	Barra Seca	Foz	Costa	Barra do Riacho	Santa Cruz
Arsênio (As)	nd	2,25$\pm$2,28*	nd	nd	nd	2,41$\pm$3,35*
Ferro (Fe)	nd	65,07 $\pm$ 57,64	nd	nd	nd	32,34 $\pm$ 13,92
Alumínio (Al)	nd	42,26 $\pm$ 52,32	nd	nd	nd	57,83 $\pm$ 40,55
Bário (Ba)	nd	0,060 $\pm$ 0,035	nd	nd	nd	0,050 $\pm$ 0,030
Cádmio (Cd)	nd	0,024 $\pm$ 0,013	nd	nd	nd	0,027 $\pm$ 0,009
Cromo (Cr)	nd	0,084 $\pm$ 0,076	nd	nd	nd	0,129 $\pm$ 0,269
Chumbo (Pb)	nd	0,051 $\pm$ 0,111	nd	nd	nd	0,015 $\pm$ 0,007
Cobre (Cu)	nd	4,52 $\pm$ 2,55	nd	nd	nd	1,79 $\pm$ 0,58
Cobalto (Co)	nd	0,05 $\pm$ 0,06	nd	nd	nd	0,04 $\pm$ 0,03
Manganês (Mn)	nd	2,67 $\pm$ 1,41	nd	nd	nd	2,13 $\pm$ 0,81
Mercúrio (Hg)	nd	0,006 $\pm$ 0,003	nd	nd	nd	0,006 $\pm$ 0,004
Níquel (Ni)	nd	0,15 $\pm$ 0,08	nd	nd	nd	0,09 $\pm$ 0,07
Prata (Ag)	nd	0,01 $\pm$ 0,00	nd	nd	nd	0,01 $\pm$ 0,00
Selênio (Se)	nd	0,26 $\pm$ 0,12	nd	nd	nd	0,21 $\pm$ 0,10
Zinco (Zn)	nd	64,16 $\pm$ 31,31	nd	nd	nd	67,17 $\pm$ 29,20

Nota: Dados em negrito e acompanhados de asteriscos representam valores acima dos limites máximos estabelecidos pela Resolução Anvisa (RDC nº 42/2013), nd = não determinado.

Fonte: Adaptado de Econservation (2016).

¹ Esta resolução não apresenta nome científico das espécies de peixes para as quais são estabelecidas algumas restrições quanto ao limite máximo de contaminantes inorgânicos.

Tabela 50 – Média $\pm$ desvio padrão dos valores de bioacumulação (mg/kg de peso úmido - PU) obtidos de crustáceos (camarões, *Xiphopenaeus kroyeri*) coletados em cinco diferentes localidades ao longo da costa do estado do Espírito Santo durante oito semanas após a chegada da lama à foz do rio Doce (entre dez./2015 e fev./2016).

Elementos (mg/kg PU)	Localidades amostradas					
	Regência					
	Barra Nova	Barra Seca	Foz	Costa	Barra do Riacho	Santa Cruz
Arsênio (As)	8,69$\pm$2,88*	8,90$\pm$2,57*	nd	8,86$\pm$3,74*	7,71$\pm$3,38*	4,63$\pm$3,91*
Ferro (Fe)	28,08 $\pm$ 13,09	28,75 $\pm$ 13,34	nd	36,37 $\pm$ 21,57	31,94 $\pm$ 32,18	15,51 $\pm$ 14,01
Alumínio (Al)	31,51 $\pm$ 13,71	43,35 $\pm$ 23,33	nd	36,15 $\pm$ 18,83	33,87 $\pm$ 11,82	14,98 $\pm$ 10,13
Bário (Ba)	0,103 $\pm$ 0,091	0,074 $\pm$ 0,041	nd	0,161 $\pm$ 0,167	0,099 $\pm$ 0,037	0,026 $\pm$ 0,016
Cádmio (Cd)	0,004 $\pm$ 0,003	0,004 $\pm$ 0,002	nd	0,006 $\pm$ 0,005	0,005 $\pm$ 0,003	0,007 $\pm$ 0,011
Cromo (Cr)	0,055 $\pm$ 0,027	0,065 $\pm$ 0,028	nd	0,060 $\pm$ 0,025	0,059 $\pm$ 0,023	0,029 $\pm$ 0,019
Chumbo (Pb)	0,019 $\pm$ 0,010	0,018 $\pm$ 0,013	nd	0,020 $\pm$ 0,012	0,059 $\pm$ 0,175	0,019 $\pm$ 0,010
Cobre (Cu)	3,88 $\pm$ 0,47	4,63 $\pm$ 1,42	nd	4,45 $\pm$ 1,27	3,81 $\pm$ 0,98	2,68 $\pm$ 2,04
Cobalto (Co)	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00	nd	0,02 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,00	0,02 $\pm$ 0,01
Manganês (Mn)	0,97 $\pm$ 1,44	0,79 $\pm$ 0,65	nd	0,74 $\pm$ 0,56	0,65 $\pm$ 0,42	0,59 $\pm$ 0,95
Mercúrio (Hg)	0,018 $\pm$ 0,010	0,016 $\pm$ 0,008	nd	0,01 $\pm$ 0,01	0,011 $\pm$ 0,006	0,018 $\pm$ 0,019
Níquel (Ni)	0,03 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01	nd	0,03 $\pm$ 0,03	0,03 $\pm$ 0,04	0,03 $\pm$ 0,05
Prata (Ag)	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00	nd	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00
Selênio (Se)	0,85 $\pm$ 0,43	0,75 $\pm$ 0,29	nd	0,68 $\pm$ 0,37	0,54 $\pm$ 0,25	0,38 $\pm$ 0,018
Zinco (Zn)	9,59 $\pm$ 1,48	10,22 $\pm$ 2,30	nd	12,17 $\pm$ 10,44	9,41 $\pm$ 1,80	11,94 $\pm$ 14,27

Nota: Dados em negrito e acompanhados de asteriscos representam valores acima dos limites máximos estabelecidos pela Resolução Anvisa (RDC nº 42/2013), nd = não determinado.

Fonte: Adaptado de Econservation (2016).

Tabela 51 – Média $\pm$ desvio padrão dos valores de bioacumulação (mg/kg de peso úmido - PU) obtidos de peixes (diferentes espécies) coletados em cinco diferentes localidades ao longo da costa do estado do Espírito Santo durante oito semanas após a chegada da lama à foz do rio Doce (entre dez./2015 e fev./2016).

Elementos (mg/kg)	Localidades amostradas					
	Regência					
	Barra Nova	Barra Seca	Foz	Costa	Barra do Riacho	Santa Cruz
Arsênio (As)	6,64$\pm$6,79*	4,45$\pm$5,98*	1,22$\pm$3,79*	2,49$\pm$2,66*	2,33$\pm$3,28*	1,99$\pm$2,57*
Ferro (Fe)	1,29 $\pm$ 1,35	1,60 $\pm$ 1,03	3,03 $\pm$ 2,51	2,47 $\pm$ 3,42	1,95 $\pm$ 2,35	9,58 $\pm$ 37,48
Alumínio (Al)	0,76 $\pm$ 0,80	1,05 $\pm$ 0,92	1,30 $\pm$ 1,70	2,41 $\pm$ 6,88	1,18 $\pm$ 2,34	2,02 $\pm$ 8,71
Bário (Ba)	0,008 $\pm$ 0,002	0,012 $\pm$ 0,015	0,652 $\pm$ 1,067	0,042 $\pm$ 0,108	0,010 $\pm$ 0,006	0,011 $\pm$ 0,011
Cádmio (Cd)	0,003 $\pm$ 0,003	0,003 $\pm$ 0,002	0,003 $\pm$ 0,001	0,003 $\pm$ 0,002	0,004 $\pm$ 0,002	0,008 $\pm$ 0,016
Cromo (Cr)	0,016 $\pm$ 0,012	0,014 $\pm$ 0,007	0,021 $\pm$ 0,017	0,023 $\pm$ 0,029	0,031 $\pm$ 0,046	0,019 $\pm$ 0,018
Chumbo (Pb)	0,018 $\pm$ 0,023	0,011 $\pm$ 0,003	0,015 $\pm$ 0,011	0,019 $\pm$ 0,021	0,016 $\pm$ 0,016	0,015 $\pm$ 0,015
Cobre (Cu)	0,09 $\pm$ 0,05	0,11 $\pm$ 0,05	0,14 $\pm$ 0,11	0,14 $\pm$ 0,09	0,13 $\pm$ 0,07	0,23 $\pm$ 0,45
Cobalto (Co)	0,01 $\pm$ 0,00	2,14 $\pm$ 14,72	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00	0,01 $\pm$ 0,00

Elementos (mg/ kg)	Localidades amostradas					
	Regência					
	Barra Nova	Barra Seca	Foz	Costa	Barra do Riacho	Santa Cruz
Manganês (Mn)	0,07±0,07	0,14±0,27	0,12±0,09	0,20±0,48	0,16±0,38	0,48±1,28
Mercurio (Hg)	0,097±0,076	0,125±0,127	0,12±0,15	0,059±0,134	0,038±0,028	0,060±0,050
Níquel (Ni)	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,02±0,02	0,01±0,01	0,01±0,01
Prata (Ag)	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00	0,01±0,00
Selênio (Se)	0,46±0,26	0,33±0,13	0,34±0,16	0,33±0,23	0,36±0,15	0,33±0,18
Zinco (Zn)	2,33±0,96	2,76±1,29	7,34±10,91	2,01±0,61	2,26±0,75	5,62±9,12

Nota: Dados em negrito e acompanhados de asteriscos representam valores acima dos limites máximos estabelecidos pela Resolução Anvisa (RDC nº 42/2013), nd = não determinado.

Fonte: Adaptado de Econservation (2016).

Nas legislações vigentes no Brasil para estabelecimento de limites máximos de contaminantes inorgânicos em alimentos estão preconizados os limites para antimônio, arsênio, cádmio, cobre, chumbo, cromo, estanho, mercúrio, níquel, selênio e zinco (BRASIL, 1965; ANVISA, 1998; 2013). Entre os elementos avaliados pela Econservation (2016) e comparados com essas legislações, apenas o arsênio foi identificado em não conformidade, uma vez que apresentou elevadas concentrações (ou seja, acima de 1,0 mg/kg) em todos os organismos (especialmente em camarões) e pontos analisados. Bioacumulação de arsênio já havia sido registrada em moluscos e peixes coletados em diferentes locais da costa do Espírito Santo (SOUZA et al., 2013; APLYSIA, 2017), especialmente próximo à região de Vitória, a qual é impactada por diferentes fontes antrópicas. Com relação, especificamente, aos peixes coletados na região da foz do rio Doce, a média da concentração de arsênio encontrada (1,22±3,79 mg/kg PU; Tabela 50) foi a menor em relação aos demais pontos amostrados. No entanto, é importante ressaltar que a amplitude de variação das concentrações determinadas em todos os peixes obtidos nessa região foi bastante grande, de 0,01 até 21,96 mg/kg PU (ECONSERVATION, 2016). Além disso, a concentração média encontrada para os peixes coletados na foz do rio Doce, além de ser 22% superior às legislações vigentes no Brasil (BRASIL, 1965; ANVISA, 1998; ANVISA; 2013), é de 5.709% superior ao limite máximo estabelecido para consumo diário (US EPA, 2009) e 8.033% superior ao limite máximo para consumo semanal (FAO/OMS, 2016) quando comparada às legislações internacionais vigentes. Cabe a ressalva que as legislações brasileiras não esclarecem se os limites máximos estabelecidos se referem ao máximo tolerado para consumo diário, semanal ou mensal.

Segundo discussão apresentada no relatório da Econservation (2016), devido ao arsênio possuir diferentes especiações químicas, entre as quais, apenas a fração inorgânica seria tóxica aos organismos, as elevadas concentrações de As encontradas (que correspondem a frações totais) não significam toxicidade do elemento à biota aquática, tão pouco risco à saúde humana. Ainda, segundo o relatório, o arsênio, quando presente na forma inorgânica em pescados, ocorre em quantidades muito pequenas. Denobile (2007) afirma que o pescado é reconhecidamente a fonte mais significativa de ingestão

de As por seres humanos, porém corrobora a informação de que as concentrações inorgânicas desse elemento se apresentam, em geral, baixas comparadas às concentrações totais encontradas em pescado. Desse modo, somente através de análises específicas para determinação da fração de inorgânica de As em pescado é que se torna possível inferir sobre os efeitos desse elemento sobre a biota e, mais especificamente, sobre a saúde humana.

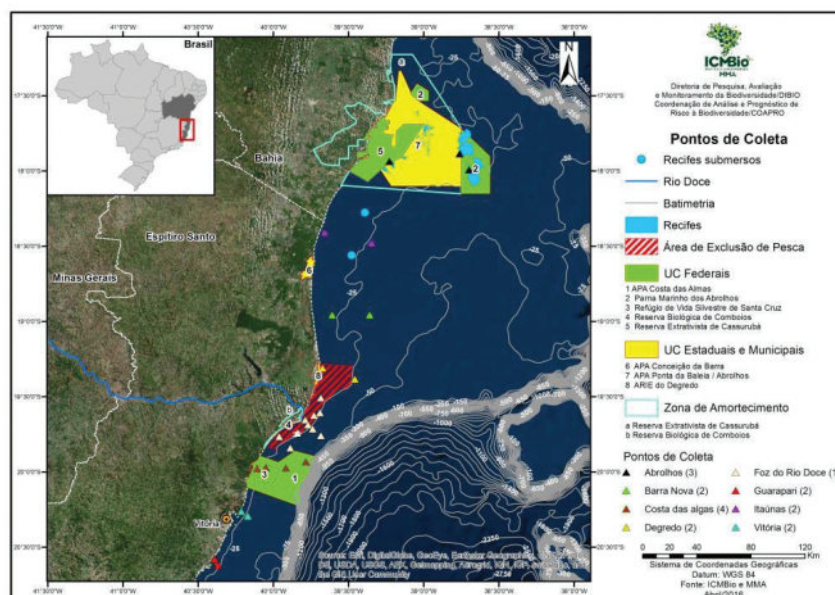
Cabe ressaltar, ainda, que não existe na legislação brasileira limites máximos estabelecidos para os elementos alumínio, bário, cobalto, ferro, manganês e prata. Além disso, no relatório da Econservation (2016), especificamente para os elementos cromo, cobre, níquel, selênio e zinco, a discussão sobre as concentrações encontradas foi realizada com base nos limites estabelecidos pela legislação federal Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965, que dispõe apenas sobre normas reguladoras para o emprego de aditivos em alimentos (BRASIL, 1965). Nesse sentido, se consideradas normas internacionais, como as estabelecidas pela *Codex Alimentarius Commission* (FAO/OMS 2016), para a avaliação desses elementos supracitados, os resultados apresentados pela Econservation (2016) para moluscos, crustáceos e peixes teriam, além do arsênio, os elementos alumínio, cádmio (especificamente para ostras), cobre, ferro, mercúrio e zinco fora de conformidade, com concentrações que teriam ultrapassado valores máximos permitidos para consumo humano tanto por mês quanto por semana e, em alguns casos, por dia. Além disso, quando comparados com o estudo realizado por Niencheski et al. (2014), os resultados apresentados pela Econservation (2016) foram superiores aos valores determinados para os elementos Cd, Cr, Cu, Pb e Zn para peixes e moluscos. Apesar disso, para a Econservation (2016), Samarco (2016) e Golder Associates (2016a), não é possível estabelecer uma relação entre as elevadas concentrações de metais e metalóides (especialmente arsênio e selênio) ao longo da costa do estado do Espírito Santo e a pluma de lama proveniente do desastre, uma vez que foram encontradas, desde as primeiras coletas, não conformidades em organismos coletados em pontos distantes da foz, não havendo tempo para ocorrer acúmulo da forma como foram encontrados. No entanto, conforme já apontado na porção de água doce por alguns relatórios, a Econservation (2016) também considera que o volume de rejeitos, e a força deste, promoveu o revolvimento de sedimentos, aumentando a disponibilidade dos mais variados elementos no ambiente aquático de água doce e marinho-estuarino, e que o acúmulo de compostos nos organismos se dará ao longo e por um longo período de tempo nessas regiões.

Confirmando a contribuição da pluma de rejeitos sobre as alterações identificadas na biota aquática, estudos de monitoramento que estão sendo realizados por pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande (FURG/Coral Vivo), em parceria com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), também identificaram, desde a primeira coleta após a chegada da pluma de sedimentos na região marinha-estuarina, aumento nas concentrações de metais e semimetais (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn e Pb) em amostras de pescado (camarões e peixes) coletados em 13 (campanha 1) e 21 (campanha 2) pontos (Tabela 51; Figura 84) ao longo do litoral norte do Espírito Santo e sul da Bahia, incluindo ambientes recifais, coralíneos e algais (FAURG, 2016a; b; ICMBio, 2016a; b; d; e; f).

Tabela 52 – Descrição e coordenadas geográficas dos pontos de coleta do grupo de avaliação ecotoxicológica FURG/Coral Vivo/ICMBio.

Ponto	Estado	Área	Ponto	Campanha		Coordenadas	
				1	2	Latitude	Longitude
1			RD1	x	x	19,653167	39,786389
2			RD3	x	x	19,714556	39,736972
3		Foz do rio Doce	RD6	x	x	19,605417	39,689250
4			RD8	x	x	19,840528	39,886139
5			RD9	x	x	19,507056	39,683611
6			RD10	x	x	19,764722	39,959694
7		APA Costa das Algas	CA1	x	x	19,977593	40,108306
8			CA3	x	x	19,972194	40,048111
9	ES	Barra Nova - São Mateus	BN1	x	x	18,957417	39,358639
10			BN2	x	x	18,957417	39,608194
11		Vitória	VIX1		x	20,262193	40,212487
12			VIX2		x	20,293670	40,168049
13		Itaúnas - Conceição da Barra	ITA 1		x	18,408001	39,658504
14			ITA 2		x	18,478489	39,345227
15		Degredo - Linhares	DEG1		x	19,308584	39,671964
16			DEG2		x	19,382999	39,457405
17		APA de Setiba - Guarapari	GUA1		x	20,580440	40,389720
18			GUA2		x	20,619110	40,368510
19			AB1	x	x	17,934861	39,227222
20	BA	Abrolhos	AB2	x	x	17,991722	38,697111
21			AB4	x	x	17,883149	38,759722

Figura 84 – Mapa indicando a localização dos pontos de coleta do grupo de avaliação ecotoxicológica FURG/Coral Vivo/ICMBio.



Fonte: FAURG (2016a).

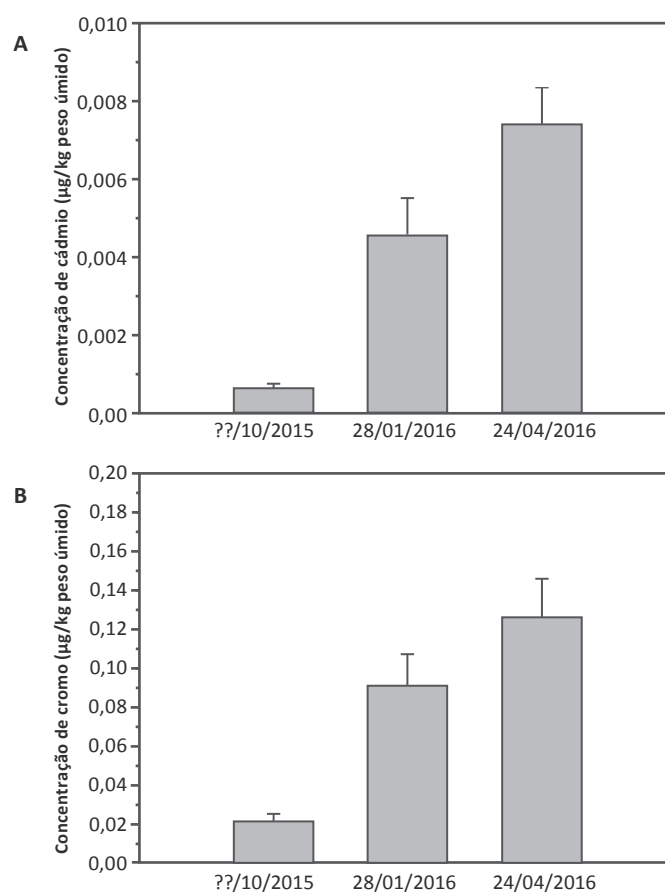
Os resultados da primeira coleta realizada a bordo do navio Soloncy Moura, entre os dias 27/01 e 03/02/2016, indicaram aumento nas concentrações de As, Cd e Pb, respectivamente, em amostras de músculos de pescados (peixes e camarões) em comparação aos limites máximos estabelecidos pela Resolução RDC nº 42 (ANVISA, 2013; Tabela 45). Foi identificado aumento em 75%; 100% e 72,7% das amostras do peixe roncador (*Conodon nobilis*, n=22); 88,9%, 95,2% e 95,2% das amostras de linguado (espécie a ser identificada, n=21); 100%, 100% e 25% das amostras de peroá (*Balistes capriscus*, n=4); 75%, 54,2% e 79,2% das amostras de camarão rosa (*Farfantepenaeus brasiliensis* e *F. paulensis*, n=24); e 90,9%, 42,9% e 71,4% das amostras de camarão-de-sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*, n=14) (ICMBio, 2016a; b; c; d; f). Do mesmo modo, os resultados dessa primeira coleta também foram superiores em comparação a valores pretéritos descritos para amostras biológicas obtidas na região marinha-estuarina estudada (JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; SOUZA et al., 2013; NIENCHESKI et al., 2014). Apesar de apenas As, Cd e Pb terem limites máximos regulamentados pela legislação brasileira (ANVISA, 2013; Tabela 45), permitindo, dessa forma, o cálculo da porcentagem de aumento das concentrações, os elementos Cr, Cu, Fe e Mn, cujos limites não são regulamentados por essa legislação, também apresentam concentrações elevadas nos organismos avaliados e, especialmente, em pontos próximos à foz do rio Doce (ICMBio, 2016a; b; d).

Além disso, os resultados dessa primeira expedição indicaram a existência de contaminação por metais fora da área de proibição estabelecida pela Justiça Federal, especificamente nas áreas de Barra Nova – São Mateus (ES) e banco de Abrolhos ao norte e UCs APA Costa das Algas e RVS de Santa Cruz ao sul (ICMBio, 2016a; b; c; e). Desse modo, no dia 15 de abril de 2016, a Anvisa publicou uma resolução (RE nº 989) que determinou a proibição da comercialização, distribuição e armazenamento do pescado oriundo da atividade pesqueira desenvolvida no mar da região, estabelecendo, dentro da área de proibição de pesca, as áreas das APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz até a obtenção de resultados mais conclusivos sobre a origem e impacto dos metais encontrados no pescado (ICMBio, 2016b; c; e).

Uma vez que a pluma de rejeitos continuou a fluir pelo rio Doce, e devido à dinâmica do ambiente marinho na foz do rio Doce contribuir para o aumento na distribuição do sedimento na região costeira, o monitoramento da pluma seguiu sendo realizado. Os resultados apresentados em relatório subsequente, referente a amostragens realizadas no período de 19 a 27 de abril de 2016, permitiram identificar a presença de Cd, Cu, Cr, Pb, As, Fe e Mn em 36%, 79%, 92%, 63%, 40%, 99,6% e 98%, respectivamente, das 493 amostras de pescado (peixes e camarões) analisadas. Porém, quando comparados aos limites estabelecidos pela Resolução RDC nº 42 (ANVISA, 2013; Tabela 45) apenas 4 amostras apresentaram concentrações de As superiores às estabelecidas pela legislação sendo, duas amostras de oveva, uma amostra de pescada e uma amostra de camarão-branco, o que corresponde a 0,8% do total de amostras analisadas. Com relação à concentração de chumbo, apenas uma amostra de camarão-rosa foi identificada em não conformidade em relação à legislação, o que representa apenas 0,2% do total de amostras de pescado analisadas (FAURG, 2016a).

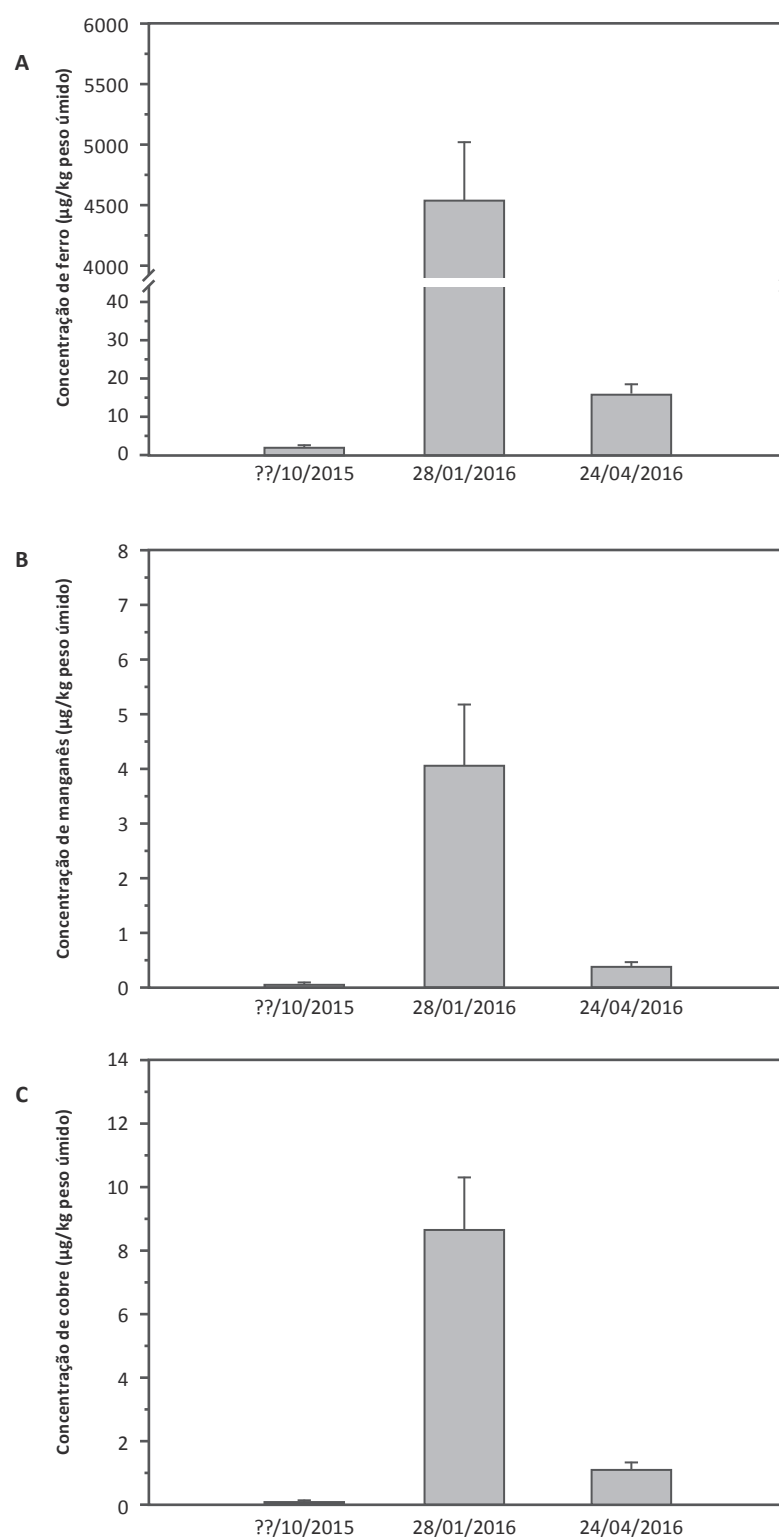
Por sua vez, a análise do relatório comparativo divulgado pela FAURG (2016b), o qual inclui dados de amostras obtidas de uma coleta realizada antes do desastre (outubro de 2015) e duas outras coletas realizadas após a ocorrência deste (abril e junho de 2016), permitiu identificar padrões distintos de bioacumulação de metais e semimetais nas amostras musculares de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e oveva), comumente denominadas pescadas. Para os elementos Cd e Cr houve um aumento significativo nas concentrações destes ao longo do tempo (Figura 85). Para Fe, Mn e Cu houve aumento significativo na primeira coleta após o desastre (28/01/2016), seguido da diminuição nas concentrações obtidas na segunda coleta após o desastre (24/04/2016), porém ainda em concentrações maiores que as encontradas para os peixes coletados antes da chegada da lama (outubro de 2015) (Figura 86). Para Pb, não foram observadas alterações entre as concentrações estabelecidas antes e após a ocorrência do desastre (Figura 87) (FAURG, 2016b).

Figura 85 – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) dos elementos cádmio (A) e cromo (B) determinadas em amostras de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e oveva) coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (outubro de 2015) e após (28/01/2016 e 24/04/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre.



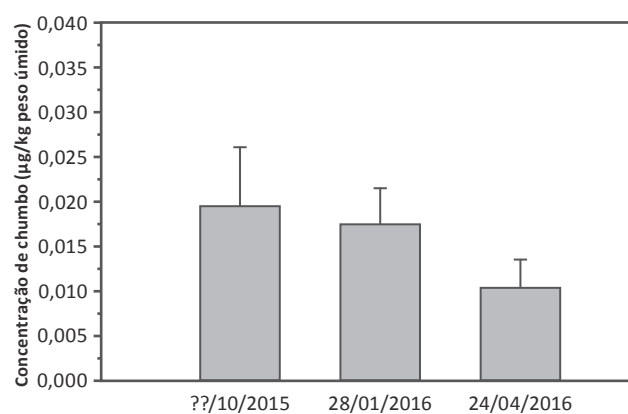
Fonte: FAURG (2016b).

Figura 86 – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) dos elementos ferro (A), manganês (B) e cobre (C) determinadas em amostras de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e oveva) coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (outubro de 2015) e após (28/01/2016 e 24/04/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre.



Fonte: FAURG (2016b).

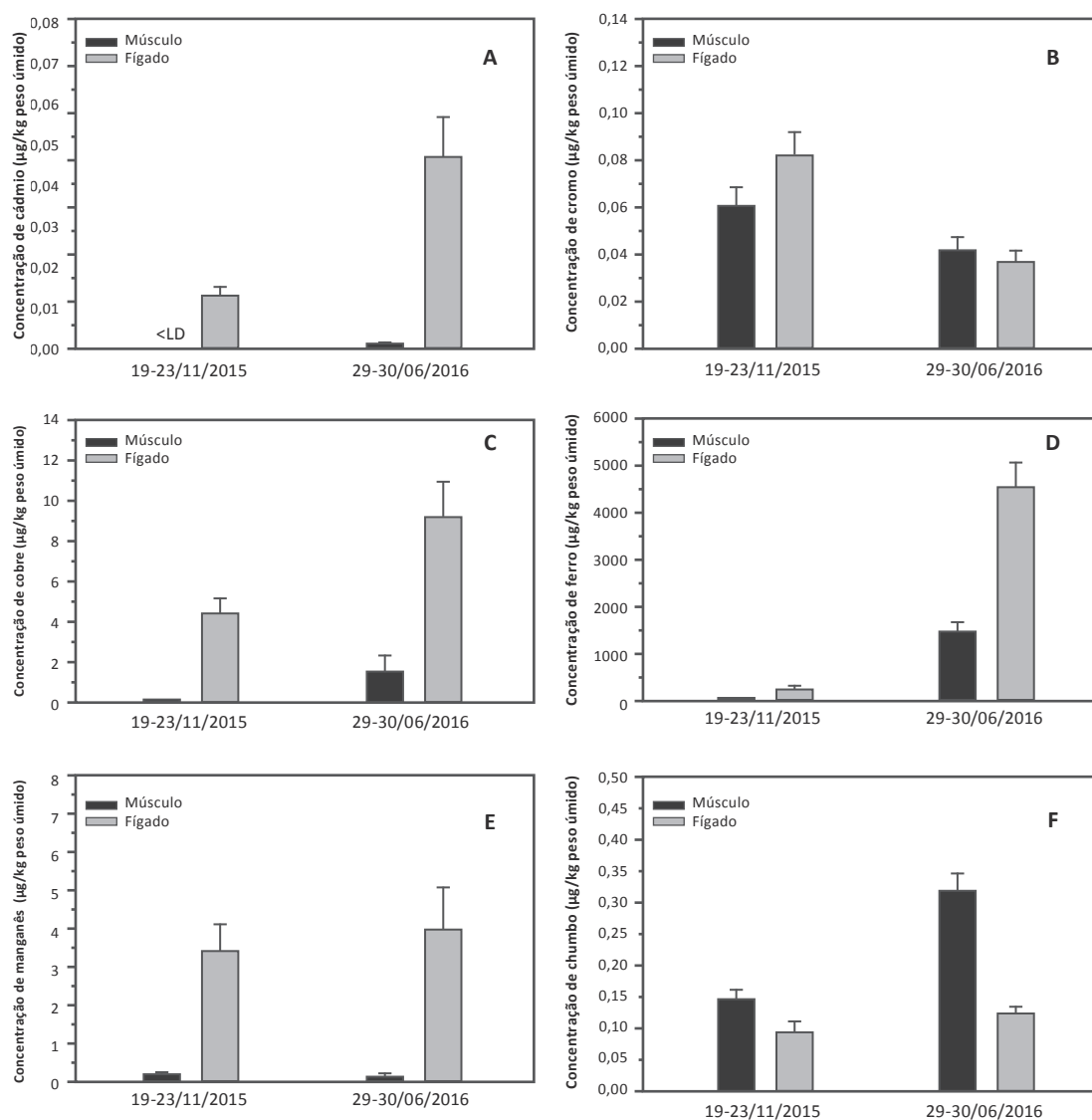
Figura 87 – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g/kg}$ peso úmido) do elemento chumbo determinadas em amostras de peixes (pescada, pescadinha, pescadão, pescada-foguete e oveva) coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (outubro de 2015) e após (28/01/2016 e 24/04/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre.



Fonte: FAURG (2016b).

Para as outras espécies de peixes (*Eucinostomus argenteus*, *Eucinostomus melanopterus*, *Pachyurus adspersus*, *Caranx latus*, *Eugerres brasiliensis*, *Cathorops spixii*, *Genidens genidens*, *Pachyurus adspersus*, *Pomadasys ramosus*, *Bairdiella ronchus*, *Pimelodus maculatus*, *Callichthys callichthys*, *Mugil liza*, *Mugil curema*, *Oligoplites saliens*, *Cynoscion sp.*, *Micropogonias furnieri* e *Centropomus parallelus*), coletadas entre 19 e 23/11/2015 e 20 e 30/06/2016, e que tiveram tanto músculo quanto fígado analisados, houve, de forma geral, um aumento significativo nas concentrações de metais e semimetais, em ambos os tecidos analisados, após o desastre quando comparadas àquelas obtidas antes deste (Figura 88) (FAURG, 2016b).

Figura 88 – Gráfico comparativo das médias das concentrações ($\mu\text{g}/\text{kg}$ peso úmido) dos elementos cádmio (A), cromo (B), cobre (C), ferro (D), manganês (E) e chumbo (F) determinadas em amostras de músculo (barra preta) e fígado (barra cinza) de peixes de diferentes espécies coletados em diferentes pontos da região marinha-estuarina do estado do Espírito Santo antes (19 a 23/11/2015) e após (20 a 30/06/2016) a chegada da pluma de sedimentos provenientes do desastre.



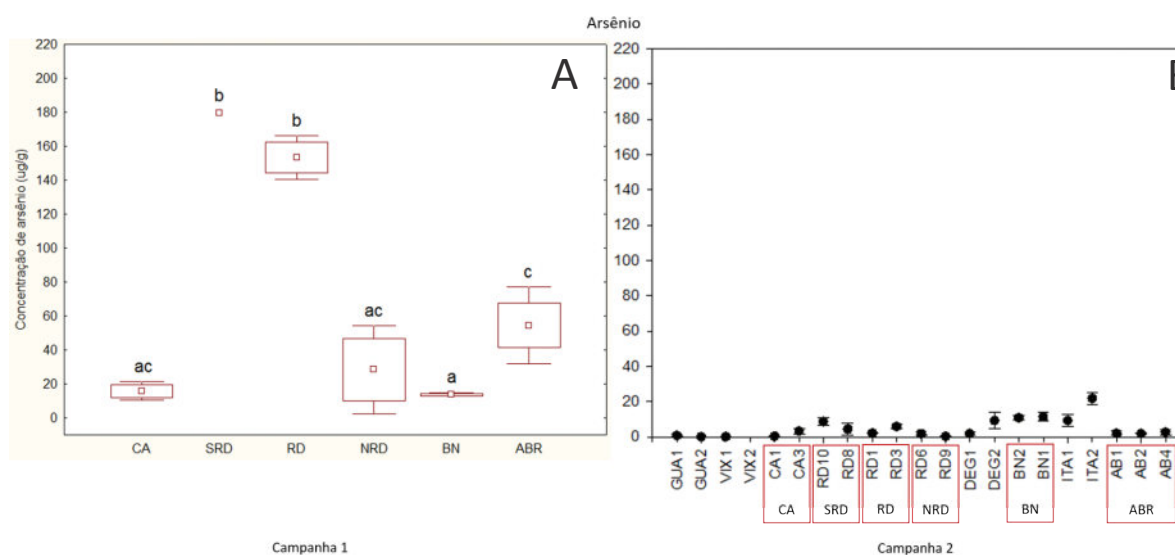
Fonte: FAURG (2016b).

O impacto da chegada da pluma de rejeitos também pôde ser avaliado por meio da identificação de bioacumulação e alterações fisiológicas (peroxidação lipídica) em invertebrados (zooplâncton e corais), os quais também foram coletados ao longo do litoral norte do Espírito Santo e sul da Bahia, incluindo a área de preservação ambiental de Abrolhos. Para isso, o zooplâncton foi selecionado como bioindicador, pois, além de constituir a base da cadeia alimentar, onde é responsável pela produção secundária, foi o único grupo encontrado em todos os pontos de coleta (exceto o ponto RD8, onde não houve coleta por problemas técnicos, Tabela 51; Figura 84). Para a região de Abrolhos, além das amostras de zooplâncton, foram analisadas amostras do hidrocoral *Millepora alcicornis*, devido sua representatividade no local (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d). É importante indicar que, para melhor visualização dos resultados das amostragens de zooplâncton realizadas na campanha 1, os autores agruparam os dados dos pontos de coleta da seguinte forma: pontos a leste da foz (RD1 e RD3) - RD; pontos ao sul da (RD8 e RD10) - SRD; ao norte da foz (RD6 e RD9) - NRD; Costa das Algas - CA, Barra Norte (BN) e Abrolhos (ABR). Na campanha 2 foram inseridos novos pontos: Vitória (VIX); Itaúnas (ITA); Degredo (DEG) e Guarapari (GUA). Sendo assim, foi possível avaliar apenas 13 pontos comparativamente.

Os resultados de bioacumulação de metais e semimetais (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn e Pb) obtidos de amostras de zooplâncton, coletadas na campanha 1, mostraram que a maior concentração desses elementos ocorreu nos organismos coletados na foz do rio Doce e adjacências (RD), seguindo um gradiente decrescente de bioacumulação em direção ao sul (SRD e/ou CA) e ao norte (NRD) (Figura 89A até Figura 95A). Os elementos Cu (Figura 92), Pb (Figura 93) e Cd (Figura 94) apresentaram concentrações distribuídas mais uniformemente, exceto em amostras de zooplâncton obtidas nos pontos BN e ABR, os quais apresentaram elevados níveis de Pb (Figura 93). O padrão espacial de acumulação corporal em zooplâncton coincide com o padrão espacial dos níveis de contaminação da água, observado para todos os metais analisados, à exceção do cobre. No que se refere à área de Abrolhos, foram encontrados níveis elevados de bioacumulação de alguns metais, especialmente Fe, Pb e Cd, com destaque para a presença de um marcado gradiente de bioacumulação de cádmio (Cd) entre os pontos de coleta naquela região, com o maior valor sendo observado nas amostras de zooplâncton coletadas na face norte do banco de Abrolhos (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016a; b; d; e; f).

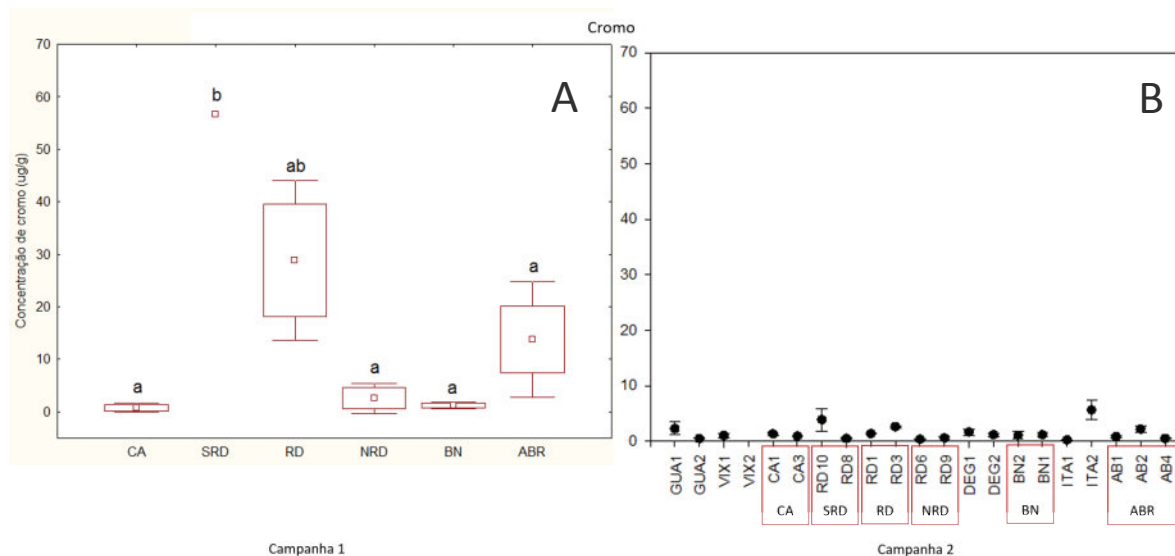
Quando os resultados de bioacumulação determinados em zooplâncton obtidos na campanha 2 foram comparados com os obtidos na campanha 1, foi possível identificar uma redução significativa nas concentrações de As, Cd, Cr, Mn, Cu e Pb, especialmente nos organismos obtidos na região da foz do rio Doce (Figura 89B a Figura 95B). Por outro lado, houve um aumento significativo nas concentrações de Fe nas amostras de zooplâncton de todos os pontos de coleta (Figura 95B) (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016a; d).

Figura 89 – Concentração corporal de arsênio ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



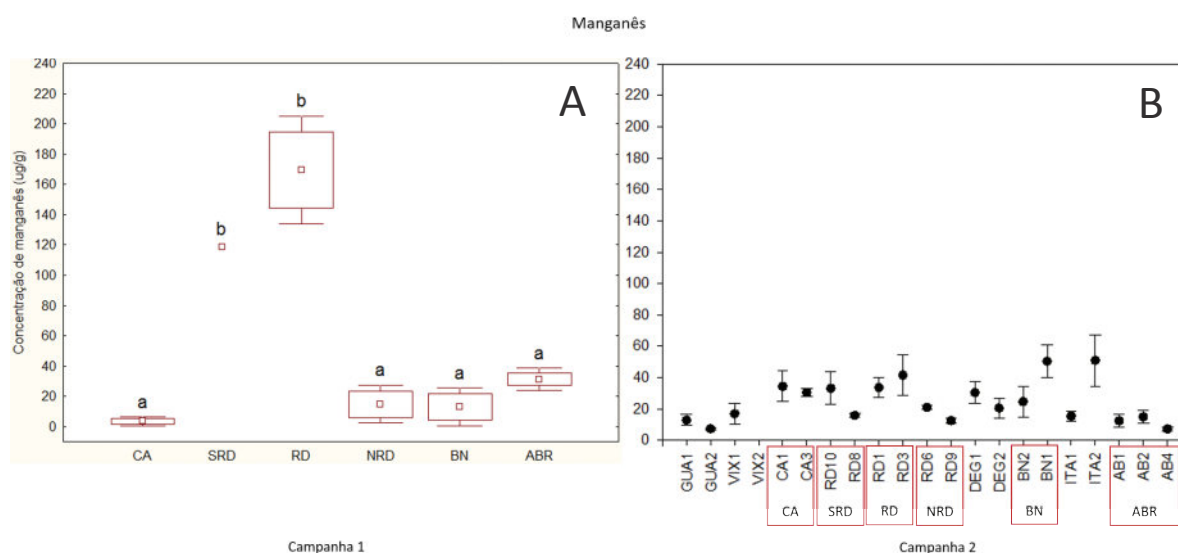
Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

Figura 90 – Concentração corporal de cromo ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



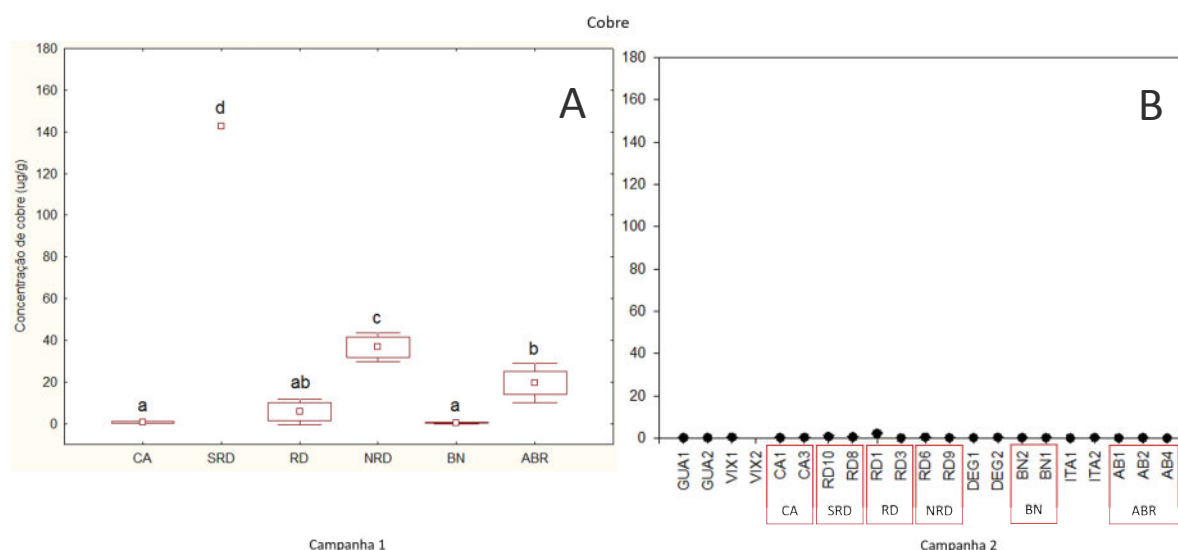
Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

Figura 91 – Concentração corporal de manganês ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



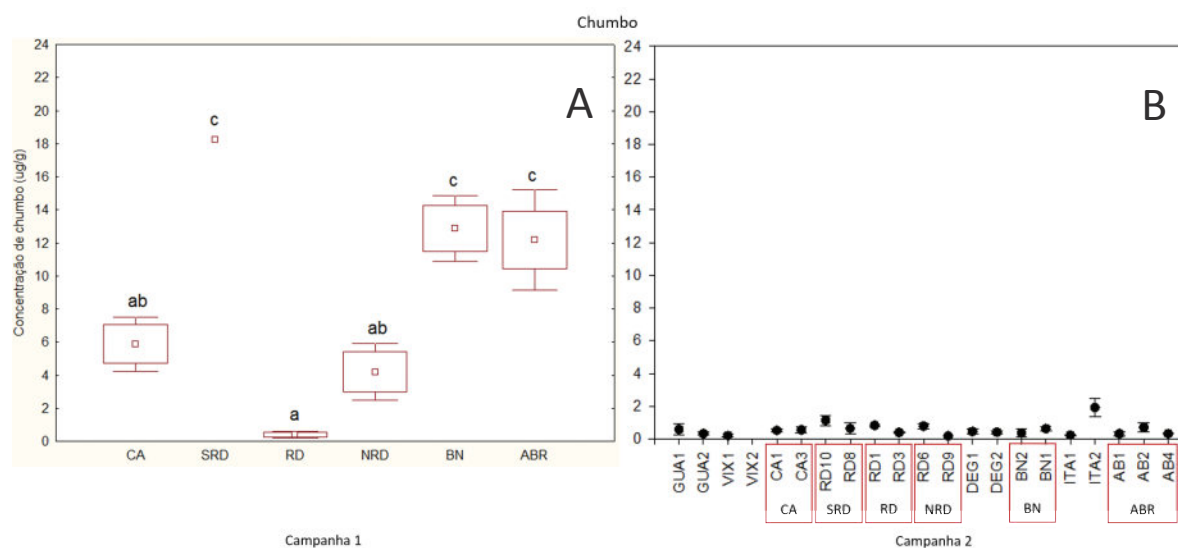
Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

Figura 92 – Concentração corporal de cobre ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



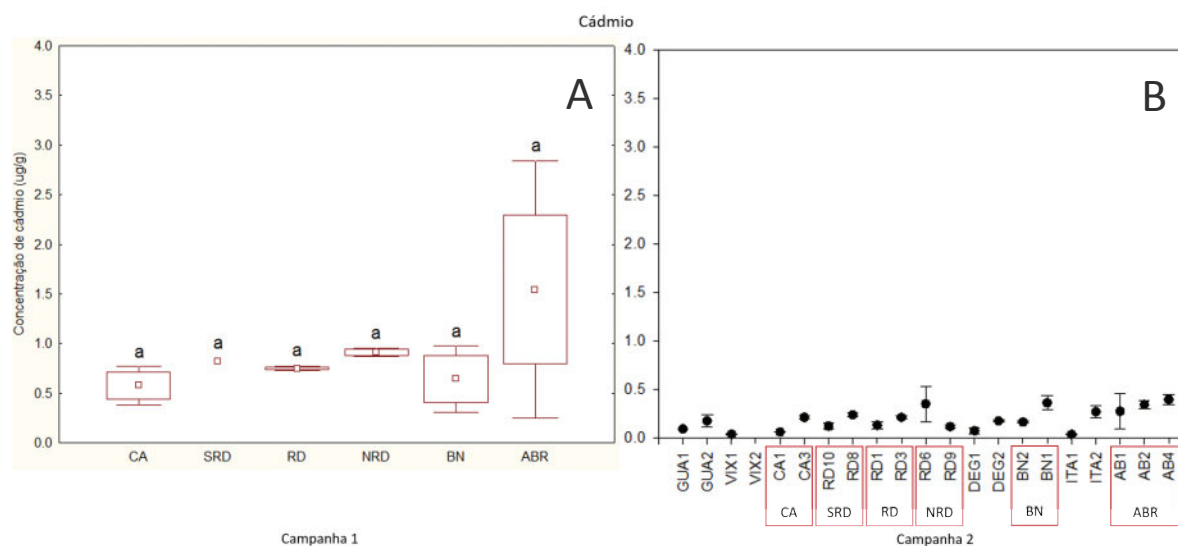
Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

Figura 93 – Concentração corporal de chumbo ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



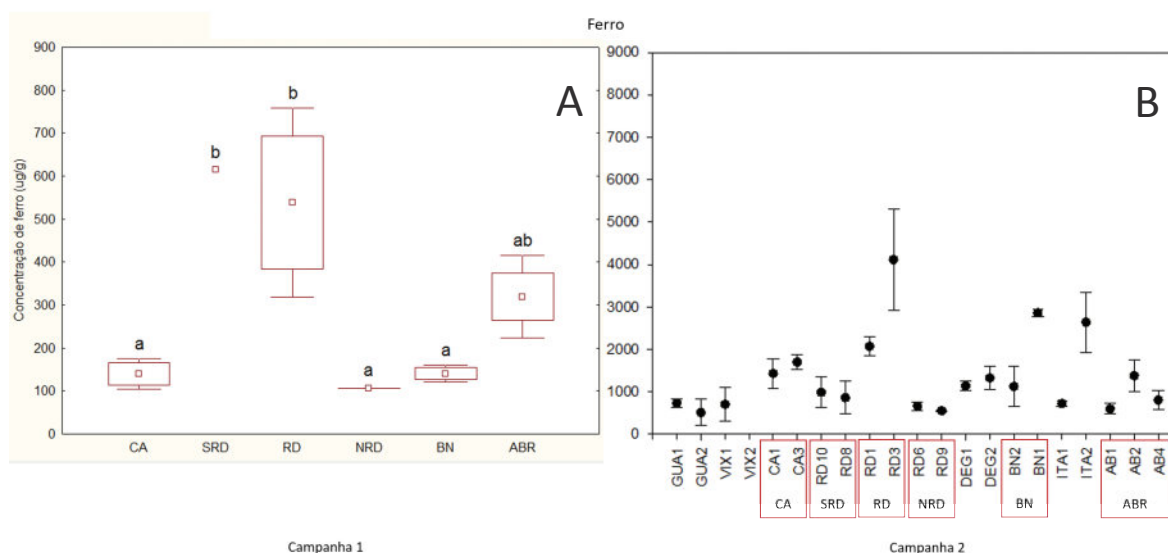
Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

Figura 94 – Concentração corporal de cádmio ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

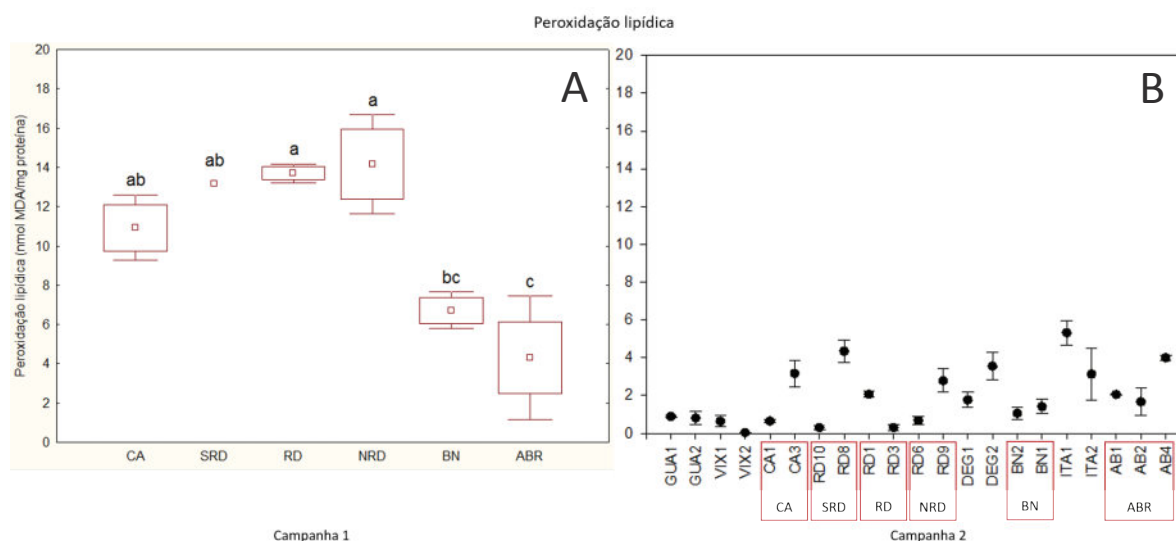
Figura 95 – Concentração corporal de ferro ($\mu\text{g/g}$ peso úmido) nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: A) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). B) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

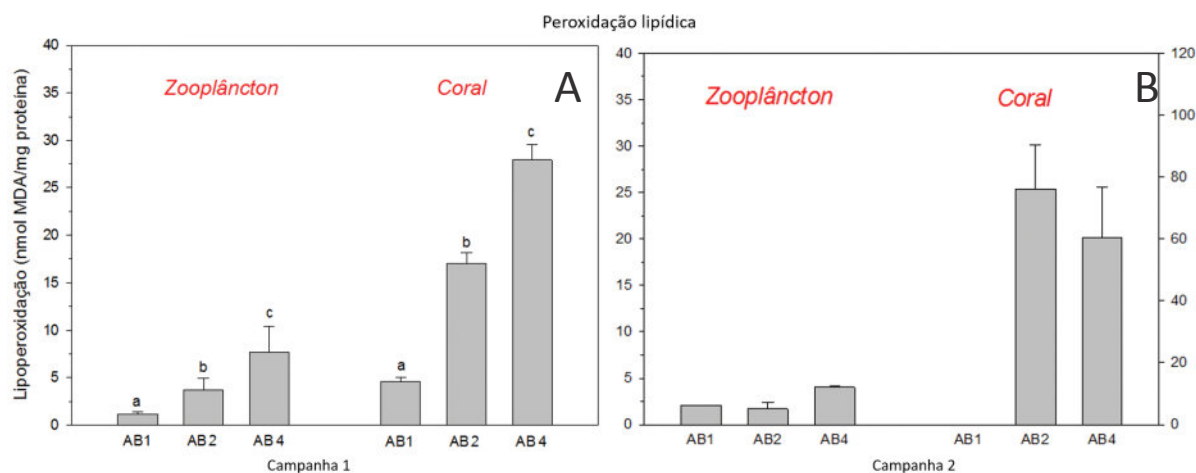
Do mesmo modo como descrito para o padrão espacial de bioacumulação, houve aumento nos níveis de estresse oxidativo (ou peroxidação lipídica) nas amostras de zooplâncton (Figura 96A e Figura 97A) e corais (*Millepora alcicornis*; Figura 97A) coletadas na campanha 1 e redução da resposta desse biomarcador nas amostras desses mesmos organismos coletados na campanha 2 (Figura 96B; Figura 97B, respectivamente), coincidindo com o padrão espacial de contaminação observado para as amostras de água, exceto para a região de Abrolhos. Segundo os pesquisadores, nessa região, embora os níveis de peroxidação lipídica tenham sido muito semelhantes entre as duas campanhas realizadas, na campanha 2 houve um aumento nos valores médios desse biomarcador em comparação aos valores médios obtidos na campanha 1. Dessa forma, além de confirmarem a influência da pluma sobre a biota aquática local, esses resultados indicam que os metais e semimetais estão disponíveis para assimilação, e que o estresse oxidativo nesses organismos está associado, ao menos em parte, aos níveis de contaminação da água. Assim, reforça-se a necessidade da manutenção do monitoramento dos efeitos da pluma de sedimentos sobre os organismos marinho-estuarinos, em especial da região de Abrolhos (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016a; b; d; e; f).

Figura 96 – Nível corporal de peroxidação lipídica nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido sul-norte: a) Campanha 1- dados expressos como média (quadrado menor) $\pm$ desvio padrão (barras verticais) e erro padrão (quadrado maior). b) Campanha 2- os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com a campanha 1.



Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

Figura 97 – Nível corporal de lipoperoxidação nas amostras de zooplâncton e hidrocoral (*Millepora alcicornis*) dos pontos de coleta na área de Abrolhos. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão.



Fonte: Modificado de FAURG (2016) e ICMBio (2016d).

CONCLUSÕES PRELIMINARES

Embora o impacto visual do desastre esteja diminuindo, os resultados apresentados pelos diferentes estudos aqui compilados confirmaram a importante mobilização e contribuição da pluma de rejeitos na contaminação das águas e biota local por metais e semimetais, sejam eles direta ou indiretamente associados à atividade de mineração. Além disso, embora haja indicação de que o material que estava em suspensão possa se depositar e se acumular no fundo, junto ao sedimento, é sabido que este foi ressuspenso e disponibilizado na coluna d'água, desencadeando, consequentemente, por um longo período, alterações significativas na qualidade da água, biogeoquímica de sedimentos, bioacumulação e efeitos de toxicidade para a biota local e até mesmo para a população humana. Assim, enquanto não houver certeza sobre a estabilização desse material, tanto na calha do rio Doce quanto na região marinha-estuarina, não será possível mensurar o comprometimento desses ambientes, e consequentemente, da biota associada a estes. Nesse sentido, ressalta-se a importância da realização do monitoramento ambiental para que se possa conhecer, exatamente, a composição e os efeitos do rejeito, bem como fazer uma previsão sobre o tempo de depuração e de recuperação do ambiente atingido. Além disso, somente através de estudos ecotoxicológicos é que será possível identificar o nível de relação entre as concentrações de elementos inorgânicos (especificamente metais e metaloides) encontrados nos diferentes organismos e a pluma de lama de rejeitos, e determinar os efeitos da pluma à biodiversidade local, além de fornecer informações essenciais sobre a contaminação desses organismos e se estes podem ou não ser utilizados para consumo humano.

APÊNDICES

Apêndice A - Limites de quantificação

Limites de Quantificação				
Variável	IGAM (MG)		IEMA (ES)	
	Antes	Depois	Antes	Depois
Alumínio Dissolvido (mg/L)	0,1	0,1	SD	0,01
Arsênio Total (mg/L)	0,0003; 0,001	0,001	SD	0,001
Chumbo Total (mg/L)	0,005	0,005	SD	0,01
Ferro Dissolvido (mg/L)	SD	SD	SD	0,01
Manganês Total (mg/L)	SD	SD	SD	SD
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	SD	SD	SD	SD
pH	SD	SD	SD	SD
Turbidez (UNT)	SD	SD	SD	SD
Zinco Total (mg/L)	0,02	0,02	SD	0,01

SD: sem dados

Apêndice B – Números de observação

Número de Observações – Alumínio Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14	15	23	14	14	18
RD019	11	10	23	14	13	18
RD023	11	10	23	14	13	18
RD035	11	10	23	14	13	18
RD033	11	10	23	13	13	18
RD083	15	15	23	13	14	18
RD044	11	10	23	13	13	17
RD045	11	10	23	13	13	17
RD053	11	10	21	12	13	18
RD058	11	10	21	13	13	18
RD059	11	10	21	13	13	18
RD067	11	10	21	13	13	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	21	21	SD	1	2	1
RD018	11	10	SD	1	1	1
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	11	10	SD	1	1	1
RD039	11	10	SD	1	1	1
RD040	11	10	SD	1	1	1
RD089	15	15	SD	1	2	2
RD057	11	10	SD	1	1	1
RD065	11	10	SD	1	1	1
Colatina 1	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	SD	SD	5	31	12	SD
Linhares 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Arsênio Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14	15	23	14	14	18
RD019	18	18	23	14	13	18
RD023	18	18	23	14	13	18
RD035	16	16	23	14	13	18
RD033	18	18	23	13	13	18
RD083	8	7	22	13	13	18
RD044	16	16	21	13	13	17
RD045	18	18	21	13	13	17
RD053	18	17	20	12	13	18
RD058	16	16	19	13	13	18
RD059	18	18	18	13	13	18
RD067	18	17	14	13	13	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	18	18	SD	1	1	1
RD018	16	16	SD	1	1	1
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	16	16	SD	1	1	1
RD039	18	18	SD	1	1	1
RD040	16	16	SD	1	1	1
RD089	8	7	SD	1	1	1
RD057	18	18	SD	1	1	1
RD065	18	17	SD	1	1	1
Colatina 1	SD	SD	6	24	0	SD
Colatina 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	24	0	SD
Colatina 4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	SD	SD	5	23	0	SD
Linhares 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	23	0	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Chumbo Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14	15	23	14	14	18
RD019	19	17	23	14	13	18
RD023	35	34	23	14	14	18
RD035	21	22	23	14	14	18
RD033	18	17	23	13	13	18
RD083	8	7	22	13	13	18
RD044	16	16	21	13	13	17
RD045	18	17	21	13	13	17
RD053	18	17	20	12	13	18
RD058	20	21	19	13	14	18
RD059	18	17	18	13	13	18
RD067	22	22	14	13	14	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	18	17	SD	1	1	1
RD018	23	23	SD	1	1	1
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	16	16	SD	1	1	1
RD039	22	22	SD	1	2	2
RD040	16	16	SD	1	1	1
RD089	8	7	SD	1	1	1
RD057	18	17	SD	1	1	1
RD065	23	22	SD	1	2	2
Colatina 1	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	SD	SD	5	31	12	SD
Linhares 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Ferro Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14	15	23	14	14	18
RD019	27	27	23	14	14	18
RD023	34	34	23	14	14	18
RD035	20	21	23	14	14	18
RD033	19	19	23	13	13	18
RD083	15	15	23	13	14	18
RD044	16	16	23	13	13	17
RD045	27	27	23	13	14	17
RD053	27	26	21	12	13	18
RD058	25	25	21	13	14	18
RD059	27	27	21	13	14	18
RD067	27	27	21	13	14	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	18	18	SD	1	1	1
RD018	30	31	SD	1	2	2
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	16	16	SD	1	1	1
RD039	22	23	SD	1	2	2
RD040	16	16	SD	1	1	1
RD089	15	15	SD	1	2	2
RD057	27	27	SD	1	2	2
RD065	27	27	SD	1	2	2
Colatina 1	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	SD	SD	5	31	12	SD
Linhares 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Manganês Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14	15	23	14	14	18
RD019	34	34	23	14	14	18
RD023	34	34	23	14	14	18
RD035	23	22	23	14	13	18
RD033	34	34	23	13	14	18
RD083	15	15	22	13	14	18
RD044	23	22	21	13	13	17
RD045	34	34	21	13	14	17
RD053	34	33	20	12	13	18
RD058	16	16	19	13	13	18
RD059	18	18	18	13	13	18
RD067	18	18	14	13	13	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	19	18	SD	1	1	1
RD018	31	31	SD	1	2	2
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	23	22	SD	1	1	1
RD039	28	28	SD	1	2	2
RD040	23	22	SD	1	1	1
RD089	15	15	SD	1	2	2
RD057	18	18	SD	1	1	1
RD065	18	18	SD	1	1	1
Colatina 1	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	SD	SD	5	31	12	SD
Linhares 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Oxigênio Dissolvido						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	25	23	23	14	14	18
RD019	47	45	23	14	14	18
RD023	47	45	23	14	14	18
RD035	44	41	23	14	14	18
RD033	47	45	23	13	14	18
RD083	26	23	23	13	14	18
RD044	43	40	23	13	14	17
RD045	47	45	23	13	14	17
RD053	47	44	21	12	13	18
RD058	43	40	21	13	14	18
RD059	47	45	21	13	14	18
RD067	46	44	21	13	14	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	44	45	SD	3	6	5
RD018	32	32	SD	1	2	2
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	32	32	SD	1	2	2
RD039	36	37	SD	1	2	2
RD040	32	32	SD	1	2	2
RD089	15	15	SD	1	2	2
RD057	36	37	SD	1	2	2
RD065	36	37	SD	1	2	2
Colatina 1	19	8	6	32	12	SD
Colatina 2	13	6	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	19	8	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	18	7	5	31	12	SD
Linhares 2	18	7	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – pH <i>in loco</i>						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	25	23	23	14	14	18
RD019	47	45	23	14	14	18
RD023	47	45	23	14	14	18
RD035	44	41	23	14	14	18
RD033	47	45	23	13	14	18
RD083	26	23	23	13	14	18
RD044	43	40	23	13	14	17
RD045	47	45	23	13	14	17
RD053	47	44	21	12	13	18
RD058	43	40	21	13	14	18
RD059	47	45	21	13	14	18
RD067	46	44	21	13	14	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	14	15	7	14	14	18
RD013	44	45	SD	3	6	5
RD018	32	32	SD	1	2	2
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	32	32	SD	1	2	2
RD039	36	37	SD	1	2	2
RD040	32	32	SD	1	2	2
RD089	15	15	SD	1	2	2
RD057	36	37	SD	1	2	2
RD065	36	37	SD	1	2	2
Colatina 1	19	7	6	32	12	SD
Colatina 2	13	6	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	19	8	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	18	7	5	31	12	SD
Linhares 2	18	7	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Turbidez						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	25	23	23	14	14	18
RD019	47	45	23	14	14	18
RD023	47	45	23	14	14	18
RD035	44	41	23	14	14	18
RD033	47	45	23	13	14	18
RD083	26	23	23	13	14	18
RD044	43	40	23	13	14	17
RD045	47	45	23	13	14	17
RD053	47	44	21	12	13	18
RD058	43	40	21	13	14	18
RD059	47	45	21	13	14	18
RD067	46	44	21	13	14	18
RD011	SD	SD	1	13	11	15
RD071	7	7	7	14	14	18
RD013	44	45	SD	3	6	5
RD018	32	32	SD	1	2	2
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	32	32	SD	1	2	2
RD039	36	37	SD	1	2	2
RD040	32	32	SD	1	2	2
RD089	15	15	SD	1	2	2
RD057	36	37	SD	1	2	2
RD065	36	37	SD	1	2	2
Colatina 1	19	8	6	32	12	SD
Colatina 2	13	6	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	19	8	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	18	7	5	31	12	SD
Linhares 2	18	7	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Número de Observações – Zinco Total						
Estação	Pré-desastre (Sc)	Pré-desastre (Ch)	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	14	15	SD	7	14	18
RD019	18	18	SD	7	13	17
RD023	18	18	SD	7	13	17
RD035	16	16	SD	7	13	17
RD033	18	18	SD	6	13	17
RD083	8	7	SD	6	13	17
RD044	16	16	SD	6	13	16
RD045	18	18	SD	6	13	16
RD053	18	17	SD	6	13	17
RD058	16	16	SD	6	13	17
RD059	18	18	SD	6	13	17
RD067	18	18	SD	6	13	17
RD011	SD	SD	SD	6	11	15
RD071	7	7	SD	7	14	18
RD013	18	18	SD	1	1	1
RD018	16	16	SD	1	1	1
RD073	14	15	SD	1	2	2
RD034	16	16	SD	1	1	1
RD039	18	18	SD	1	1	1
RD040	16	16	SD	1	1	1
RD089	8	7	SD	1	1	1
RD057	18	18	SD	1	1	1
RD065	18	18	SD	1	1	1
Colatina 1	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Colatina 3	SD	SD	6	32	12	SD
Colatina 4	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 1	SD	SD	5	31	12	SD
Linhares 2	SD	SD	SD	SD	SD	SD
Linhares 3	SD	SD	5	31	12	SD

SD: sem dados

Apêndice C – Resultados de p-valor para o teste de permutação

P-valor – Alumínio Dissolvido – IGAM (MG)				
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0,0028	0,0737	1,0000	1,0000
RD019	0,0042	0,6776	1,0000	1,0000
RD023	0,0046	0,0981	1,0000	1,0000
RD035	0,0006	0,2430	1,0000	1,0000
RD033	0,0032	0,0402	1,0000	1,0000
RD083	0,0119	0,0018	1,0000	0,0220
RD044	0,0482	0,0222	1,0000	0,4266
RD045	0,0302	0,0965	1,0000	1,0000
RD053	0,0031	0,0317	1,0000	0,2282
RD058	0,0345	0,1129	1,0000	0,4818
RD059	0,0732	0,0510	1,0000	0,5583
RD067	0,1021	0,0144	1,0000	0,5209
RD072	0,1902	0,5905	0,0317	0,4042
RD019	0,0148	0,6684	0,2004	0,7289
RD023	0,0119	0,2911	0,0367	0,4264
RD035	0,0003	0,0384	0,0259	0,0107
RD033	0,0010	0,1249	0,0770	0,0215
RD083	0,0677	0,0415	0,0120	0,0124
RD044	0,0003	0,0653	0,4716	0,0065
RD045	0,0012	0,0188	0,2991	0,0007
RD053	0,0002	0,0152	0,4777	0,0003
RD058	0,0014	0,2656	0,4748	0,0275
RD059	0,0015	0,1639	0,2941	0,0120
RD067	0,0073	0,2621	0,7226	0,0346

P-valor – Chumbo Total – IGAM (MG)				
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0,0262	0,0059	1,0000	1,0000
RD019	0,0003	0,4482	1,0000	1,0000
RD023	0,0001	0,0079	1,0000	1,0000
RD035	0,0003	0,0980	1,0000	1,0000
RD033	0,0073	1,0000	1,0000	0,0842
RD083	0,1197	1,0000	1,0000	1,0000
RD044	0,0432	1,0000	1,0000	1,0000
RD045	0,4961	0,2656	1,0000	0,0053
RD053	0,0442	1,0000	1,0000	1,0000
RD058	0,0015	1,0000	1,0000	1,0000
RD059	0,0314	0,2680	1,0000	0,1807
RD067	0,0441	1,0000	1,0000	1,0000
RD072	0,0005	0,0021	0,0003	0,0001
RD019	0,0001	0,0073	0,0001	0,0926
RD023	0,0001	0,0001	0,0084	0,0125
RD035	0,0001	0,0007	0,0007	0,0481
RD033	0,0004	0,0002	0,0001	0,0194
RD083	0,0082	0,0001	0,0012	0,0008
RD044	0,0059	0,0008	0,0003	0,2796
RD045	0,0001	0,0009	0,0185	0,0027
RD053	0,0001	0,0001	0,0035	0,0014
RD058	0,0001	0,0059	0,0113	0,1356
RD059	0,0001	0,0001	0,2160	0,0096
RD067	0,0005	0,0003	0,6597	0,3682

P-valor – Manganês Total – IGAM (MG)				
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0,0118	0,0001	0,0605	0,0766
RD019	0,0001	0,0001	0,0004	0,0009
RD023	0,0001	0,0001	0,0002	0,0072
RD035	0,0003	0,0001	0,0001	0,0200
RD033	0,0001	0,0001	0,0483	0,0630
RD083	0,0126	0,0016	0,5052	0,0594
RD044	0,0001	0,1122	0,1564	0,3421
RD045	0,0001	0,0045	0,0629	0,8300
RD053	0,0001	0,0141	0,1007	0,7598
RD058	0,0001	0,6504	0,0416	0,3019
RD059	0,0001	0,4673	0,0980	0,8886
RD067	0,0130	0,6803	0,0375	0,2479
RD072	0,0151	0,1915	0,1765	0,7670
RD019	0,0001	0,1640	0,8209	0,0817
RD023	0,0035	0,3417	1,0000	1,0000
RD035	0,0001	0,1671	1,0000	0,0966
RD033	0,0001	1,0000	0,1267	0,7810
RD083	0,0001	0,0047	0,4094	0,2119
RD044	0,0002	0,0721	0,3031	0,0282
RD045	0,0001	0,7909	0,7265	1,0000
RD053	0,0001	1,0000	0,5642	1,0000
RD058	0,0140	0,2638	1,0000	0,2779
RD059	0,0001	0,1419	0,0311	0,5866
RD067	0,3409	0,0048	0,5274	0,1431

P-valor – pH – IGAM (MG)				
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0,0002	1,0000	0,0318	0,1108
RD019	0,0011	0,6475	0,0099	0,7708
RD023	0,0002	0,4517	0,0519	0,1464
RD035	0,0033	0,7729	0,0378	0,4978
RD033	0,0015	0,5822	0,0544	0,7894
RD083	0,0236	0,3070	0,0080	0,1128
RD044	0,7057	0,9967	0,6092	0,9954
RD045	0,0767	0,0474	0,0896	1,0000
RD053	0,6831	0,3368	0,1511	0,8063
RD058	0,6940	0,7164	0,1498	1,0000
RD059	0,2115	1,0000	0,0371	0,8974
RD067	0,5992	0,8084	0,4230	0,9846

P-valor – Turbidez – IGAM (MG)				
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	0,0001	0,0001	0,0020	0,0003
RD019	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
RD023	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
RD035	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
RD033	0,0001	0,0001	0,0001	0,0011
RD083	0,0001	0,0001	0,0001	0,0024
RD044	0,0001	0,0001	0,0625	0,0490
RD045	0,0001	0,0001	0,0767	0,2199
RD053	0,0001	0,0001	0,3134	0,4366
RD058	0,0001	0,0001	0,7778	0,0677
RD059	0,0001	0,0004	0,1450	0,0506
RD067	0,0001	0,0001	0,6001	0,0534

P-valor – Zinco – IGAM (MG)				
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Set/16 (Sc)	Out/16 a Mar/17 (Ch)
RD072	NA	1,0000	1,0000	1,0000
RD019	NA	0,8438	1,0000	0,0182
RD023	NA	0,5303	1,0000	0,0008
RD035	NA	0,7205	0,7043	0,2274
RD033	NA	0,1864	0,2600	0,0053
RD083	NA	0,3983	1,0000	1,0000
RD044	NA	0,7585	1,0000	0,0119
RD045	NA	0,8059	1,0000	0,0410
RD053	NA	0,9569	1,0000	0,0271
RD058	NA	0,1641	1,0000	0,0164
RD059	NA	0,3254	1,0000	0,0239
RD067	NA	0,3214	1,0000	0,0045

P-valor – Oxigênio Dissolvido – IEMA (ES)			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	0,5662	0,1686	0,0179
Linhares 1	0,5777	0,0122	0,0405

P-valor – pH – IEMA (ES)			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	0,6882	0,9889	0,8588
Linhares 1	1,0000	0,8072	0,8342

P-valor – Turbidez – IEMA (ES)			
Estação	Nov/15 (Ch)	Dez/15 a Mar/16 (Ch)	Abr/16 a Ago/16 (Sc)
Colatina 1	0,0127	0,1518	0,5578
Linhares 1	0,0477	0,1289	0,0583

REFERÊNCIAS

- ABILHOA, V.; BRAGA, R. R.; BORNATOWSKI, H.; VITULE, J. R. S. Fishes of the atlantic rain forest streams: ecological patterns and conservation. In: Grillo, O.; Venora, G. (Ed.). **Changing diversity in changing environment**. Croácia: InTech, 2011. p. 259-282.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Portaria - nº 685**, de 27 de agosto de 1998. Aprova o Regulamento técnico: “Princípios gerais para o estabelecimento de níveis máximos de contaminantes químicos em alimentos” e seu anexo: “Limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos, 1998. 5p.
- _____. **Resolução - RDC nº 42**, de 29 de agosto de 2013. Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos, 2013. 11p.
- ANDRADE, C. A. **Estudo ecotoxicológico no trecho médio da Bacia do Rio Doce – MG**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ANDRADE, M. T.; VEADOR, M. A. R. V.; MENEZES, M. A. B. C.; ALÍPIO, V. C. Análise da concentração de metais pesados no rio Piracicaba, Minas Gerais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2010. p. 1-15. Disponível em: <www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TN_STO_113_739_16250.pdf>. Acesso em: 3 maio 2017.
- APLYSIA – Soluções Ambientais. **Relatório Técnico nº 245/2017**. Levantamento de dados de arsênio em tecidos de peixes e moluscos. 2017. 19p.
- ARANTES, I. A.; PINTO, M. T. C.; MANGABEIRA, P. A.; GRENIER-LOUSTALOT, M. F.; VEADO, M. A. R. V.; OLIVEIRA, A. H. Mercury concentration in fish from Piracicaba River (Minas Gerais, Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 156, p. 119-130, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Classificação de Resíduos Sólidos**. NBR 10.004: 2004. Rio de Janeiro. 2004.
- BAZAIRI, H.; BAYED, A.; GLÉMAREC, M. & HILY, C. 2003. Spatial organization of macrozoobenthic communities in response to environmental factors in a coastal lagoon of the NW African coast (Merja Zerka, Morocco). *Oceanologica Acta*, 26: 457-471.
- BEVILACQUA, J. E. **Estudo sobre a caracterização e a estabilidade de amostras de sedimentos do rio Tietê, SP**. 1996. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Química do Instituto de Química da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 190p.
- BOLETIM ESTATÍSTICO DA PESCA DO ESPÍRITO SANTO - Ano 2011: Programa de estatística pesqueira do Espírito Santo /Universidade Federal do Espírito Santo; coordenadores Mauricio Hostim Silva, Guilherme Scheidt de Souza Soares . –N. 2 (2013)- . - Vitória, ES: UFES, 2013
- BORBA, R. P.; FIGUEIREDO, B. R.; CAVALCANTI, J. A. Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Escola de Minas**, v. 57, n. 1, p. 45-51, 2004.
- BORBA, R.P.; FIGUEIREDO, B. A influência das condições geoquímicas na oxidação da arsenopirita e na mobilidade do arsênio em ambientes superficiais tropicais. Ver. Brasileira de Geociências, vol.4, 2004
- BRANDT MEIO AMBIENTE - SAMARCO. **Relatório do resgate de carcaças de peixes ao longo do rio Doce**. Mariana, MG: Brandt, 2016. 47p.
- _____. – MARINHA DO BRASIL. **Relatório Final de Levantamento Hidroceanográfico, Navio de pesquisa hidroceanográfico “Vital de Oliveira”**. Diretoria de Hidrografia e Navegação: “Levantamento Ambiental expedito em regência/ES” – LH 035/15. 2015. 137p.
- _____. – PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965. Modifica o Decreto nº 50.040, de 24 de janeiro de 1961, referente a normas reguladoras do emprego de aditivos para alimentos, alterado pelo Decreto nº 691 de 13 de março de 1962. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 mar. 1965. 9p.

- _____. Resolução nº 91, de 05 de novembro de 2008. Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 6 fev. 2008.
- BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D. C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR, P. M.; MILLAN, V. E. G.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A.; SOARES-FILHO, B.; Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza e Conservação**, v. 14, p. 35-45, 2016.
- CABRAL, A. T.; CELSO, O.L. Modelamento hidrogeológico do aquífero aluvionário de Amaro Lanari – Vale do Aço – MG. In XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS, 2002.
- CAMARGO, S.A.F. & PETRERE JR., M. 2001. Social and financial aspects of the artesan fisheries of middle São Francisco River, Minas Gerais, Brazil. *Fisheries Management and Ecology*, 8: 163-171.
- CAMPOS, A. G.; CHAVES, J. V. Seguro defeso: diagnóstico dos problemas enfrentados pelo programa. Brasília: IPEA, 2014. (Texto para Discussão n. 1.956). Disponível em: <http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1956.pdf>.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. S.; PINTO, C. E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>. 2017.
- CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- CHAPMAN, P. M.; PAINE, M. D.; ARTHUR, A. D.; TAYLOR, L. A. A triad study of sediment quality associated with a major, relatively untreated marine sewage discharge. **Marine Pollution Bulletin**, v. 32, n. 1, p. 47-67, 1996.
- CHAVES, P.; PICHLER, H. & ROBERT, M. 2002. Biological, technical and socioeconomic aspects of the fishing activity in a Brazilian estuary. *Journal of Fish Biology*, 61: 52-59.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br>>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005.
- _____. Resolução nº 454, de 1 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 8 nov. 2012.
- CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades e planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce**: relatório final. Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.
- COSTA, A. T. **Geoquímica das águas e dos sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, leste – Sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG)**: estudo de uma área afetada por atividade de extração mineral. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.
- COWX, I.G. & GERDEAUX, D. 2004. The effects of fisheries management practices on freshwater ecosystems. *Fisheries Management and Ecology*, 11: 145-151.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Monitoramento especial da bacia do rio Doce. Relatório 1: acompanhamento da onda de cheia. Primeira campanha de campo**. Belo Horizonte: dezembro/2015.
- 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- MG, Brasil. 2015. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/publique/media/RT_02_2015_MONIT_ESP_BACIA_RIO_DOCE_v4_5.pdf. Acesso em: 02 de outubro de 2017.

- DENOBILO, M. **Estudo da ocorrência de compostos arseniais, mercuriais e de selênio em cações comercializados na cidade de São Paulo**. 2007. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Toxicologia e Análises Toxicológicas da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 166p.
- DIRETORIA DE PREVENÇÃO E EMERGÊNCIA AMBIENTAL (DEAMB), SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMAD) e SISTEMA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SISEMA). **Relatório Técnico nº 11/2016**. Mortandade de peixes na Bacia do Rio Doce após rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues (Mariana/MG), em 05/11/2015, Ref. DO1-DOC-05112015. 2016. 71p.
- DROGUETT, J.; FONSECA, J. O. Ubatuba – espaço, memória e cultura. Editora Arte e Ciência: São Paulo, 2005.
- ECONSERVATION - Estudos e Projetos Ambientais. **Relatório técnico RT ECV 065/16**: Monitoramento de bioacumulação (Ictiofauna, Carcinofauna e Malacofauna) por metais, na região marinha adjacente à foz do rio Doce e sob possível influência da lama de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão, abril, 2016. 972p.
- ESCOBAR, H. Mud tsunamis wreaks ecological havoc in Brazil. **Science**, v. 350, p. 1138–1139, 2015.
- ESTADO DE MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Belo Horizonte: Sedru, fev. 2016. Disponível em <http://www.urbano.mg.gov.br/images/NOTICIAS/2016/relatorio_final.pdf>.
- EVANS, D. H. The fish gill: Site of action and model for toxic effects of environmental pollutants. **Environmental Health Perspectives**, v. 71, p. 47-58, 1987.
- EVANS, D. H.; PIERMARINI, P. M.; CHOE, K. P. The multifunctional fish gill: Dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid-base regulation, and excretion of nitrogenous waste. **Physiological Reviews**, v. 85, p. 97–177, 2005.
- FAO (1995). Código de Conducta para la Pesca Responsable. Roma, FAO.
- FELIPPE, M. F.; COSTA, A.; FRANCO, R.; MATOS, R. A Tragédia Do Rio Doce: A Lama, O Povo e a Água. Relatório de campo e Interpretações preliminares sobre as consequências do rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/BHP). **Geografias** - Edição Especial - Vale do Rio Doce: formação geo-histórica e questões atuais, p. 63-94, 2016.
- FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. **Metal pollution in the aquatic environment**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- FROESE, R.; PAULY, D. (Ed.). FishBase. WorldWide web eletronic publication. Version (06/2017). Disponível em: <www.fishbase.org>. Acesso em: 02 de outubro de 2017.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE (FAURG). **Relatório técnico-científico, contrato 105/2016**. Etapa 1: Análise de contaminantes (metais); Etapa 2: Análise sobre as possibilidades de contaminação do Parque Nacional Marinho de Abrolhos e regiões relacionadas; Etapa 3: Assinatura geoquímica de elementos de comparação com a pluma de sedimentos do rio Doce; Etapa 4: Análise de biomarcadores (lipoperoxidação). 2016a. 63p.
- _____. **Relatório técnico-científico, contrato 105/2016**. Etapa 5: Análise comparativa sobre os resultados entre as expedições Soloncy Moura I e II e as amostras coletadas antes do evento. 2016b. 16p.
- GARRELS, R. M.; CHRIST, C.L. Solutions, Minerals and Equilibria. New York: Harper & Row, 1965.
- GIAIA – GRUPO INDEPENDENTE PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL. Relatório parcial expedição rio Doce. 2015. Disponível em: <http://giaia.eco.br/wp-content/uploads/2015/12/Resultados-11_12-Agua-GIAIA.pdf>. Acesso em: set. 2016.
- _____. Relatório Técnico: Determinação de metais na bacia do rio Doce. Maio de 2016. Colatina Online. Disponível em: <<http://www.colatina.es.gov.br/acidade/?pagina=historia&item=3>>

- GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. **Memorando Técnico MT-253_159-515-2282**. Concentração de metais em água, sedimentos, tecido de peixes e organismos aquáticos coletados na região marinha e estuarina da foz do rio Doce. Março, 2016a.
- _____. **Memorando Técnico MT-023_159-515-2282_01-B**. Rompimento da Barragem de Fundão – Caracterização Geoquímica de Rejeitos de Fonte e de Rejeitos Depositados (Base de Dados Secundária). Abril, 2016b.
- _____. **Relatório Técnico RT-023_159-515-2282_00-J**. Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão. Julho, 2016c.
- GOOD, P. **Permutation Tests: A Practical Guide to Resampling Methods for Testing Hypotheses**. Springer: New York 1994. 271 p.
- GRUPO DA FORÇA-TAREFA. Governo do Estado de Minas Gerais - Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. **Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. fev. 2016. Disponível em: <http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770 /relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf>.
- GRUPO INDEPENDENTE PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL (GIAIA). **Relatório-técnico de determinação de metais na bacia do rio Doce** (Período: dezembro-2015 a abril-2016). 2016. 71p.
- GUERRA, M. B. B.; TEANEY, B. T.; MOUNT, B. J.; ASUNSKIS, D. J.; JORDAN, B. T.; BARKER, R. J.; SANTOS, E. E.; SCHAEFER, C. E. G. R. Post-catastrophe analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils. **Water, Air and Soil Pollution**, p. 228 – 252. 2017.
- GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; ZULIANI, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. Elementos traço em solos e sistemas aquáticos. **Tópicos em Ciências do Solo**, v. 4, p. 345-390, 2005.
- HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Nature: Scientific Reports**, v. 7, n. 10706, p. 1-13, 2017. DOI:10.1038/s41598-017-11143-x 1.
- HEM, J. D. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. Alexandria, VA: United States Government Printing Office, 1986.
- HEM, J.D. Chemistry of Manganese in Natural Water. Geological Survey Water Supply Paper 1667-A. Washington, 1963.
- HORA, A. M.; DIAS, C. A.; GUEDES, G. R.; COSTA, A. S. V.; JUNIOR, M. J. F. **Da exploração econômica da bacia hidrográfica do Rio Doce ao atual processo de degradação de seus recursos naturais**. In.: TERRITÓRIO, MOBILIDADE POPULACIONAL E AMBIENTE, p. 213-234, 2012. Disponível em http://gilvanguedes.com/wp-content/uploads/2016/09/hora_etal_2012_livro_tmpa_cap9.pdf. Acesso em 20 de setembro de 2017.
- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Estatística da pesca 2007 Brasil**: grandes regiões e unidades da federação /Brasília: Ibama, 2009. 175 p. ; 29 cm.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Encarte especial sobre a qualidade das águas do rio Doce após 1 ano do rompimento da barragem de Fundão – 2015/2016**. Belo Horizonte: 2016b. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2016/QUALIDADE/ENCARTE_ESPECIAL_SOBRE_A_QUALIDADE_DA_%C3%81GUA_DO_RIO_DOCE_AP%C3%93S_O_ROMPIMENTO_DE_BARRAGEM_DA_SAMARCO_NO_DISTrito_DE_BENTO_RODRIGUES.pdf> Acesso em: 23 outubro 2017
- _____. **Monitoramento da qualidade das águas superficiais da bacia do rio doce em 2009. Relatório anual**. Belo Horizonte: dezembro/2010. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/publicacoes-tecnicas/qualidade-das-aguas/qualidade-das-aguas-superficiais/relatorios-de-avaliacao-de-qualidade-das-aguas-superficiais/relatorios-anuais/6051-2009>> Acesso em: 19 outubro 2017.

- _____. **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. 01 de fevereiro de 2016.** Belo Horizonte: 2016a. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2016/QUALIDADE/3Relatorio_Tecnico_Monitoramento_Rio_Doce_Rev01_02_2016.pdf> Acesso em: 16 outubro 2017.
- _____. **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. Junho/2017.** Belo Horizonte: 2017. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2017/INFORMATIVO_RD/Relatorio_AvaliacaoQualidadeEmergencial_junho2017.pdf> Acesso em: 6 novembro 2017.
- _____. Relatório anual de gestão e situação dos recursos hídricos de Minas Gerais -2014 - Belo Horizonte, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Lauda Técnico Preliminar dos impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.** 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 11 de janeiro de 2016.
- _____. **Parecer técnico sobre os resultados obtidos das coletas de amostras de água, na região da foz do rio Doce, no período de 22/11/15 a 01/01/16.** 2016. 22p.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Nota técnica nº 24/2015/ CEPTA/DIBIO/ICMBIO.** Consequências parciais na biodiversidade aquática da bacia do rio Doce, provocadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração da SAMARCO Mineradora S.A. no município de Mariana, MG. Ministério do Meio Ambiente. Pirassununga, SP, 2015. 10p.
- _____. **Resumo das análises realizadas - 1ª Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura.** Equipe de Pesquisa Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Coral Vivo. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 15 de março. 2016a. 4p.
- _____. **Nota técnica nº 006/2016 conjunta – Centro TAMAR/APA Costa das Algas/REBIO de Comboios/RVS de Santa Cruz.** Relato das informações apresentadas pelos pesquisadores da UFES e FURG quanto a contaminação de organismos marinhos na costa capixaba e suas implicações na proibição de pesca de camarão e demais recursos pesqueiros na região marinha próxima a Foz do rio Doce (Aracruz e Linhares/ES). Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 18 de março. 2016b. 8p.
- _____. **Informação técnica nº 003/2016 – Centro TAMAR/ICMBIO.** Complementação da nota técnica no 006/2016 conjunta – Centro TAMAR/APA Costa das Algas/REBIO de Comboios/RVS de Santa Cruz. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 21 de março. 2016c. 8p.
- _____. **Relatório de 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 CEPsul/ICMBio** (28 de abril de 2016). Equipe de Pesquisa Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Coral Vivo. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF, 28 de abril. 2016d. 62p.
- _____. **Nota técnica nº 02/2016 conjunta – APA Costa das Algas/RVS de Santa Cruz.** Relato das informações apresentadas pelos pesquisadores da EFES e FURG quanto a contaminação de organismos marinhos na costa capixaba e suas implicações na proibição de pesca de camarão e demais recursos pesqueiros no interior da APA Costa das Algas e do RVS de Santa Cruz/ES. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 29 de abril. 2016e. 29p.
- _____. **Nota técnica nº 012/2016 Centro TAMAR/DIBIO/ICMBio.** Consolidação das informações apresentadas pelos pesquisadores da UFES e FURG a partir das campanhas amostrais realizadas na região marinha da foz do rio Doce. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 17 de maio. 2016f. 18p.
- _____. **Nota técnica nº 23/2017/TAMAR-Vitória-ES/DIBIO/ICMBio.** Monitoramento da pluma de sedimentos proveniente da Barragem de Fundão. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 25 de setembro. 2017. 44p.

- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF). **Portaria nº 40**, de 11 de maio de 2017, Belo Horizonte – MG. 2017. Disponível em <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=44320>. Acesso em 16 de outubro de 2017.
- INSTITUTOS LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na Bacia do rio Doce**. Relatório de Linha-Base: Volume II – Meio Biótico e Bens Arqueológicos e Culturais, Curitiba, Paraná, Brasil. Outubro, 2017b. 711p.
- INSTITUTOS LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na Bacia do rio Doce**. Relatório de Linha-Base: Volume I – Meio Físico, Curitiba, Paraná, Brasil. Outubro, 2017a. 1376p.
- JESUS, H. C.; COSTA, E. A.; MENDONÇA, A. S. F.; ZANDONADE, E. Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da Ilha de Vitória-ES. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 378-386, 2004.
- JORDÃO, C. P.; PEREIRA, J. C.; BRUNE, W.; PEREIRA, J. L.; BRAATHEN, P. C. Heavy metal dispersion from industrial wastes in the Vale do Aço, Minas Gerais, Brazil. **Environmental Technology**, v. 17, p. 489-500, 1996.
- JOYEUX, J. C.; CAMPANHA FILHO, E. A.; JESUS, H. C. Trace metal contamination in estuarine fishes from Vitória Bay, ES, Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 5, p. 765-774, 2004.
- JUNCÁ, F. A.; PAVAN, D.; JESUS, T.B.; ETEROVICK, P. Girinos como bioindicadores da qualidade da água do rio Doce. **Relatório Final Greenpeace**, junho, 2017. 33p.
- LEMM – Laboratório de Estudos do Movimento Migratório. LEIDETEC – Laboratório de Estudos de Identidades e Tecnociência. GIAIA – Grupo Independente para Avaliação do Impacto Ambiental. Ribeirinhos do Baixo rio Doce - Relatório preliminar. Janeiro/ Julho. Mimeo. 2016
- LEONARDO, F.; IZOTON, J.; VALIM, H. CREADO, E. TRIGUEIRO, A. SILVA, B. DUARTE, L. SANTANA. N. Rompimento da barragem de Fundão (SAMARCO/VALE/BHP BILLITON) e os efeitos do desastre na foz do Rio Doce, distritos de Regência e Povoação, Linhares (ES). **Relatório de pesquisa**. Vitória: GEPEDES. 2017. 114p.
- LIMA, H. S. **Qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do Rio Doce e sua relação com aspectos socioambientais**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. 170p.
- LLOYD, J. W.; HEATHCOTE, J.A. Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction, Oxford: Clarendon Press, 1985
- LÜRLING, M.; SCHEFFER, M. Info-disruption: pollution and the transfer of chemical information between organisms. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 22, p. 374-379, 2007.
- MACKINSON S., NOTTESTAD, L. . Combining local and scientific knowledge, Reviews in Fish Biology and Fisheries , 1998, vol. 8 (pg. 481-490)
- MAGALHÃES, D. P.; FERRÃO FILHO, A. S. A ecotoxicologia como ferramenta no biomonitoramento de ecossistemas aquáticos. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 3, p. 355-381, 2008.
- MAIA, F. F. **Elementos traços em sedimentos e qualidade da água de rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG**. 2017. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. 57p.
- MDGEO. **Estudo Hidrogeológico**: mapa potenciométrico da região de Linhares/ES. Proj. MDGEO - contrato Fund. RENOVA nº 4500170624, nov. 2016.
- MENEZES, N. A.; BUCKUP, P. A.; FIGUEIREDO, J. L.; MOURA, R. L. **Catálogo das espécies de peixes marinhos do Brasil**. São Paulo: Museu de Zoologia da USP, 2003.
- MORAIS, A. C. T. **Concentração de metais pesados em peixes teleósteos do Rio Piracicaba, Minas Gerais, Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Biologia Animal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009. 108p.

- MOURÃO, M. A. A. **Caracterização hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2007. Tese (Doutorado em Meio Ambiente) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- MOURÃO, M.A.; LIMA, J.E.S.; MONTEIRO, E.A. Os Sistemas aquíferos do Norte do Estado do Espírito Santo: Potencial de Exploração e Diagnóstico Atal de aproveitamento. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. ABAS, 2002.
- NELSON, J. S. **Fishes of the world.** 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- NETO, R. R.; SÁ, F.; CARNEIRO, M. T. W. D.; COSTA, E. S.; RODRIGUES, D. R. P. The worst brazilian environmental disaster altered the distribution of metals in water at the Doce river estuary and marine region. In: 18th International Conference on Heavy Metals in the Environment, 12 to 15 September 2016, **Anais...** Ghent, Belgium, 2016.
- NEVES, M.A. *Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do rio Jundiá (SP).* Tese de Doutorado – 2005. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro 1994.
- NIENCHESKI, L. F., MACHADO, E. C., SILVEIRA, I. M. O., FLORES MONTES, M. J. Metais traço em peixes e filtradores em quatro estuários da costa brasileira. **Tropical Oceanography**, v. 42, n. 1, p. 94-106, 2014.
- NUNES, F.C.; SILVA, E.F., VILAS BOAS, G.S. Grupo Barreiras: Características Gênese e Evidências de Neotectonismo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 194, Embrapa Solos. Rio de Janeiro, 2011
- O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **GSA Bulletin**, v. 87, p. 1463-1469, 1976.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA/ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (FAO/OMS). **Codex Alimentarius Commission: Food standards programme códigoex committee on contaminants in foods.** In: 10th session, Rotterdam, March, 2016. Disponível: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeeting%252FCX-735-10%252FWD%252Fcf10_INF1e.pdf. Acesso em: 10 de outubro de 2017.
- ORGANON, Núcleo de Estudo, Pesquisa e Extensão em Mobilizações Sociais. Impactos socioambientais no Espírito Santo da ruptura da barragem de rejeitos da Samarco - **Relatório preliminar.** Novembro/dezembro, 2015. 105p.
- PALMIERI, H. E. L. **Distribuição, especiação e transferência de Hg e As para a biota em áreas do sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2006. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006. 193p.
- PALMIERI, H. E. L.; LEONEL, L. V. Determination of methylmercury in fish tissue by gas chromatography with microwave-induced plasma atomic emission spectrometry after derivatization with sodium tetraphenylborate. **Fresenius Journal of Analytical Chemistry**, v. 366, p. 466-469, 2000.
- Pauly, D.; Christensen, V.; Guénette, S.; Pitcher, T.; Sumaila, U.; Walters, C.; Watson, R.; Zeller, D. Towards sustainability in world fisheries. **Nature**, v. 418, p. 689-695, 2002.
- PEREIRA, A. A.; VAN HATTUM, B.; BROUWER, A.; VAN BODEGOM, P. M.; REZENDE, C. E.; SALOMONS, W. Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon. **Journal of Soils and Sediments**, v. 8, p. 239-252, 2008.
- PEREIRA, A. A.; VAN HATTUM, B.; DE BOER, J.; VAN BODEGOM, P. M.; REZENDE, C. E.; SALOMONS, W. Trace elements and carbon and nitrogen stable isotopes in organisms from a Tropical Coastal Lagoon. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 59, p. 464-477, 2010.
- PINHEIRO, H.T.* & JOYEUX, J.-C, Pescarias Multi-Específicas Na Região Da Foz Do Rio Doce, Es, Brasil: Características, Problemas E Opções Para Um Futuro Sustentável. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 2007, 11(2):15-23.
- PIPER, A. M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses: American Geophysical Union Transactions, v. 25, p. 914-923. Washinton, 1944.

- 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**, v. 27, n. 3, p. 393-397, 2003.
- POEMAS - Grupo Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade. Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG). **Relatório Final**. 2015. 103p.
- PORTZ, D. E.; WOODLEY, C. M.; CECH JR, J. J. Stress-associated impacts of short-term holding on fishes. **Reviews in Fish Biology and Fisheries**, v. 16, p. 125-170, 2006.
- PUPPIM, L. G. **Avaliação de metais pesados e biomarcadores fecais no sedimento da foz do rio Doce, Linhares – ES**. 2005. Monografia - Curso de graduação em Oceanografia da UFES, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2014. 48p.
- QUEIROZ, M. T. A. **Bioacumulação de metais pesados no rio Piracicaba, Minas Gerais, aplicando a análise por ativação neurotrônica instrumental**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, UNILESTE, MG, Coronel Fabriciano, 2006. 105p.
- RAMOS, M.L.S.; MARTINS, J.C. Abordagem preliminar do uso da água subterrânea em Minas Gerais através do instrumento de outorga. In. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas., 2002.
- RAMOS, W. E. S. **Contaminação por mercúrio e arsênio em Ribeirões do Quadrilátero Ferrífero – MG, em área de mineração e atividades garimpeiras**. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005. 122p.
- RHODES, V. P. **Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo ouro – Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. 113p.
- RODRIGUES, A. S. L.; MALAFAIA, G.; COSTA, A. T.; NALINI JÚNIOR, H. A. Iron ore mining promotes iron enrichment in sediments of the Gualaxo do Norte River basin, Minas Gerais State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, p. 4177–4186, 2014.
- SALES, S. C. M. **Avaliação ecotoxicológica de impactos da contaminação por metais e arsênio em áreas de mineração e beneficiamento de ouro em Minas Gerais**. 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 158p.
- SAMARCO. **Esclarecimentos sobre a água do rio Doce e do mar, bioacumulação em peixes e diálogo**. 2016. 9p. Disponível em http://samarco.com/wp-content/uploads/2016/06/Paper_Agua_23-06.pdf. Acesso em: 29 de setembro de 2017.
- SANCHEZ, Luiz. Pescado: matéria prima e processamento. São Paulo, Fundação Cargill, 1989. 61p.
- SARMIENTO, A. M.; DELVALLS, A.; NIETO, J. M.; SALAMANCA, M. J.; CARABALLO, M. A. Toxicity and potential risk assessment of a river polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 4763–4771, 2011.
- SARTORI, É.; COSTA, L. H. V.; SOUZA, D. L.; RANGEL, T. P.; ALMEIDA, D. Q. R.; REZENDE, C. E.; VERGILIO, C. S. Comparação entre matrizes ambientais (água e sedimento) como fonte de contaminação por metais para peixes. In: XXI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VII Encontro de Iniciação à Docência, Universidade do Vale do Paraíba, **Anais...**, São José dos Campos, Brasil, p. 1-6, 2017.
- SCOTT, G. R.; SLOMAN, K. A. The effects of environmental pollutants on complex fish behavior: integrating behavioral and physiological indicators of toxicity. **Aquatic Toxicology**, v. 68, p. 369-392, 2004.
- SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL DE POLÍTICA URBANA E GESTÃO METROPOLITANA DO GOVERNO DE MINAS GERAIS (SEDUR). **Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. Responsável: Grupo da Força-Tarefa. Belo Horizonte, 2016. 287p.

- SEGURA, F. R.; NUNES, E. A.; PANIZ, F. P.; PAULELLI, A. C. C.; RODRIGUES, G. B.; BRAGA, G. U. 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.
- SILVA, A. C.; CAVALCANTE, L. C. D.; FABRIS, J. D.; JÚNIOR, R. F.; BARRAL, U. M.; FARNEZI, M. M. M.; VIANA, A. J. S.; ARDISSON, J. D.; FERNANDEZ-OUTON, L. E.; LARA, L. R. S.; STUMPF, H. O.; BARBOSA, J. B. S.; SILVA, L. C. Características químicas, mineralógicas e físicas do material acumulado em terraços fluviais, originado do fluxo de lama proveniente do rompimento de barragem de rejeitos de mineração de ferro em Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brasil. **Revista Espinhaço**, v. 5, n. 2, p. 44-53. 2016.
- SILVA, I. F. L. **Contribuições para o diagnóstico ambiental da parte média e inferior da bacia do Rio Piracicaba, MG**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. 127p.
- SOUZA, I. C.; DUARTE, I. D.; PIMENTEL, N. Q.; ROCHA, L. D.; MOROZESK, M.; BONOMO, M. M.; AZEVEDO, V. C.; PEREIRA, C. D. S.; MONFERRÁN, M. V.; MILANEZ, C. R. D.; MATSUMOTO, S. T.; WUNDERLIN, D. A.; FERNANDES, M. N. Matching metal pollution with bioavailability, bioaccumulation and biomarkers response in fish (*Centropomus parallelus*) resident in neotropical estuaries. **Environmental Pollution**, v. 180, p. 136-144, 2013.
- SOUZA, V. L. B.; LIMA, V.; HAZIN, C. A.; FONSECA, C. K. L.; SANTOS, S. O. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1A, p. 01-13, 2015.
- SOUZA, W. R. **Análise de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPAs – Em sedimentos do Ribeirão do Funil na região de Ouro Preto – MG**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. 95p.
- THÉ, A. P. G. Conhecimento local ecológico na pesca do alto-médio São Francisco: contribuição aos estudos da relação sociedade-natureza e da gestão de território. VII Encontro Regional de Geografia. Unimontes: 2008.
- TORRES, J. P. M.; SOUZA, J.; PADILHA, J.; OLIVEIRA, G.; PAIVA, T. **Contaminação por metais pesados na água utilizada por agricultores familiares na Região do Rio Doce**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2017. Disponível em: <http://www.greenpeace.org.br/hubfs/Campanhas/Agua_Para_Quem/documentos/greenpeace_estudo_agua_riodoce%20.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2017.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **Risk-Based Concentration Table**. Philadelphia PA, Washington, DC. 2009.
- UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UERJ). **Estudo preliminar sobre a detecção da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre o Parque Nacional dos Abrolhos-BA, para o evento de 5-6 de Janeiro 2016**. Rio de Janeiro, RJ, 4 de maio. 2016.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES). **Monitoramento da Influência da Pluma do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG – Novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados**, Vitória, 2017. 254p.
- _____. **Relatório Técnico Parcial das análises realizadas em amostras coletadas na Plataforma Adjacente a Foz do rio Doce, APA Costa das Algas e Plataforma de Abrolhos: Embarque Soloncy Moura**, Vitória, abril, 2016b. 24p.
- _____. **Resultados parciais das análises realizadas em amostras coletadas na Plataforma Adjacente a Foz do rio Doce: Embarque NOc Vital de Oliveira**. Vitória, fevereiro, 2016a. 17p.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI (UFVJM). **Relatório da contaminação dos peixes capturados na região do médio rio Doce, na microrregião de Governador Valadares, MG**. 2017. 10p.
- VAN DER OOST, R.; BEYER, J.; VERMEULEN, N. P. E. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 13, p. 57-149, 2003.

- VAN GESTEL, C. A. M.; VAN BRUMMELEN, T. C. Incorporation of the biomarker concept in ecotoxicology calls for a redefinition of terms. **Ecotoxicology**, v. 5, p. 217-225, 1996.
- VAREJÃO, E. V. V. **Distribuição de mobilidade de arsênio e metais pesados em ribeirões do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 205p.
- VARGAS, I. B.; MAINARDI, V. F.; AGUIAR, L. L.; SOUZA, D. L.; PIEDADE, A. E.; RANGEL, T. P.; ALMEIDA, D. Q. R.; MENDONÇA, P. P.; REZENDE, C. E.; DAVID, J. A. O.; VERGILIO, C. S. Potencial mutagênico e genotóxico de peixes expostos ao sedimento do rio doce após o rompimento da barragem. **Revista UNIVAP** – Universidade do Vale do Paraíba, online, Edição Especial - ISSN 2237-1753 - XX Encontro de Iniciação Científica, XVI Encontro de Pós-Graduação, X INIC Jr e VI INID da Universidade do Vale do Paraíba, v. 22, n. 40, p. 1-5, 2016.
- VEADO, M. A. R. V.; MENEZES, M. A. B. C.; QUEIROZ, M. A. T.; COSTA, A. A.; LOPES, G. F.; OLIVEIRA, A. H. Nuclear Application in Studies of Environmental Pollution in Brazil. In: 16th Pacific Basin Nuclear Conference (16PBN), **Anais...**, Aomori, Japan, p. 13-18, 2008. Paper ID P16P1273. Disponível em: <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:41018080>. Acesso em: 19 jun. 2017.
- VERONEZ, A. C. S.; SALLA, R. V.; BARONI, V. D.; BARCAROLLI, I. F.; BIANCHINI, A.; MARTINEZ, C. B. R.; CHIPPARI-GOMES, A. R. Genetic and biochemical effects induced by iron ore, Fe and Mn exposure in tadpoles of the bullfrog *Lithobates catesbeianus*. **Aquatic Toxicology**, v. 174, p. 101-108, 2016.
- VIANA, J. P. **Nota técnica n. 11**. Os pescadores da bacia do rio Doce: subsídios para a mitigação dos impactos socioambientais do desastre da Samarco em Mariana, Minas Gerais. Brasília, DF: IPEA, 2016. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/nota_tecnica/160524_nt_dirur_11.pdf>. Acesso em: nov. 2017.
- VIEIRA, F. Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do Rio Doce. **MG Biota**, v. 2, n. 5, p. 5-22, 2009/2010.
- WENDELAAR BONGA, S. E. The stress response in fish. **Physiological Reviews**, v. 77, p. 591-625, 1997.
- XAVIER-DA-SILVA, J. Geoprocessamento e análise ambiental. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 54, n. 3, p. 47-61, 1992.

