

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

Relatório Pós-Desastre 2

Meios Físico e Biótico

Geologia

Solos

Hidrologia e Hidrosedimentologia

Qualidade de Sedimentos

Unidades de Conservação

Flora

Fauna

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

Relatório Pós-Desastre 2

Meios Físico e Biótico

Geologia

Solos

Hidrologia e Hidrosedimentologia

Qualidade de Sedimentos

Unidades de Conservação

Flora

Fauna

Documento:	Diagnóstico Socioambiental do Rio Doce – Relatório pós-desastre
Considerações Gerais:	Este documento refere-se à continuação do relatório de pós-desastre das seguintes áreas: Geologia, Solos, Hidrologia, Hidrosedimentologia, Qualidade de Sedimentos, Unidades de Conservação, Flora e Fauna, que são parte integrante do Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Rio Doce, o qual demonstra características ambientais subsequentes ao desastre do 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 Departamento Recursos Ambientais

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

EQUIPE TÉCNICA

PRESIDÊNCIA		
Luiz Fernando Vianna	Diretor Presidente	
DIRETORIA		
Lauro Elias Neto	Diretor de Operações Tecnológicas e de Desenvolvimento Tecnológico	
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		
GEOLOGIA E GEOTECNIA		
Amanda Jarek	Dra., Engenheira Civil	http://lattes.cnpq.br/1505490272203990
Betina Lepretti Medeiros	Gerente da Divisão de Pesquisa em Estruturas Cíveis	http://lattes.cnpq.br/1756315291615130
Bruno Endo Ribeiro	Téc. Em Construção Civil	http://lattes.cnpq.br/4603691886693999
Eduardo Alberto Garotti Orlowski	Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/7796199656235610
Ernesto Goldfarb Figueira	MSc., Geólogo	http://lattes.cnpq.br/4401942500945463
Isabella Françoso Rebutini Figueira	Dra., Geóloga	http://lattes.cnpq.br/2157580235609038
José Henrique Ferronato Pretto	M.Sc., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/0011830871815627
Joubert Weigert Favaro	Engenheiro Ambiental	http://lattes.cnpq.br/9803440730131162
Kleber Franke Portella	Dr., Químico	http://lattes.cnpq.br/3831923854387307
Marcelo Buras	M.Sc., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/6794337770630385

Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança	Dra., Engenheira Ambiental	http://lattes.cnpq.br/0715737214891999
Mário Sérgio Mandu Kleina	Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/6538424098662887
Rodrigo Moraes da Silveira	Dr., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/0100630696334012
Rodrigo Soares Ferreira	Gerente de Química	http://lattes.cnpq.br/2988740732783866

SOLOS

Antônio Carlos Vargas Motta	Dr., Engenheiro Agrônomo	http://lattes.cnpq.br/8680679653637138
Araína Hulmann Batista	Dra., Engenheira Agrônoma	http://lattes.cnpq.br/6998288030287433
Bernardo Lipski	MSc., Engenheiro Agrônomo	http://lattes.cnpq.br/6729588963615658

HIDROLOGIA E HIDROSEDIMENTOLOGIA

Fernando Mainardi Fan	Dr., Engenheiro Ambiental	http://lattes.cnpq.br/2253828772531348
Irani do Santos	Dr., Geógrafo	http://lattes.cnpq.br/5351700724990743
João Batista Dias de Paiva	Dr., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/8797362461678439
João Paulo J. Saboia	M.Sc., Engenheiro Ambiental	http://lattes.cnpq.br/1148076312542763
Julio Werner Yoshioka Bernardo	M.Sc., Engenheiro Ambiental	http://lattes.cnpq.br/9289720469347369
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Dr., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/9163718529870752
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	M.Sc. Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/0468168157068042
Rubem Luiz Daru	M.Sc., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/5523700772597388
Tobias Bernward Bleninger	Dr., Engenheiro Civil	http://lattes.cnpq.br/5131189316971564

QUALIDADE DE SEDIMENTOS

Camila Ghilardi Cardoso Fontanella	M.Sc., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/6768888804239630
Gheysa do Rocio Moraes Pires	M.Sc., Química Ambiental	http://lattes.cnpq.br/2618972397792943
Rosemary Aparecida Brogim	Dra., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/2848426979042715

MEIO BIÓTICO

FLORA

Fernando Camargo da Silva	Esp., Engenheiro Florestal	http://lattes.cnpq.br/8784632725243557
Juliano José da Silva Santos	MSc., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/2365223544076944

FAUNA

Andressa Gatti	Dra., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/4572274192248896
Camila Ghilardi Cardoso Fontanella	MSc., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/6768888804239630
Daniel da Silva Ferraz	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/2277219497950697
Fabrício Locatelli Trein	Esp., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/9787718063873855
João Eduardo Cavalcanti Brito	MSc., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/8949716465914443
Leonardo Liberali Wedekin	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/1896046647953008
Letícia de Paulo Koproski	Dra., Medica Veterinária	http://lattes.cnpq.br/3556372314320095
Lucas Reinert Laufer Pereira Mendes	Biólogo	http://lattes.cnpq.br/8111616653190732
Luiz Eduardo Macedo Reis	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/6905739300346980
Marcelo Alejandro Villegas Vallejos	MSc., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/6098794122212386
Matheus Ferreira de Souza	Médico Veterinário	http://lattes.cnpq.br/2616758728280165
Matheus Oliveira Freitas	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/5550609084808301
Maurício Belézia de Oliveira	Esp., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/6239819920450961
Michel Barros Faria	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/8990052092397056
Patrícia Dammski Borges de Andrade	MSc., Bióloga	http://lattes.cnpq.br/3040297416264303
Paulo Rogerio Mangini	Dr., Médico Veterinário	http://lattes.cnpq.br/3007985003165083
Rafael Lucchesi Balestrin	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/3889085115853833
Raphael Eduardo Fernandes Santos	Esp., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/7738724695987815
Robson Odeli Espíndola Hack	Esp., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/9746099348251654
Vinícius Abilhoa	Dr., Biólogo	http://lattes.cnpq.br/0315094345358871

ESTAGIÁRIOS

Alcides Conte Neto	Estatística	http://lattes.cnpq.br/6629850738248226
Ana Carolina Canossa Becker	Engenharia Civil	http://lattes.cnpq.br/6054762283835269
Angel Aparecida Maia	Geologia	http://lattes.cnpq.br/4055730889405891
Carolina Valério Leme	Engenharia Ambiental	http://lattes.cnpq.br/9673870579986011

Eduardo Miguel Zanette Correia	Ciências Biológicas	http://lattes.cnpq.br/9916816146000799
Ericka Viviane Lemos Marcondes	Ciências Biológicas	http://lattes.cnpq.br/5565766260121240
Isabela Martins Hoff Grando	Ciências Biológicas	http://lattes.cnpq.br/3107172799158996
Jaqueline Schmidt	Ciências Biológicas	http://lattes.cnpq.br/2113943688297300
Jéssica Cristina Lozovei	Geografia	http://lattes.cnpq.br/3151692305270284
Luiz Guilherme Tatsch Henriqui	Engenharia Ambiental	http://lattes.cnpq.br/3720037483658594
Mariana Simões Stuckert Fialho	Tecnologia em Processos Ambientais	http://lattes.cnpq.br/6990586044503074
Murilo Radloff Barghouthi	Engenharia Florestal	http://lattes.cnpq.br/9618792830948893
Renan José Alberton Disner	Engenharia Ambiental	http://lattes.cnpq.br/3465652787199534

Lista de Figuras

Figura 1 – Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero.	34
Figura 2 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na escala 1:25.000 com destaque em vermelho a área referente à barragem de Fundão. Mapa modificado de CPRM (1994).	36
Figura 3 – Filitos sericíticos crenulados, mapeados na barragem de Fundão.	37
Figura 4 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.	42
Figura 5 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.	43
Figura 6 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.	44
Figura 7 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.	45
Figura 8 – Areal situado nas margens do rio Doce Processo DNPM 830010/2001. A) Imagem World View de 15/06/2015 e B) Imagem World View de 10/02/2016.	46
Figura 9 – Processos situados nas margens do rio Doce, com destaque em vermelho para o processo mineral afetado com a lama de rejeito. A) Imagem World View de 21/01/2015 e B) Imagem World View de 26/02/2016.	46
Figura 10 – Processos situados nas margens do rio Doce, com destaque em vermelho para o processo mineral afetado com a lama de rejeito. A) Imagem World View de 21/01/2015 e B) Imagem World View de 11/02/2016.	47
Figura 11 – Localização das cavidades/abrigos situados na proximidade da barragem Santarém.	48
Figura 12 – Localização das cavidades/abrigos elencados como atingidos pelo rejeito (MPMG, 2017). A localização das cavidades afetadas é o mesmo da mapeada pela Carste e Agroflor.	49
Figura 13 – Fotos gerais da vistoria espeleológica e a equipe envolvida nesta atividade.	50
Figura 14 – Localização das cavernas selecionadas para vistoria.	51
Figura 15 - Localização dos pontos coletados para amostragem em solos anteriores ao desastre.	58
Figura 16 - Localização dos pontos de amostragem em rejeitos depositados após o rompimento da barragem de Fundão.	60
Figura 17 - Fração granulométrica média do rejeito barrado em Germano.	65
Figura 18 – Fração granulométrica média do rejeito depositado nas margens do rio Doce a jusante da barragem de Fundão.	66
Figura 19 – Resultado médio (n=22 amostras) da granulometria do rejeito coletado e analisado pela CH2M (2017).	66
Figura 20 – Distribuição granulométrica média do rejeito (D50) depositado nas planícies de inundação ao longo do caminho percorrido pela lama a partir da barragem de Fundão.	67
Figura 21 - Fração granulometria média do solo natural (n = 32).	68

Figura 22 - Representação esquemática (apenas duas dimensões) de dois tipos de estrutura (agregados) do horizonte B do solo sob condições naturais (I - estrutura em blocos, com tamanho de 20 mm e II - estrutura granular, com tamanho de 2 mm).....	70
Figura 23 - Localização aproximada dos pontos levantados pela CH2M (2017) para determinação de metais pesados em solos (margens esquerda e direita) e em sedimentos (calha do rio). Região entre Mariana e Barra longa, denominada de trecho 08.....	74
Figura 24 – Mapa da bacia do rio Doce destacando o caminho da lama a partir do rompimento da barragem do Fundão e os pontos de amostragem de solo às margens do rio.	78
Figura 25 – Níveis pseudototais dos elementos determinados para as amostras controle, solo afetado e rejeito sendo estes apresentados no formato de <i>box-plot</i> . A) análise para arsênio e B) análise para bário. Total de amostras analisadas: controle n=12, solo afetado n =23 e rejeito n=25.	79
Figura 26 – A) Agrupamento principal dos dados de Guerra et al. (2017) na PC1 entre amostras de solo de controle, solo afetado, e rejeito de mineração. B) Agrupamento principal dos dados de Guerra et al. (2017) na PC1 e picos de raios X.....	79
Figura 27 – Contorno barragem de Fundão.	90
Figura 28 – Imagem utilizada para georreferenciamento das seções transversais.....	91
Figura 29 – Vetorização das seções transversais e análise em relação às curvas de nível de 27/10/2015.....	91
Figura 30 – Curvas de nível referentes aos períodos pré e pós-desastre (27/10/2015 e 12/11/2015).	92
Figura 31 – Exemplo de vértices que compõem o traçado de uma curva de nível e de trecho de arquivo de texto contendo as coordenadas XYZ de cada vértice.	92
Figura 32 – MDT referente ao dia 27/10/2015 no formato GeoTIFF (pré-desastre).....	93
Figura 33 – MDT referente ao dia 12/11/2015 no formato GeoTIFF (pós-desastre).	93
Figura 34 – MDT referente ao dia 02/02/2016 no formato GeoTIFF (pós-desastre).	94
Figura 35 – Subtração entre os MDTs.	94
Figura 36 – Resultado da subtração entre os MDTs de 27/10/2015 e 12/11/2015.	95
Figura 37 – Resultado da subtração entre os MDTs de 12/11/2015 a 02/02/2016.	95
Figura 38 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios com indicação dos principais problemas decorrentes.....	97
Figura 39 – Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill (Curva 5) e Brune (Curva 4).	99
Figura 40 – Batimetria realizada pela HDC Engenharia em agosto/2007 (pré-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.	107
Figura 41 – Batimetria realizada pela HDC Engenharia em maio/2014 (pré-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.	107
Figura 42 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em novembro/2015 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.	108
Figura 43 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em maio/2016 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.....	108

Figura 44 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em dezembro/2016 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.	109
Figura 45 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em outubro/2017 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.	109
Figura 46 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em junho/2015 antes do desastre.....	114
Figura 47 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em dezembro/2015 após o desastre.....	115
Figura 48 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em agosto/2016 após o desastre (nota-se que há uma região sem dados).	115
Figura 49 – Profundidades máximas de água, levantamento de junho/2015.	116
Figura 50 – Profundidades máximas de água, levantamento em dezembro/2015 após o desastre... ..	117
Figura 51 – Profundidades máximas de água, levantamento em agosto/2016 após o desastre.	117
Figura 52 – Evolução das curvas cota-volume do reservatório da UHE Mascarenhas.	122
Figura 53 – Localização da estação Fazenda Ouro Fino.	126
Figura 54 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométrica.	128
Figura 55 – Estações IGAM e IEMA.	130
Figura 56 – Estações sedimentométricas selecionadas para análise das concentrações de sedimentos em suspensão.....	134
Figura 57 – Estações de qualidade da água selecionadas para análise da turbidez e dos sólidos suspensos totais.	134
Figura 58 – Estações virtuais selecionadas para análise das reflectâncias espectrais de superfície na faixa do vermelho e do infravermelho.	136
Figura 59 – Séries amostrais de uma mesma variável “x”, com diferentes médias e variâncias.....	138
Figura 60 – Ilustração do teste t de Student para médias.	138
Figura 61 – Ilustração do teste F de Snedecor.	139
Figura 62 – Comparação entre as linhas de tendência na estação Fazenda Ouro Fino (56776500). ..	140
Figura 63 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Porto Firme (560750000).	141
Figura 64 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Ponte Nova Jusante (56110005). ..	142
Figura 65 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Acaiaca Jusante (56335001).....	142
Figura 66 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Dom Cavati (56935000).	143
Figura 67 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Fazenda Cachoeira d’Antas (56425000).	143
Figura 68 – Alterações no transporte de sedimentos estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000).	144
Figura 69 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Governador Valadares (56850000).	145

Figura 70 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Tumiritinga (56920000).....	145
Figura 71 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Colatina (56994500).....	146
Figura 72 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD013.	146
Figura 73 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD023.	147
Figura 74 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD019.....	147
Figura 75 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD044.	148
Figura 76 – Série histórica de CSS (azul) para a estação 56075000, localizada no rio Piranga. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).....	149
Figura 77 – Série histórica de CSS para a estação 56696000, localizada no rio Piracicaba. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).....	149
Figura 78 – Série histórica de CSS para a estação 56994500, localizada no rio Doce. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	150
Figura 79 – Anomalia sem sazonalidade da CSS para a estação 56075000, localizada no rio Piranga. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	151
Figura 80 – Anomalia sem sazonalidade da CSS para a estação 56696000, localizada no rio Piracicaba. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	151
Figura 81 – Anomalia sem sazonalidade da CSS para a estação 56994500, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	152
Figura 82 – Anomalia da CSS para a estação 56425000, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	152
Figura 83 – Série histórica da turbidez para a estação RD013, localizada no rio Piranga. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	153
Figura 84 – Série histórica da turbidez para a estação RD032, localizada no rio Piracicaba. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).....	153
Figura 85 – Série histórica da turbidez para a estação RD089, localizada no rio Suaçuí Grande. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).....	154
Figura 86 – Série histórica da turbidez para a estação RD071, localizada no rio do Carmo. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).....	154
Figura 87 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD019, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	155

Figura 88 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD019, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	155
Figura 89 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD083, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	156
Figura 90 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD130, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	156
Figura 91 – Valor máximo de turbidez registrado em cada uma das estações localizadas no caminho da onda de rejeitos, sendo a estação RD072 a mais a montante e a RD130 a mais a jusante nesse percurso.	157
Figura 92 – Comparação da turbidez máxima encontrada nas estações localizadas no caminho da onda de rejeitos nos anos de 2016 e 2017 (azul) e apenas no verão 2016/2017 (laranja).	157
Figura 93 – Anomalia padrão dos SSTs para a estação RD001, localizada no rio Piranga. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	158
Figura 94 – Anomalia padrão dos SSTs para a estação RD039, localizada no rio Santo Antônio. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	159
Figura 95 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD072, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	159
Figura 96 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD033, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	160
Figura 97 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD033, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	160
Figura 98 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD059, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	161
Figura 99 – Valores de SSTs ao longo do caminho da onda de rejeitos em novembro/2015.	161
Figura 100 – Série histórica de RefVER para a estação REF06, localizada no rio Santo Antônio. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	162
Figura 101 – Série histórica de RefVER para a estação REF10, localizada no rio Caratinga. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	162
Figura 102 – Série histórica de RefVER para a estação REF02, localizada no rio Doce. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	163

Figura 103 – Série histórica de RefVER para a estação REF15, localizada no rio Doce. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	163
Figura 104 – Anomalia sem sazonalidade da RefVER para a estação REF02, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	164
Figura 105 – Anomalia sem sazonalidade da RefVER para a estação REF15, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	164
Figura 106 – Série histórica da RefIVP para a estação REF13, localizada no rio Manhuaçu. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefIVP antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	165
Figura 107 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF13, localizada no rio Manhuaçu. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	165
Figura 108 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF03, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	166
Figura 109 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF08, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	166
Figura 110 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF14, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).	167
Figura 111 – Reflectância espectral da água com vários níveis de concentração de sedimentos suspensos.	168
Figura 112 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de CSS.	170
Figura 113 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de CSS.	170
Figura 114 - Resultado do teste estatístico <i>t de student</i> para as estações de CSS ao nível de significância $\alpha = 1\%$	171
Figura 115 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de CSS ao nível de significância $\alpha = 1\%$	171
Figura 116 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de turbidez.	173
Figura 117 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de Qualidade de Água com dados de turbidez.	173
Figura 118 – Resultado do teste estatístico <i>t de student</i> para as estações de turbidez ao nível de significância $\alpha = 1\%$	174
Figura 119 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de turbidez ao nível de significância $\alpha = 1\%$. Sólidos Suspensos Totais.	174

Figura 120 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de SST.	176
Figura 121 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de Qualidade de Água com dados de SST.	176
Figura 122 – Resultado do teste estatístico <i>t de student</i> para as estações de SST ao nível de significância $\alpha = 1\%$	177
Figura 123 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de SST ao nível de significância $\alpha = 1\%$. Refletância espectral de superfície na faixa do vermelho	177
Figura 124 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de RefVER.	179
Figura 125 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de RefVER.	179
Figura 126 – Resultado do teste estatístico <i>t de student</i> para as estações de RefVER ao nível de significância $\alpha = 1\%$	180
Figura 127 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de RefVER ao nível de significância $\alpha = 1\%$	180
Figura 128 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de RefIVP.	182
Figura 129 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de RefIVP.	182
Figura 130 – Resultado do teste estatístico <i>t de student</i> para as estações de RefIVP ao nível de significância $\alpha = 1\%$	183
Figura 131 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de RefIVP ao nível de significância $\alpha = 1\%$	183
Figura 132 – Localização das estações de amostragem no trecho de Mariana até o município de rio Doce, utilizadas no relatório da Fundação COPPETEC (2016).	191
Figura 133 – Localização das estações de amostragem no trecho de São Pedro dos Ferros em Minas Gerais a Colatina no Espírito Santo, Fundação COPPETEC (2016).	191
Figura 134 – Localização das estações de amostragem no trecho de Colatina até a foz do rio Doce, Fundação COPPETEC (2016).	192
Figura 135 – Localização das estações de amostragem no rio Gualaxo do Norte trecho de Colatina até a foz do rio Doce, CH2M (2017).	193
Figura 136 – Localização das estações de amostragem no trabalho de Canatto (2017).	194
Figura 137 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizado por Maia (2017).	195
Figura 138 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizados pelo CPRM (2015).	196
Figura 139 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizados pela CPRM (2016).	197
Figura 140 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizado pelo IEMA (2015-2016).	199
Figura 141 – Localização das estações de amostragem do monitoramento realizado pelo IGAM (2016).	200
Figura 142 – Distribuição dos resultados de arsênio por trecho.	202

Figura 143 – Distribuição dos resultados de cádmio por trecho.....	203
Figura 144 – Distribuição dos resultados de chumbo por trecho.	204
Figura 145 – Distribuição dos resultados de cobre por trecho.	205
Figura 146 – Distribuição dos resultados de cromo por trecho.	206
Figura 147 – Distribuição dos resultados de mercúrio por trecho.	207
Figura 148 – Distribuição dos resultados de níquel por trecho.	208
Figura 149 – Distribuição dos resultados de zinco por trecho.	209
Figura 150 – Distribuição dos resultados de alumínio por trecho.	211
Figura 151 – Distribuição dos resultados de ferro por trecho.....	212
Figura 152 – Distribuição dos resultados de manganês por trecho.	213
Figura 153 – Distribuição espacial dos dados granulométricos.	215
Figura 154 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento arsênio.	216
Figura 155 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento cádmio.....	217
Figura 156 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento chumbo.	217
Figura 157 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento cobre.	218
Figura 158 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento cromo.	218
Figura 159 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento mercúrio.....	219
Figura 160 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento níquel.	219
Figura 161 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento zinco.	220
Figura 162 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento alumínio.....	220
Figura 163 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento ferro.	221
Figura 164 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento manganês.....	221
Figura 165 – Comparativo dos resultados obtidos para a granulometria.	222
Figura 166 – Maior riqueza de taxa de macroinvertebrados bentônicos segundo dados do PMQQS nos meses de agosto e setembro/2017.....	226
Figura 167 – Riqueza de taxa de macroinvertebrados aquáticos segundo dados disponibilizados pela UHE Baguari entre julho/2012 e julho/2017.....	232
Figura 168 – Densidade total de aquáticos segundo dados disponibilizados pela UHE Baguari entre julho/2012 e julho/2017.	232
Figura 169 – Aspecto da vegetação ciliar atingida pela onda de lama.....	241
Figura 170 – Vegetação ciliar suprimida pela onda de lama.	242
Figura 171 – Localização aproximada dos estudos de Rievers (2010), Moura et al. (2012), Santos (2013), em relação ao complexo de barragens da empresa Samarco e a foz do rio Doce.	252

Figura 172 – Exemplar de <i>Tropidurus torquatus</i> observado próximo ao rio Doce no Parque Estadual do Rio Doce.	258
Figura 173 – Exemplar de <i>Dipsas cf. albifrons</i> encontrada atropelada em uma estrada de acesso ao Parque Estadual do Rio Doce.	259
Figura 174 – Exemplar de <i>Micrururs corallinus</i> encontrada em uma estrada de acesso ao Parque Estadual do Rio Doce.	259
Figura 175 – Número total de ninhos registrados nas últimas dez temporadas, considerando todas as espécies, incluindo as não identificadas.	261
Figura 176 – Número de desovas por espécie, considerando somente os ninhos abertos após eclosão, quando a espécie é identificada.....	262
Figura 177 – Distribuição temporal dos registros não reprodutivos de quelônios marinhos na área de monitoramento do PMP-BC/ES durante o período de outubro de 2010 a setembro de 2016.	263
Figura 178 – Região de abrangência do Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo (PMP-BC/ES), com 14 divisões geográficas estabelecidas pelo referido programa.....	274
Figura 179 – Tendência anual no número de encalhes do boto-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) por região monitorada durante o PMP-BC/ES.....	275
Figura 180 – Tendência anual no número de encalhes da toninha (<i>Pontoporia blainvillei</i>) por região monitorada durante o PMP-BC/ES.....	276
Figura 181 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Rio Casca (56415000).	300
Figura 182 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Rio Matipó (56484998).	300
Figura 183 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Mario de Carvalho (56696000)... ..	301
Figura 184 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Colatina (56994500).	301
Figura 185 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Fazenda Barraca (56787000).	302
Figura 186 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Senhora do Porto (56800000).	302
Figura 187 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Naque Velho (56825000).	303
Figura 188 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Porto Santa Rita (56846000).	303
Figura 189 – Alterações no transporte de sedimentos na estação São Pedro do Suaçuí (56860000).....	304
Figura 190 – V Alterações no transporte de sedimentos na estação Vila Matias Montante (56891900).	304
Figura 191 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Fazenda Bragança (56976000).	305
Figura 192 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Assaraí Montante (56989400).	305
Figura 193 – Alterações no transporte de sedimentos na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000).	306
Figura 194 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Afonso Cláudio Montante (56990990).	306
Figura 195 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Laranja da Terra (56991500).	307

Figura 196 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Baixo Guandu (56992000).	307
Figura 197 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Jusante Córrego Piaba (569933551).....	308
Figura 198 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Ponte do Pancas (56995500)	308
Figura 199 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD019.	309
Figura 200 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD073.	309
Figura 201 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD034.	310
Figura 202 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD033.	310
Figura 203 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD039.	311
Figura 204 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RDC1E010/P2.	311
Figura 205 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56075000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	312
Figura 206 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56425000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	313
Figura 207 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56539000 Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	314
Figura 208 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56696000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	315
Figura 209 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56850000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	316
Figura 210 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56920000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	317
Figura 211 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56994500. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	318
Figura 212 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD001. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	319
Figura 213 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD013. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	320
Figura 214 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD019. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	321

Figura 215 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD032. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	322
Figura 216 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD033. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	323
Figura 217 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RS035. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	324
Figura 218 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD039. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	325
Figura 219 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD044. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	326
Figura 220 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD045. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	327
Figura 221 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD053. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	328
Figura 222 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD058. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	329
Figura 223 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD059. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	330
Figura 224 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD067. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	331
Figura 225 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD071. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	332
Figura 226 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD072. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	333
Figura 227 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD083. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	334
Figura 228 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD089. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	335

Figura 229 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD110. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	336
Figura 230 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD115. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	337
Figura 231 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD130. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	338
Figura 232 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD001. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	339
Figura 233 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD014. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	340
Figura 234 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD019. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	341
Figura 235 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD032. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	342
Figura 236 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD033. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	343
Figura 237 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD035. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	344
Figura 238 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD039. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	345
Figura 239 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD044. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	346
Figura 240 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD045. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	347
Figura 241 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD053. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	348
Figura 242 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD058. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	349

Figura 243 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD059. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).....	350
Figura 244 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD067. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).....	351
Figura 245 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD071. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).....	352
Figura 246 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD072. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).....	353
Figura 247 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD083. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).....	354
Figura 248 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD089.	355
Figura 249 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF01. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	356
Figura 250 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF02. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	357
Figura 251 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF03. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	358
Figura 252 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF04. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	359
Figura 253 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF05. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	360
Figura 254 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF06. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	361
Figura 255 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF07. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	362
Figura 256 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF08. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	363
Figura 257 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF09. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	364

Figura 258 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF10. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	365
Figura 259 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF11. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	366
Figura 260 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF12. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	367
Figura 261 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF13. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	368
Figura 262 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF14. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	369
Figura 263 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF15. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	370
Figura 264 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF01. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	371
Figura 265 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF02. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	372
Figura 266 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF03. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	373
Figura 267 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF04. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	374
Figura 268 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF05. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	375
Figura 269 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF06. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	376
Figura 270 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF07. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	377

Figura 271 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF08. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	378
Figura 272 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF09. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).	379
Figura 273 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF10. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	380
Figura 274 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF11. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	381
Figura 275 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF12. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	382
Figura 276 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF13. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	383
Figura 277 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF14. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha CONTÍNUA).....	384
Figura 278 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF15. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)	385

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Processos Minerários obtidos junto ao DNPM – SIGMINE em atividade de exploração.	39
Tabela 2 – Síntese das principais substâncias requeridas e/ou em pesquisa.	41
Tabela 3 – Lista de cavidades/abrigos situados no entorno da barragem de Santarém. As nomenclaturas destas cavidades/abrigos possuem uma simbologia própria do mapeamento realizado pela Samarco, Agroflor e Casrte.	48
Tabela 4 – Cavernas selecionadas para vistoria (CANIE – Responsável: CECAV).	51
Tabela 5 – Análises físicas e de fertilidade de amostras de solo não afetados e afetados pelo rejeito.	56
Tabela 6 – Caracterização química de solos de terras altas e de várzeas e de sedimentos da calha do rio Doce.	59
Tabela 7 - Resultados de análises químicas do rejeito depositado nas áreas afetadas.	61
Tabela 8 – Atributos químicos de amostra de rejeitos depositados.	62
Tabela 9 – Análises químicas de rejeito e solo provenientes da Mina de Alegria, Mariana (MG).	63
Tabela 10 - Análises físicas do rejeito depositado no vale dos rios Gualaxo do Norte e Carmo.	69
Tabela 11 - Composição granulométrica, densidade do solo, densidade de partículas e volume total de poros para amostra coletada de 0-30 cm em pacote de rejeito depositado com o desastre.	71
Tabela 12 – Composição granulométrica, densidade aparente e densidade de partícula de amostras de rejeito barrado e de solo (natural) provenientes da Mina de Alegria, Mariana (MG).	71
Tabela 13 – Macroporosidade, microporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica e capacidade de campo do rejeito e do solo provenientes da Mina de Alegria, Mariana (MG). ...	71
Tabela 14 – Resultados das análises químicas para metais – coletado pela CH2M – região do trecho 08 (entre Mariana e Barra Longa).	75
Tabela 15 - Teores de metais no rejeito depositado na planície aluvionar do rio Doce.	76
Tabela 16 – Dados encontrados para arsênio (As) e manganês (Mn) para os diferentes tipos de amostra (n=60).	78
Tabela 17 – Frações pseudototais e móveis para Mn e As nas amostras selecionadas (n=23).	80
Tabela 18 – Número de propriedades atingidas por município.	82
Tabela 19 – Resumo quantitativo dos prejuízos causados	82
Tabela 20 – Área atingida por uso e ocupação do solo.	82
Tabela 21 – Número e percentual de áreas atingidas por propriedades e por município.	83
Tabela 22 – Percentual de área atingida por grupo.	83
Tabela 23 – Análise de incerteza devido principalmente ao tipo de dado processado e aos métodos.	96
Tabela 24 – Tipos de operação de reservatórios.	99

Tabela 25 – Constantes W e K para o cálculo do peso específico aparente.....	100
Tabela 26 – Volume máximo de água para os diversos levantamentos (o incremento do volume é o volume assoreado no intervalo dos levantamentos).....	110
Tabela 27 – Volume máximo de água para os diversos levantamentos.....	116
Tabela 28 – Volumes assoreados para diversos períodos.....	118
Tabela 29 – Estimativa de taxas de assoreamento pelo método empírico.....	118
Tabela 30 – Evolução das curvas cota-volume do reservatório da UHE Mascarenhas.....	121
Tabela 31 – Comparação do volume do reservatório nas cotas mínima normal e máxima normal entre levantamento de 2016 e levantamento anterior.....	123
Tabela 32 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas (ANA).....	127
Tabela 33 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas (IGAM/IEMA).....	129
Tabela 34 – Períodos adotados para a análise das estações IGAM e IEMA.....	130
Tabela 35 – Estações de monitoramento sedimentométrico na bacia do rio Doce operadas por ANA e CPRM.....	132
Tabela 36 – Estações de monitoramento de qualidade de água na bacia do rio Doce operadas pelo IGAM e pelo IEMA.....	133
Tabela 37 – Estações virtuais de monitoramento de reflectância espectral na faixa do vermelho e infravermelho com dados dos satélites Landsat 5 e 8, com <i>proxy</i> da concentração de sedimentos nos rios da bacia do rio Doce.....	135
Tabela 38 – Resultados dos testes estatísticos <i>t de student</i> e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de CSS. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.....	169
Tabela 39 – Resultados dos testes estatísticos <i>t de student</i> e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de turbidez. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.....	172
Tabela 40 – Resultados dos testes estatísticos <i>t de student</i> e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de SST. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.....	175
Tabela 41 – Resultados dos testes estatísticos <i>t de student</i> e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de RefVER. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.....	178
Tabela 42 – Resultados dos testes estatísticos <i>t de student</i> e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de RefIVP. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.....	181
Tabela 43 – Classificação granulométrica de sedimento de acordo com o tamanho da partícula.....	189
Tabela 44 – Classificação dos elementos químicos com base nos efeitos à biota.....	190
Tabela 45 – Distribuição dos pontos amostrais por trecho.....	198

Tabela 46 – Localização das estações de amostragem e pontos de coleta do monitoramento emergencial realizado pela Fundação Renova.	223
Tabela 47 – Localização dos pontos de coleta do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimento realizado pela Fundação Renova.	224
Tabela 48 – Localização dos pontos de coleta do programa de monitoramento limnológico da UHE Baguari.....	225
Tabela 49 – Indivíduos coletados por ponto de coleta entre agosto e outubro/2017 segundo dados do PMQQS.	227
Tabela 50 – Macroinvertebrados aquáticos encontrados vivos na primeira expedição realizada pelo GIAIA, segundo Moraes (2016).....	229
Tabela 51 – Macroinvertebrados aquáticos encontrados na segunda e terceira expedições realizadas pelo GIAIA, segundo Menezes (2016) e Menezes, Arruda, Gargiulo (2016).	230
Tabela 52 – Classificação da qualidade de água segundo Junqueira et al. (2000) utilizando a pontuação do BMWP adaptado por Junqueira et al. (2000) nos oito pontos amostrados próximos à UHE Baguari no período em que os dados foram disponibilizados.	233
Tabela 53 - Estimativa das áreas afetadas pela deposição de rejeitos.....	243
Tabela 54 – Modelos generalizados lineares (GLM) considerados para explicar a variação do número de encalhes do boto-cinza na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro entre 2010 e 2016.	277
Tabela 55 – Modelos generalizados lineares (GLM) considerados para explicar a variação do número de encalhes da toninha na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro entre 2010 e 2016.	277

Sumário

1. INTRODUÇÃO	29
2. MEIO FÍSICO	31
2.1 GEOLOGIA.....	31
2.1.1 Introdução	31
2.1.2 Objetivo.....	31
2.1.3 Metodologia	32
2.1.4 Revisão bibliográfica - Minerações no Quadrilátero Ferrífero	33
2.1.4.1 Condicionantes geológicas prévias da área da mineração e da barragem de Fundão	33
2.1.5 Resultados Preliminares	35
2.1.5.1 Contexto geológico – barragem de Fundão	35
2.1.5.2 Processos minerários afetados	37
2.1.5.3 Espeleologia – cavidades/abrigos.....	47
2.2 SOLOS.....	52
2.2.1 Introdução.....	52
2.2.2 Objetivo.....	53
2.2.3 Metodologia	54
2.2.4 Resultados.....	54
2.2.4.1 Fertilidade do solo e do rejeito	55
2.2.4.2 Propriedades físicas e morfológicas do solo	65
2.2.4.3 Mudança na mineralogia da fração argila.....	72
2.2.4.4 Aumento no teor total de metais e semimetais.....	73
2.2.4.5 Danos gerais na área rural.....	81
2.2.4.6 Considerações finais.....	83
2.3 HIDROLOGIA E HIDROSEDIMENTOLOGIA.....	86
2.3.1 Introdução	86
2.3.2 Objetivo.....	87
2.3.3 Estimativa do Volume Defluente da Barragem de Fundão	87
2.3.3.1 Materiais	89
2.3.3.2 Métodos.....	90
2.3.3.3 Resultados.....	94
2.3.3.4 Considerações finais	96
2.3.4 Estimativa de Volume Assoreado nos Reservatórios Afetados.....	96
2.3.4.1 Revisão bibliográfica	96

2.3.4.2 Metodologia.....	106
2.3.4.3 Resultados.....	106
2.3.4.4 Considerações finais	124
2.3.5 Análise das Alterações no Transporte de Sedimentos	125
2.3.5.1 Revisão bibliográfica	125
2.3.5.2 Materiais e Métodos	125
2.3.5.3 Aplicação dos testes.....	139
2.3.5.4 Resultados.....	140
2.3.5.5 Considerações finais	185
2.3.6 Considerações e Trabalhos Futuros.....	185
2.4 QUALIDADE DE SEDIMENTOS	187
2.4.1 Introdução.....	187
2.4.2 Objetivo.....	187
2.4.3 Metodologia	187
2.4.3.1 Distribuição espacial dos dados físico-químicos	188
2.4.3.2 Parâmetros físico-químicos para avaliação da qualidade de sedimentos.	189
2.4.3.3 Macroinvertebrados bentônicos.....	190
2.4.4 Resultados.....	190
2.4.4.1 Fundação COPPETEC (2016)	190
2.4.4.2 CH2M (2017).....	193
2.4.4.3 Canatto (2017).....	194
2.4.4.4 Maia (2017)	195
2.4.4.5 CPRM (2015).....	196
2.4.4.6 CPRM (2016).....	197
2.4.4.7 Golder Associates (2016).....	198
2.4.4.8 IEMA (2015-2016).....	199
2.4.4.9 IGAM (2016)	200
2.4.4.10 Distribuição espacial dos dados dos autores.....	201
2.4.4.11 Análise Granulométrica.....	214
2.4.5 Comparação de resultados antes e depois do rompimento da Barragem de Fundão	216
2.4.5.1 Arsênio	216
2.4.5.2 Cádmio	217
2.4.5.3 Chumbo.....	217
2.4.5.4 Cobre.....	218

2.4.5.5 Cromo	218
2.4.5.6 Mercúrio.....	219
2.4.5.7 Níquel	219
2.4.5.8 Zinco.....	220
2.4.5.9 Alumínio	220
2.4.5.10 Ferro.....	221
2.4.5.11 Manganês.....	221
2.4.5.12 Granulometria	222
2.4.5.13 Macroinvertebrados Límnicos.....	222
2.4.6 Considerações Finais	234
3 MEIO BIÓTICO	235
3.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO	235
3.1.1 Introdução	235
3.1.2 Documentos oficiais	235
3.1.3 Demais Publicações.....	238
3.1.4 Considerações Finais	240
3.2 FLORA.....	241
3.2.1 Introdução.....	241
3.2.2 Relatórios Técnicos e Documentos	241
3.2.3 Artigos Científicos	244
3.2.4 Considerações Finais	246
3.3 FAUNA	247
3.3.1 Introdução.....	247
3.3.2 Documentos Oficiais	247
3.3.2.1 Notas técnicas – Câmara Técnica de Conservação e Biodiversidade (CTBio).....	247
3.3.2.2 Deliberações Comitê Interfederativo (CIF).....	247
3.3.2.3 Grupo Independente para Avaliação do Dano Ambiental (GIAIA)	247
3.3.2.4 Outros documentos	248
3.3.3 Entomofauna.....	248
3.3.3.1 Introdução.....	248
3.3.3.2 Objetivo.....	248
3.3.3.3 Metodologia.....	248
3.3.4 Herpetofauna	249
3.3.4.1 Introdução.....	249
3.3.4.2 Objetivo.....	251

3.3.4.3 Metodologia herpetofauna terrestre.....	251
3.3.4.4 Resultados herpetofauna terrestre.....	252
3.3.4.5 Metodologia quelônios	260
3.3.4.6 Resultados quelônios	260
3.3.4.7 Considerações finais.....	264
3.3.5 Avifauna	265
3.3.5.1 Introdução.....	265
3.3.5.2 Objetivo.....	265
3.3.5.3 Metodologia.....	265
3.3.5.4 Resultados.....	265
3.3.5.5 Considerações finais	267
3.3.6 Mastofauna	267
3.3.6.1 Introdução.....	267
3.3.6.1 Objetivo.....	268
3.3.6.3 Metodologia.....	269
3.3.6.4 Resultados.....	269
3.3.7 Cetáceos.....	273
3.3.7.1 Pós-desastre em comparação à linha-base	273
3.3.7.2 Considerações finais	279
3.3.8 Considerações consolidadas à fauna	279
REFERÊNCIAS.....	281
APÊNDICES	300

1. INTRODUÇÃO

Após o rompimento da barragem de Fundão em 05 de novembro de 2015, entre as diversas áreas impactadas constam os cursos d'água por onde a lama ou fluxo dos rejeitos passou, incluindo os rios afetados pelo remanso da onda de inundação. Na passagem dessa onda, os sedimentos que representam esses rejeitos liberados foram sendo transportados via hídrica para jusante, percorrendo quase a totalidade do rio Doce e atingindo a área costeira, onde, estando influenciados pelo conjunto dos processos hidrodinâmicos dominantes dessa região, se deslocaram ao longo dessa costa em diversas direções. Ao longo desse trajeto, parte desse material sólido se depositou, tanto em áreas de margens quanto no próprio leito do rio. Os efeitos do rompimento da barragem de Fundão continuam sendo relatados mesmo após dois anos de sua ocorrência. Portanto, o desastre apresenta uma significativa área atingida como também uma abrangência temporal longa.

Dessa forma, o presente documento procura indicar, ainda que em caráter preliminar, os principais danos ocorridos no Meio Físico ao longo da bacia hidrográfica do rio Doce, ou seja, danos e impactos relativos aos materiais sólidos (rejeitos, solos e sedimentos) compilando a primeira etapa deste diagnóstico do pós-desastre, que aborda os seguintes itens:

- processos minerários e acervo espeleológico;
- fertilidade do solo;
- propriedades físicas e morfológicas do solo;
- mineralogia da fração argila do solo;
- teor total de metais e semimetais tóxicos no solo;
- danos à área rural;
- estimativa do volume defluente da barragem de Fundão;
- estimativa do volume assoreado nos reservatórios afetados;
- análise das alterações no transporte de sedimentos;
- análise das concentrações de sólidos suspensos;
- avaliação da alteração da qualidade dos sedimentos de fundo da região fluvial, através da análise de dados secundários (granulometria, metais, semimetais e macroinvertebrados bentônicos).

O Meio Biótico de um ecossistema engloba a fauna e flora, e no presente relatório também se consideram as áreas protegidas e unidades de conservação. O rompimento da barragem de Fundão em Mariana ocasionou direfentes tipos de danos ao meio biótico, afetando diretamente ou indiretamente a biodiversidade da bacia do rio Doce.

O presente documento apresenta uma síntese e discussão dos dados obtidos no período após o desastre do rompimento da barragem de Fundão, município de Mariana. Constam informações que aludem a menções de danos em Unidades de Conservação e, posteriormente, sobre a flora e fauna da região do rio Doce.

O trabalho consistiu em levantar dados disponíveis em publicações das mais diversas – entre relatórios e documentos oficiais dos órgãos ambientais e outros atores envolvidos na avaliação dos danos, assim como extensivas buscas por publicações acadêmicas que se referiram ao período pós-desastre. A partir da avaliação das informações disponíveis assim obtidas por diversos especialistas, seguem-se breves discussões e apreciação desses dados, com vistas a balizar os futuros trabalhos de diagnóstico e monitoramento dos componentes bióticos afetados.

De forma geral, cada capítulo apresenta uma introdução, revisão bibliográfica, metodologia e resultados e considerações relativas à consolidação dos resultados obtidos até o momento.

2. MEIO FÍSICO

2.1 GEOLOGIA

2.1.1 INTRODUÇÃO

Embora as condicionantes geológicas estejam diretamente relacionadas às diversas áreas do meio físico, os danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, associados à geologia propriamente dita estão sobretudo relacionados ao acervo espeleológico e aos processos minerários existentes nas áreas afetadas.

Além destes danos, com o intuito de caracterizar eventuais alterações químicas ocorridas na água, nos solos e nos sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce, que possam estar associadas a antigas atividades minerárias, principalmente no Quadrilátero Ferrífero, o presente documento procura abordar também as condições do contexto geológico e geoquímico anteriores e posteriores ao rompimento. Parte destas alterações químicas está relacionada à remobilização de materiais acumulados no fundo dos rios oriundos das explorações minerais históricas, principalmente àquelas relacionadas aos garimpos de ouro, aos quais normalmente estão também associados os elementos tóxicos como mercúrio e arsênio. Complementações acerca deste tema podem ser encontradas também no Capítulo 2.4 - Qualidade de sedimentos.

Os danos identificados até o momento estão sendo ainda determinados em maior detalhe; de todo modo, preliminarmente pode-se dizer que esse fluxo de lama, proveniente do rompimento da barragem, constituído por água, rejeito e detritos, provocou o soterramento de parte do patrimônio espeleológico, causou danos a alguns processos de extração de bens minerais e foi responsável por alterações no quimismo das águas e sedimentos ao longo de diversas drenagens.

Alguns dos danos indicados acima já haviam sido apontados no laudo técnico preliminar realizado pelo IBAMA (2015a), logo após o desastre, em novembro/2015, intitulado *Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*. Desde então, muitos outros estudos têm sido realizados na intenção de determinar os impactos causados pelo rompimento da barragem de rejeito, entre os quais destaca-se também o *Relatório de campo e interpretações preliminares sobre as consequências do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão (Samarco/VALE/BHP)*, elaborado por Fellipe et al. (2016); a *Avaliação dos impactos da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana* (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2017); e a *Avaliação dos impactos no meio físico resultantes do rompimento da barragem de Fundão*, elaborado por Golder Associates (2016a).

2.1.2 OBJETIVO

Este tópico tem como objetivo apresentar os processos minerários existentes na área atingida pelos rejeitos para posteriormente determinar a extensão das respectivas áreas afetadas e os danos associados, assim como os resultados preliminares referentes aos levantamentos espeleológicos realizados na região da barragem de Santarém.

Além destes objetivos pretende-se também apresentar dados referentes ao contexto geológico e geoquímico anteriores ao rompimento, para posterior correlação com as análises químicas a serem realizadas em solos, sedimentos, água e rochas, de forma a buscar parâmetros que permitam compreender a origem dos diferentes elementos contaminantes e consequentemente, quantificar os danos provocados pelo fluxo de lama oriundo do rompimento da barragem Fundão.

2.1.3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para elaboração deste documento foi dividida nas seguintes etapas:

- Atividades de escritório

Consistiram da revisão bibliográfica e dados preexistentes. Essas atividades estão em andamento e são de fluxo contínuo, baseadas, sobretudo, na análise de documentos, imagens, artigos, dissertações, teses, entre outras. Para uma análise espacial coerente, visando integrar os diferentes níveis de informação, utilizou-se técnicas de geoprocessamento (GIS);

- Processos Minerários

No que se refere a determinação dos polígonos dos processos minerários afetados foram utilizados os dados disponíveis no DNPM/SIGMINE. Estes dados tratam-se de poligonais de todos os processos dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e foram selecionados somente aqueles cujos limites interceptam parcial ou totalmente as áreas afetadas. Os demais processos foram desconsiderados nesta análise. Para cada processo há informações quanto ao requerente, área requerida, substância mineral, fase do processo e outras informações.

- Atividades de campo de levantamento Geológico e Geomorfológico

Estas atividades consistiram de vistorias técnicas executadas nas datas de 17 a 21 de julho de 2017 e 6 a 8 de novembro de 2017 e tiveram como objetivo inicial o reconhecimento preliminar da área da mineração e do arcabouço geológico e geomorfológico. Para esta atividade foram realizadas análises em imagens aéreas e orbitais, identificação das principais litologias em mapas geológicos pré-existentes e acessos. Em campo foram obtidas medidas estruturais com o uso de bússola de geólogo, bem como coletadas amostras de rocha para análises físico-químicas e mineralógicas.

- Atividades de campo para o levantamento do acervo espeleológico

Nas atividades realizadas em 18 a 21 de março de 2018, foram realizadas vistorias acerca do patrimônio espeleológico situado no entorno da barragem de Santarém. Para estas atividades procurou-se determinar, principalmente, se essas cavidades foram afetadas ou não pelos rejeitos, além de informações sobre o desenvolvimento horizontal e vertical, litotipos associados, e demais características gerais do meio físico e do meio biótico.

2.1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA - MINERAÇÕES NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Considerando que as áreas do Quadrilátero Ferrífero (QF) têm sido exploradas há muito tempo, estes processos de extração causaram e ainda causam alterações ambientais acentuadas, principalmente na composição química das águas e sedimentos.

Desde o final do século XVII, o Quadrilátero Ferrífero é uma das mais importantes regiões produtoras de minérios no Brasil, em especial às minerações de ouro. Ribeiro (1998) e Borba (2002) relataram que as associações minerais presentes nos depósitos de ouro são ricas em elementos-traço, os quais podem apresentar alto potencial tóxico. Estas atividades constituíram uma importante fonte de metais pesados, mesmo que atualmente muitas das atividades de extração de ouro estejam paralisadas.

Borba et al. (2000) estimam que, em três séculos de mineração na região do QF, houve o lançamento de cerca de 300 mil toneladas de arsênio (As) em tributários dos rios das Velhas e Doce.

Segundo Maia (2017), a ocupação do QF se deu, principalmente, pela busca do ouro no século XVIII. O minério de ouro, geralmente, ocorre em associação com as piritas. A pirita mais comum é o sulfeto de ferro (FeS_2), contudo é frequente a presença da arsenopirita (FeAsS) nas minas de ouro brasileiras. Em condições atmosféricas, a FeAsS é rapidamente transformada pelo intemperismo químico, primeiramente sendo oxidada à escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) com posterior dissolução desse mineral formando goethita (FeOOH) e liberando arsênio para a solução. Por esse motivo, os teores de arsênio nas águas do rio do Carmo são elevados, podendo chegar a 200 $\mu\text{g/L}$. Os registros de arsênio são verificados em toda extensão do rio do Carmo, mesmo a montante da foz do rio Gualaxo do Norte nesse rio.

O QF é uma região com inúmeras mineralizações auríferas sulfetadas. De acordo com Borba, Figueiredo e Cavalcanti (2004), a distribuição geográfica de arsênio nas rochas do QF guarda uma associação importante com as rochas auríferas sulfetadas. Os principais depósitos auríferos do QF estão concentrados nas porções norte e sul, totalizando 66 minas, a maioria delas atualmente fechadas (LADEIRA, 1988). Além das principais minerações, há existência de inúmeras minas de menor porte e de garimpos. A maioria dos depósitos auríferos, principalmente os da porção norte do QF, está hospedada nas rochas do Supergrupo Rio das Velhas (BORBA; FIGUEIREDO; CAVALCANTI, 2004).

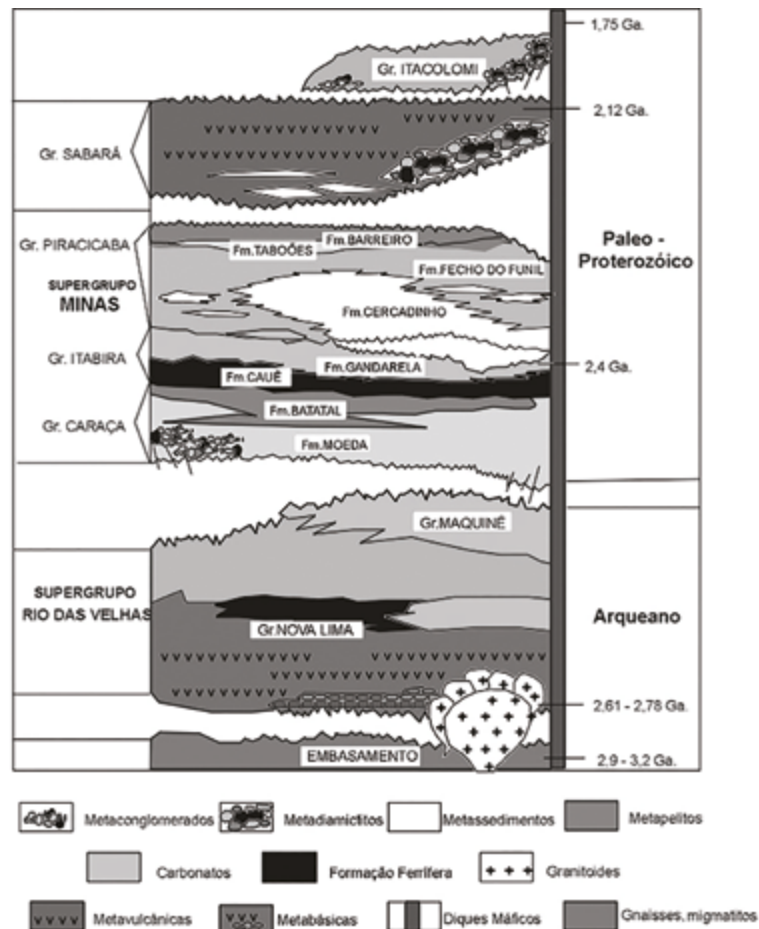
Segundo Sousa (2016), os itabiritos dessa região apresentam uma associação mineral composta por hematita lamelar, magnetita, goethita, quartzo, martita (produto de transformação da oxidação da magnetita em hematita) e outros minerais presentes na canga, como celadonita, barita, monazita e xenotima.

2.1.4.1 Condicionantes geológicas prévias da área da mineração e da barragem de Fundão

De acordo com Costa (2001), as reservas da Samarco Mineração estão localizadas no chamado Complexo Alegria, localizado na porção leste do QF, fazendo parte do Sinclinal de Alegria, estrutura formada por rochas do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas, conforme coluna litoestratigráfica da Figura 1 e mapa geológico da Figura 2.

A formação ferrífera encontra-se na Formação Cauê do Grupo Itabira, pertencente ao Supergrupo Minas. Estão presentes nessa formação diversos tipos de itabirito, outros materiais ferruginosos como cangas, brechas e hematitas compactas, e, ainda, rochas não ferruginosas como quartzitos, filitos, filitos dolomíticos, xistos e metabasitos.

Figura 1 – Coluna estratigráfica proposta para o Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Modificado de Alkmim e Marshak (1998).

A Formação Cauê pertencente ao Grupo Itabira é conhecida como o gigante depósito de minério de ferro hospedado do QF (SPIER et al., 2006), sobrepõe a Formação Batatal e é sobreposto pela Formação Gandarela, ambos em contato de natureza transicional (DORR, 1969). Devido ao comportamento plástico das Formações Ferríferas Bandadas (FFBs) da Formação Cauê, durante o processo de deformação que afetou o QF, a espessura dessa unidade em diversas partes do QF excede 1.500 m (AMORIM; ALKMIM, 2011).

A Formação Cauê (DORR, 1958) é uma sequência composta por FFBs do tipo Lago Superior metamorfizadas, de baixo a médio grau (itabiritos), hematita-filitos, filitos dolomíticos e mármore. Segundo Amorim e Alkmim (2011), há quatro tipos de itabirito hospedados na Formação Cauê: silicoso, dolomítico, anfibolítico e magnetítico.

Os diferentes tipos de óxido de ferro presentes nessa formação seguem uma sequência paragénetica (do estágio mais velho para o mais novo): magnetita, kenomagnetita, martita, hematita granoblástica recristalizada, hematita microtabular de granulometria fina e hematita especular hospedada na zona de cisalhamento (HENSLEY, 2013).

Mendes (2012), ao realizar estudos em formações ferríferas da região do QF, concluiu que, no domínio oeste, com menor grau de deformação e menores temperaturas, que as fácies óxido apresentam a magnetita como mineral predominante e que, à medida que seguem para os domínios central e leste com maior grau de deformação e maiores temperaturas, a quantidade de hematita e o tamanho desses grãos aumentam.

Segundo Costa (2001), a alimentação da usina de concentração, da mineração Samarco, era feita com um blending de minérios provenientes de subdivisões do complexo Alegria.

2.1.5 RESULTADOS PRELIMINARES

2.1.5.1 Contexto geológico – barragem de Fundão

Considerando a relação direta do rejeito com as características geológicas das minas, de onde o minério é extraído e, conseqüentemente, os danos provocados por este devido ao rompimento da barragem, principalmente no que diz respeito aos aspectos geoquímicos, segue breve descrição da geologia da mina e da área da antiga barragem de Fundão.

A partir de vistoria técnica de campo, realizada em julho/2017, verificou-se que a rocha aflorante na Mina de Alegria Sul caracteriza-se por itabiritos e quartzitos ferruginosos, muito friáveis a friáveis.

No que se refere à antiga barragem de Fundão, observações de campo permitiram verificar que na maior parte da área ocorrem filitos do Grupo Piracicaba, conforme Figura 2.

As rochas encontradas na área são essencialmente filitos sericíticos, crenulados (Figura 3) e apresentam-se com intercalações de quartzitos e localmente veios de quartzo. A direção preferencial da foliação nos filitos é NW-SE, com mergulho na direção 40 NE. Além da foliação observa-se ao menos duas famílias de fraturas subverticais.

Estudos geocronológicos a partir de análises U-Pb por Laser Ablation Induced Coupled Mass Spectrometer (LA-ICP-MS), realizados em zircões detríticos, por Mendes et al. (2014), indicam idades médias de deposição das rochas do Grupo Piracicaba de 2680 ± 24 Ma.

Figura 2 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na escala 1:25.000 com destaque em vermelho a área referente à barragem de Fundão. Mapa modificado de CPRM (1994).

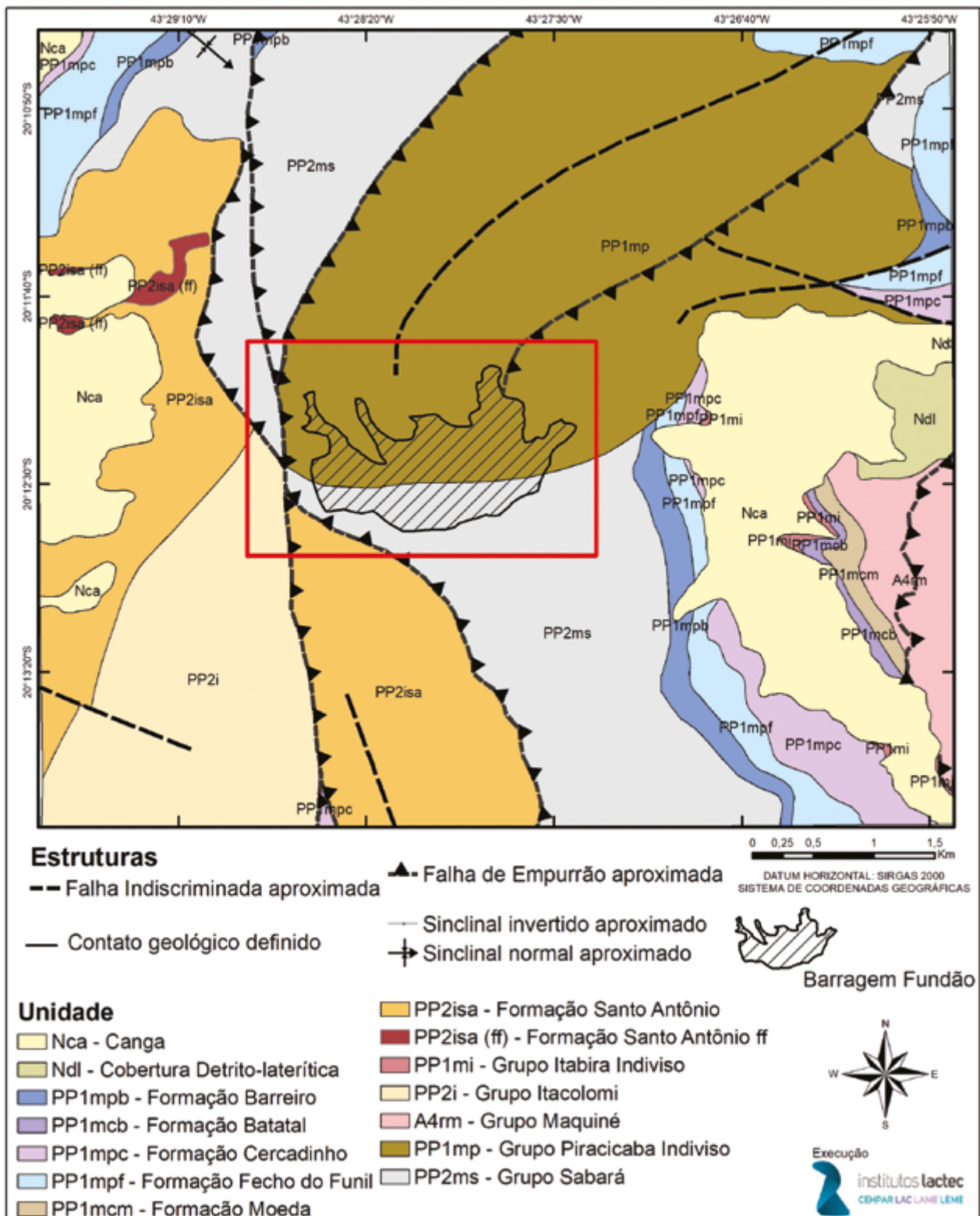


Figura 3 – Filitos sericíticos crenulados, mapeados na barragem de Fundão.



2.1.5.2 Processos minerários afetados

A fim de indicar as diferentes fases que envolvem um processo mineral, segue breve descrição, em ordem cronológica, de como são classificadas, a saber: requerimento de pesquisa; autorização de pesquisa; requerimento de lavra e concessão de lavra para os processos com substâncias em geral; e requerimento de licenciamento e licenciamento apenas para uso na construção civil.

O requerimento de pesquisa pode ser realizado por pessoa física e jurídica e é a primeira fase do processo minerário. Trata-se de um conjunto de documentos que devem ser protocolados no Departamento Nacional de Pesquisas Minerais (DNPM) visando à pesquisa e posterior exploração de um bem mineral. Deve ser instruído, entre outros documentos, com o plano de pesquisa, que deve fornecer subsídios técnicos que denotem a possibilidade de existência de recursos minerais na área pretendida (DNPM).

Na autorização de pesquisa, a partir da publicação do alvará no Diário Oficial da União (DOU), o titular do processo está autorizado, a realizar, num prazo de 2 ou 3 anos, os trabalhos de pesquisa, que têm como meta definir uma jazida, ou seja, qualificar, quantificar e localizar espacialmente a substância mineral de interesse. Nessa fase, antes da outorga da concessão de lavra pode ser pedida a guia de utilização junto ao DNPM, que é o aproveitamento de substâncias minerais (DNPM).

Para o requerimento de lavra, deve ser apresentada a área pretendida para a lavra, o Plano de Aproveitamento Econômico (PAE), que contém informações acerca das instalações do beneficiamento, projetos referentes ao método de mineração a ser adotado, infraestrutura, planos de controle dos impactos ambientais e outros documentos exigidos pelo DNPM.

Para a obtenção da concessão de lavra, é necessário que o interessado esteja de posse da licença de operação e possa fazer o aproveitamento da substância mineral de interesse. A fase de lavra é o conjunto de operações coordenadas objetivando o aproveitamento industrial da jazida, desde a extração de substâncias minerais até o seu beneficiamento. É nessa fase que se faz a aquisição de equipamentos, construção de depósitos, alojamentos, compra de veículos, instituição de servidões, entre outras providências. A jazida e essas instalações todas constituem a mina (DNPM).

O licenciamento é um regime de aproveitamento de substâncias minerais no qual é registrada, no DNPM, licença expedida em obediência a regulamentos administrativos locais, e que permite a extração de determinados bens minerais.

A emissão do registro de licença credencia seu possuidor ao aproveitamento mineral de substâncias destinadas ao emprego imediato na construção civil, ou seja:

- areia, cascalho e saibro, quando utilizados *in natura* na construção civil e no preparo de agregado e argamassas;
- material sílico-argiloso, cascalho e saibro empregados como material de empréstimo;
- rochas, quando aparelhadas para paralelepípedos, guias, sarjetas, moirões ou lajes para calçamento;
- rochas, quando britadas para uso imediato na construção civil e os calcários empregados como corretivos de solo na agricultura.

O aproveitamento mineral por licenciamento fica adstrito à área máxima de cinquenta hectares (50 ha), e é facultado, exclusivamente, ao proprietário do solo ou a quem dele obtiver expressa autorização. A obtenção do título é mais rápida, uma vez que todos os trâmites ocorrem na superintendência, por outro lado, depende das prefeituras e dos proprietários do solo, fato que pode se tornar um elemento complicador. Além disso, o prazo de vigência do título está vinculado às autorizações concedidas pelo proprietário do solo e prefeituras.

A lavra garimpeira é um regime de extração de substâncias minerais com aproveitamento imediato do jazimento mineral que, por sua natureza, sobretudo, seu pequeno volume e a distribuição irregular do bem mineral, não justificam, muitas vezes, investimento em trabalhos de pesquisa, tornando-se, assim, a lavra garimpeira a mais indicada. São considerados como minerais garimpáveis o ouro, diamante, cassiterita, columbita, tantalita, volframita, nas formas aluvionar, eluvional e coluvial, scheelita, demais gemas, rutilo, quartzo, berilo, moscovita, espodumênio, lepidolita, feldspato, mica e outros tipos de ocorrência que vierem a ser indicados a critério do DNPM.

Conforme mencionado, a região da bacia hidrográfica do rio Doce é notoriamente conhecida como rica em uma série de recursos minerais, especialmente as áreas a montante, no QF. Dessa forma, com o rompimento da barragem de Fundão, diversos processos minerários, tanto aqueles já em fase de concessão de lavra quanto os em fase de requerimento e pesquisa, foram direta ou indiretamente afetados.

Dos processos minerais atingidos, potencialmente aqueles situados em área de planícies e várzeas, sobretudo os bens minerais de areia, argila e ouro, podem ter sido mais afetados devido à eventual contaminação com materiais provenientes da barragem de Fundão.

Os dados referentes aos processos minerários foram obtidos junto ao DNPM, Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE). Destes processos, foram selecionados aqueles cujos polígonos estavam inseridos dentro dos limites das áreas atingidas.

A Tabela 1 apresenta os processos, em atividade de exploração do bem mineral, que foram diretamente afetados e que, portanto, sofreram contaminação total ou parcial, em um total de 40 processos. A Tabela 2 apresenta a síntese dos processos minerários afetados indiretamente, uma vez que, quando do rompimento da barragem, encontravam-se em fase de requerimento ou pesquisa, cujos indicadores totalizam 373 processos, ou seja, processos que não estavam em atividade de exploração na época do rompimento da barragem.

A distribuição das poligonais referentes aos processos minerários, em função da escala da área abrangida, está apresentada separadamente, conforme a Figura 4, Figura 5, Figura 6 e a Figura 7.

Tabela 1 – Processos Minerários obtidos junto ao DNPM – SIGMINE em atividade de exploração.

PROCESSO	ÁREA/ HA	FASE	SUBSTÂNCIA	USO	UF
2329/1935	792,15	CONCESSÃO DE LAVRA	MINÉRIO DE FERRO	NÃO INFORMADO	MG
2692/1959	97,62	CONCESSÃO DE LAVRA	BAUXITA	NÃO INFORMADO	MG
1076/1967	280,97	CONCESSÃO DE LAVRA	HEMATITA	NÃO INFORMADO	MG
830404/1979	13,32	LICENCIAMENTO	AREIA	NÃO INFORMADO	MG
830685/1989	29,00	CONCESSÃO DE LAVRA	ÁGUA MINERAL	NÃO INFORMADO	MG
896018/1999	49,93	CONCESSÃO DE LAVRA	AREIA	NÃO INFORMADO	ES
896546/1999	49,80	CONCESSÃO DE LAVRA	AREIA	NÃO INFORMADO	ES
830985/1999	1,01	LICENCIAMENTO	AREIA	NÃO INFORMADO	MG
831698/1999	50,00	LICENCIAMENTO	AREIA	NÃO INFORMADO	MG
831661/2000	50,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
832382/2001	25,46	LICENCIAMENTO	ARGILA	CERÂMICA VERMELHA	MG
831832/2002	48,86	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
832180/2002	2,24	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
832310/2002	50,00	LICENCIAMENTO	ARGILA	CERÂMICA VERMELHA	MG
832205/2003	50,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
832206/2003	50,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
833776/2004	22,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
830124/2005	8,91	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896677/2006	42,83	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES

PROCESSO	ÁREA/ HA	FASE	SUBSTÂNCIA	USO	UF
834095/2007	15,11	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
834648/2007	50,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896791/2007	9,30	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
834504/2008	47,15	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
832732/2009	48,05	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896140/2009	7,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
832636/2010	0,39	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896203/2010	8,99	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
896422/2010	2,79	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
896449/2010	43,33	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
896014/2011	1,64	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
896212/2011	1,05	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
896459/2011	49,00	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
832271/2012	8,48	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
833563/2012	25,78	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896628/2012	49,70	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
831639/2013	9,73	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896022/2014	1,78	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES
832654/2015	0,63	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
831759/2016	5,92	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	MG
896052/2017	1,29	LICENCIAMENTO	AREIA	CONSTRUÇÃO CIVIL	ES

Tabela 2 – Síntese das principais substâncias requeridas e/ou em pesquisa.

Nº Processos	Fase	Substância	Total Processos
1	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	ÁGUA MINERAL	1
110	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	AREIA	210
32	LICENCIAMENTO		
32	REQUERIMENTO DE LAVRA		
15	REQUERIMENTO DE LICENCIAMENTO		
2	CONCESSÃO DE LAVRA		
19	REQUERIMENTO DE PESQUISA		
3	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	AREIA INDUSTRIAL	3
12	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	ARGILA	24
2	LICENCIAMENTO		
2	REQUERIMENTO DE LAVRA		
3	REQUERIMENTO DE LICENCIAMENTO		
5	REQUERIMENTO DE PESQUISA		
6	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA		
1	REQUERIMENTO DE LAVRA	ARGILA REFRACTÁRIA	7
3	REQUERIMENTO DE PESQUISA	BAUXITA	4
1	CONCESSÃO DE LAVRA		
4	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	DIAMANTE	4
1	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	ESTEATITO	1
1	REQUERIMENTO DE LAVRA	FELDSPATO	1
1	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	FERRO	1
2	REQUERIMENTO DE LAVRA GARIMPEIRA	GEMA	2
1	REQUERIMENTO DE PESQUISA	GNAISSE	1
28	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	GRANITO	35
4	REQUERIMENTO DE LAVRA		
3	REQUERIMENTO DE PESQUISA		
1	CONCESSÃO DE LAVRA	HEMATITA	1
2	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	ILMENITA	2
17	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	MINÉRIO DE FERRO	26
1	CONCESSÃO DE LAVRA		
8	REQUERIMENTO DE PESQUISA		
31	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	MINÉRIO DE OURO	44
4	REQUERIMENTO DE LAVRA		
9	REQUERIMENTO DE PESQUISA	OURO	5
5	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA		
1	AUTORIZAÇÃO DE PESQUISA	QUARTZO	1

Figura 4 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.

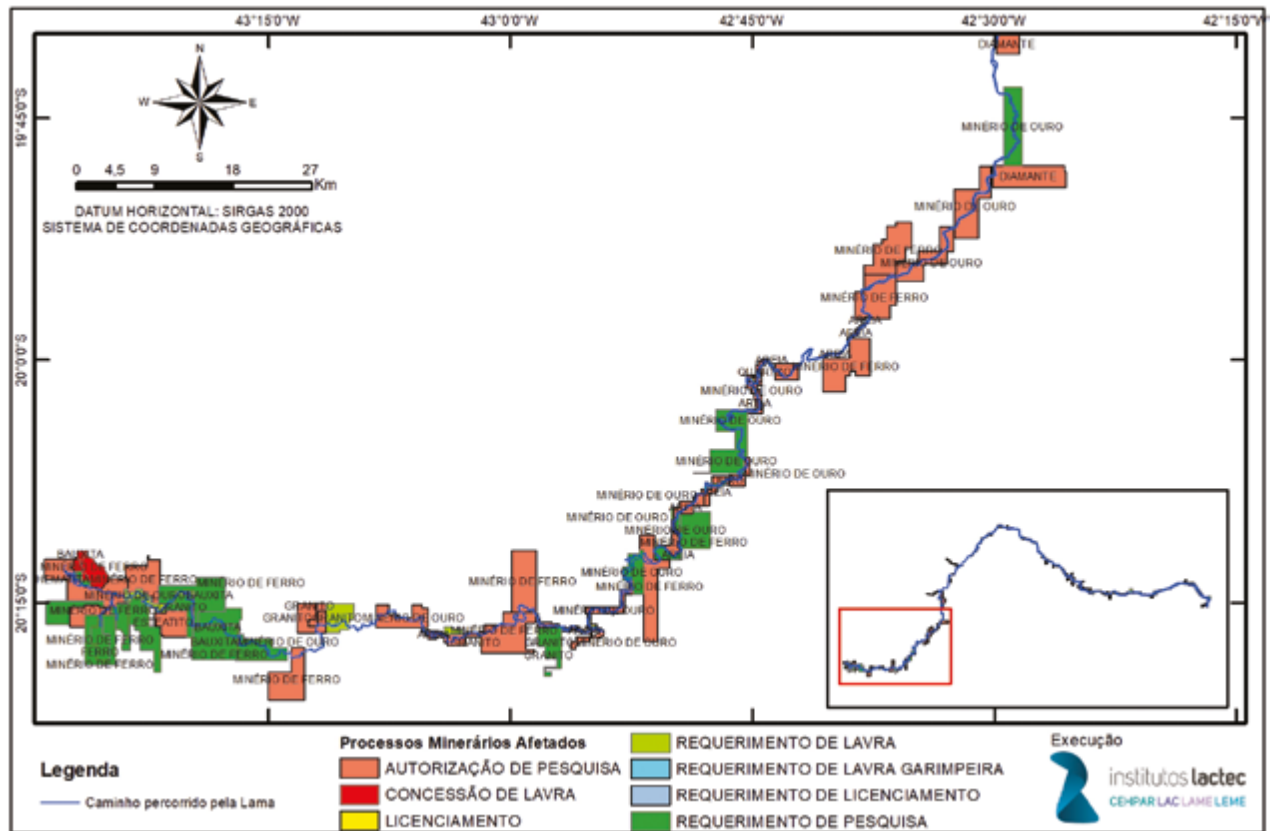


Figura 5 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.

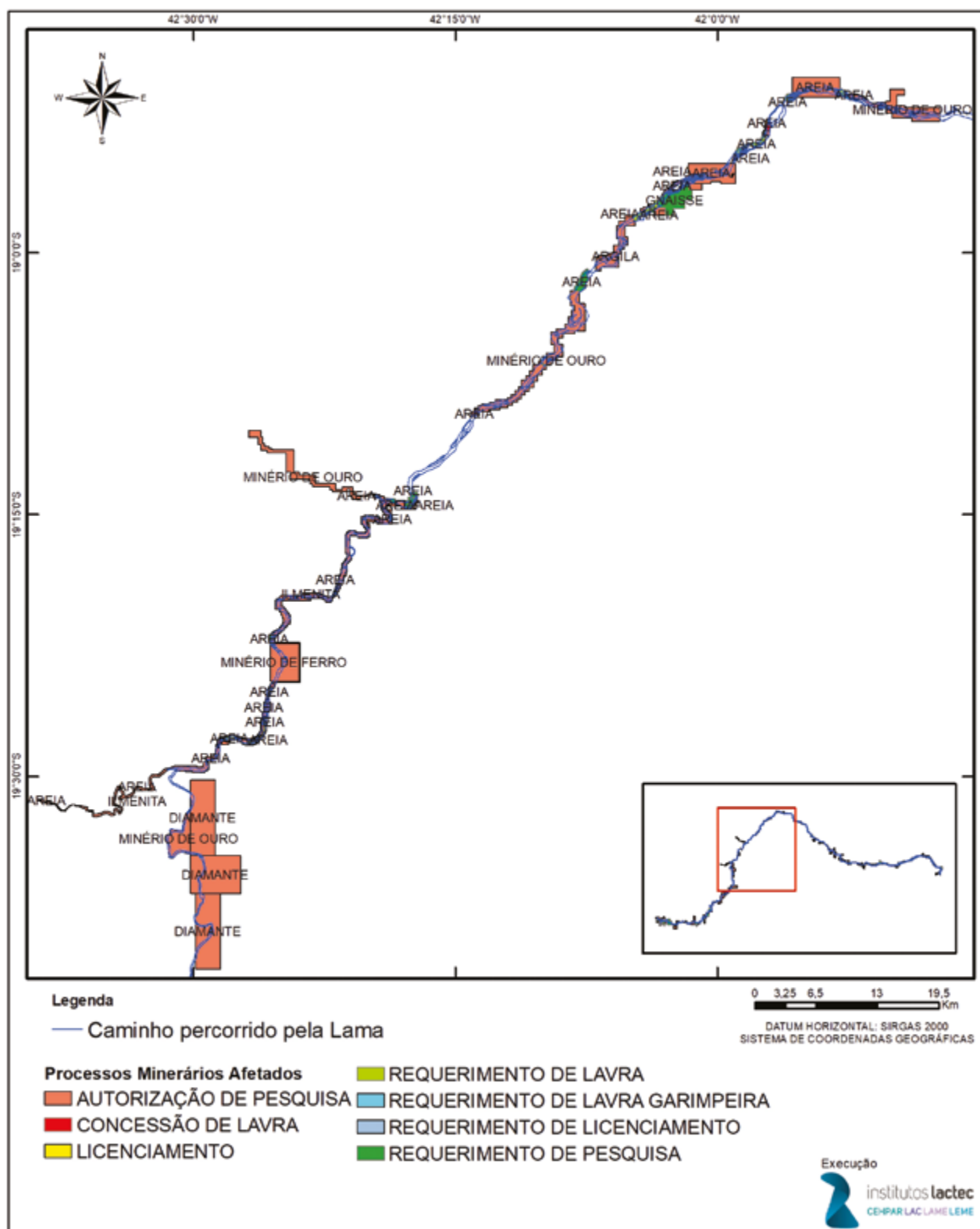


Figura 6 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.

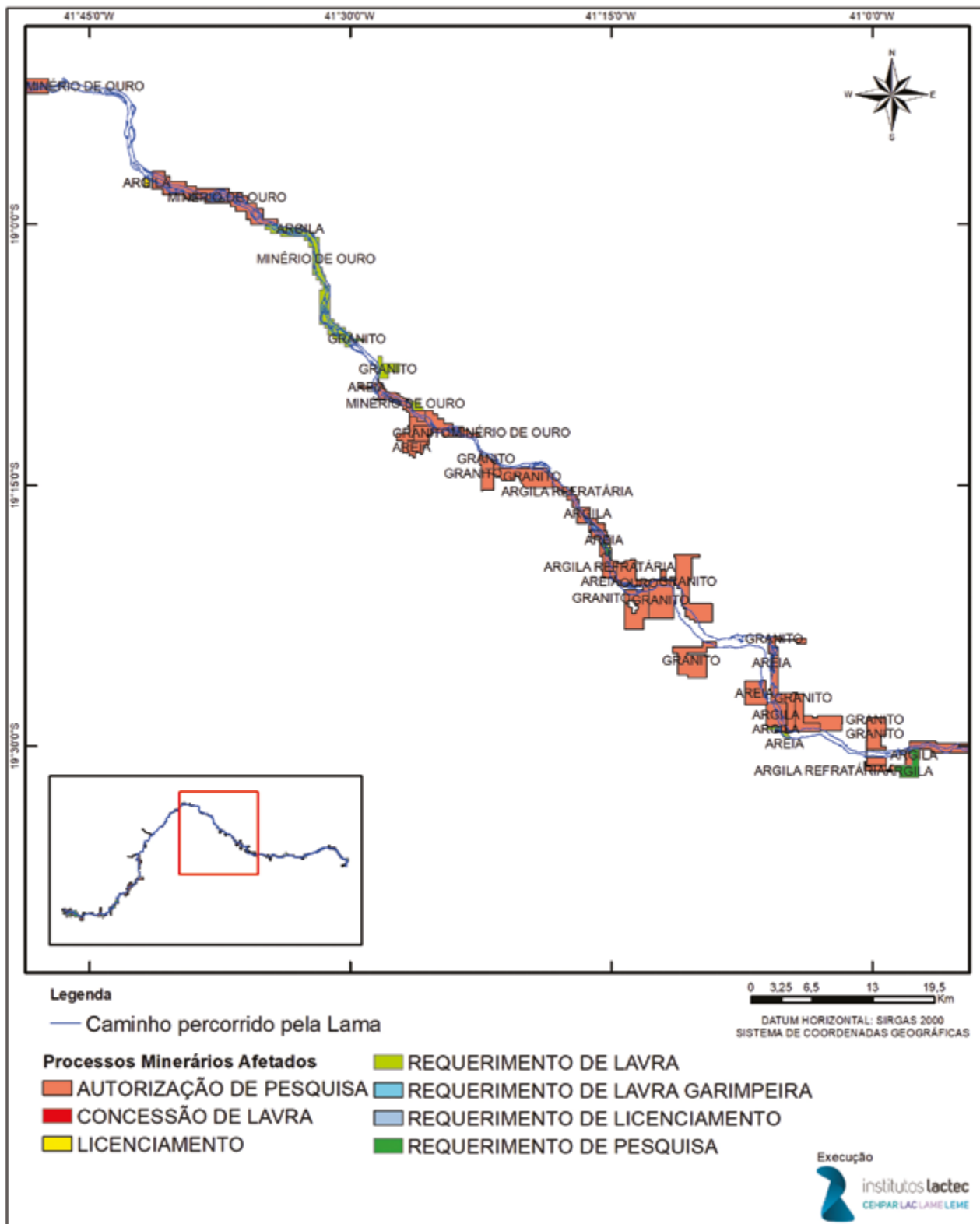
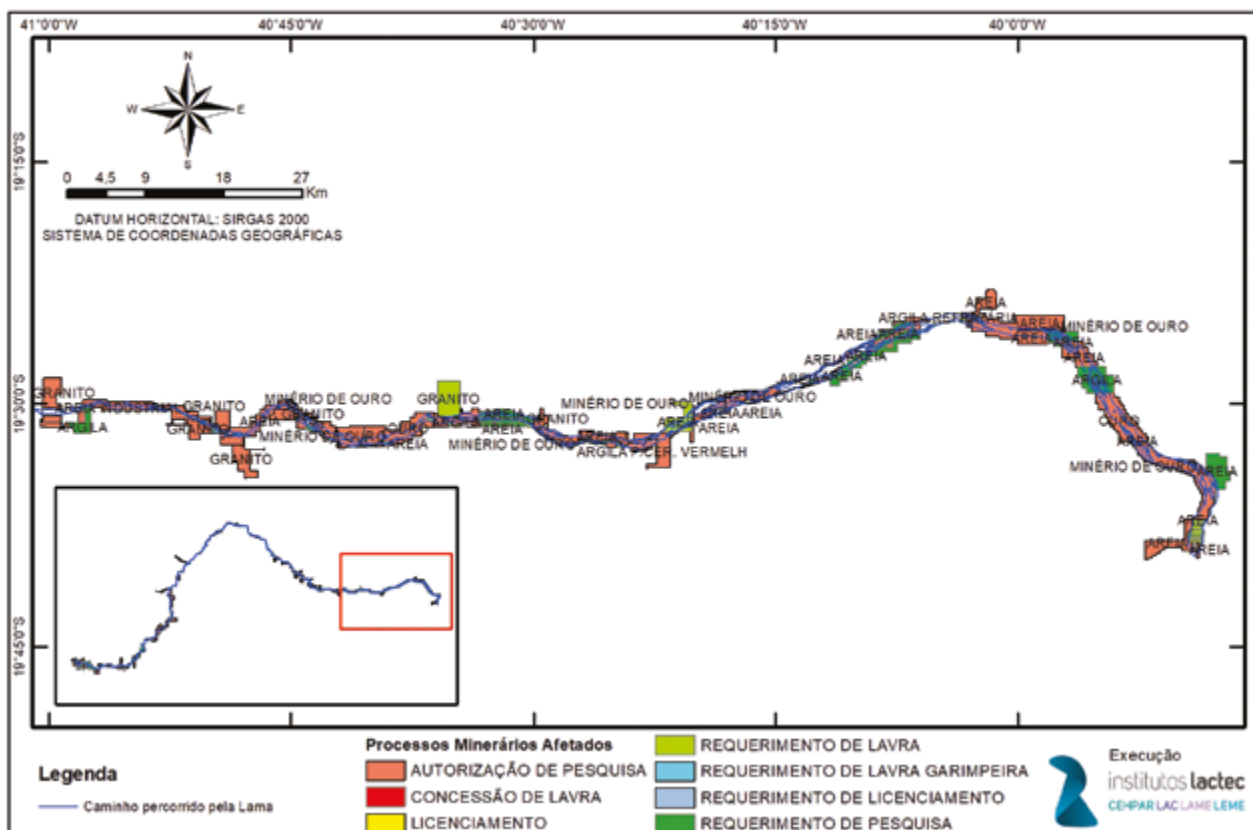


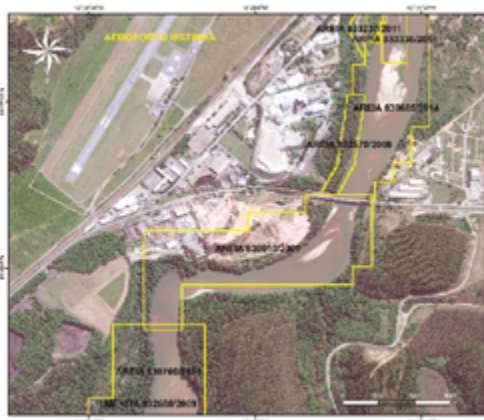
Figura 7 – Processos minerários obtidos na base do DNPM/SIGMINE com a cor referente à fase que se encontra.



A determinação da área afetada destes processos minerários foi realizada preliminarmente através de análises multitemporais de imagens orbitais. Foram identificadas as poligonais destes processos em imagens anteriores e posteriores ao rompimento e constatou-se que parte destas poligonais encontrava-se dentro dos limites das áreas afetadas pela lama. Além da análise dos limites dos processos minerários, foram analisadas também, quando possível, as posições das frentes de lava, sendo possível constatar que o bem mineral foi diretamente contaminado.

Entre esses processos, principalmente os de substância areia, argila e minério de ouro, estão nas áreas das drenagens afetadas pela lama de rejeito, conforme apresenta a Figura 8, Figura 9 e Figura 10.

Figura 8 – Areal situado nas margens do rio Doce Processo DNPM 830010/2001. A) Imagem World View de 15/06/2015 e B) Imagem World View de 10/02/2016.



A

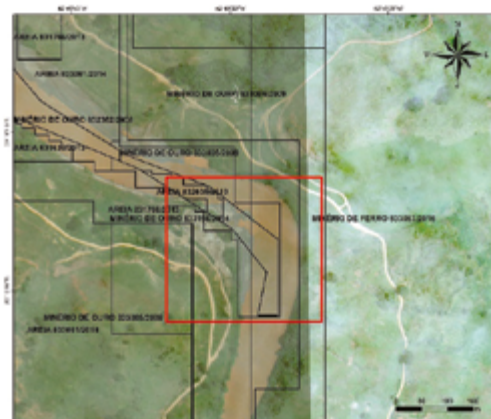


B

Figura 9 – Processos situados nas margens do rio Doce, com destaque em vermelho para o processo mineral afetado com a lama de rejeito. A) Imagem World View de 21/01/2015 e B) Imagem World View de 26/02/2016.

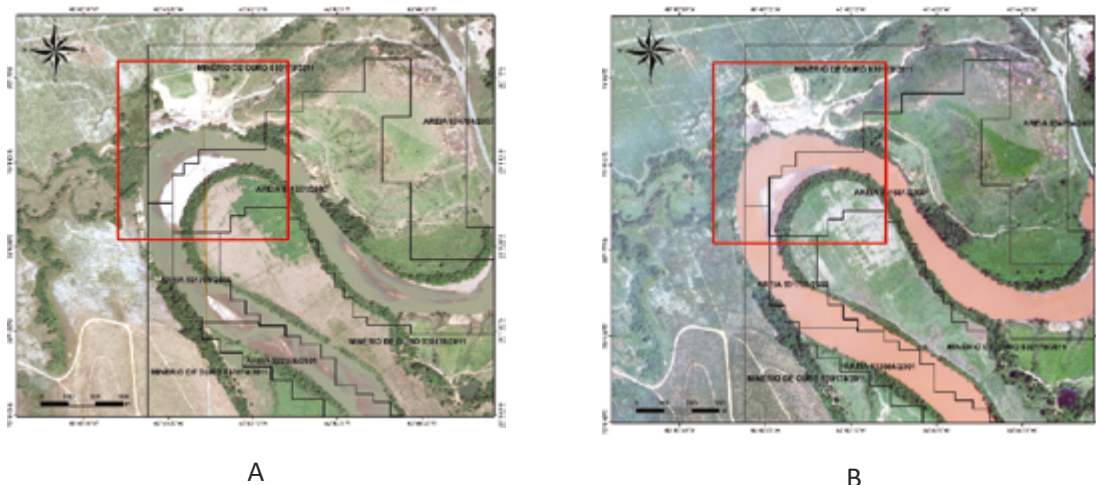


A



B

Figura 10 – Processos situados nas margens do rio Doce, com destaque em vermelho para o processo mineral afetado com a lama de rejeito. A) Imagem World View de 21/01/2015 e B) Imagem World View de 11/02/2016.



2.1.5.3 Espeleologia – cavidades/abrigos

De acordo com o Decreto Federal nº 6.640/2008:

Entende-se por cavidade natural subterrânea todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante.

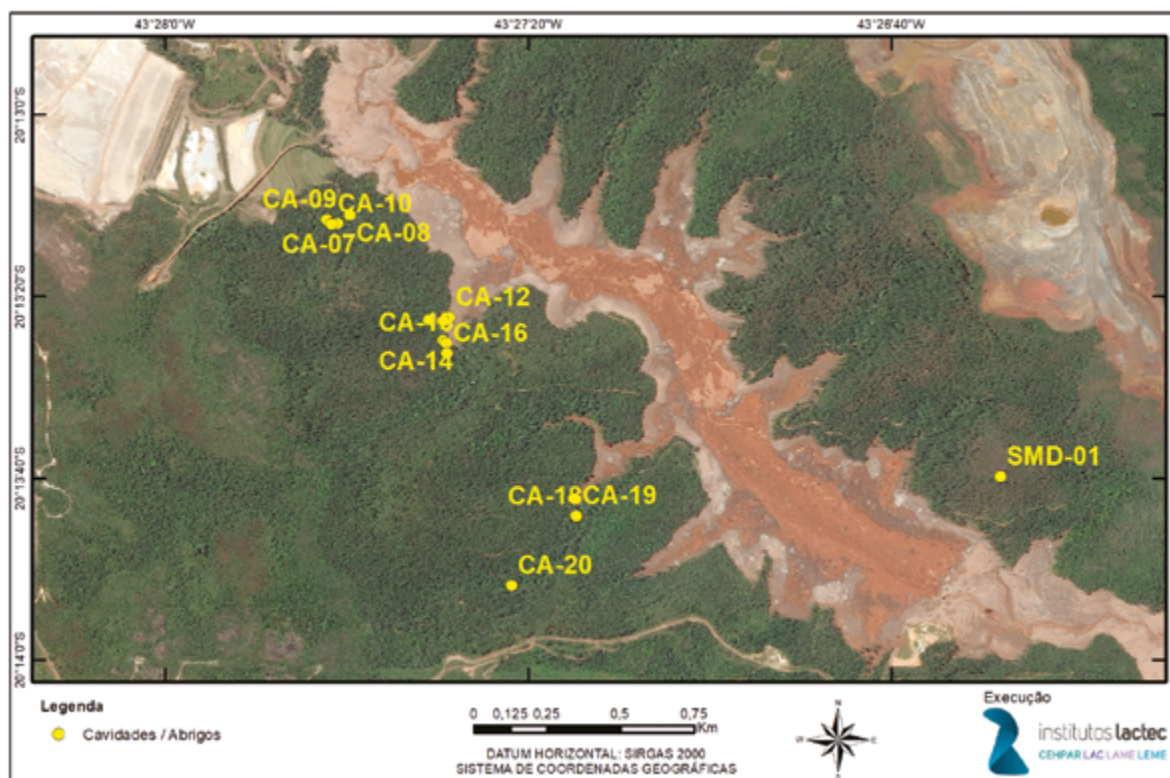
Segundo os documentos para a solicitação da licença ambiental para alteamento da barragem de Santarém, *Alteamento barragem Santarém. Topografia de cavidades e abrigos*, realizado pela CARSTE (2013); e *Relatório para atendimento ao auto de fiscalização – prospecção espeleológica*, realizado pela Agroflor Engenharia e Meio Ambiente (2013a) e demais relatórios internos produzidos para a Samarco, haviam sido cadastradas 15 cavidades/abrigos, situadas no entorno da barragem de Santarém (Tabela 3 e Figura 11).

Tabela 3 – Lista de cavidades/abrigos situados no entorno da barragem de Santarém. As nomenclaturas destas cavidades/abrigos possuem uma simbologia própria do mapeamento realizado pela Samarco, Agroflor e Casrte.

NOME	UTM E	UTM N	ALTITUDE	TPO FEIÇÃO
CA-07	660781	7763474	819	ABRIGO
CA-08	660822	7763501	841	CAVIDADE
CA-09	660747	7763486	813	ABRIGO
CA-10	660761	7763471	839	ABRIGO
CA-11	661071	7763143	798	CAVIDADE
CA-12	661136	7763152	769	CAVIDADE
CA-13	661116	7763139	778	CAVIDADE
CA-14	661116	7763075	789	CAVIDADE
CA-15	661126	7763065	807	CAVIDADE
CA-16	661127	7763030	795	CAVIDADE
CA-17	661528	7762535	781	ABRIGO
CA-18	661537	7762474	792	CAVIDADE
CA-19	661536	7762477	776	ABRIGO
CA-20	661326	7762243	810	ABRIGO
SMD-01	662894	776259	855	ABRIGO

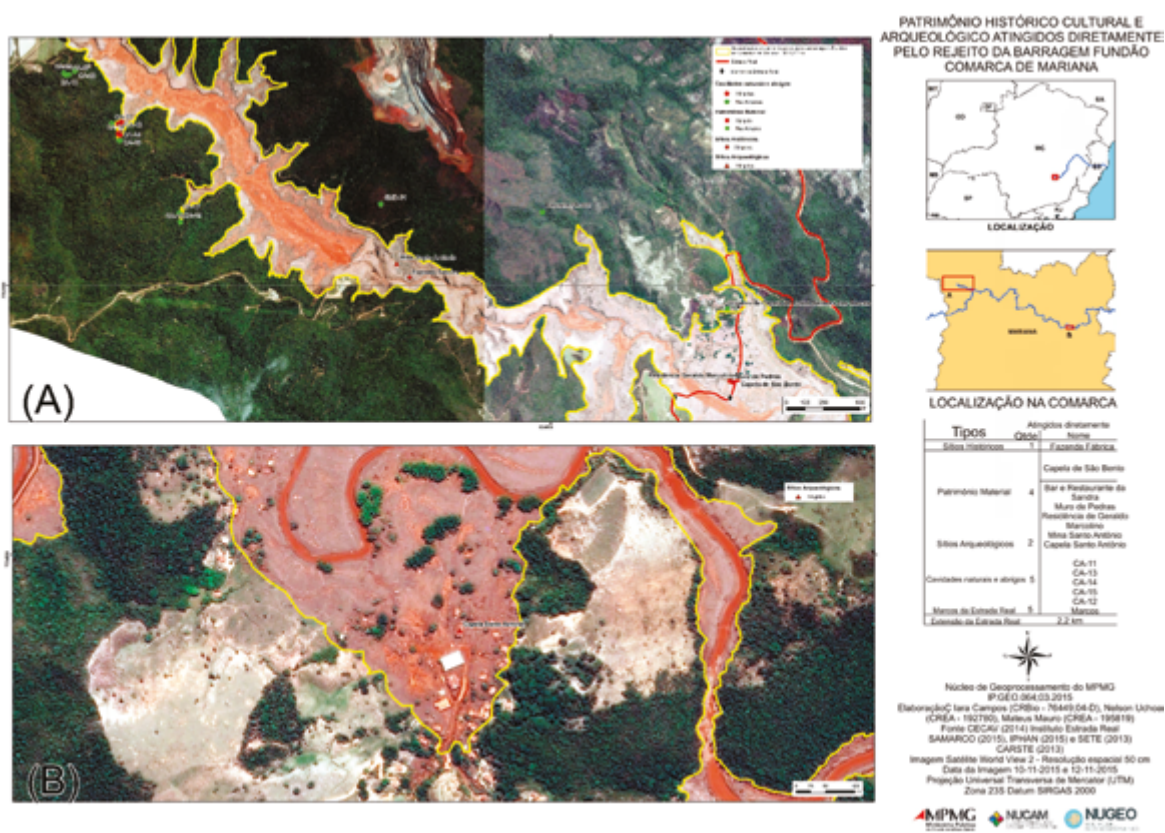
Fonte: modificado de CARSTE (2013).

Figura 11 – Localização das cavidades/abrigos situados na proximidade da barragem Santarém.



Das cavidades/abrigos mapeados pela Carste e Agroflor, conforme o documento da Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico (MPMG, 2017), cinco foram diretamente afetadas pela lama (Figura 12). Com o intuito de fazer um reconhecimento preliminar destas cavidades, foi realizada uma primeira vistoria pela equipe do Lactec, em julho de 2017. Nesta vistoria foram identificadas previamente as cavidades CA-14, CA-15 e CA-16. Alguns danos a estas cavidades já haviam sido identificados a partir da análise de imagens orbitais, anteriores e posteriores ao desastre. Em campo, mesmo que preliminarmente, foram identificadas presença de lama de rejeito, marcas do nível da lama em árvores situadas nas imediações e não foi encontrada a CA-12, por estar submersa.

Figura 12 – Localização das cavidades/abrigos elencados como atingidos pelo rejeito (MPMG, 2017). A localização das cavidades afetadas é a mesma da mapeada pela Carste e Agroflor.



Nota: A imagem está em baixa resolução conforme obtida na fonte.

A segunda vistoria foi realizada no período de 18 a 21 de março de 2018. Essa atividade contou com integrantes do Lactec, Samarco e da Carste, empresa responsável pelo mapeamento das cavidades/abrigos para os estudos de licenciamento da Samarco.

Foram vistoriadas 12 cavidades/abrigos, todos situados nas imediações do reservatório da barragem de Santarém. Nesta atividade foram levantadas informações sobre o desenvolvimento horizontal e vertical, eventuais danos causados pelo rejeito, características geológicas, geomorfológicas e estruturais, além das características do meio biótico presente, conforme fotos apresentadas na Figura 13.

Figura 13 – Fotos gerais da vistoria espeleológica e a equipe envolvida nesta atividade.



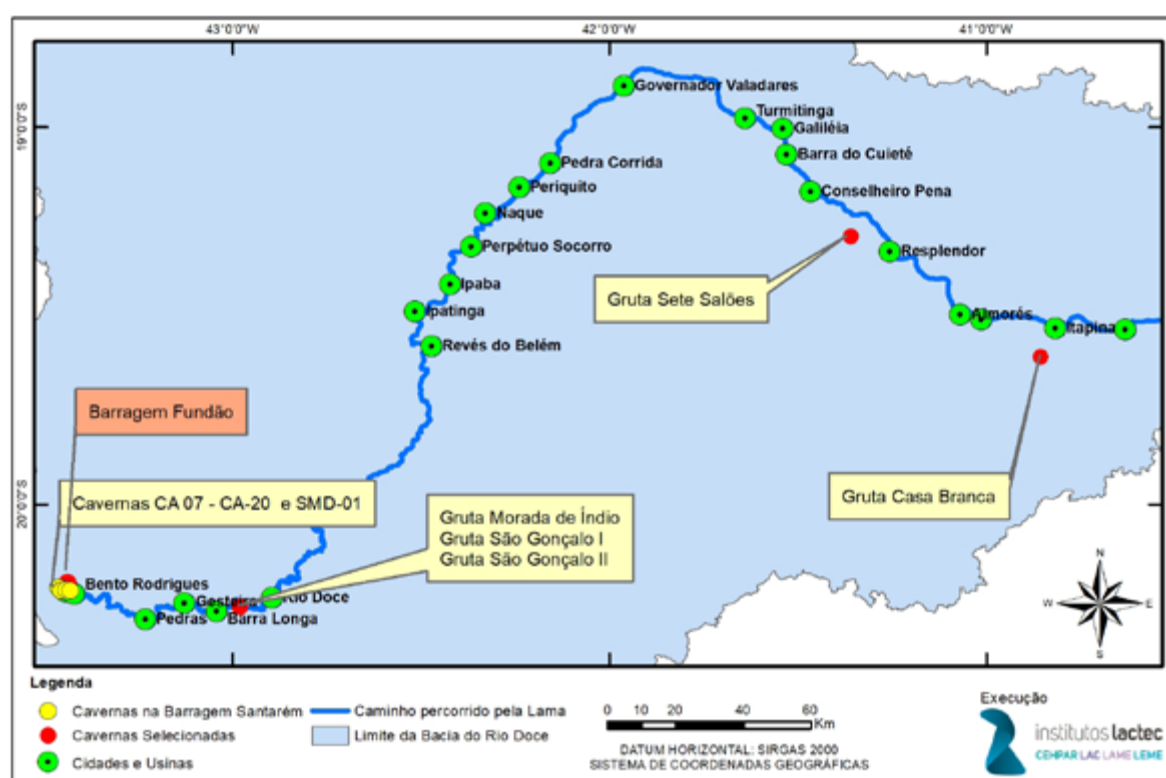
Os resultados completos referentes a estas vistorias estão em andamento e serão apresentados no relatório subsequente.

Além dessas cavidades e abrigos diretamente afetados, deverão ser realizadas vistorias similares para identificar eventuais danos a outras cinco cavidades localizadas ao longo do rio Doce, de acordo com o cadastro do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas/Sociedade Brasileira de Espeleologia - CECAN/SBE (Tabela 4). Embora não existam informações de danos ocorridos a estas cavidades pela passagem da onda de rejeitos, podem, eventualmente, ter ocorrido danos à fauna cavernícola (morcegos), que se utilizava do rio Doce para pesca. Com a mortalidade dos peixes, decorrente, sobretudo, da alta turbidez da água e a consequente escassez de alimento, esses animais de hábitos cavernícolas podem ter sido afetados.

Tabela 4 – Cavernas selecionadas para vistoria (CANIE – Responsável: CECAV).

Cavidades	UF	Município	Localidade	Latitude	Longitude
Gruta Morada de Índio	MG	Barra Longa	Fazenda São Gonçalo	-20,2722540	-42,9798400
Gruta São Gonçalo I	MG	Barra Longa	Sem informação	-20,2703540	-42,9795400
Gruta São Gonçalo II	MG	Barra Longa	Fazenda São Gonçalo	-20,2725540	-42,9795400
Gruta Sete Salões	MG	Santa Rita do Itueto	Serra das Onças - Parque Sete Salões	-19,2893070	-41,3592110
Gruta Casa Branca	ES	Colatina	Sem informação	-19,6085470	-40,8557110

A Figura 14 apresenta a localização geral de todas as cavernas selecionadas para as futuras vistorias, ou seja, engloba tanto as cavernas e abrigos situados nas proximidades da barragem de Santarém quanto aquelas situadas ao longo do rio Doce.

Figura 14 – Localização das cavernas selecionadas para vistoria.

2.2 SOLOS

2.2.1 INTRODUÇÃO

Com o rompimento da barragem de Fundão um grande volume de rejeitos que estava armazenado vazou e afetou o rio Doce e seus afluentes, até chegar a sua foz, na região litorânea do Espírito Santo. A energia desta onda promoveu a remoção de vegetações e de solos às margens dos corpos hídricos, ocorrendo intensa mistura do rejeito com o solo e material vegetal nativos. Este processo foi mais intenso entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves, a qual reteve grande parte do rejeito em seu reservatório, diminuindo a energia da onda, e neste trecho ocorreram grandes depósitos em extensas planícies de inundação. A partir da UHE Risoleta Neves a lama se concentrou na calha do rio Doce, sendo transportada até a foz no Espírito Santo.

O rejeito depositado possui características químicas, físicas, biológicas e mineralógicas diferenciadas dos solos naturais das margens do rio Doce. Essas alterações nas características originais dos solos podem ser consideradas como danos ambientais. Para melhor compreensão dos danos faz-se necessário um breve descritivo das características naturais dos solos.

O solo é um sistema trifásico onde coexistem as fases sólida, líquida e gasosa, sendo constituído de espaços porosos preenchidos por água e ar (aproximadamente 50%), minerais (45% a 50%) e matéria orgânica (0% a 5%) (LIMA et al., 2007). A fase líquida ou solução do solo contém os íons e substâncias orgânicas, e sua composição é resultante das reações que ocorrem com as outras fases do solo. Somente através da solução do solo é que as plantas podem absorver os nutrientes, que são tamponados pela fase sólida. Na fase gasosa, o O_2 (gás oxigênio) é o principal gás requerido pelas raízes das plantas para a respiração das células (MELO & ALLEONI, 2009).

Dependendo do diâmetro granulométrico, as partículas da fração mineral podem ser divididas em areia, silte e argila, com composição química e mineralógica específicas. As características químicas do solo são fortemente influenciadas pela fração argila, que são em geral classificadas em filossilicatos e óxidos (OLIVEIRA, 2005). As argilas podem variar amplamente em suas atividades no solo quanto aos aspectos físicos (superfície específica, plasticidade, pegajosidade, expansividade/contração e capacidade de retenção de água) e químicos (capacidade de troca catiônica – CTC; capacidade de troca aniônica – CTA; fixação – adsorção específica de cátions, ânions e moléculas orgânicas). Logo, a quantidade e o tipo de argila (mineralogia) são fatores essenciais na caracterização do solo (MELO & ALLEONI, 2009). A matéria orgânica do solo (MOS), apesar de constituir menos de 5% dos horizontes mais superficiais, também é determinante na definição dos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos, indispensáveis para o desenvolvimento das plantas e na regulação dos processos ambientais do solo. Mais de 95% dessa matéria orgânica é encontrada no solo como polímeros de alto peso molecular denominada de matéria orgânica humificada ou simplesmente húmus, resultado de um lento processo de acúmulo de decomposição de vegetais e animais (BRADY, 1983). A matéria orgânica na forma de húmus é muito estável e está ligada às superfícies das argilas, formando partículas organomineral.

A matéria orgânica do solo é o único reservatório de N (nitrogênio), P (fósforo) e S (enxofre), contribuindo com, mais 97% do N, mais de 95% do S e mais 50% de P dos solos tropicais. Ela também

contribui com cerca de 50 a 80% das cargas negativas do solo, especialmente em solo arenoso ou solo com argila de baixa atividade (BRADY, 1983).

As frações areia, silte, argila e matéria orgânica, em geral, se juntam para formar grânulos, os quais se organizam no solo formando estruturas (LEPSCH, 2011). As estruturas podem variar conforme o tipo (granular, blocos, prismática, colunar e laminar), o tamanho (pequena, média e grande) e o grau de desenvolvimento (fraco, moderado e forte). O tipo de argila tem papel importante, como visto anteriormente, dadas as grandes diferenças quanto às características de superfície específica, cargas, pegajosidade e expansão (OLIVEIRA, 2005). Os cátions presentes no solo também têm função importante no processo de formação e estabilização dos agregados. Em particular, o Na^+ (sódio) tem ação dispersiva, ou seja, faz com que as argilas do solo fiquem livres, não formem agregados ou diminuam a estabilidade destes. Por outro lado, Al^{+3} (alumínio) e Ca^{+2} (cálcio) atuam como flocculantes, permitindo a formação e aumentando a estabilidade do agregado (MELO & ALLEONI, 2009). O Al^{+3} é o elemento mais importante como flocculante em solos muito ácidos, já o cálcio, em solo levemente ácido, neutro e alcalino.

A justaposição das unidades estruturais do solo deixa espaços vazios de maior diâmetro, denominados macroporos (LIMA et al., 2007). Os macroporos determinam a drenagem do solo, recarga do nível freático e crescimento das raízes das plantas. Dentro dos agregados, têm-se os poros de menor diâmetro (microporos), cuja principal função ecológica é armazenar água para os organismos e para as plantas (LEPSCH, 2011). A combinação de textura (proporção de areia, silte e argila), teor de matéria orgânica e forma e tamanho das estruturas define as propriedades físicas dos solos, como densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica saturada. Mesmo solos muito argilosos podem ter alta porcentagem de macroporos e elevada drenagem, se as suas estruturas forem granulares pequenas (OLIVEIRA, 2005).

A composição da fase sólida também define as propriedades químicas dos solos. Solos mais argilosos e com maiores teores de matéria orgânica apresentam mais cargas elétricas, principalmente negativas (CTC). Essas frações coloidais apresentam grupos hidroxilados de superfície que, quando desprotonados, formam cargas negativas. A CTC é responsável pela adsorção de nutrientes catiônicos essenciais às plantas e organismos dos solos.

A lama é composta de rejeito da mineração de minério de ferro, partículas de solo e fragmentos de rocha (SILVA et al., 2006). Além do itabirito (minério de ferro), fragmentos de filito, gnaiss e quartzito também podem estar presentes na lama. Desta forma, para estimar a extensão do dano ao solo natural, faz-se necessário compreender as características químicas, físicas e mineralógicas da lama que hoje recobre grande parte do solo natural às margens do rio Doce após o desastre de Fundão.

2.2.2 OBJETIVO

O objetivo deste item do relatório é avaliar as características dos solos antes do rompimento da barragem de Fundão e dos rejeitos depositados ao longo da várzea do rio Doce e alguns de seus afluentes, no tocante às propriedades físicas e morfológicas, mineralogia, fertilidade e metais, através de informações disponíveis na literatura. A análise destes dados irá subsidiar a avaliação de danos ocasionados no ambiente solo a partir da deposição de rejeitos acarretada pelo desastre.

2.2.3 METODOLOGIA

A metodologia está fundamentada nos dados secundários disponíveis na literatura. Foram avaliados os seguintes documentos do período pós-desastre:

- EMBRAPA, 2015. Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: apoio ao plano de recuperação agropecuária.
- EMATER, 2016. Perdas na área rural atingida pelo rompimento da barragem do Fundão em Mariana – MG.
- CH2M, 2017. Anexo I: relatório das atividades de campo para aplicação do plano de manejo no trecho 08.
- GOLDER ASSOCIATES, 2016. Avaliação dos impactos no meio físico resultantes do rompimento da barragem de Fundão.
- Relatórios mensais e anuais da Fundação Renova. mar./2016 a out./2017.
- SCHAEFER et. al. Paisagens de lama: os tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana.
- SILVA et. al, 2016. 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.
- GUERRA et. al, 2017. Post-catastrophe analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils.

Foram avaliados também documentos complementares de outras áreas de mineração e trabalhos desenvolvidos na bacia do rio Doce, realizados em períodos anteriores ao desastre, e que contribuíram para subsidiar a análise de comparação com os resultados dos documentos supracitados para melhor entendimento ao tema.

2.2.4 RESULTADOS

A partir da análise dos documentos supracitados foram confrontadas as seguintes características: solos antes do desastre ou solos não impactados pela lama *versus* rejeitos depositados ao longo da várzea do rio Doce e alguns de seus afluentes:

- fertilidade do solo e do rejeito;
- propriedades físicas e morfológicas do solo e do rejeito;
- mineralogia das frações do solo e rejeito;
- teor total de metais e semimetais tóxicos no solo e no rejeito.

2.2.4.1 Fertilidade do solo e do rejeito

Emater (2016) realizou uma ampla avaliação das propriedades rurais afetadas pela lama no rio Doce. Estas informações fazem parte da ferramenta denominada ISA (Indicador de Sustentabilidade em Agrossistemas), conforme Fundação Renova (2017). Das 218 propriedades atingidas, foi possível analisar os laudos físico-químicos de 164 propriedades rurais, uma vez que os demais laudos não foram recebidos pelos Institutos Lactec. Dessas 164 propriedades, 72 estão localizadas no município de Barra Longa, 77 em Mariana, 6 em Ponte Nova, 5 no Rio Doce e 4 em Santa Cruz Escalvado. A partir das planilhas disponibilizadas pela Emater (2016) separaram-se os dados por municípios e em seguida esses mesmo dados foram agrupados em áreas afetadas e não afetadas, calculando-se os valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros analisados (Tabela 5). Apenas cinco amostras de Mariana e uma de Santa Cruz Escalvado apresentavam padrão analítico coerente com a lama ou pertencente a área afetada pela lama (rejeito) (Tabela 5). O pH (em água) das áreas afetadas pelo rejeito variou entre 6,9 a 8,7, ou seja, é superior aos valores encontrados nas áreas não afetadas, que possuem variação entre 4,4 a 6,9. Comparando somente as médias das amostras afetadas pela lama do município de Mariana (devido a um número maior de amostras que Santa Cruz do Escalvado) verifica-se que o pH do rejeito, normalmente, é 24% a 48% vezes superior ao dos solos das áreas não afetadas. Conforme a classificação agrônômica, o pH varia em 5 níveis (muito baixo (<4,5), baixo (4,5-5,4), bom (5,5-6,0), alto (6,1-7,0) e muito alto (>7,0)) e o rejeito se enquadraria na categoria de muito alto (RIBEIRO et al., 1999).

As amostras de rejeito são naturalmente mais pobres em cálcio, magnésio e potássio trocáveis (variação de muito baixo a baixo, conforme Ribeiro et al., 1999) quando comparados com as áreas não afetadas (Tabela 5). Outra característica notável das áreas afetadas é que o rejeito possui valores de capacidade de troca catiônica (CTC) (tanto a efetiva quanto a obtida a pH 7,0) mais baixos que os solos naturais, com uma redução de 50 a 87 %. Os valores médios de CTC pH 7,0 e CTC efetiva em Mariana nas amostras das áreas afetadas são classificadas como muito baixo e baixo (RIBEIRO et al., 1999). As amostras de rejeitos possuem 60% a menos de carbono orgânico em comparação com as amostras de solo das áreas não afetadas (Tabela 5). Os teores de carbono orgânico nas amostras afetadas pela lama são considerados baixos (RIBEIRO et al., 1999). Em todas as amostras, seja em áreas afetadas e não afetadas, o teor de fósforo é considerado muito baixo. Destaca-se também as diferenças nos teores de argila: amostras de rejeito - média de 12% e amostras não afetadas pelo rejeito - média 25 a 35%, ou seja, uma redução de 51 a 61% nos teores de argila quando utilizados os solos não afetados como referência.

Tabela 5 – Análises físicas e de fertilidade de amostras de solo não afetados e afetados pelo rejeito.

Área	Municípios	Número de propriedades por Município	Estatística por Município	pH H ₂ O	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB ⁴	T ⁵ pH 7	t ⁶ pH solo	mg dm ⁻³			V ⁸	m ⁹	Argila
												P	C ⁷	%			
Não Afetada	Barra Longa	72 ¹	Média	5,38	0,5	0,9	0,5	0,11	1,51	5,81	2,06	1,4	1,51	26	32	35	
			Máxima	6,90	3,1	3,4	1,7	0,47	5,19	9,18	5,20	7,0	2,09	75	100	57	
			Mínimo	4,30	0,0	0,0	0,0	0,00	0,04	2,48	1,10	0,6	0,00	1	0	13	
	Mariana	72 ²	Média	5,21	0,7	0,7	0,4	0,13	1,19	5,85	1,93	1,6	1,57	21	45	30	
			Máxima	6,50	2,0	3,1	1,5	0,50	4,91	9,05	4,90	10,1	2,09	66	94	52	
			Mínimo	4,40	0,0	0,0	0,0	0,04	0,06	3,54	1,10	0,6	1,10	1	0	11	
	Ponte Nova	6 ³	Média	5,95	0,1	3,0	1,4	0,17	4,57	7,85	4,67	1,2	1,60	56	5	32	
			Máxima	6,30	0,6	4,6	2,1	0,23	6,63	10,36	6,60	2,0	1,87	68	32	38	
			Mínimo	5,40	0,0	0,7	0,5	0,11	1,32	5,27	1,90	0,8	1,39	25	0	21	
	Rio Doce	5 ³	Média	6,02	0,1	2,1	0,9	0,21	3,19	6,42	3,26	2,6	1,55	46	5	26	
			Máxima	6,40	0,3	4,6	1,4	0,47	6,15	9,46	6,20	8,5	1,80	65	23	31	
Mínimo			5,60	0,0	0,7	0,2	0,07	0,97	3,59	1,30	0,7	1,16	27	0	12		
Santa Cruz Escalvado	3 ³	Média	6,20	0,0	4,2	1,7	0,25	6,08	9,28	6,07	4,5	1,60	60	0	30		
		Máxima	6,40	0,0	8,4	2,8	0,28	11,44	14,49	11,40	11,0	1,73	79	0	31		
		Mínimo	6,00	0,0	1,9	0,9	0,22	3,32	6,38	3,30	1,0	1,39	50	0	30		
Afetada	Mariana	5	Média	7,74	0,0	0,9	0,0	0,06	0,94	1,18	0,96	6,5	0,63	83	0	12	
			Máxima	8,70	0,0	1,0	0,1	0,11	1,03	1,59	1,00	8,3	0,70	100	0	38	
			Mínimo	6,90	0,0	0,7	0,0	0,03	0,85	0,95	0,90	4,5	0,52	57	0	4	
	Santa Cruz Escalvado	1	Média	7,40	0,0	0,9	0,1	0,24	1,24	1,24	1,20	4,2	0,70	100	0	3	

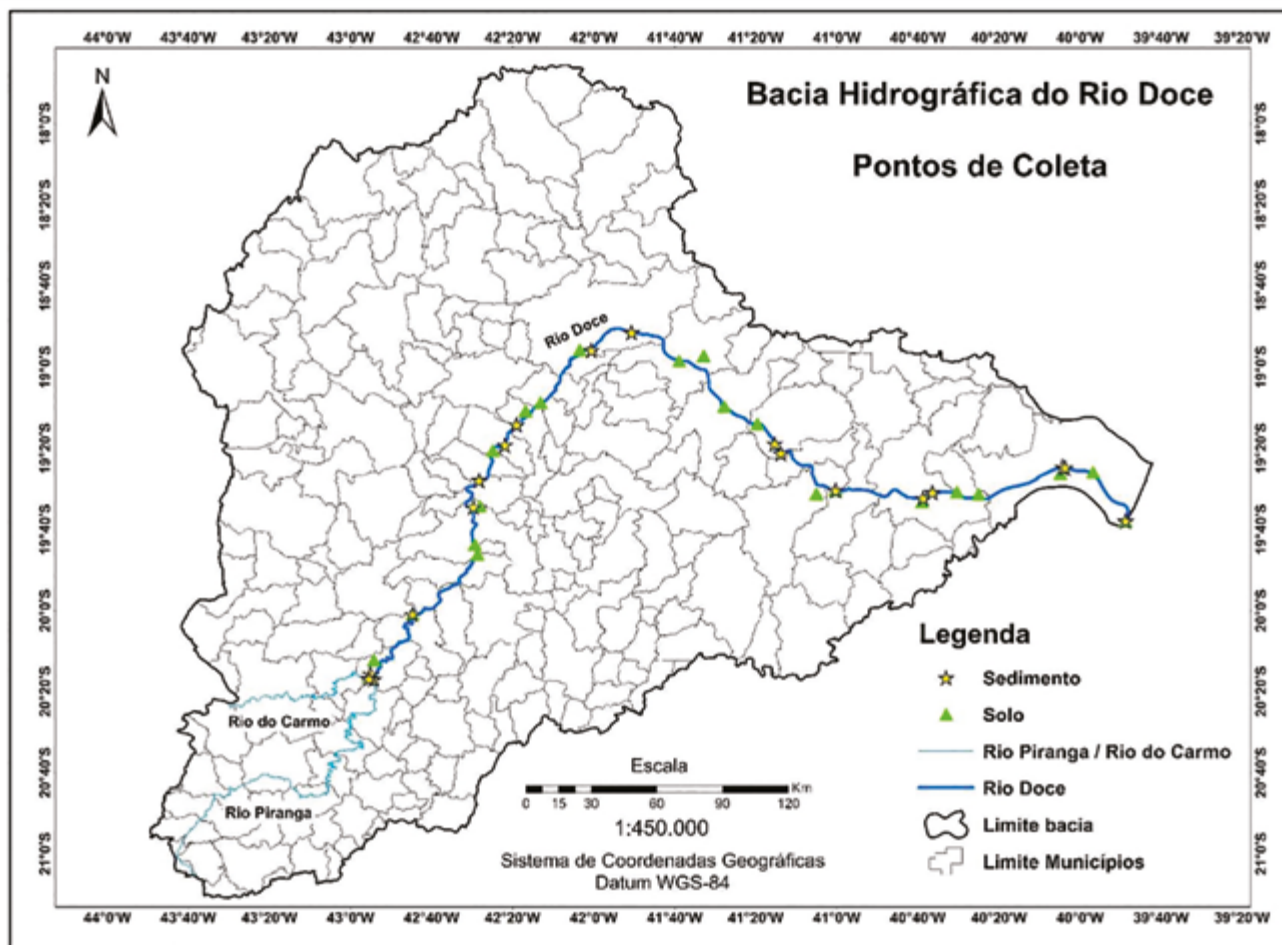
Observação: Usos de solo coletados por município: ¹Pastagem (65), Plantio (3), Não Informado (4); ²Pastagem (65), Eucalipto (4), Milho (2), Não informado (1); ³Somente pastagem. ⁴Soma de bases; ⁵capacidade de troca catiônica a pH 7,0; ⁶capacidade de troca catiônica a pH do solo ou efetiva; ⁷carbono; ⁸saturação por bases, sendo V = 100 SB/T; ⁹Saturação por Al³⁺, sendo m = 100 Al³⁺/t.

Fonte: Emater (2016).

Pacheco (2015) avaliou a contaminação em solos e sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce por metais e a relação com o fundo geoquímico natural, ou seja, amostragem dos solos em período anterior ao desastre da barragem de Fundão. Foram realizadas coletas no formato de seções transversais ao longo dos 853 km da calha do rio Doce (Figura 15). Foram coletados solos na parte alta da paisagem, solos de várzea, caracterizados pelos Neossolos Flúvicos, além de sedimentos na calha e nas margens esquerda e direita do rio. Nestas amostras de solo foram realizadas caracterizações físicas, fertilidade, determinação dos teores de metais pesados (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Cd, Ba, Hg e Pb) por fluorescência de raios-X, caracterização mineralógica da fração argila por difratometria de raios-X microscopia eletrônica de transmissão, suscetibilidade magnética e espectroscopia de absorção de raios-X pela radiação sincrotron. Foram amostrados 11 perfis completos para os solos de várzea (Neossolos Flúvicos) e 11 perfis completos para os solos de parte alta da paisagem (terras altas - com amostragem nas diversas classes de solos existentes na bacia do rio Doce em áreas de preservação permanente com floresta secundária - Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelhos e Cambissolos). Os pontos selecionados para a coleta de sedimentos seguiram as principais cidades e a foz de alguns dos afluentes do rio Doce ao longo de sua calha principal. Para cada ponto foram coletadas duas amostras de sedimento no perfil transversal do rio (margem esquerda e direita), totalizando 12 seções e 32 pontos amostrais. Os locais coletados em Minas Gerais foram nos municípios do Rio Doce, na foz do Rio Casca, Ipatinga, Naque, Periquito, Governador Valadares e Resplendor; no Espírito Santo foram nos municípios de Baixo Guandu, Colatina, Linhares e Regência. A partir dos dados de Pacheco (2015) foram calculadas médias, valores máximos e mínimos e os dados foram agrupados por solos localizados nas partes altas da paisagem (terras altas), solos de várzea e os sedimentos coletados nas calhas dos rios.

Os resultados são apresentados na Tabela 6. Esses dados têm grande potencial de uso, pois representam a situação original do leito do rio Doce, meses antes do desastre. Qualquer valor anômalo dos atributos químicos e físicos dos solos nesse trabalho deve ser creditado a influência de outras atividades antrópicas na região e não ao derramamento dos rejeitos. Comparando os resultados obtidos por Emater (2016) nas áreas afetadas pela lama em Mariana (pós-desastre) (Tabela 5) com os dados de Pacheco (2015) (antes do desastre, Tabela 6) verifica-se uma redução nos valores médios de CTC a pH 7,0 e CTC efetiva nas áreas impactadas pela lama: Emater (2016) - 1,18 e 0,96 $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$, respectivamente, e Pacheco (2015) - 5,19 e 2,58 $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$, respectivamente. Os solos originais das várzeas (PACHECO, 2015) possuem pH maior, menor CTC (tanto a pH 7,0 e efetiva) e teor de carbono orgânico inferiores aos solos das porções mais altas do relevo. Ressalta-se que dos 11 transeptos coletados por Pacheco (2015), apenas o primeiro é coincidente com a área afetada pela deposição de rejeitos nas planícies de inundação. Contudo, como se trata de mesmo ambiente de várzea e mesmo material de origem dos solos da encosta (fonte dos sedimentos), todos os 11 transeptos podem ser considerados importantes para compor um banco de dados das condições antes do desastre na área de estudo. Referente às coletas realizadas na área afetada pela Emater (2016) destaca-se negativamente a pequena quantidade de amostras de solo coletadas nas áreas afetadas pelo desastre (total de 6 amostras), que pode ser considerado pouco representativas devido a grande possibilidade de variações do material depositado nas planícies de inundação nas áreas afetadas.

Figura 15 - Localização dos pontos coletados para amostragem em solos anteriores ao desastre.



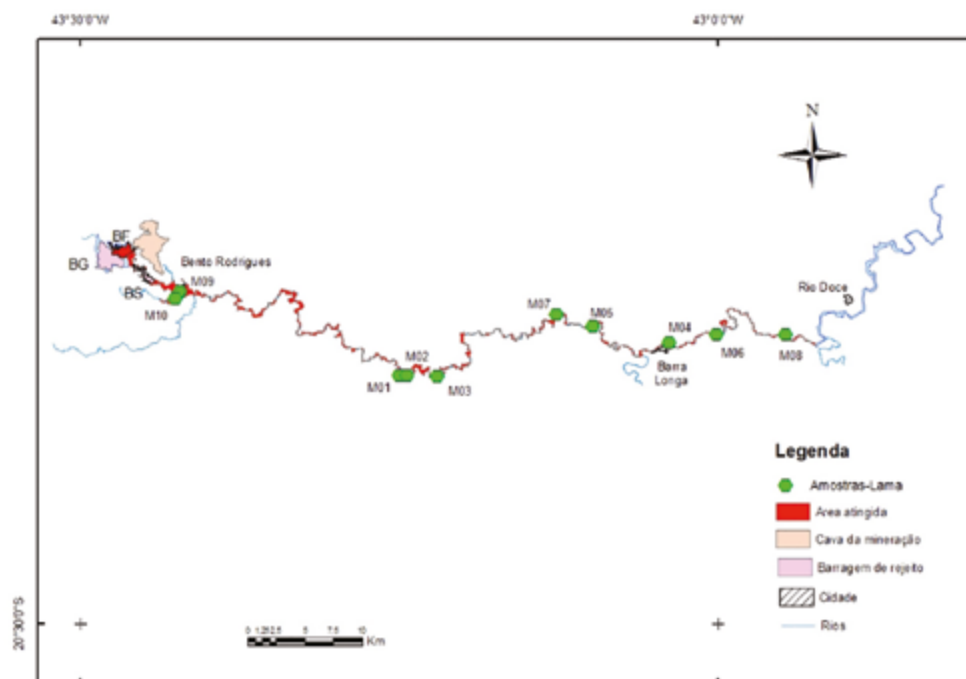
Fonte: Pacheco (2015).

Tabela 6 – Caracterização química de solos de terras altas e de várzeas e de sedimentos da calha do rio Doce.

Áreas	Matriz	Local	Prof. (cm)	Estatística	pH		Al	Ca	Mg	K	SB ¹	H + Al	t ²	T ³	V ⁴	M ⁵	CO ⁶	P	P rem ⁷												
					H ₂ O	KCl														-----cmol _c dm ⁻³ -----										----- % -----	
																														mg dm ⁻³	
Não Afetadas pelo desastre	Solos	Terras altas	0 - 20	Média	5,28	4,43	0,61	1,6	1,1	0,16	2,83	4,6	3,44	7,47	36	27	2,0	2	28												
				Máximo	6,45	5,67	2,05	4,7	2,3	0,28	7,12	8,7	7,12	10,54	82	89	2,6	3	41												
				Mínimo	4,24	4,03	0,00	0,1	0,1	0,05	0,19	1,6	1,72	5,13	3	0	1,4	1	16												
		30-100	Média	5,26	4,52	0,84	0,8	0,6	0,05	1,43	2,7	2,27	4,10	29	53	0,5	1	17													
			Máximo	6,54	5,72	1,37	3,4	2,1	0,14	4,42	4,5	4,42	6,02	80	95	1,0	2	29													
			Mínimo	4,69	4,00	0,00	0,1	0,0	0,02	0,08	1,1	1,06	2,48	2	0	0,3	0	9													
	Várzea	0-45 cm	Média	5,97	5,24	0,01	1,8	0,6	0,12	2,56	2,6	2,58	5,19	54	1	0,8	5	36													
			Maximo	6,40	5,58	0,15	3,2	1,4	0,25	4,67	10,1	4,67	11,67	83	7	1,4	7	44													
			Minimo	5,38	4,54	0,00	0,8	0,3	0,03	1,18	1,0	1,18	2,48	12	0	0,3	2	23													
		63-150	Média	6,08	5,26	0,00	1,7	0,7	0,07	2,52	2,2	2,52	4,76	53	0	0,6	3	30													
			Maximo	6,60	5,60	0,05	3,1	1,4	0,20	4,01	5,6	4,06	7,16	72	1	0,9	8	43													
			Minimo	5,69	4,97	0,00	0,8	0,3	0,02	1,26	1,0	1,26	2,31	21	0	0,2	1	17													
Sedimentos	Calha do Rio	0-45 cm	Média	6,17	5,10	0,02	1,1	0,5	0,07	1,70	1,5	1,72	3,22	52	1	0,5	6	34													
			Máximo	6,88	5,84	0,10	2,8	1,8	0,14	4,74	3,7	4,74	6,82	77	14	1,5	11	51													
			Mínimo	5,35	4,34	0,00	0,2	0,1	0,02	0,34	0,5	0,34	0,84	16	0	0,1	2	14													

A Embrapa (2015) realizou coleta de rejeitos nas áreas afetadas nos municípios de Mariana, Barra Longa e Rio Doce durante os dias 18 e 20/11/15. As coletas foram realizadas em 10 locais (Figura 16) na camada superficial do solo (0-20 cm) para determinações químicas, físicas, mineralógicas e teores totais de metais. Os resultados obtidos pela análise química do rejeito (total de 11 amostras -Tabela 7) demonstram que o material depositado durante o desastre é homogêneo. O valor de pH (em água) médio foi de 8,0, considerado muito alto conforme a classificação de Ribeiro et al. (1999). O rejeito é pobre em nutrientes, como cálcio, magnésio e potássio. Nas amostras de rejeito ocorre elevada saturação de sódio, que em média é de 11%, o que leva a classificação desse material como caráter solodico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2006). Essa alta porcentagem de saturação de sódio pode causar toxidez as plantas mais sensíveis à presença de sódio (EMBRAPA, 2015). Destaca-se que o rejeito possui teor de carbono orgânico muito baixo (RIBEIRO et al., 1999), com média de 0,09%. Esse baixo teor de carbono orgânico torna a capacidade de troca de cátions extremamente dependente da composição mineralógica do rejeito.

Figura 16 - Localização dos pontos de amostragem em rejeitos depositados após o rompimento da barragem de Fundão.



Fonte: Embrapa (2015).

Tabela 7 - Resultados de análises químicas do rejeito depositado nas áreas afetadas.

Local	Amostra	pH		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	SB ¹	Al ³⁺	H ⁺	T ²	V ³	Sat. Na ⁴	P ⁵	C.O ⁶
		H ₂ O	KCl	-----cmol _c kg ⁻¹ -----								%	%	mg kg ⁻¹	%
Paracatu	M01	8,3	7,9	0,8	0,2	0,02	0,15	0,08	0,0	0,0	1,2	100	12	8	0,08
Paracatu	M02	8,2	7,8	0,8	0,2	0,02	0,14	0,11	0,0	0,0	1,2	100	12	8	0,11
Pedras	M03	8,3	7,9	0,7	0,3	0,02	0,17	0,08	0,0	0,0	1,2	100	14	8	0,08
Jurumirim	M04	8,2	7,8	0,8	0,2	0,02	0,15	0,09	0,0	0,0	1,2	100	12	8	0,09
Gesteira	M05	8,0	7,7	0,9	0,1	0,02	0,14	0,09	0,0	0,0	1,2	100	12	8	0,09
São Gonçalo	M06	8,6	7,8	0,8	0,2	0,02	0,15	0,09	0,0	0,0	1,2	100	12	8	0,09
Gesteira	M07	8,2	7,8	0,8	0,2	0,02	0,12	0,08	0,0	0,0	1,1	100	11	9	0,08
Faz. Porto Alegre	M08	8,1	7,9	0,7	0,3	0,02	0,14	0,07	0,0	0,0	1,2	100	12	9	0,07
Bento Rodrigues	M09	8,4	8,1	0,8	0,02	0,14	0,01	0,0	0,0	0,0	1,0	100	14	9	0,01
Bento Rodrigues	M10-encosta ⁷	6,6	5,8	0,8	0,3	0,04	0,10	0,28	0,0	1,0	2,2	55	5	4	0,28
Bento Rodrigues	M10-baixada ⁸	7,4	7,0	0,8	0,02	0,09	0,06	0,0	0,0	0,0	0,9	100	10	6	0,06
	Média	8,0	7,6	0,8	0,3	0,02	0,14	0,09	0,0	0,1	1,2	96	11	8	0,09
	Desvio Padrão	0,6	0,7	0,1	0,2	0,01	0,02	0,07	0,0	0,3	0,3	14	2	1	0,07
	Mediana	8,2	7,8	0,8	0,2	0,02	0,14	0,08	0,0	0,0	1,2	100	12	8	0,08
	Máximo	8,6	8,1	0,9	0,8	0,04	0,17	0,28	0,0	1,0	2,2	100	14	9	0,28
	Mínimo	6,6	5,8	0,7	0,1	0,02	0,09	0,01	0,0	0,0	0,9	55	5	4	0,01

¹Soma de bases; ²capacidade de troca catiônica a pH=7,0; ³saturação por base; ⁴saturação de sódio; ⁵fósforo assimilável; ⁶ carbono orgânico; ⁷amostrado coletada em encosta atingida pela lama; ⁸amostra coletada em posição topográfica deprimida (fundo de vale), em local próximo da anterior.

Fonte: Embrapa (2015).

No trabalho realizado por Schaefer et al. (2016) foram coletadas e analisadas amostras de rejeito nas áreas afetadas pela lama, desde a barragem de Fundão até a barragem de Risoleta Neves. Foram amostrados também 26 amostras de solos soterrados pelos rejeitos para determinações químicas e físicas (amostras tomadas como referência). O pH (em água) do rejeito foi de 5,69 e dos Neossolos Flúvicos e Cambissolos soterrados foram de 5,65 e 5,77, respectivamente, ou seja, não houve incremento de pH nas amostras de rejeitos em comparação com os solos soterrados. Esses resultados são conflitantes com os dados apresentados pela Emater (2016) (Tabela 5) e Embrapa (2015) (Tabela 7), onde, nesses últimos estudos, os valores de pH (em água) do rejeito foram sistematicamente superiores ao pH dos solos não afetados pela lama na região. O teor de fósforo nas amostras de rejeitos (9,34 mg dm⁻³) é superior aos Cambissolos (5,38 mg dm⁻³) e inferior aos Neossolos Flúvicos soterrados (11,05 mg dm⁻³) (SCHAEFER et al., 2016). O teor de fósforo no rejeito obtido por Schaefer et al. (2016) foi superior aos valores médios encontrados por município nas áreas não afetadas por Emater (2016) (Tabela 5). Ainda em relação ao trabalho de Schaefer et al. (2016) pode-se concluir: 1) a CTC a pH 7,0 do rejeito (2,96 cmol_c dm⁻³) é menor que do Neossolos Flúvicos (3,78 cmol_c dm⁻³) e Cambissolos (5,67cmol_c dm⁻³) soterrados, corroborando os dados de Emater (2016) (Tabela 5); 2) o teor de sódio nas amostras de rejeito (11,61 mg dm⁻³) é superior ao sódio nas amostras de solos soterrados, tanto para os Neossolos

Flúvicos ($5,23 \text{ mg dm}^{-3}$), quanto para os Cambissolos ($4,88 \text{ mg dm}^{-3}$). Esse mesmo comportamento foi verificado pela Embrapa (2015) (Tabela 7); 3) os teores de argila nas amostras de rejeito são inferiores (18%) aos encontrados nos Neossolos Flúvicos (23%) e Cambissolos (39%) soterrados. O rejeito é composto basicamente por areia fina (33%) e silte (32%); 4) o rejeito possui baixa concentração de carbono ($0,53\%$), que por sua vez é superior aos valores encontrados nos Neossolos Flúvicos ($0,49\%$) e inferior a concentração obtida nos Cambissolos ($0,82\%$) soterrados. Os baixos teores de carbono orgânico dos solos soterrados obtidos por Schaefer et al. (2016) é mais uma evidência da erosão e do arraste de partículas da superfície do solo original durante a passagem lama. A elevada energia da onda de lama durante o desastre removeu a camada mais fértil e orgânica do solo original, expondo horizontes mais profundos dos Cambissolos e Neossolos soterrados.

Silva et al. (2016) coletaram uma amostra de rejeito no dia 20 de novembro de 2015 nas margens do rio do Carmo (coordenadas UTM 23K 704623 sul e 7756199 oeste). Antes da deposição do rejeito a área era usada para criação de animais e cultivo e árvores frutíferas. Foi amostrada a camada 0-30 cm de rejeito, de um total de 3 m de lama depositada no local. Foram realizadas análises químicas, físicas e mineralógicas nessas amostras. Os dados da Tabela 8 confirmam o elevado valor de pH (em água), baixos teores de fósforo, altos de sódio, baixos valores de CTC a pH 7,0 e de carbono orgânico dos rejeitos.

Tabela 8 – Atributos químicos de amostra de rejeitos depositados.

pH (água)	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB ¹	T ²	m ³
	mg / dm ³	mg / dm ³	cmolc / dm ³	cmolc / dm ³	cmolc / dm ³	cmolc / dm ³	cmolc / dm ³	cmolc / dm ³	%
8,24	3,58	1,44	1,76	0,02	nd	0,95	1,79	2,74	nd ⁶
V ⁴	C ⁵	Na	Fe	Zn	Cu	Mn	Cd	Pb	Ni
%	%	mg / dm ³	mg /dm ³	mg /dm ³	mg /dm ³	mg /dm ³	mg /dm ³	mg /dm ³	mg / dm ³
65,2	0,41	1,67	409,2	1,5	2,4	441,4	nd	1,9	0,9

¹Soma de bases; ²capacidade de troca catiônica a pH = 7,0; ³saturação de alumínio; ⁴saturação por bases; ⁵carbono; ⁶não detectado. Fonte: Silva et al. (2016).

No estudo realizado por Silva et al. (2006) foi feita a caracterização química, física e mineralógica de amostras de rejeito de mineração de ferro, coletadas diretamente em lagoa de decantação da Mina de Alegria ($20^{\circ}11'22'' \text{ S}$, $43^{\circ}28'22'' \text{ W}$ e altitude de 945 m), em Mariana-MG. A lagoa da Mina Alegria situa-se próxima a Barragem de Fundão. Foram coletadas também amostras de um Neossolo próximo ao local da Mina. Os autores observaram que o rejeito da mina possuía pH (em água) acima de 7,0, enquanto o pH do Neossolo era apenas 4,4 (Tabela 9). No rejeito a capacidade de troca catiônica a pH 7,0 é considerada muito baixa. O rejeito analisado por Silva et al. (2006) é pobre em cálcio, magnésio, fósforo e potássio, com os níveis classificados como muito baixo (RIBEIRO et al., 1999). Outra característica do rejeito é o baixo teor de carbono orgânico ($0,16\%$), principalmente se comparado com o Neossolo ($3,98\%$) (Tabela 9).

Tabela 9 – Análises químicas de rejeito e solo provenientes da Mina de Alegria, Mariana (MG).

Material	pH (H ₂ O)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	K ⁺	Na ⁺	T ¹	SB ²	t ³	P	m ⁴	V ⁵	C ⁶
		cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	mg/dm ³	%	%	%
REJEITO	7,5	0,14	0	0	0	0	0,05	0,19	0,19	0,19	3	0	100	0,16
SOLO	4,4	0,69	0,38	1,09	10,3	0,2	0,2	11,77	1,47	2,56	3,4	42,6	12,49	3,98

¹Capacidade de troca catiônica a pH = 7, sendo $t = SB + Al^{3+}$; ² Soma de bases, sendo $SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+}$; ³ Capacidade de troca catiônica efetiva; ⁴ Saturação por Al^{3+} , sendo $m = 100 Al^{3+}/t$; ⁵ Saturação por bases, sendo $V = 100 SB/T$; ⁶ carbono orgânico. Fonte: Silva et al. (2006).

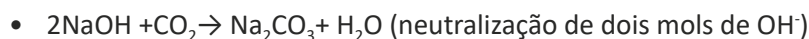
Comparando os resultados obtidos das análises químicas no rejeito (EMATER, 2016; EMBRAPA, 2015; SCHAEFER et al. 2016; SILVA et al. 2016) (Tabela 5, Tabela 7, Tabela 8) depositado nas áreas afetadas pelo desastre ocasionados pelo rompimento da Barragem de Fundão com os resultados de amostra coletada diretamente na lagoa de decantação de rejeito da Mina da Alegria (SILVA et al., 2006) (Tabela 9) verifica-se valores similares de pH (em água), capacidade de troca catiônica e teor de carbono orgânico. Esses dados são resultados de dois processos: 1) as características químicas dos rejeitos das lagoas de decantação de Fundão e da Mina Alegria são muito similares e; 2) o processo de transporte dos rejeitos durante o vazamento e deposição sobre os solos de várzeas não alteraram as características dos rejeitos. A comparação desses trabalhos permite, ainda, as seguintes generalizações: 1) o rejeito depositado sobre as planícies de inundação entre a barragem de Fundão e Risoleta Neves é caracterizado por um pH alcalino, estando este acima de 6,9, com médias de 7,74 (EMATER, 2016), 8,0 (EMBRAPA, 2015) e 8,24 (SILVA et al., 2016). Os solos não afetados pela lama por sua vez são normalmente ácidos, com pH médio de 5,97 para os solos de várzea, de 5,28 para os solos de terras altas (PACHECO, 2015). Em estudo mais amplo dos solos dos municípios impactados, o pH dos solos originais do entorno do desastre apresentou valores de pH médios entre 5,21 a 6,20 (EMATER, 2016). A elevação do pH nas áreas com a presença de rejeito pode ser um problema se considerar que a disponibilidade de nutrientes para as plantas e atividade biológica são fortemente dependentes do pH.

A elevação do pH acima de 5,5 resulta na hidrólise do Al trocável no solo (desejável), que é o elemento mais tóxico para as plantas em solo mais ácido (menor que pH 5,5 em água). Com isso, a elevação do pH pela deposição da lama seria uma vantagem pela precipitação do Al tóxico às raízes das plantas. Isso justifica a ausência de Al trocável ou tóxico no rejeito (EMATER, 2016; EMBRAPA, 2015; SILVA et al., 2016). Contudo, valores de pH acima de 6,5 (na lama os valores de pH médio atingiram 8,0) têm resultado fortemente negativo na absorção de Manganês e de Ferro pelas plantas cultivadas sob condição normal de aeração do solo. Entretanto, as condições de anoxia sobrepõem o efeito do pH para a deficiência de ferro e manganês. Mesmo para valores de pH mais elevados, em áreas alagadas ou sujeitas a encharcamentos ocorre um aumento da disponibilidade de ferro e manganês, pois suas formas reduzidas são mais móveis e precipitam em valores de pH mais elevados (MOTTA et al., 2007).

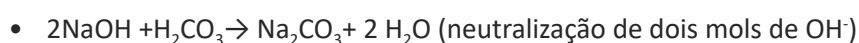
Os elevados valores de pH dos rejeitos (EMATER, 2016; EMBRAPA, 2015; SILVA et al., 2016) é coerente com o processo de obtenção de minério de ferro. A rocha minério (itabirito) passa pelos

processos de moagem, deslamagem, extração por ímã e flotação (VASCONCELOS et al., 2012). Para realização deste processo são utilizados amido de milho, hidróxido de sódio e etermonoamina pH 10,5. O aumento do pH tem como propósito aumentar a repulsão entre as partículas para dispersar o sistema (GOMES, 2009).

Como o rejeito é tratado com pH acima de 10 era esperado que o seu pH fosse superior aos valores encontrados (6,9 a 8,0). Contudo, é provável que tenha havido processo de carbonatação via CO_2 (dióxido de carbono) atmosférico, o que reduz o pH do rejeito para próximo a 8:



Ou essa reação ocorre na presença de umidade pelo seguinte sistema de reações:



O enriquecimento de sódio no rejeito era esperado, dada a adição deste na forma de NaOH (hidróxido de sódio) (Tabela 7) no processo de obtenção do minério de ferro. Já Schaefer et al. (2016) indicaram teores similares de sódio e potássio no rejeito depositado, o que indica uma perda de sódio via lixiviação, pois esse elemento apresenta baixa energia de interação com os colóides do solo e permanece em maiores concentrações na solução do solo. Silva et al. (2016) também constataram valores baixos de sódio no rejeito depositado, mesmo em pH acima de 8 (Tabela 8), o que é compatível com a baixa permanência do sódio no sistema.

O rejeito depositado nas planícies de inundação possui capacidade de troca catiônica a pH 7,0 característica de material com baixa e muito baixa capacidade de reter cátions nas suas partículas coloidais (RIBEIRO et al., 1999). Os valores de CTC a pH 7,0 do rejeito publicados na literatura foram (cmolc dm^{-3}): 1,18 a 1,24 (EMATER, 2016); 1,2 (EMBRAPA, 2015); 2,96 (SCHAEFER et al., 2016); 2,74 (SILVA et al., 2016). Para efeitos comparativos foi utilizada a densidade aparente do solo de 1 g/cm^3 para converter massa para volume nos dados da Embrapa (2015). Os solos naturais, por sua vez, apresentam valores superiores de capacidade de troca catiônica (cmolc dm^{-3}): 5,81 a 7,85 (EMATER, 2016); 5,19 em solos de várzea (PACHECO, 2015); 7,47 em terras altas da paisagem (PACHECO, 2015), 3,78 em Neossolos Flúvicos enterrados (SCHAEFER et al., 2016) e 5,67 em Cambissolos enterrados (SCHAEFER et al., 2016). A CTC é um dos parâmetros mais importantes no solo responsável por um bom crescimento das plantas, pois é a medida da quantidade de cargas negativas do solo. Em solos férteis, essas cargas negativas são ocupadas (saturadas) por elementos catiônicos essenciais às plantas, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Essa interação eletrostática entre cargas opostas previne a lixiviação desses nutrientes, aumentando suas disponibilidades para as plantas. Como já discutido anteriormente, os rejeitos também apresentam baixos teores de Ca, Mg e K disponíveis às plantas.

Com relação ao fósforo, os dados já apresentados e discutidos mostraram comportamento inconsistente entre os trabalhos, onde os teores do nutriente disponível às plantas foram maiores e menores nos solos afetados pela lama em relação aos não afetados pela lama, dependendo da pesquisa considerada. Deve-se, contudo, considerar que o extrator Mehlich I utilizado nesta análise de fósforo disponível é sensível à textura dos solos, com mais poder de extração em solo de textura arenosa, ou seja, maior extração de fósforo disponível nas amostras de rejeito.

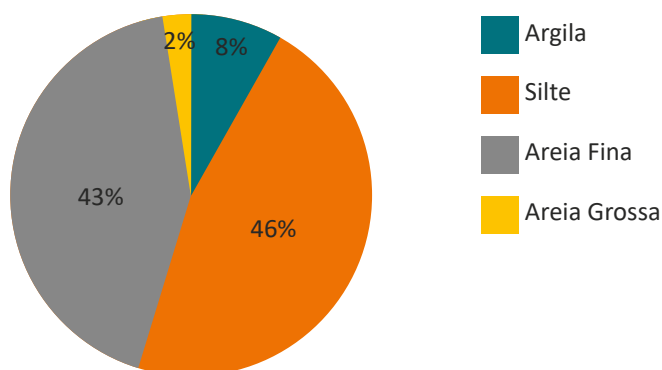
De forma consistente em todos os trabalhos, os rejeitos depositados nas várzeas apresentam teores inferiores de carbono orgânico em relação aos solos antes do desastre ou aos solos não afetados pela lama. Os baixos teores de carbono orgânico dos rejeitos representam um grande decréscimo na qualidade do solo, visto que o carbono orgânico se correlaciona com a matéria orgânica do solo, que por sua vez possui enorme contribuição nas propriedades biológicas, química e físicas do solo. O restabelecimento das plantas nas várzeas após o desastre passa, necessariamente, por práticas que visam aumentar os teores de matéria orgânica dos solos.

2.2.4.2 Propriedades físicas e morfológicas do solo

As alterações físicas dos solos são devidas à própria natureza dos rejeitos que foram depositados na superfície do terreno nas margens do rio Doce e de alguns de seus afluentes. Por isso, segue descrição do processo de produção do rejeito durante a recuperação de ferro minério. As principais etapas de beneficiamento do minério de ferro são: peneiramento, britagem, moagem, deslamagem e flotação (ARAÚJO, 2006). A etapa de moagem diminui o tamanho da partícula até o material ficar na fração areia fina (0,02- 0,2 mm) ou silte (0,002 – 0,02 mm) (Souza, 2005), Gomes, 2009) e Vasconcelos et al. 2012). Conforme informações fornecidas pela Samarco e publicadas pela Golder Associates (2016a), os rejeitos de Fundão possuem diâmetro médio (D_{50}) de partícula de 0,06mm e 0,0072 mm, com enquadramento de partículas nos tamanhos areia fina e silte, de acordo os limites propostos por Santos et al. (2005). A proporção entre o tamanho das partículas produzida anualmente de rejeito pela Samarco é entorno de 77% (p/p) de areia fina e 33% (p/p) de silte (GOLDER ASSOCIATES, 2016a). Foram coletadas amostras de rejeito logo após o rompimento, a jusante da barragem de Fundão, no reservatório de Santarém e, também, em Germano, devido à semelhança do rejeito barrado em comparação com Fundão e por pertencer ao mesmo complexo mineral (Golder Associates, 2016a). As análises granulométricas realizadas pelos laboratórios SGS Geosol e AnaTech indicaram que o material depositado (D_{50} _diâmetro médio da partícula) é caracterizado por areia fina e areia grossa, sendo muito semelhante ao material que era barrado em Fundão (GOLDER ASSOCIATES, 2016a). Foram coletadas quatro amostras simples do rejeito barrado em Germano (GOLDER ASSOCIATES, 2016a) para compor uma amostra composta e a granulometria do rejeito é apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Fração granulométrica média do rejeito barrado em Germano.

FRAÇÃO GRANULOMETRIA MÉDIA DO REJEITO BARRAGEM DE GERMANO (N = 4)

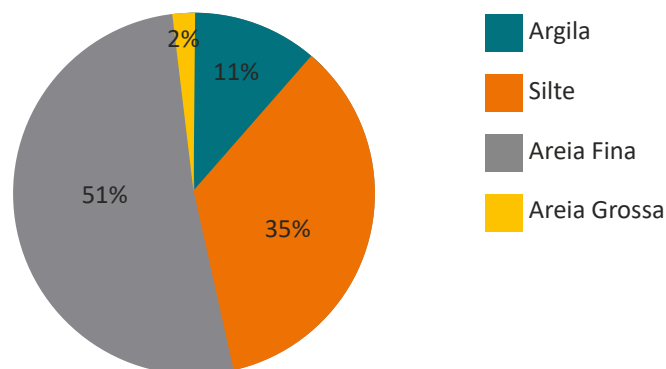


Fonte: Golder Associates (2016a).

Saindo das barragens de contenção, durante o desastre, a onda de rejeito erodiu os solos de várzea e a mistura com partículas de solo promoveu um enriquecimento em fração argila do material depositado. O rejeito depositado a jusante do barramento de Fundão foi composto de 51% de areia fina, 2% de areia grossa, 35% de silte e 11% de argila (Figura 18).

Figura 18 – Fração granulométrica média do rejeito depositado nas margens do rio Doce a jusante da barragem de Fundão.

**FRAÇÃO GRANULOMETRIA MÉDIA DO REJEITO
A JUSANTE DA BARRAGEM DO FUNDÃO (N = 6)**

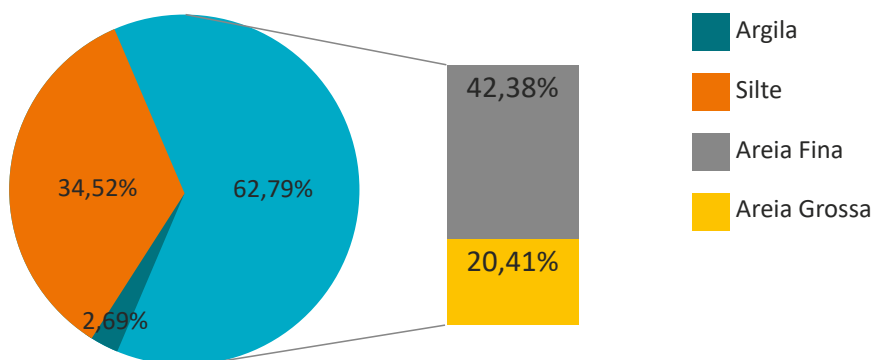


Fonte: Golder Associates (2016a).

As frações granulométricas apresentadas na Figura 18 são muito similares às encontradas no rejeito depositado nas planícies de inundação ao longo do rio Doce, conforme dados de outros estudos. CH2M (2017) coletou 22 amostras de rejeito (inconsolidado e lavado) a jusante da foz do córrego Santarém, estendendo-se até a jusante da PCH Bicas, em locais de depósito, tanto nas planícies de inundação quanto na calha do rio. Os resultados da granulometria dessas amostras são apresentados na Figura 19. O material depositado na calha e nas margens é composto predominantemente pelas frações areia fina e areia grossa, perfazendo, juntas, 62,8% das partículas desse compartimento. Há ocorrência de 34 % de silte e a fração argila é rara nas amostras de rejeito (2,69%).

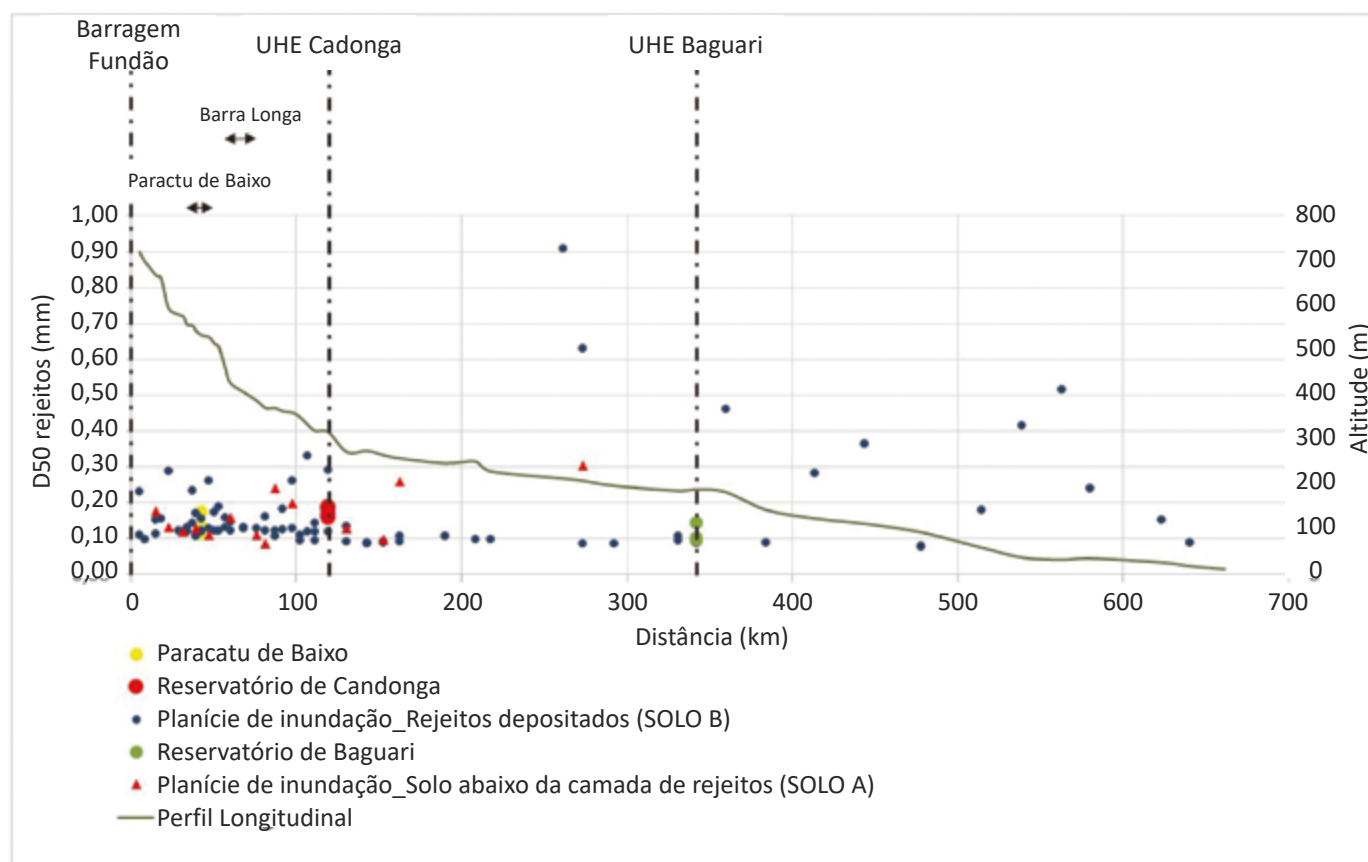
Figura 19 – Resultado médio (n=22 amostras) da granulometria do rejeito coletado e analisado pela CH2M (2017).

Granulometria do Rejeito - Trecho 08 (CH2M, 2017)



Em outro estudo levantado pela Golder Associates (2016a) foram analisadas as planícies de inundação que continham rejeito e determinados o diâmetro médio da partícula (D_{50}), ocorrendo coletas desde Fundão até a foz do rio Doce, próximo ao mar (Figura 20). Os levantamentos foram mais intensificados na região entre a barragem de Fundão e Candonga, local onde ocorreu o maior depósito de rejeitos. A variação média do diâmetro das partículas do rejeito depositado foi de 0,10 mm e 0,30 mm. Essa amplitude de tamanho se posiciona nas frações areia fina (0,02 a 0,2mm) e areia grossa (0,2 a 2 mm). Esse trecho é caracterizado por uma ocorrência maior de amostras com diâmetro mais fino (areia fina), concordando com a descrição do material barrado em Fundão (77% do material depositado anualmente apresentava tamanho areia fina). Após a barragem de Candonga, ocorreram os menores depósitos em rejeito, tanto em volume quanto em espessura, dificultando a separação ou distinção do rejeito depositado do solo natural. Nesse ambiente ocorreram as maiores variações granulométricas das partículas de rejeito/solo (0,10 mm a 0,90mm de D_{50}) e a princípio não foram encontradas diferenças no diâmetro médio (D_{50}) entre o rejeito e o solo soterrado nas planícies de inundação (Golder Associates, 2016a). No mesmo estudo realizado por Golder Associates (2016a) foram coletadas 32 amostras de solo não afetado pela lama, próximo a encostas (Figura 21).

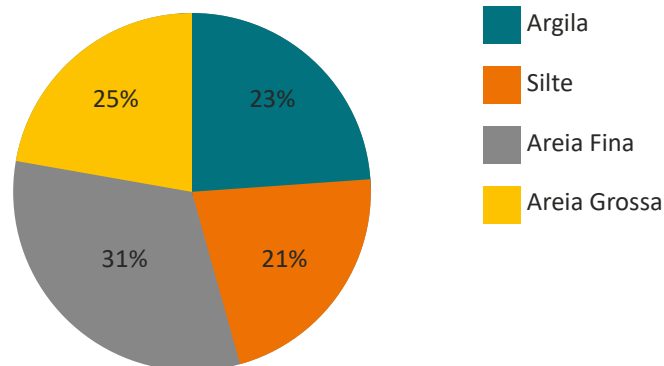
Figura 20 – Distribuição granulométrica média do rejeito (D_{50}) depositado nas planícies de inundação ao longo do caminho percorrido pela lama a partir da barragem de Fundão.



Fonte: Golder Associates (2006a, p. 589).

Figura 21 - Fração granulometria média do solo natural (n = 32).

**FRAÇÃO GRANULOMETRIA MÉDIA DO
SOLO NATURAL (N = 32)**



Fonte: Golder Associates (2016a).

Comparando os dados das Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21 pode-se chegar às seguintes conclusões: 1) nos locais mais próximos à barragem de Fundão o grande volume de rejeitos depositados apresentavam granulometria similar ao rejeito barrado em Germano (com predomínio de areia e silte e baixos teores de argila (< 3%)); 2) nas porções onde houve maior mistura rejeito/solo o teor de argila do material depositado aumentou (em torno de 11%); 3) o teor de argila média dos solos não afetados pela lama próximos às encostas apresentam os teores mais elevados de argila da área de estudo (média de 23%). Na prática, a deposição do rejeito reduziu a quantidade de argila do terreno, o que confere efeitos negativos principalmente às características químicas, como redução da CTC dos solos. A redução de cargas negativas torna o ambiente mais vulnerável, por exemplo, a contaminações por poluentes catiônicos, como os metais pesados.

A Embrapa (2015), conforme já comentado anteriormente, coletou 11 amostras de rejeitos depositados nas planícies de inundação afetadas pelo desastre para caracterização física destas amostras (Tabela 10). Destaca-se a homogeneidade granulométrica do material coletado em diferentes posições geográficas, visto o baixo desvio padrão das amostras. A fração argila, como observado nos estudos anteriores, possui baixa proporção na composição do rejeito, variando entre 6,3 a 10,7%.

Tabela 10 - Análises físicas do rejeito depositado no vale dos rios Gualaxo do Norte e Carmo.

Local	Amostra	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Argila dispersa em água	Grau de Floculação	Relação Silte/Argila	Densidade de Partículas
----- % -----							--- % ---	cm ³ /100cm ³	
Paracatu	M01	3,4	50,9	39,7	6,0	0,0	100,0	6,6	3,08
Paracatu	M02	4,0	49,9	36,1	10,0	0,0	100,0	3,6	3,13
Pedras	M03	4,2	51,5	34,3	10,0	0,0	100,0	3,4	3,12
Jurumirim	M04	3,4	52,7	33,9	10,0	0,0	100,0	3,4	3,18
Gesteira	M05	3,6	49,3	37,1	10,0	0,0	100,0	3,7	3,04
São Gonçalo	M06	3,8	52,2	34,0	10,0	0,0	100,0	3,4	2,68
Gesteira	M07	3,8	50,4	35,8	10,0	0,0	100,0	3,6	3,10
Faz. Porto Alegre	M08	3,8	50,4	37,8	8,0	0,0	100,0	4,7	3,10
Bento Rodrigues	M09	3,0	52,3	40,7	4,0	0,0	100,0	10,2	2,94
Bento Rodrigues	M10-encosta	6,4	50,7	32,9	10,0	100,0	0,0	3,3	2,96
Bento Rodrigues	M10-baixada	5,6	58,5	29,90	6,00	0,0	100,0	5,0	3,00
	Média	4,1	51,7	35,7	8,5	9,1	90,9	4,6	3,03
	Desvio Padrão	1,0	2,5	3,1	2,2	30,2	30,2	2,1	0,14
	Mediana	3,8	50,9	35,8	10,0	0,0	100,0	3,6	3,08
	Máximo	6,4	58,5	40,7	10,0	100,0	100,0	10,2	3,18
	Mínimo	3,0	49,3	29,9	4,0	0,0	0,0	3,3	2,68

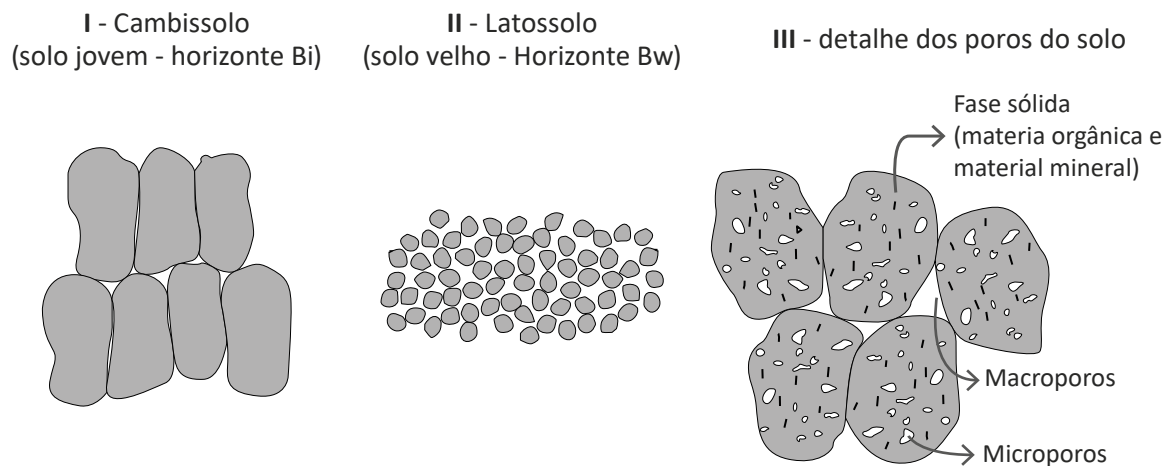
Fonte: Embrapa (2015)

Todas as amostras de rejeito apresentaram 0% de argila dispersa em água (ADA) e 100% grau de floculação (GF) (Tabela 10). Em condições naturais de solo com estrutura bem desenvolvida, valores de ADA de 0% e GF de 100% seriam desejáveis. Contudo, nesse caso, os valores devem ser analisados com cuidado. A falta de dispersão das argilas se deve, provavelmente, ao baixo teor dessa fração coloidal no solo e não a características físicas adequadas do rejeito.

As partículas de areia, silte e argila do rejeito se encontram dispersas e individualizadas e a deposição desse material causa uma justaposição dos minerais: as partículas de silte preenchem os espaços vazios deixados pelas partículas de areia grossa e areia fina e, por fim, as partículas de argila promovem o preenchimento dos poros de menor diâmetro. Como resultado, tem-se uma matriz adensada e com reduzida percentagem de poros de maior diâmetro (macroporos > 0,05 mm), responsáveis pela drenagem e trocas gasosas do solo. Esse cenário é agravado pelos baixos teores de matéria orgânica do rejeito, conforme discutido anteriormente. Em condições normais de formação dos horizontes de um solo, as frações areia, silte, argila e matéria orgânica se juntam (processo de floculação e cimentação) para formar grânulos, os quais se organizam no solo formando estruturas. A justaposição das unidades estruturais deixa espaços vazios de maior diâmetro, denominados macroporos. Os macroporos

determinam a drenagem do solo, recarga do nível freático e crescimento das raízes das plantas. Dentro dos agregados, têm-se os poros de menor diâmetro (microporos), cuja principal função ecológica é armazenar água para os organismos e para as plantas. A combinação de textura (proporção de areia, silte e argila), teor de matéria orgânica, forma e tamanho das estruturas definem as propriedades físicas dos solos, como densidade do solo, porosidade e condutividade hidráulica saturada. Mesmo solos muito argilosos podem ter alta porcentagem de macroporos e elevada drenagem, se as suas estruturas forem granulares pequenas. Uma representação esquemática da estrutura do solo em condições naturais é apresentada na Figura 22. Como não há agregação e formação de estruturas no rejeito, esse material tende a apresentar alto adensamento, principalmente no estado seco pelo aumento das forças de coesão do solo.

Figura 22 - Representação esquemática (apenas duas dimensões) de dois tipos de estrutura (agregados) do horizonte B do solo sob condições naturais (I- estrutura em blocos, com tamanho de 20 mm e II- estrutura granular, com tamanho de 2 mm).



Essa condição física indesejável do rejeito diminuiu a porosidade do solo, ou seja, restringe a infiltração e o crescimento radicular das plantas (virtual ausência de macroporos), dificultando o processo de recuperação nas áreas afetadas (EMBRAPA, 2015). O estudo realizado por Silva et al. (2016) mostra o efeito desse empacotamento das partículas minerais no aumento da densidade aparente do solo ($2,12 \text{ g/cm}^3$) (Tabela 11). Esse valor de densidade aparente é considerado extremamente elevado e muito restritivo ao crescimento das raízes das plantas. Para solos arenosos (como é o caso da textura dos rejeitos), os valores de densidade aparente devem ser inferiores a $1,7 \text{ g/cm}^3$. Para solos argilosos com alto volume de macroporos (estrutura granular pequena e forte) os valores de densidade aparente chegam a $0,7 \text{ g/cm}^3$ (PREVEDELLO et. al, 2015). Contudo, há efeito do elevado valor de densidade de partícula ($2,85 \text{ g/cm}^3$) no aumento da densidade aparente do solo. A elevação do valor de densidade de partícula é devido à alta proporção de hematita no rejeito. Solos com predomínio de quartzo nas frações areia e silte a densidade de partícula fica em torno de $2,6 \text{ g/cm}^3$.

Essas diferenças refletem a maior massa atômica do ferro em relação ao silício. Contudo, deve-se creditar principalmente o elevado valor de densidade aparente do rejeito à falta de estrutura desse material. O empacotamento das partículas minerais, o baixo teor de matéria orgânica, a ausência de estruturas e o baixo volume de macroporos resultaram nos baixos valores de volume total de poros determinados por Silva et al. (2016) em amostras de rejeito depositado (Tabela 11).

Tabela 11 - Composição granulométrica, densidade do solo, densidade de partículas e volume total de poros para amostra coletada de 0-30 cm em pacote de rejeito depositado com o desastre.

Areia	Silte	Argila	Densidade aparente do solo	Densidade de partícula	Volume total de poros
%	%	%	g/cm ³	g/cm ³	%
58	36	6	2,12	2,85	25,6

Fonte: Silva et al. (2016).

A mesma deterioração física do rejeito barrado foi observada no trabalho de Silva et al. (2006) (Tabela 12 e Tabela 13). O rejeito barrado em relação à amostra de solo coletada na mesma região apresenta: maior densidade aparente, menor volume de macroporos e menor valor de condutividade hidráulica saturada. Todas essas características demonstram a baixa qualidade física do pacote de rejeitos contidos nas lagoas de decantação. O dado mais expressivo dessa diferença de qualidade física é a condutividade hidráulica saturada: rejeito 3,4 cm/h e solo 19,1 cm/h. Essa expressiva diferença de valores reflete a baixa drenagem do pacote de rejeitos.

Tabela 12 – Composição granulométrica, densidade aparente e densidade de partícula de amostras de rejeito barrado e de solo (natural) provenientes da Mina de Alegria, Mariana (MG).

Material	Composição Granulométrica				Densidade	
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Aparente	Partícula
	-----g/kg-----				-----g/cm ³ -----	
Rejeito barrado	54	729	122	21	2.00	3,74
Solo	372	223	232	95	1.56	3,33

Fonte: Silva et al. (2006).

Tabela 13 – Macroporosidade, microporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica e capacidade de campo do rejeito e do solo provenientes da Mina de Alegria, Mariana (MG).

Material	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade Total	Condutividade Hidráulica	Capacidade de Campo
	-----%			cm/h	%
Rejeito barrado	7,8	38,5	46,3	3,4	13,3
Solo	23	30	53	19,1	25,3

Fonte: Silva et al. (2006).

Espera-se que após o desastre, o rejeito tenha-se acomodado similarmente sobre os solos de várzea. Com isso também haveria o mesmo empacotamento das partículas minerais, causando adensamento (aumento da densidade aparente) e redução significativa da macroporosidade e condutividade hidráulica. Não há relatos de publicações sobre as características físicas (macroporosidade, microporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica e capacidade de campo) do rejeito de Fundão.

2.2.4.3 Mudança na mineralogia da fração argila

Essa avaliação foi dividida em três compartimentos espaciais e temporais: a mineralogia dos solos aluviais antes do desastre; a mineralogia dos rejeitos nas lagoas da mineração; e a mineralogia dos solos e sedimentos após o vazamento de rejeitos na calha do rio Doce.

Pacheco (2015) coletou amostras de solos ao longo dos 853 km da calha principal do rio Doce antes do desastre e concluiu que a mineralogia da fração argila dos sedimentos de calha e dos solos aluviais foi essencialmente caulínica, com presença de ilita e quantidades residuais de goethita e hematita. Como o autor determinou a mineralogia da fração argila dos solos aluviais e dos sedimentos de calha do rio Doce antes do desastre, esses dados são importantes para estabelecer a referência mineralógica para checar o aporte de óxidos de ferro (principalmente hematita) com a movimentação da lama.

No trabalho de Cordeiro (2014) foram estudadas amostras de rejeitos do beneficiamento de minério de ferro de duas empresas distintas, situadas no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Esses rejeitos foram coletados em duas barragens de contenção (rejeito A e rejeito B) e foram analisados pelas seguintes técnicas: difratometria de raios X para caracterização mineralógica; fluorescência de raios X para caracterização química; e análise magnética para caracterização mineralógica dos óxidos de ferro. A análise mineralógica dos dois rejeitos foi bastante variável. No rejeito A, houve predomínio mais pronunciado de hematita e seus teores variaram de 70 a 95% em função da granulometria da fração analisada. O rejeito B apresentou menor teor de hematita (22 a 55%) e maior teor de quartzo (15 a 48%). Na fração mais fina, foram observados picos de caulinita por difração de raios X. Essa discrepância de dados em função do local de coleta mostra a variação no potencial poluidor dos rejeitos. Quanto maior o teor de hematita (principalmente em frações mais finas), maior é o impacto ambiental.

Um estudo da mineralogia na barragem de Germano foi realizado pela Golder Associates (2016a), o qual comprovou os elevados teores de hematita no rejeito. Com essa composição oxidica dos rejeitos, tem-se forte expectativa dos solos e sedimentos impactados pelo desastre apresentam altos teores de hematita. Esperam-se prejuízos nas características químicas ao transformar os sedimentos caulínicos em sedimentos oxidicos. A hematita apresenta baixa capacidade de troca de cátions (CTC) em relação à caulinita. Com isso, o poder filtrante (capacidade de adsorção) de metais pesados tóxicos catiônicos (como Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{2+}) será drasticamente reduzido com o desastre, ou seja, os sedimentos atuais do rio Doce são mais vulneráveis à contaminação ambiental. A caulinita apresenta pH do ponto de carga zero (pHPCZ) em torno de 3,5 (ALLEONI et al., 2009). Na prática, quando o pH do solo está em torno de 3,5 na superfície do mineral, tem-se a igualdade de cargas positivas e negativas, ou seja, a CTC se iguala à CTA. Como o pH dos solos e sedimentos é invariavelmente superior a esse valor, a caulinita apresenta maior capacidade filtrante de metais pesados catiônicos. Outro ponto favorável do predomínio de caulinita na fração argila de solos e sedimentos é em termos de fertilidade. O predomínio de CTC adsorve cátions essenciais às plantas, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Já os óxidos de ferro (hematita e goethita) apresentam elevado valor de pHPCZ (entre 7 e 9) (SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989). Para solos com pH inferior à neutralidade (quase a totalidade dos solos brasileiros), haverá predomínio de cargas positivas na superfície dos óxidos de ferro. A única vantagem da maior ocorrência de hematita nos sedimentos pós-desastre é a maior capacidade de adsorção de arsênio. Ao contrário do Pb^{2+} , a

espécie predominante de As(V) nos solos é na forma aniônica (HAsO_4^{2-}) (SAADA et al., 2003), que será atraída eletrostaticamente pela CTA da hematita, reduzindo a lixiviação e contaminação das águas.

Apesar da maior capacidade de adsorção de arsênio, outro aspecto importante e negativo do enriquecimento da calha do rio Doce em hematita é o potencial de aporte ambiental de metais pesados. A hematita litogênica do itabirito foi formada durante os processos de metamorfismo na área do Quadrilátero Ferrífero. As altas temperaturas desse evento geológico facilitam a entrada de outros metais pesados na estrutura da hematita por meio da substituição isomórfica de octaedros de Fe^{3+} por octaedros de Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{2+} , entre outros (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001). Esse é um aspecto ambiental muito importante, pois o rompimento da barragem de Fundão pode ter favorecido a grande dispersão desses poluentes ao longo da calha do rio Doce. Como conclusão, pode-se agrupar os efeitos do enriquecimento da fração argila dos solos e sedimentos em hematita após o desastre em dois aspectos: 1) a hematita litogênica apresenta grande potencial de guardar formas estruturais de metais pesados tóxicos em sua estrutura e, com a deposição desse mineral em ambiente anóxico, pode-se acelerar a liberação desses poluentes ao ambiente. Sob deficiência de oxigênio o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} e a hematita paulatinamente dissolvida; 2) ao reduzir os teores de caulinita e aumentar os teores de hematita nos solos e sedimentos da calha do rio Doce, esse ambiente terá uma redução da CTC e aumento da CTA, o que reduz a capacidade filtrante dos solos em metais pesados catiônicos da solução e torna o ambiente mais limitante ao crescimento de plantas.

2.2.4.4 Aumento no teor total de metais e semimetais

Foram obtidas informações referentes à análise de metais em solo do relatório da CH2M HILL do Brasil Engenharia Ltda. (CH2M, 2017). A CH2M foi contratada pela Fundação Renova para a execução do plano de manejo de rejeitos – trecho 08, que compreende a região a jusante da foz do córrego Santarém e se estende até a jusante da PCH Bicas. Foram realizadas sondagens para determinação da espessura da camada de rejeitos. Nesse estudo, foi separado o material depositado na calha no rio da região extra-calha, composta pelas planícies aluvionares e áreas de encostas. As coletas foram realizadas utilizando a metodologia de transeptos transversais ao rio de forma a avaliar as características do rejeito.

A CH2M avaliou os teores de metais e semi-metals do rejeito coletado em alguns pontos durante o levantamento de campo na região do trecho 08 (Figura 23). Em cada seção foram amostrados a margem esquerda (ME), a margem direita (MD) e o canal do rio que compreende a parte de sedimentos. Nessas seções foram amostradas normalmente 9 amostras por seção, ou seja, 3 amostras por partes da seção (ME, MD, canal), podendo ocorrer variações devido à largura das seções, com mais ou menos pontos. Importante salientar que, para a realização das análises químicas das amostras, em cada uma das partes da seção foi realizada uma amostra composta, ou seja, coletou-se de cada ponto uma parte do material a ser analisado, misturando-o aos demais pontos de uma mesma parte da seção para ser representativo daquele local.

Para representar a localização dos pontos por trecho da seção, a partir dos pontos de coleta da CH2M (2017), foi obtida uma média das coordenadas planimétricas (X, Y) entre os pontos de um mesmo trecho da seção para representar apenas a localização das seções amostradas pela CH2M e os locais aproximados de amostragem (Figura 23).

Figura 23 - Localização aproximada dos pontos levantados pela CH2M (2017) para determinação de metais pesados em solos (margens esquerda e direita) e em sedimentos (calha do rio). Região entre Mariana e Barra longa, denominada de trecho 08.



Fonte: Adaptado da CH2M (2017).

Os teores totais de metais e semi-metais em cada um dos trechos da seção são apresentados na Tabela 14. Foi utilizado como valor de referência (*background* ou linha-base) o Valor de Referência Qualidade (VRQ) para o estado de Minas Gerais (COPAM, 2011). Nota-se que os valores destacados em vermelho estão acima desse *background*, o qual foi definido para todo estado de Minas Gerais. Destaca-se os teores de antimônio acima do VRQ em alguns pontos. Já para o boro, apesar de ser um elemento essencial para algumas plantas, seus níveis foram superiores ao de referência em todos os pontos, ultrapassando em média 800% em relação ao valor de referência. Para o mercúrio, ocorreram pontos acima do valor de referência; entretanto, até para gerar o VRQ desse elemento, em muitas das amostras analisadas no estado de Minas Gerais, ocorreram problemas em relação ao limite de quantificação, podendo ser um limite frágil quando é utilizado para comparações. Nota-se que, para o arsênio, em um único ponto, houve um aumento de 18% desse elemento em relação ao valor de referência, entretanto esse ponto estava localizado na calha do rio, ou seja, local de aporte de sedimentos, devendo-se comparar os dados com valores de referência para sedimentos (Resolução CONAMA nº 454/2012).

Como já comentado, ressalta-se que para a área afetada pela lama não há valores locais definidos como referência. Dessa forma, toda e qualquer comparação se torna frágil devido à própria riqueza dos minerais existentes no Quadrilátero Ferrífero em metais e semi-metais, além dos próprios processos de contaminação ao longo de anos pela exploração de ouro, deixando teores elevados de arsênio nos sedimentos conforme apontam alguns estudos (COSTA, 2007; VAREJÃO et al., 2011; SILVA et al., 2013; PACHECO, 2015).

Tabela 14 – Resultados das análises químicas para metais – coletado pela CH2M – região do trecho 08 (entre Mariana e Barra Longa).

Parâmetros	Unidade	VRQ	TS-02- AS-01	TS-02- AS-02	Margem Direita	TS-03- AS-01	TS-03- AS-02	Margem Direita	TS-03- AS-03	Margem Esquerda	TS-05- AS-01	TS-05- AS-02	Margem Esquerda	TS-05- AS-03	Calha	Margem Direita	TS-06- AS-01	TS-06- AS-02	Calha	Margem Esquerda	TS-06- AS-03	Margem Esquerda	TS-08- AS-01	TS-08- AS-02	Calha	Margem Direita	TS-10- AS-01	TS-10- AS-02	Calha
Alumínio	mg/kg	-	1570	856	1570	1890	633	1750	1450	1450	1370	918	698	2000	1410	1350	726	729	5140	392	475								
Antimônio	mg/kg	0,5	<1	<1	<1	1,87	<1	<1	1,69	<1	<1	1,19	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Arsênio	mg/kg	8	7,73	10,5	6,96	7,27	4,32	6,69	5,56	26,2	25,5	10,8	10,7	5,38	3,82	5,79	5,92	4,23	2,49	2,94	4,81								
Bário	mg/kg	93	28,7	67,8	16,9	27	32,1	18,9	26,2	25,5	10,8	10,7	19,8	17,2	16	26,5	27,4	65,5	8,97	12,6									
Boro	mg/kg	11,5	153	127	171	186	61,3	175	111	110	58,1	125	67,9	89	130	76,1	61,8	22,1	71,3	85									
Cádmio	mg/kg	<0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Chumbo	mg/kg		5,61	4,19	6,19	6,71	2,16	6,08	5,09	5,02	3,13	2,34	6,06	5,11	5,28	3,07	2,83	8,47	2,71	3,05									
Cobalto	mg/kg	6	1,77	1,8	1,25	4,06	5,83	2,66	5,2	4,32	4,61	3,36	2,65	4,62	3,68	4,49	3,1	3,34	8,72	1,95	1,72								
Cobre	mg/kg	49	4,74	3,37	4,06	5,83	2,66	5,2	4,32	4,61	3,36	2,65	4,62	3,68	4,49	3,1	3,34	8,72	1,95	1,72									
Cromo	mg/kg	75	11,1	6,02	9,14	12	4,49	14,1	10,2	9,75	5,52	5,52	4,27	9,52	8,1	8,65	4,52	4,24	17,5	2,28	2,79								
Ferro	mg/kg	-	47000	44000	49900	52000	25900	50500	43900	43900	29400	31500	45400	39100	46700	35300	30300	13000	34000	37200									
Manganês	mg/kg	-	504	977	429	502	603	441	529	495	214	157	387	321	376	652	658	126	196	299									
Mercurio	mg/kg	0,05	0,128	0,124	0,116	0,11	0,0911	0,099	0,0828	0,0784	0,0695	<0,05	0,0782	0,0812	0,079	0,0564	0,0673	0,868	<0,05	<0,05									
Molibdênio	mg/kg	<0,9	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1									
Níquel	mg/kg	21,5	3,07	3,1	2,3	2,93	2,44	3,22	2,45	3,16	2,12	1,37	2,27	1,69	1,97	1,76	1,59	5,56	<1	<1									
Prata	mg/kg	19,5	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1									
Selênio	mg/kg	-	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1									
Vanádio	mg/kg	129	12,9	8,6	12,6	15	5,25	13,6	10,3	10,4	5,9	5,3	11,6	8,86	10,4	6,16	5,39	31,8	4,36	5,45									
Zinco	mg/kg	46,5	6,81	8,67	6,93	7,83	6,56	7,55	8,35	8,34	10	9,47	10,9	8	8,27	7,63	12,9	31,5	14,8	6,75									

Fonte: Sondagens realizadas de 1 a 11 de julho de 2017, CH2M (2017).

No estudo realizado pela Embrapa (2015) foram coletadas amostras de rejeitos depositados nas áreas afetadas pela lama e analisados os teores totais de elementos químicos do solo, obtidos por fluorescência de raios X em campo e os teores de elementos químicos solubilizados por tratamento com ácidos nítrico e clorídrico em forno micro-ondas conforme o método da USEPA 3051a. Os resultados obtidos dessas análises ficaram abaixo dos limites adotados como referência para avaliação da contaminação de metais no solo, assumindo como comparativo a Resolução CONAMA nº 420/2009. Entretanto ao utilizar o VRQ para o estado de Minas Gerais (COPAM, 2011), em um ponto apenas (M10-encosta) foi encontrado valor superior para arsênio (Tabela 15).

Tabela 15 - Teores de metais no rejeito depositado na planície aluvionar do rio Doce

Local	Amostra	As	Cu	Zn	Pb	Mn	Cr	Co	Ni	Cd
-----mg kg ⁻¹ -----										
Paracatu	M01	3,9	4,8	5,9	4,4	381	12	2,3	3,2	<0,01
Paracatu	M02	4,7	5,3	6,4	4,6	380	15,2	2,5	<1,0	<0,01
Pedras	M03	4,3	5,1	6,2	4,4	388	12,8	2,9	<1,0	<0,01
Jurumirim	M04	3,7	4,9	5,7	4,8	387	12,8	2,5	<1,0	<0,01
Gesteira	M05	4,3	4,8	6	4,5	360	13,5	2,5	2,9	<0,01
São Gonçalo	M06	4,2	4,7	5,7	4,3	356	13,8	2,3	<1,0	<0,01
Gesteira	M07	4,3	4,8	5,9	4,8	399	13,4	3	3	<0,01
Faz. Porto Alegre	M08	4,3	4,9	6,2	4,6	380	13,3	2,7	<1,0	<0,01
Bento Rodrigues	M09	2,8	5,7	4,5	3,3	357	10,3	1,9	2,8	<0,01
Bento Rodrigues	M10-Baixada	4	9	5,7	4,5	250	17	2,3	3,7	<0,01
Bento Rodrigues	M10-Encosta	8,7	8,6	9,5	8,2	279	25,5	3,1	6,7	<0,01
	Média	4,47	5,69	6,15	4,76	356	14,51	2,55	3,72	-
	Desvio Padrão	1,49	1,57	1,22	1,21	48	4,02	0,36	1,50	-
	Mediana	4,30	4,90	5,90	4,50	380	13,40	2,50	3,10	-
	Máximo	8,70	9,00	9,50	8,20	399	25,50	3,10	6,70	-
	Mínimo	2,8	4,7	4,5	3,3	250	10,3	1,9	2,8	-

Fonte: Embrapa (2015).

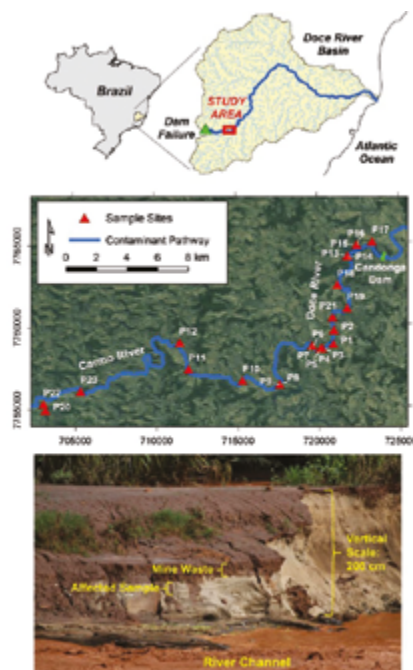
Guerra et al. (2017) realizou um estudo em 24 de novembro de 2015, retirando amostras de solo e sedimento de 23 locais (Figura 24). O total de amostras coletadas foi de 60 amostras, com a seguinte relação com os rejeitos da mineração: grupo 1 - amostras de referência (sem adição de rejeitos) (n = 12); grupo 2 - amostras de solo diretamente afetadas (n = 23); grupo 3 - resíduos da mineração (n = 25).

Inicialmente foi feita a determinação dos teores totais de elementos majoritários Si, Al, Ca, Ti, K e Fe por fluorescência de raios X. Os teores pseudo-totais de elementos-traço tóxicos (As, Ba, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V, and Zn) foram determinados pelo método EPA 3050B. Um terceiro método foi aplicado para determinar os teores de As e Mn mais solúveis e de maior impacto ambiental, definido como fração lixiviável.

Guerra et al. (2017) observaram um enriquecimento notável para arsênio (As) e manganês (Mn) em alguns resíduos de minas e amostras de solo afetadas. Para Mn, os seguintes dados foram encontrados: amostras de solo controle (de 78 a 1568 mg kg⁻¹; média = 579 mg kg⁻¹), amostras de solo afetadas (de 123 a 2410 mg kg⁻¹; média = 904 mg kg⁻¹) e amostras de resíduos da mineração (de 203 a 2298 mg kg⁻¹; média = 824 mg kg⁻¹). Para As, os dados encontrados foram: amostras de solo controle (de 0,7 a 24,8 mg kg⁻¹; média = 5,2 mg kg⁻¹ As), amostras de solo afetadas (de 0,8 a 55 mg kg⁻¹; média = 17,6 mg kg⁻¹ As), e amostras de resíduos da mineração (de 0,8 a 164 mg kg⁻¹; média = 12,5 mg kg⁻¹ As). O As pode estar associado a partículas finas de arsenopirita da região do Quadrilátero Ferrífero. O enriquecimento sistemático observado para As e Mn em amostras de solo diretamente afetadas pelo derramamento da barragem pode não ser alarmante, dado o fundo naturalmente alto (*background* geoquímico) da região do Quadrilátero Ferrífero (SOUZA et al., 2015): média e coeficiente de variação: As - 168 mg kg⁻¹ (174%) e Mn - 6301 mg kg⁻¹ (197%).

Os dados de Guerra et al. (2017) indicam maior preocupação ambiental em relação ao As. Os teores pseudo-total de As foram significativamente superiores nas amostras de solo afetadas pela lama em relação às amostras testemunhas. Esse comportamento não ocorreu para os outros metais. Também, os teores de As em alguns solos impactados pela lama foram superiores em relação ao valor de prevenção (15 mg kg⁻¹) estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009. O valor de prevenção é a concentração de alerta para uma substância específica em que acima desse limite pode causar alterações prejudiciais na qualidade do solo e das águas subterrâneas (Resolução CONAMA nº 420/2009). Contudo, os mesmos autores discutem que esse valor de prevenção para os solos do Quadrilátero Ferrífero não apresenta validade, pois os teores naturais (*background* geoquímico) de As da região é superior a esse limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009. Isso ocorre porque o material de origem dos solos do Quadrilátero Ferrífero são naturalmente ricos em As e outros metais pesados, independente de atividades antrópicas. Os autores deveriam apresentar os teores de metais individualizados por ponto de coleta e não apenas os dados médios agrupados por amostras de referência (sem adição de rejeitos) (n = 12); grupo 2 - amostras de solo diretamente afetadas (n = 23); grupo 3 - resíduos da mineração (n = 25). A apresentação individualizada daria para acompanhar os teores de As ao longo do rio Doce. Com relação ao trabalho de Pacheco (2015), o teor máximo de As de 52 mg kg⁻¹ obtido nas amostras de solo impactadas pela lama seria bem inferior ao teor máximo de As antes do desastre (152 mg kg⁻¹).

Figura 24 – Mapa da bacia do rio Doce destacando o caminho da lama a partir do rompimento da barragem do Fundão e os pontos de amostragem de solo às margens do rio.



Fonte: Guerra et al. (2017).

Analisando os teores médios de As e Mn obtidos por Guerra et al. (2017) (Tabela 16) é possível verificar que existem valores acima do VRQ para o estado de Minas Gerais (8 mg/kg) e, dependendo da comparação, até alguns pontos de controle amostrados por esses autores (GUERRA et al., 2017) são superiores ao VRQ proposto pela COPAM (2011).

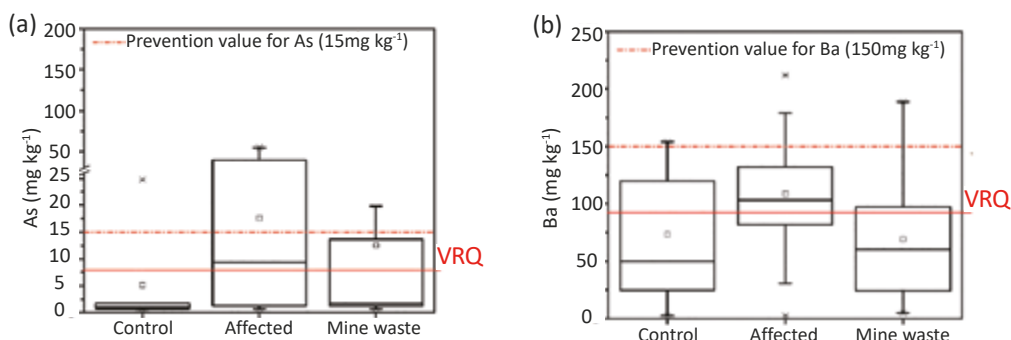
Tabela 16 – Dados encontrados para arsênio (As) e manganês (Mn) para os diferentes tipos de amostra (n=60).

	Arsênio (As) mg/kg		Manganês (Mn) mg/kg	
	Média	Mínimo e Máximo	Média	Mínimo e Máximo
Linha-Base (solos de referência) (n=12)	5,2	0,7- 24,8	579	78-1568
Solo Afetado sob o Rejeito (n=23)	17,6	0,8-55	904	123-2410
Rejeito (n=25)	12,5	0,8-164	824	203-2298

Fonte: Guerra et al. (2017)

Analisando os teores de metais e semi-metais apresentados por Guerra et al. (2017) chama a atenção que, dependendo da comparação realizada, seja ela através de pontos de referência ou utilizando o VRQ (COPAM, 2011), os resultados podem ser diferentes. Por exemplo, para arsênio, como já apresentado, demonstra ter um enriquecimento após o desastre, tanto no solo afetado que está abaixo da camada do rejeito quanto na própria camada de rejeito que foi depositada. Para bário, quando comparado somente ao VRQ, as amostras de controle apresentaram valores acima dessa referência (COPAM, 2011) (Figura 25), demonstrando que há lugares naturalmente ricos desse elemento e que necessitam ser comparados ponto a ponto. Isso não foi possível pela apresentação apenas dos teores de metais por GUERRA et al. (2017).

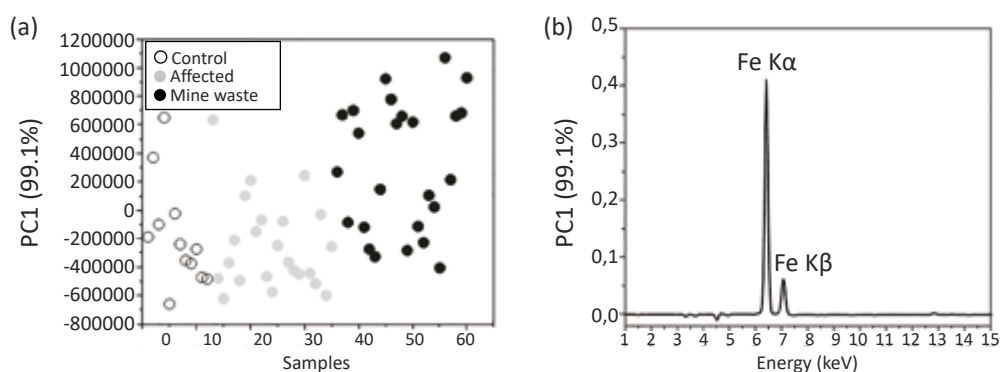
Figura 25 – Níveis pseudototais dos elementos determinados para as amostras controle, solo afetado e rejeito sendo estes apresentados no formato de *box-plot*. A) análise para arsênio e B) análise para bário. Total de amostras analisadas: controle n=12, solo afetado n =23 e rejeito n=25.



Fonte: Adaptado de Guerra et al. (2017).

Os dados dos teores de metais e semi-metais de Guerra et al. (2017) foram trabalhados por análise de componentes principais para verificar o possível agrupamento de amostras em função do padrão de poluentes (Figura 26). A primeira componente principal explicou 99,1% da variação nos dados e permitiu uma classificação das amostras quanto ao teor de ferro, visto que 83% das amostras de controle apresentaram valores negativos no PC1, e 70% das amostras de resíduos de minas apresentaram valores positivos.

Figura 26 – A) Agrupamento principal dos dados de Guerra et al. (2017) na PC1 entre amostras de solo de controle, solo afetado, e rejeito de mineração. B) Agrupamento principal dos dados de Guerra et al. (2017) na PC1 e picos de raios X.



Fonte: adaptado de Guerra et al. (2017).

No entanto, selecionando a região espectral entre 1 e 11 keV e excluindo os picos de raios X dos principais constituintes do solo (Al, Si, K, Ca, Ti e Fe), não foi observada uma clara tendência de agrupamento. Essa descoberta corrobora a natureza heterogênea do material descarregado no rio Doce. A barragem armazenava principalmente partículas de areia e silte e devido ao deslocamento do material rio abaixo esses materiais foram misturados e depositados em diferentes proporções nas margens do rio (GUERRA et al., 2017).

Guerra et al. (2017) analisaram também os teores de As e Mn mais solúveis e de maior impacto ambiental, definido como fração lixiviável. Para extrair a fração lixiviável de As e Mn foi utilizado o fluido número 1 do método EPA 1311: 5,7 mL ácido acético gracial em 500 mL de água ultra-pura, mais 64,3 mL de NaOH 1 mol L⁻¹, diluir a solução final para 1 L. O pH do final do fluido número 1 será de 4,93.

A suspensão solo:solução foi agitada por 18 horas. Essa análise foi realizada apenas para 23 amostras: 3 amostras controle, 11 amostras de solo afetado e 9 amostras de rejeito (Tabela 17). Para o manganês móvel foi verificada uma alta variabilidade, ocorrendo valores até mesmo mais altos nas amostras de controle em comparação com os locais afetados (solo afetado e rejeito depositado). A unidade usada por Guerra et al. (2017) não permite comparações com a disponibilidade de As móvel de outras pesquisas. Para isso, tem-se que transformar os dados, como se segue:

- teor máximo de As móvel = $3,33 \mu\text{g L}^{-1}$;
- passando para conteúdo em 5 mL de solução extratora - $0,0165 \mu\text{g 5 mL}^{-1}$;
- passando para conteúdo no solo - $0,0165 \mu\text{g 2,5 g solo}^{-1}$;
- concentração de As móvel no solo = $0,0066 \text{ mg kg}^{-1}$.

Esse teor máximo de As móvel no solo é extremamente baixo e não representa risco ambiental. Contudo, recomenda-se determinar outras formas biodisponíveis de todos os elementos-traço tóxicos em trabalhos futuros, como extrações com soluções de Mehlich-1 e solução de HNO_3 1 mol L^{-1} em sistema fechado.

Tabela 17 – Frações pseudototais e móveis para Mn e As nas amostras selecionadas (n=23).

Local de Amostragem	ID da amostra	Classe da Amostra	Mn pseudototal (mg/kg)	Mn móvel (mg/L)	As pseudototal (mg/kg)	As móvel ($\mu\text{g/L}$)
P2	2	Controle	940 ± 12	$4,69 \pm 0,05$	$24,3 \pm 0,1$	$1,8 \pm 0,4$
P7	16		1014 ± 10	$8,1 \pm 0,3$	$24,8 \pm 0,9$	$3,1 \pm 0,5$
P17	43		1568 ± 6	$30,0 \pm 0,4$	$1,5 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,5$
P4	7		938 ± 79	$2,2 \pm 0,3$	24 ± 1	$2,3 \pm 0,4$
P5	13		622 ± 10	$6,4 \pm 0,2$	$17,8 \pm 0,5$	$3,7 \pm 0,4$
P6	15		946 ± 21	$3,95 \pm 0,03$	18 ± 2	$1,27 \pm 0,09$
P7	17	Solo afetado sob o rejeito	935 ± 12	$3,3 \pm 0,1$	$46,9 \pm 0,5$	$1,9 \pm 0,6$
P8	21		2410 ± 33	$7,38 \pm 0,09$	55 ± 4	$2,6 \pm 0,6$
P9	23		1765 ± 32	$4,57 \pm 0,07$	$46,4 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,3$
P10	25		1240 ± 52	$2,75 \pm 0,07$	$39,8 \pm 0,7$	$1,9 \pm 0,5$
P11	27		1619 ± 7	$16,3 \pm 0,5$	$45,4 \pm 0,8$	$1,9 \pm 0,3$
P19	47		1318 ± 4	$28,5 \pm 0,6$	$9,2 \pm 0,4$	$4,9 \pm 0,2$
P21	53	Rejeito	1400 ± 21	$8,9 \pm 0,3$	$47,3 \pm 0,1$	$3,33 \pm 0,07$
P23	57		993 ± 82	$3,08 \pm 0,05$	$15,5 \pm 0,9$	$0,65 \pm 0,01$
P4	6		736 ± 15	$4,3 \pm 0,2$	18 ± 1	$1,7 \pm 0,2$
P5	9		889 ± 25	$4,86 \pm 0,02$	$7,8 \pm 0,3$	$0,38 \pm 0,06$
P5	12		703 ± 4	$8,4 \pm 0,1$	$17,3 \pm 0,2$	$2,6 \pm 0,2$
P9	22		1955 ± 46	$6,9 \pm 0,1$	$19,8 \pm 0,1$	$1,15 \pm 0,03$
P11	28	Rejeito	1531 ± 46	$9,8 \pm 0,2$	164 ± 3	$6,2 \pm 0,5$
P14	35		918 ± 90	$7,55 \pm 0,01$	$2,7 \pm 0,1$	$1,15 \pm 0,15$
P17	41		2298 ± 52	$22,6 \pm 0,3$	17 ± 1	$5,4 \pm 0,6$
P18	44		2168 ± 29	$27,7 \pm 0,7$	$14,6 \pm 0,4$	$4,9 \pm 0,3$
P18	45		1247 ± 25	$22,2 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,1$	$1,5 \pm 0,2$

Após a análise dos trabalhos que tratam dos teores de metais e semi-metais nos rejeitos e solos da bacia do rio Doce é patente a grande dificuldade de escolha de níveis de referência desses poluentes para se afirmar, com segurança, se o desastre promoveu a contaminação ambiental com metais.

Além dos teores pseudo-totais de metais pesados (EPA3050B e EPA3051A), métodos de extração mais brandos deveriam também ser utilizados. Os métodos com menor energia de extração permitem quantificar formas mais solúveis de metais pesados, com maior mobilidade e potencial de contaminação ambiental. Dois solos ou sedimentos com o mesmo teor pseudo-total de metal pesado terá maior impacto ambiental aquele que apresentar formas mais solúvel do poluente. Apenas dois trabalhos tentaram determinar formas mais móveis de metais pesados, mas os resultados foram comprometidos por falta de critérios amostrais e metodológicos.

Não há dados disponíveis se os metais pesados foram absorvidos e acumularam nas raízes e parte aérea das plantas nativas das áreas impactadas pela lama. Uma das principais formas dos metais pesados dos solos e sedimentos entrarem na cadeia trófica é por meio do consumo de plantas contaminadas por animais.

Como conclusão dos estudos analisados na área do desastre, a determinação da linha de base ou fundo geoquímico de metais pesados tem sido o gargalo para a correta interpretação dos dados pós-desastre. Os resultados ainda não são conclusivos quanto à contaminação por metais com o deslocamento do rejeito da mineração. Contudo um fato parece irrefutável: mesmo os teores de metais pesados serem naturalmente mais elevados na cabeceira do rio Doce pela proximidade às minerações de ouro da região, o deslocamento da lama proporcionou uma grande dispersão desses poluentes ao longo da calha do rio, ou seja, o imenso volume de metais pesados que estavam naturalmente confinados nas montanhas do Quadrilátero Ferrífero foram espalhados ao longo de mais de 600 km de várzea do rio Doce e seus afluentes.

2.2.4.5 Danos gerais na área rural

Emater (2016) realizou estudo para a determinação das perdas das propriedades rurais oriundas do rompimento da barragem de Fundão. As áreas afetadas foram contabilizadas através da avaliação da situação (10/11/15) de levantamentos mais precisos por técnicos da Emater de Minas Gerais, pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e pelas prefeituras de Mariana e Barra Longa (a partir de 18/11/15), da utilização de imagens de satélite e aéreas disponíveis para agilizar a mensuração dos danos causados, além da aplicação de um questionário visando quantificar e qualificar as perdas ocorridas. Nesse estudo apresentado pela Emater (2016) foram levantadas 99% das propriedades e os estudos só não foram concluídos devido à dificuldade de encontrar ou de realizar contato com os agricultores que residem em outros municípios.

Foram afetadas pela lama um total de 218 propriedades (Tabela 18), sendo 138 destas localizadas no município de Barra Longa, 73 propriedades em Mariana, 4 em Ponte Nova e 3 em Rio Doce, conforme o levantamento realizado pela Emater (2016). Cerca de 63% das propriedades atingidas pela lama estão no município de Barra Longa e 33% em Mariana.

As comunidades afetadas em Barra Longa foram Barreto, Mandioca, Gesteira, Corvinas, Vista Alegre, Capela Velha, Floresta, São Gonçalo, Jurumirim, Onça, Ocidente, Tanque e Apaga Fogo. Já as comunidades rurais atingidas em Mariana foram Bento Rodrigues, Paracatu e Campinas, além das regiões de Águas Claras e Cláudio Manoel e toda a extensão das margens do rio Gualaxo do Norte conforme informado pela Emater (2016).

Tabela 18 – Número de propriedades atingidas por município.

Número de Propriedades Atingidas	Município				
	Barra Longa	Mariana	Ponte Nova	Rio Doce	Total
	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
Total	138	73	4	3	218
Porcentagem (%)	63,30	33,49	1,83	1,38	100,00

Fonte: Emater (2016).

Na Tabela 19 é apresentado um resumo dos prejuízos causados nas áreas rurais atingidas em relação à quantificação de terras, construções, cercas, maquinários, equipamentos e animais.

Tabela 19 – Resumo quantitativo dos prejuízos causados

Item	Quantidade
Número de propriedades atingidas	218
Número de pessoas residentes nas propriedades atingidas	336
Terras atingidas (ha)	1.375,31
Construções atingidas (unidade)	252
Cercas atingidas (metro linear)	181.745
Quantidade de máquinas e equipamentos atingidos	341
Quantidade de animais perdidos	3.514
Número de produtores com dívidas de crédito rural	36

Fonte: Emater (2016).

Na Tabela 20 é apresentada a quantificação em termos de área atingida por uso e ocupação do solo por município. As áreas atingidas pela lama eram basicamente compostas por pastagens (1.129 ha de um total de 1.375 ha), representando cerca de 82% do total das áreas atingidas.

Tabela 20 – Área atingida por uso e ocupação do solo.

Terras atingidas (ha)	Barra Longa	Mariana	Ponte Nova	Rio Doce	Total	Percentual de Área Atingida por ocupação
Ocupação	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	%
Pastagens	644,66	466,10	3,10	16,00	1.129,86	82,15
Capineira / Cana-de-açúcar	73,68	105,10	3,90	0,50	183,18	13,32
Lavoura	4,02	17,25	0,00	10,50	31,77	2,31
Outras	3,94	26,21	0,36	0,00	30,50	2,22
Total	726,30	614,66	7,36	27,00	1.375,31	100,00

Fonte: Emater (2016).

Na Tabela 21, é apresentado o percentual das áreas atingidas em relação à área total das propriedades por município. No município de Mariana ocorreu o maior percentual de área atingida em comparação com a área total das propriedades atingidas, representando 22%, e, no município de Barra Longa, esse percentual foi de 11%.

Tabela 21 – Número e percentual de áreas atingidas por propriedades e por município.

Área total das propriedades, área atingida e percentual atingido	Barra Longa	Mariana	Ponte Nova	Rio Doce	Total
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Área total das propriedades atingidas	6.619,28	2.760,93	131,21	713,70	10.225,12
Área atingida	726,30	614,66	7,36	27,00	1.375,31
Percentual	10,97%	22,26%	5,61%	3,78%	13,45%

Fonte: Emater (2016).

A maioria das propriedades atingidas teve suas áreas afetadas entre 0e 25% da sua área total, sendo que, em média, estas foram afetadas em 13,45%. Das 218 propriedades atingidas pela lama, 175 tiveram danos em até 50% da área da sua propriedade. Ocorreram alguns casos mais severos com percentual da área atingida em relação ao total, entre 75% a 100% da área em 31 propriedades, conforme é possível de verificar na Tabela 22.

Tabela 22 – Percentual de área atingida por grupo.

Número de propriedades em relação ao percentual de área atingida	Barra Longa	Mariana	Ponte Nova	Rio Doce	Total
	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
00,00 a 25,00%	96	32	4	3	135
25,01% a 50,00%	22	18	0	0	40
50,01% a 75,00%	7	5	0	0	12
75,01% a 100,00%	13	18	0	0	31
Total	138	73	4	3	218

Fonte: Emater (2016).

Ressalta-se que, do total das propriedades levantadas, não foi possível catalogar 1% devido à dificuldade em contatar alguns proprietários que não residem nessas propriedades. Além disso, conforme informações da Emater de Minas Gerais, até a data de publicação do relatório, 25 propriedades ainda seriam diagnosticadas.

2.2.4.6 Considerações finais

A partir da pesquisa em dados bibliográficos de monitoramentos e trabalhos produzidos na área e demais estudos, algumas considerações podem ser feitas para a temática solo no tocante as propriedades do solo natural e do rejeito ora depositado em função do rompimento da barragem de Fundão.

A) Fertilidade do solo e do rejeito

Os dados secundários analisados até o momento indicam que o rejeito depositado nas planícies de inundação nas áreas afetadas entre a barragem de Fundão e Risoleta Neves impactou

negativamente a fertilidade dos solos. Os rejeitos apresentam as seguintes características (em relação aos solos de mesma posição geomorfológica antes do desastre ou que não foram afetados pelo desastre): menor capacidade de troca catiônica, menores teores de nutrientes disponíveis às plantas (cálcio, magnésio, potássio), pH elevado, teores de carbono mais baixos e teor de sódio mais elevados. Para confirmar esse comportamento estão sendo realizadas novas amostragem de solos em diferentes ambientes às margens do rio Doce nas áreas mais impactadas pelo desastre, para determinação dos parâmetros químicos dos solos.

B) Física do solo e do rejeito

Os estudos analisados apontam que o rejeito extravasado de Fundão possui características físicas muito inferiores aos solos não afetados pela lama na planície aluvial do rio Doce. Os rejeitos apresentam menores teores de argila, ausência de estrutura, menor volume de macroporos, maior valor de densidade aparente e menor valor de condutividade hidráulica. Na prática, essa menor qualidade física dos rejeitos dificulta as trocas gasosas do solo, o crescimento das raízes das plantas e drenagem da água da chuva, o que favorece, sobremaneira, a erosão dos solos.

C) Mineralogia das frações do solo e do rejeito

Houve expressivo aumento nos teores de hematita (óxido de ferro) nas áreas afetadas pela deposição do rejeito. Os solos originais nas várzeas eram essencialmente cauliniticos (filossilicato). Compatibilizando a granulometria com a mineralogia do solo e rejeito, como houve drástica redução da fração argila no rejeito, a hematita na lama encontra-se preferencialmente dos tamanhos areia e silte. Esperam-se prejuízos nas características químicas ao transformar os solos cauliniticos em sedimentos oxidicos (rejeito depositado). A hematita apresenta baixa capacidade de troca de cátions (CTC) em relação à caulinita. Com isso, o poder filtrante (capacidade de adsorção) de metais pesados tóxicos catiônicos (como Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{2+}) será drasticamente reduzido com o desastre, ou seja, os sedimentos atuais do rio Doce são mais vulneráveis à contaminação ambiental. Outro ponto favorável do predomínio de caulinita na fração argila de solos e sedimentos é em termos de fertilidade. O predomínio de CTC adsorve cátions essenciais às plantas, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} . A única vantagem da maior ocorrência de hematita nos sedimentos pós-desastre é a maior capacidade de adsorção de arsênio. Ao contrário do Pb^{2+} , a espécie predominante de As (V) nos solos é na forma aniônica ($HAso_4^{2-}$), que será atraída eletrostaticamente pela CTA da hematita, reduzindo a lixiviação e contaminação das águas.

Como conclusão, pode-se agrupar os efeitos do enriquecimento da fração argila dos solos em hematita após o desastre em dois aspectos: 1) a hematita litogênica apresenta grande potencial de guardar formas estruturais de metais pesados tóxicos em sua estrutura e, com a deposição desse mineral em ambiente anóxico, pode-se acelerar a liberação desses poluentes ao ambiente. Sob deficiência de oxigênio o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} e a hematita paulatinamente dissolvida; 2) ao reduzir os teores de caulinita e aumentar os teores de hematita nos solos da calha do rio Doce, esse ambiente terá uma redução da CTC e aumento da CTA, o que reduz a

capacidade filtrante dos solos em metais pesados catiônicos da solução e torna o ambiente mais limitante ao crescimento de plantas.

D) Teores de metais e semi-metais tóxicos no solos e rejeito

Os resultados relativos a teores de metais não são conclusivos quanto à contaminação de metais pela deposição de rejeitos devido grande dificuldade de escolha de níveis de referência com base nos dados secundários analisados. Destaca-se a necessidade de coletas de amostras de referência no mesmo local das amostras de rejeito. Esta atividade será desenvolvida pelos Institutos Lactec, a qual será realizada por métodos padrão para determinação dos teores pseudo-totais e buscará através de extrações complementares a avaliação da mobilidade ambiental dos metais. Está previsto ainda a análise dos teores de metais pesados nas plantas nativas das áreas impactadas para confirmar se houve ou não contaminação ambiental.

Por fim, os resultados apresentados neste relatório são unicamente com base em informações obtidas na literatura. Desta forma, está previsto a avaliação pelos Institutos Lactec de cada tema analisado, tanto de fertilidade, física, mineralógica e os teores de metais do rejeito depositado nas planícies de inundação decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, a partir de coleta e análise de rejeitos e solos da região.

2.3 HIDROLOGIA E HIDROSEDIMENTOLOGIA

2.3.1 INTRODUÇÃO

O fluxo de rejeitos de mineração alterou as características da bacia após a liberação do material represado pela barragem de Fundão sobre o terreno e corpos hídricos. O desastre afetou o ciclo da água principalmente por alterar suas propriedades e afetar sua circulação. Portanto, as análises realizadas para diagnosticar os danos causados focam em estimar a quantidade total de rejeito liberada e sua distribuição pela bacia. Naturalmente, a bacia já exporta materiais advindos do solo para os corpos hídricos, o que pode em alguns casos dificultar a diferenciação entre o material normalmente transportado e o material originado pelo desastre. Além disso, a dinâmica de transporte nos rios é sazonal, caracterizada por épocas com maiores e menores quantidades de material transportado.

Usualmente, o sedimento é o material mais estudado em hidrologia já que existe uma codependência entre o transporte de sedimento e a hidrodinâmica, isto é, ao mesmo tempo em que a hidrodinâmica promove condições para deposição/ressuspensão de sedimentos, esta deposição altera a morfologia que por sua vez modifica o escoamento. Além disso, as características do rejeito são próximas dos sedimentos já que ambos aumentam a turbidez e possuem partículas mais densas que a água. Por estes motivos, essa seção também é denominada de hidrosedimentologia.

Entre a data do rompimento da barragem de Fundão e a presente, foram realizados diversos monitoramentos ao longo da área afetada por diferentes laboratórios, bem como estudos relacionados à avaliação dos danos (IBAMA, 2015a; GOLDER ASSOCIATES, 2016a, 2016b; MORGENSTERN et al., 2016; ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT, 2017; IGAM, 2016; SEDRU, 2016). As campanhas de monitoramento foram intensificadas em regiões onde já havia uma rede de estações preexistente, bem como em novos locais foram estabelecidos planos de amostragem, de forma a complementar a metodologia prescrita pela SEDRU (2016). Nesta, destacou-se a formação de um grupo de força-tarefa para a análise de desdobramento das ocorrências do evento nas escalas microrregional (que se relaciona com os efeitos de destruição ocasionados pela onda de lama sobre os municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, bem como em seus respectivos distritos afetados) e macrorregional (referindo-se aos desdobramentos do desastre nos municípios ao longo da calha do rio Doce).

O interessante da compartimentação adotada pela SEDRU (2016) é que esta representa a forma como foram distribuídas as magnitudes dos impactos do espalhamento dos rejeitos, que pode ser explicado, principalmente, pela barreira ao transporte imediato de grande parte dos rejeitos causada pela presença da barragem da UHE Risoleta Neves (Candonga). Assim, com base nessas escalas, foi considerado neste tópico que a área afetada pode ser dividida em três trechos principais, denominados:

- Trecho 1. Este coincide, basicamente, com o setor definido na escala microrregional adotada pela SEDRU (2016), ou seja, entre as barragens de Fundão e de UHE Risoleta Neves, com extensão de, aproximadamente, 116 km. Esse trecho pode ser caracterizado por ter uma grande quantidade de material depositado, do qual parte continuará “transpassando” as barreiras impostas pelos diques e pela barragem da UHE Risoleta Neves, e parte poderá ser retida ou remanejada, caso seja implantada correta gestão desses depósitos.

- Trecho 2. Localizado entre a barragem da UHE Risoleta Neves e a foz do rio Doce no oceano, na vila de Regência (município de Linhares) e tem uma extensão aproximada de 555 km. Esse trecho é caracterizado por depósitos distribuídos de forma não uniforme e com volumes menos expressivos. Esses depósitos ocorreram tanto no canal principal quanto nas planícies de inundação atingidas pela onda de inundação, porém em quantidade aparentemente inferior ao que ocorreu a montante da UHE Risoleta Neves. Os sedimentos depositados ao longo desse trecho se constituem em material disponível para a ressuspensão e a realocação durante a passagem das cheias naturais futuras.
- Trecho 3. Este, correspondente à zona costeira que abrange a área da costa influenciada pela dispersão dos sedimentos advindos do rio Doce, cuja delimitação é variável e dependente de vários fatores como das correntes marítimas hidrodinâmicas da região, da direção e da intensidade dos ventos. Conforme descrito na avaliação da Fundação COPPETEC (2017), a pluma de sedimentos tende a se propagar preponderantemente para o sul, influenciada pela direção dos ventos dominantes na região (quadrante nordeste), mas, em situações de passagem de frentes frias, formam-se correntes que vão para o norte. A extensão da pluma observada na região pode ser de dezenas a centenas de quilômetros em cada uma das direções.

2.3.2 OBJETIVO

No presente capítulo serão avaliados os seguintes itens:

- I. estimativa do volume defluente da barragem de Fundão;
- II. estimativa do volume assoreado nos reservatórios afetados;
- III. análise das alterações no transporte de sedimentos;
- IV. análise das concentrações de sólidos suspensos.

O objetivo do item I é estimar a quantidade total de rejeitos liberada pelo desastre, já o item II é definir quanto desse total ficou armazenado nos reservatórios. Os itens III e IV buscam diagnosticar as mudanças que ocorreram no transporte de sedimentos comparando dados de linha base com dados pós-desastre.

2.3.3 ESTIMATIVA DO VOLUME DEFLUENTE DA BARRAGEM DE FUNDÃO

A primeira etapa para determinação dos danos relacionados ao volume de rejeitos e outros materiais carregados e depositados ao longo dos cursos d'água corresponde à determinação do volume de rejeitos que defluiu da barragem de Fundão com o seu rompimento. Quanto às características do processo de fornecimento de rejeitos a jusante, pode-se destacar duas fases principais: uma representada pelo rompimento e passagem da onda de lama e outra ocorrida na sequência, caracterizada pelo carregamento devido à incidência das chuvas sobre os rejeitos remanescentes na barragem, sendo que este último ocorreu de forma gradual até a construção de parte das obras de contenção.

Conforme o documento denominado Relatório Consolidado das Informações Técnicas sobre a Investigação e Resposta ao Rompimento da Barragem de Fundão (ERM, 2017), o vazamento de rejeitos contidos no reservatório formado pela barragem liberou um volume estimado de 32,2 hm³. O mesmo

relatório aponta que depois do evento, mais 11,5 hm³ de rejeitos foram liberados da barragem de Fundão devido a fortes chuvas que carrearam esse material a jusante. A soma desses valores praticamente coincide com o valor apresentado em Golder Associates (2016a), de 43,8 hm³, indicando que a provável fonte dos valores apresentados em ERM (2017) é o estudo consolidado em Golder Associates (2016a).

Idealmente, a estimativa dessa massa/volume de rejeitos liberados pelo rompimento deve considerar a topografia da área da barragem no período anterior ao rompimento (preferencialmente não maior que três meses de diferença) e a topografia da mesma região logo após a saída de volume ocorrida com a liberação da onda de rompimento e a topografia próxima ao período de estancamento do carregamento de rejeitos para além da área da barragem.

Em relação à topografia do pré-desastre, dispõe-se do Modelo Digital do Terreno (MDT) obtido pelo Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão (CGSH, 2016), o qual analisou as causas do rompimento. Esse MDT abrange uma área restrita da barragem, pois o objetivo do Comitê foi modelar a base do dique 1 (dique rompido) como construída. O Comitê reuniu informações topográficas em AutoCAD Civil 3D utilizando diferentes conjuntos de superfícies topográficas de toda a bacia em sucessivas alturas da barragem. Após o ano de 2013, dispõem-se de informações topográficas levantadas por *drones*. A data de levantamento considerada para representar a topografia da barragem no pré-desastre é de 27/10/2015, a qual corresponde, segundo CGSH (2016), ao último levantamento disponível antes do rompimento.

Para representar a topografia da barragem de rejeitos do pós-desastre logo após a ocorrência do evento, dispõe-se do MDT também obtido por CGSH (2016) sobre a mesma área restrita de Fundão citada no parágrafo anterior, com levantamento por *drone* e datado de 12/11/2015.

Conforme já mencionado, entre a data imediata pós-desastre e a finalização das obras de estancamento houve um período com ocorrência de chuvas, durante o qual houve carregamento de sedimentos. Analisaram-se as informações disponíveis em Samarco (2017) com o intuito de determinar o período de vazamento dos rejeitos pela brecha da barragem e verificar a disponibilidade de informações cartográficas após esse período.

Segundo Samarco (2017), após o fim do período chuvoso 2015/2016, puderam ser realizados os reforços das estruturas remanescentes, e concluídos os diques S1A, S2A e S3. Segundo esse mesmo estudo, através da finalização dessas obras, não houve mais carregamento de rejeitos para jusante da área de propriedade da Samarco. Os diques S1A e S2A possuíam capacidade total de, aproximadamente, 0,06 hm³ e, logo após a construção, foram totalmente assoreados. O dique S3 teve seu maciço inicial concluído em fevereiro/2013, e conforme Samarco (2017, p. 10), “atuou desde a sua implantação de maneira muito satisfatória na contenção dos sólidos em suspensão com consequente redução da turbidez das vazões vertidas para jusante”. Em novembro/2016, a obra do 2º alteamento do dique S3 foi concluída, aumentando a capacidade de seu reservatório para aproximadamente 2,95 hm³.

Samarco (2017) ainda aponta que, para a contenção dos sedimentos remanescentes no vale de Fundão e manutenção da qualidade dos efluentes descartados no rio Gualaxo do Norte durante o período chuvoso 2016/2017, foram implantadas diversas barreiras, entre elas uma principal denominada Eixo 1. Essas estruturas tinham capacidade de reserva limitada e foram assoreadas ao longo do tempo até ficarem totalmente cobertas pelos rejeitos.

Para analisar a topografia final, após o estancamento do vazamento de rejeitos, dispõe-se do mapeamento digital a *laser* obtido do voo realizado alguns dias depois sobre todo o rio Doce. Sobre a área da barragem o voo foi realizado no dia 02/02/2016. Com base na cronologia a respeito das obras de retenção dos rejeitos remanescentes apresentada por Samarco (2017), considera-se que os dados obtidos no mês de fevereiro/2016 (aproximadamente no fim do período chuvoso 2015/2016) fornecem informações aceitáveis da situação da topografia final da área.

2.3.3.1 Materiais

Segundo Golder Associates (2016a), a barragem de Fundão continha 55 hm^3 (um hm^3 = um milhão de m^3 ou um Mm^3) de materiais. Conforme Brandt (2005), a capacidade projetada da barragem de Fundão corresponde ao volume de, aproximadamente, 112 hm^3 . Esse volume seria atingido na cota de topo da pilha de rejeito igual a 920 m. Verifica-se que, conforme dados do MDT do pré-rompimento, a cota média da pilha de rejeito era igual a 900 m.

A determinação exata do volume total de rejeitos disponível em Fundão no pré-desastre não interfere na metodologia de determinação do volume de rejeitos liberado pelo rompimento, adotada no presente estudo. A referida metodologia consistiu no processamento de subtração de volumes na área da barragem utilizando MDTs disponíveis do pré e pós-rompimento.

Como insumos para o cálculo da estimativa do volume defluente da barragem de Fundão, foram utilizadas curvas de nível e MDTs disponíveis, referentes aos períodos pré-desastre e pós-desastre, os quais estão descritos a seguir:

- arquivo no formato DWG (BFND+BGER+BSAN_ANTERIOR_AO_ROMPIMENTO_ (15x11x18)_R00.DWG), contendo as curvas de nível com equidistância de 1 m x 1 m, obtidas em 27/10/2015 por meio de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e com Datum Córrego Alegre;
- arquivo no formato DWG (BFND+BGER+BSAN_PÓS_ROMPIMENTO_(15x11x18)_R00 (3).DWG), contendo as curvas de nível com equidistância de 1 m x 1 m, obtidas em 12/11/2015 por meio de VANT e com Datum Córrego Alegre;
- arquivo no formato GeoTIFF (MDT_Bloco_123_ate_candongas.tif), contendo o MDT, resolução espacial de 1 m, obtido por meio de perfilamento aéreo a *laser* em 02/02/2016 e com Datum SIRGAS 2000;
- ortoimagem orbital referente ao período pré-desastre (T0), obtida em 21/07/2015 pelo satélite WorldView-2 e com resolução espacial de 50 cm.

Os *softwares* utilizados para visualização das curvas de nível, geração das imagens dos MDTs, conversão para o Datum SIRGAS2000 e cálculos da estimativa do volume seguem especificados a seguir:

- MicroStation: utilizado para visualização das curvas de nível e geração do arquivo de texto dos MDTs;
- TerraScan: utilizado para a leitura dos arquivos de texto e geração das imagens dos MDTs;
- ArcMap 10.2: utilizado para conversão de arquivos para o Datum SIRGAS2000 e para o cálculo do volume.

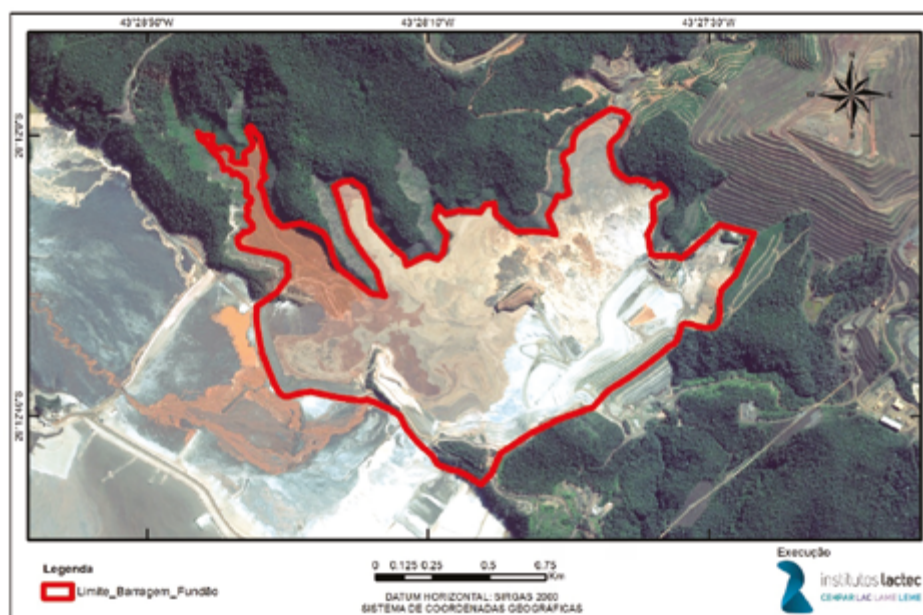
2.3.3.2 Métodos

Nesta seção são apresentados os métodos utilizados para a obtenção do volume defluente da barragem de Fundão, assim como alguns resultados intermediários relativos à verificação dos dados disponíveis e produção do modelo digital do terreno.

2.3.3.2.1 Vetorização do polígono da barragem de Fundão

Com o auxílio da ortoimagem orbital (T0) descrita no item anterior, foi realizada a vetorização do polígono referente ao contorno da barragem de Fundão, conforme apresentado na Figura 27. Essa ortoimagem está referenciada ao Datum SIRGAS 2000 e ao sistema de projeção UTM, fuso 23 sul.

Figura 27 – Contorno barragem de Fundão.



2.3.3.2.2 Conversão de Datum

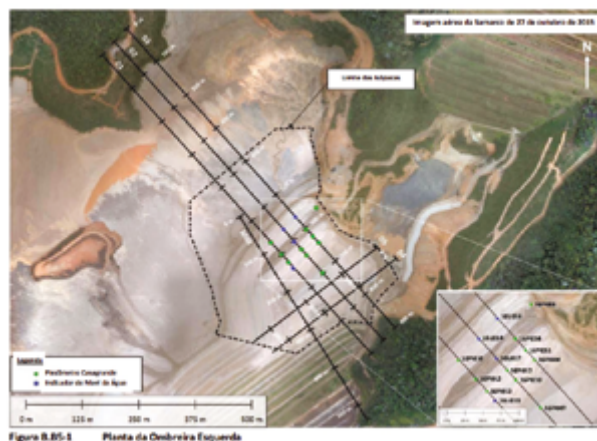
Os arquivos das curvas de nível referentes aos períodos pré e pós-desastre foram convertidos para o Datum SIRGAS 2000, sistema de projeção UTM e fuso 23 sul, com objetivo de atender à Resolução R.PR – 1/2005 de 25/02/2005 do IBGE. A referida resolução estabelece como novo sistema de referência geodésico para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e para o Sistema Cartográfico Nacional (SCN) o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização do ano de 2000 (SIRGAS 2000).

2.3.3.2.3 Avaliação dos arquivos das curvas de nível

Como forma de avaliar se o arquivo das curvas de nível obtidas em 27/10/2015 tratava-se dos mesmos dados citados no Anexo B5 – Mudanças Geométricas na Ombreira Esquerda, relativo ao Apêndice B – Dados de Saída GIS/Imagens, do Relatório sobre Causas Imediatas da Ruptura da Barragem de Fundão, executado pelo Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão em 25/08/2016 (CGSH, 2016), a imagem da Figura 28 foi georreferenciada, utilizando-se para tal pontos homólogos fotoidentificáveis entre essa imagem e a ortoimagem orbital.

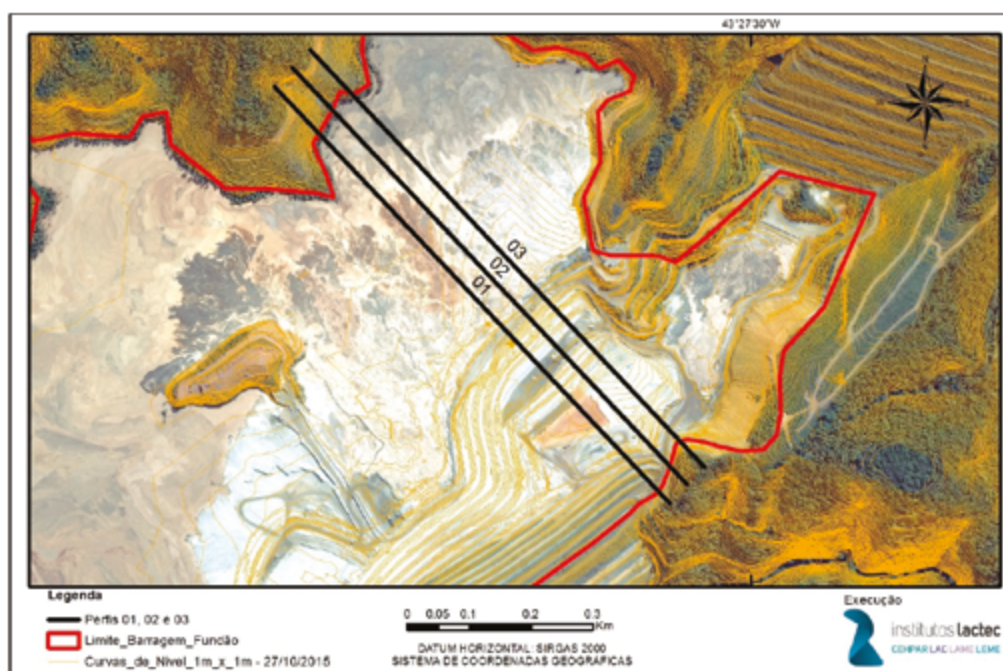
Após o georreferenciamento, foram vetorizadas as linhas das seções transversais 01, 02 e 03, a fim de serem analisadas com as curvas de nível disponibilizadas, como pode ser observado na Figura 29.

Figura 28 – Imagem utilizada para georreferenciamento das seções transversais.



Fonte: CGSH (2016, Anexo B5 – Mudanças Geométricas na Ombreira Esquerda, relativo ao Apêndice B – Dados de Saída GIS/Imagens).

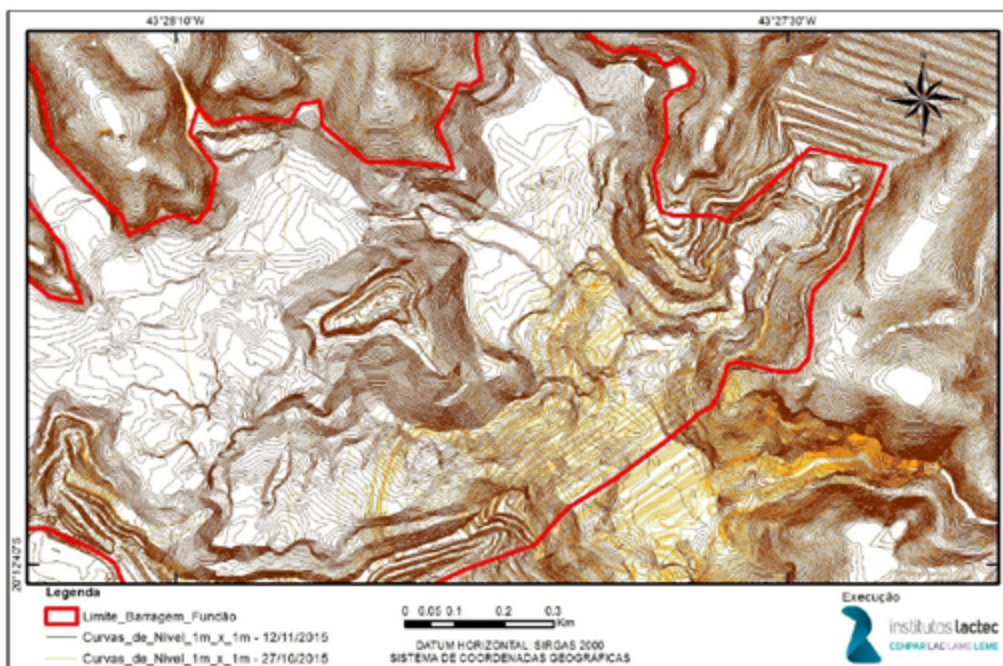
Figura 29 – Vetorização das seções transversais e análise em relação às curvas de nível de 27/10/2015.



Concluiu-se que, ao compararmos os perfis das seções transversais 01, 02 e 03, referentes à data de 27/10/2015, com o arquivo das curvas de nível disponibilizado, as informações estão condizentes.

Em relação à avaliação do arquivo das curvas de nível obtido em 12/11/2015 (período pós-desastre), este foi sobreposto ao arquivo de 27/10/2015 com objetivo de verificar se se tratavam dos mesmos dados, porém em épocas diferentes. Concluiu-se que sim, uma vez que as alterações no traçado das curvas de nível ocorreram apenas nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão, como pode ser observado na Figura 30.

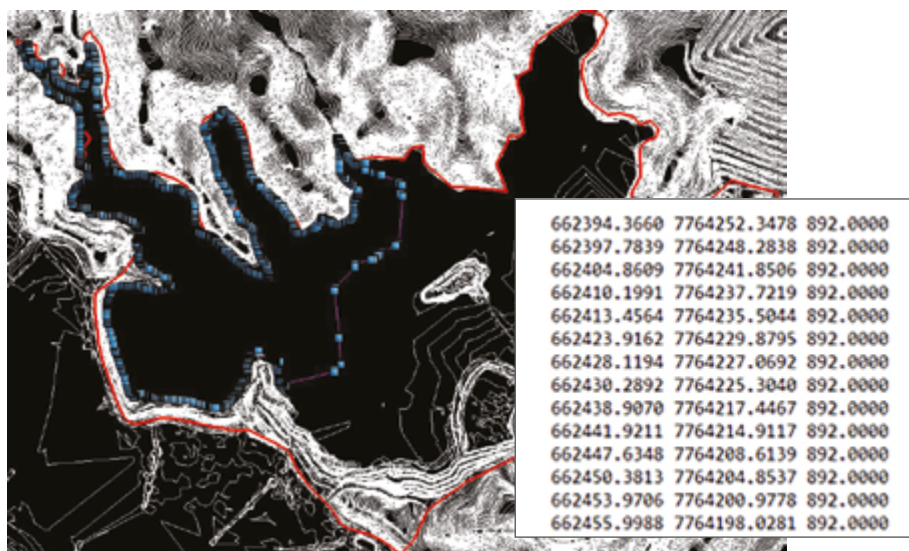
Figura 30 – Curvas de nível referentes aos períodos pré e pós-desastre (27/10/2015 e 12/11/2015).



2.3.3.2.4 Modelos Digitais do Terreno (MDTs)

Os MDTs foram obtidos a partir dos arquivos das curvas de nível. Foram gerados arquivos de texto contendo as coordenadas tridimensionais XYZ ou E, N, h de cada vértice que compõe o traçado das curvas de nível, como pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 – Exemplo de vértices que compõem o traçado de uma curva de nível e de trecho de arquivo de texto contendo as coordenadas XYZ de cada vértice.



A Figura 32 e a Figura 33 apresentam, respectivamente, os MDTs no formato *raster* GeoTIFF representativos das datas 27/10/2015 e 12/11/2015, cortados na área de interesse e gerados por meio de programas computacionais que fazem a leitura do arquivo de texto anteriormente citado e o transformam em uma superfície que representa o relevo.

Figura 32 – MDT referente ao dia 27/10/2015 no formato GeoTIFF (pré-desastre).

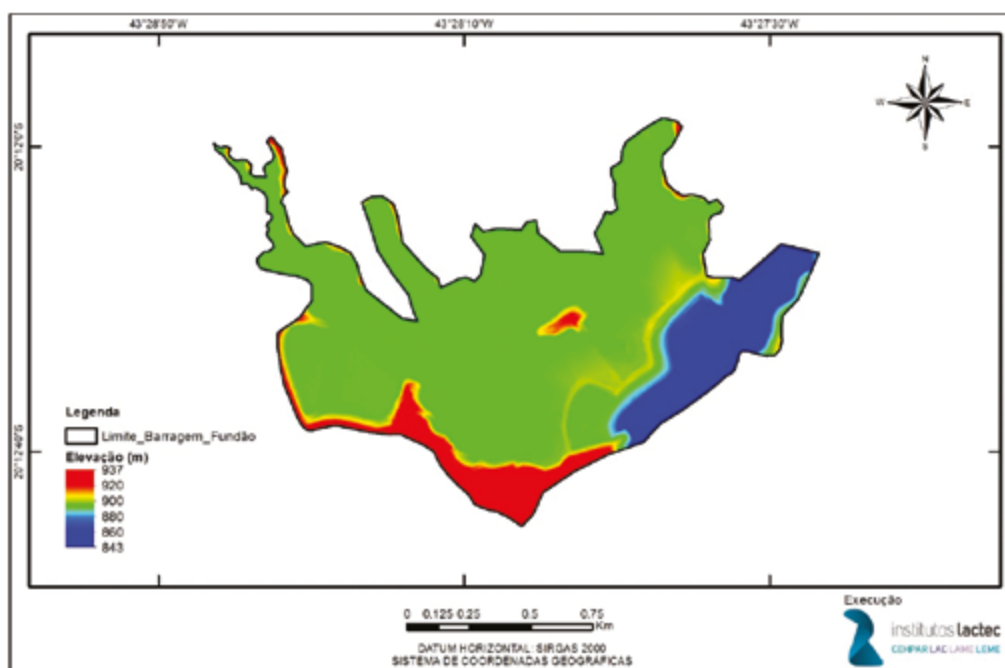
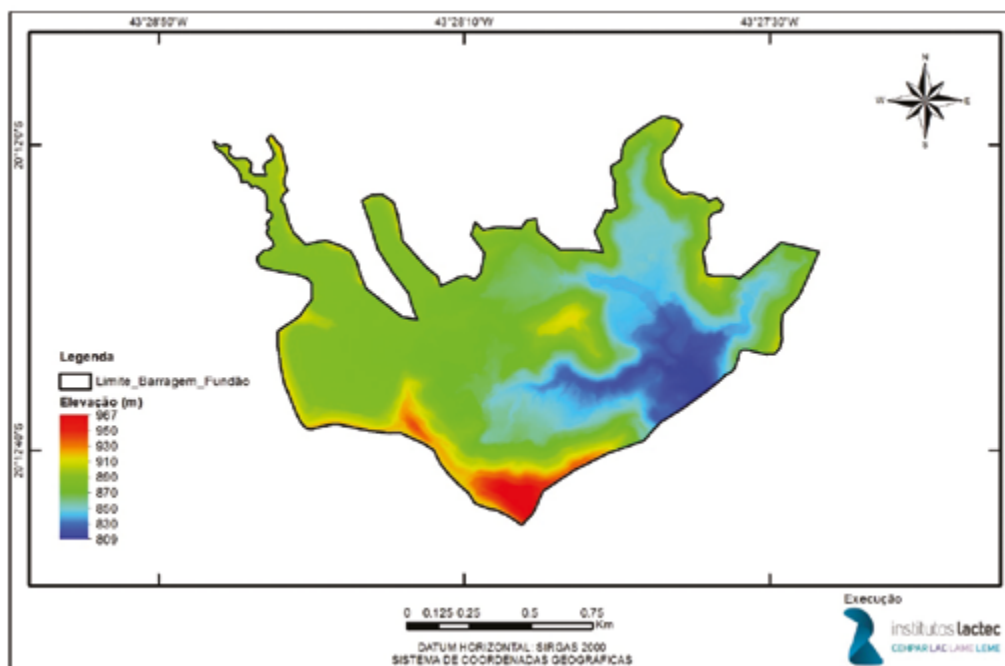
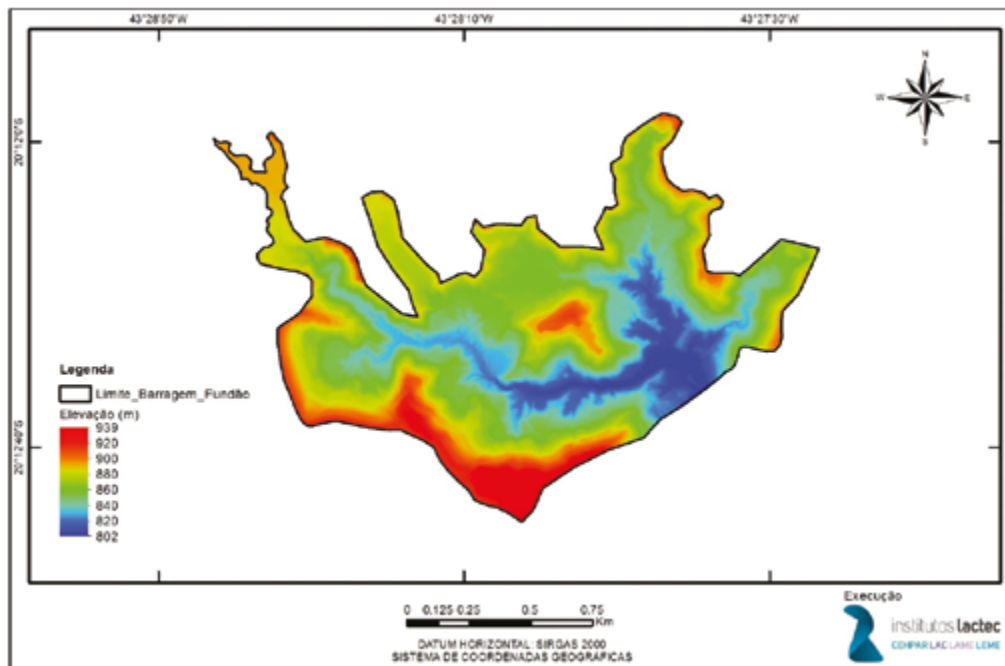


Figura 33 – MDT referente ao dia 12/11/2015 no formato GeoTIFF (pós-desastre).



O MDT formato GeoTIFF, obtido em 02/02/2016, foi cortado no polígono do limite da barragem de Fundão para que fosse obtida apenas a área de interesse.

Figura 34 – MDT referente ao dia 02/02/2016 no formato GeoTIFF (pós-desastre).



2.3.3.2.5 Cálculo da estimativa do volume defluente da barragem de Fundão

O cálculo da estimativa do volume defluente da barragem de Fundão foi feito com base nos MDTs descritos no item Materiais, através de *software* de geoprocessamento.

Utilizando a função “minus” da extensão 3D Analyst do ArcMap, foi feita a subtração entre os MDTs referentes aos períodos pré e pós-desastre. A Figura 35 ilustra o display referente à aplicação da função “minus”. O volume foi calculado utilizando somente as diferenças que reduziram a cota (valores menores que zero).

2.3.3.3 Resultados

A partir do resultado da subtração dos MDTs apresentado na Figura 36 e por meio do 3D Analyst do ArcMap, foi possível calcular o volume defluente imediato em virtude do rompimento da barragem, o qual resultou em 33,0 hm³, para o período entre os dias 27/10/2015 e 12/11/2015.

Figura 35 – Subtração entre os MDTs.

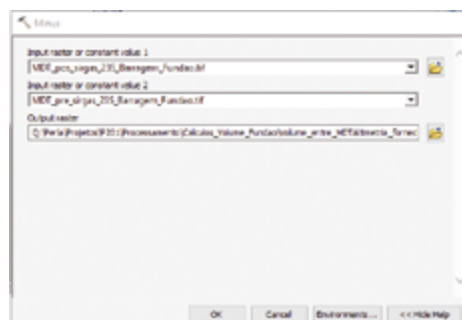
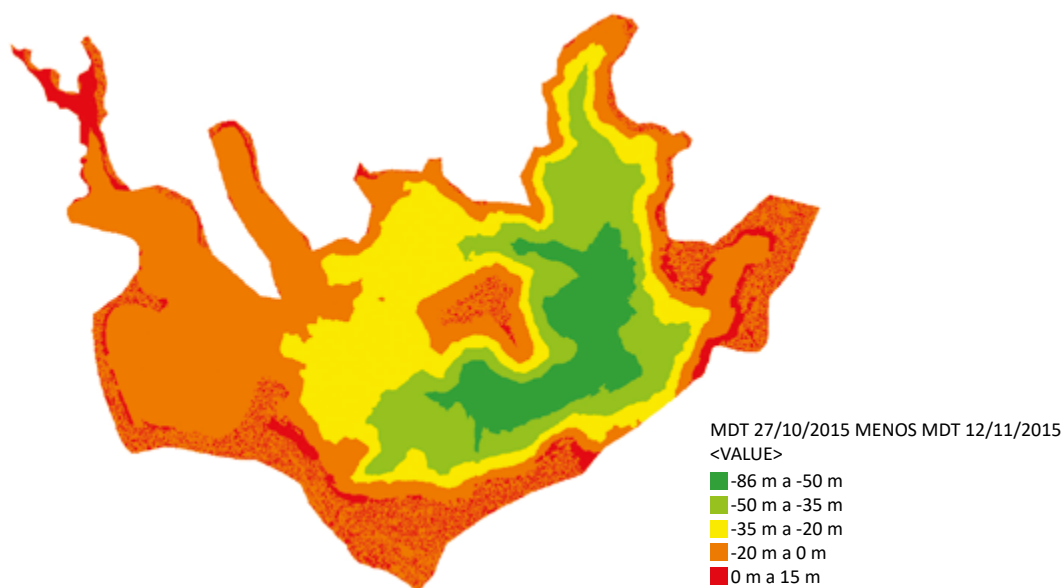
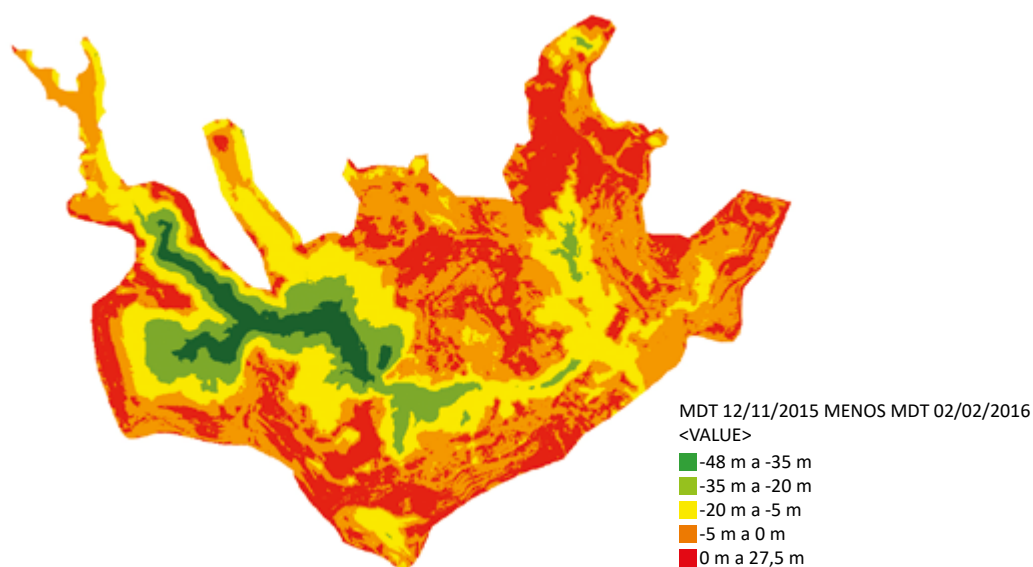


Figura 36 – Resultado da subtração entre os MDTs de 27/10/2015 e 12/11/2015.



O mesmo procedimento descrito anteriormente foi utilizado para o cálculo do volume defluente da barragem de Fundão para o período entre os dias 12/11/2015 e 02/02/2016, conforme Figura 37, o qual resultou em 11,4 hm³.

Figura 37 – Resultado da subtração entre os MDTs de 12/11/2015 a 02/02/2016.



Dessa forma, conclui-se que o volume defluente da barragem de Fundão, para o período entre os dias 05/11/2015, data do rompimento de barragem de Fundão, e 02/02/2016, foi de aproximadamente 44,4 hm³. A Tabela 23 apresenta as diferenças entre as estimativas do relatório da ERM (2017) e as realizadas neste relatório. Os volumes apresentaram pequenas diferenças e tiveram erro médio quadrático de 0,3 hm³. Considerando as duas estimativas como válidas, o volume de rejeito defluente de Fundão seria de 44,1 ± 0,3 hm³.

Tabela 23 – Análise de incerteza devido principalmente ao tipo de dado processado e aos métodos.

Período	Volume (hm ³)		Diferença
	ERM (2017)	LACTEC	
27/10/2015 e 12/11/2015	32,2	33	0,8
12/11/2015 a 02/02/2016	11,5	11,4	-0,1
27/10/2015 e 02/02/2016	43,8	44,4	0,6
		Erro Rms	0,3

2.3.3.4 Considerações finais

As estimativas do volume defluente da barragem de Fundão foram recalculadas e analisadas. Obtiveram-se duas estimativas, para dois períodos distintos. A primeira, referente ao período pós-desastre imediato, resultou um volume de 33,0 hm³; e a segunda, referente ao período entre o desastre e o estancamento dos rejeitos, foi de 44,4 hm³. A segunda estimativa é maior já que a comparação é feita com um levantamento 3 meses após o desastre, enquanto a primeira foi comparada com o levantamento de 1 semana após o desastre. Portanto, dentro do período de 3 meses após o desastre uma quantia significativa ainda foi liberada. Essa segunda estimativa pode ser considerada como representativa do volume total liberado, já que coincide com a finalização da obra de contenção do dique S3 (SAMARCO, 2017). Portanto, considerando que existem incertezas e que ambas as estimativas são válidas, o volume defluente estimado é de **44,1 ± 0,3 hm³**.

2.3.4 ESTIMATIVA DE VOLUME ASSOREADO NOS RESERVATÓRIOS AFETADOS

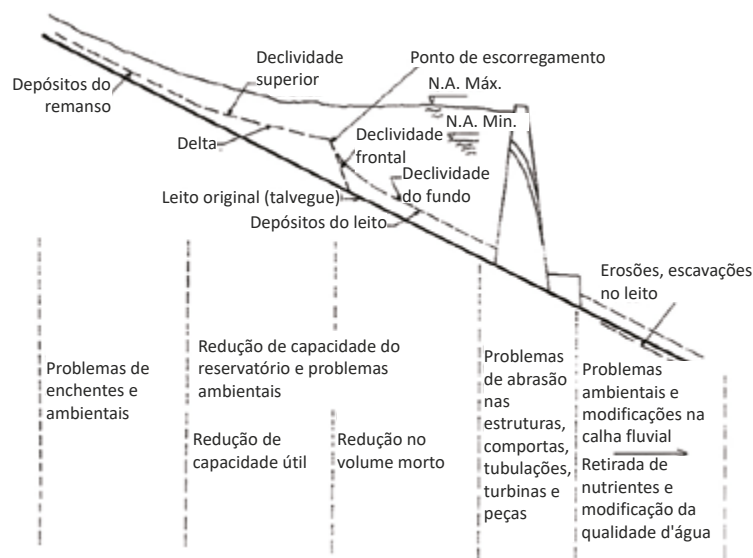
Nesta seção são analisados os volumes de rejeitos retidos nos reservatórios que estavam no caminho da pluma. O desafio dessa análise é separar o volume assoreado devido à pluma de rejeito do volume de sedimentos naturais da bacia. Na revisão bibliográfica são descritos os principais conceitos e métodos utilizados para avaliação de assoreamento dos reservatórios. E, por fim, são apresentados os resultados para os reservatórios das usinas hidrelétricas.

2.3.4.1 Revisão bibliográfica

2.3.4.1.1 Considerações iniciais

Durante a construção de uma usina hidrelétrica, há a alteração das condições hidráulicas do corpo d'água e, consequentemente, das condições de transporte de material particulado (VANONI, 1977). Com a redução da velocidade provocada pelo barramento, parte do material particulado fica retido no reservatório, que, com o passar do tempo, pode ter o seu volume útil reduzido. Esse fenômeno, denominado assoreamento, pode trazer implicações também à qualidade da água, à vida aquática e aos usos múltiplos do reservatório. A Figura 38 apresenta o esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios com indicação dos principais problemas decorrentes (CARVALHO, 2008).

Figura 38 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios com indicação dos principais problemas decorrentes.



Fonte: Carvalho (2008).

Conforme Vanoni (1977), a deposição do material particulado se dá, preferencialmente, nas seções do lago onde o rio principal ou os afluentes diretos o acessam. Esse material é resultante de diversos processos existentes na bacia hidrográfica a montante do reservatório, que podem ser naturais ou influenciados pelo homem, como erosão de solos, lançamento de efluentes, entre outros.

Santos et al. (2001) apontam que os sólidos que não sedimentarem no reservatório serão transportados para jusante pela água liberada pelo vertedor ou pelo canal de fuga após a movimentação das turbinas. Uma vez que o material sedimentável é relativamente menor, o rio a jusante pode apresentar caráter mais erosivo. Assim, eventuais depósitos de material anteriormente sedimentados em ilhas ou margens do trecho do rio a jusante da barragem podem ser erodidos, e os sedimentos retirados pelas águas podem não ser realimentados na mesma proporção.

Estudos sedimentométricos, normalmente, são efetuados antes da construção da barragem para permitir uma previsão do volume a ser assoreado e da vida útil do reservatório, e, geralmente, são utilizados métodos empíricos. O tempo de vida útil é contado desde a construção até que o reservatório fique assoreado, em uma condição que não serve aos propósitos para o qual foi construído.

O melhor procedimento de apoio para avaliações do processo de sedimentação já ocorrido em um reservatório é através do levantamento batimétrico periódico (levantamento detalhado do relevo da “seção molhada” ou parte submersa da seção transversal).

Para avaliações futuras do processo de sedimentação ou para avaliação de cenários do processo de assoreamento, contamos com modelos empíricos ou modelagem hidromórfica (hidrodinâmica mais morfologia) computacional.

A seguir, **são apresentadas as revisões bibliográficas de cada um dos métodos de avaliação do assoreamento. A revisão bibliográfica dos estudos anteriores realizados para estimar o assoreamento de cada um dos reservatórios do trecho será apresentada diretamente no item Resultados**, pois a análise aqui empregada, na maioria das vezes, se constituiu na avaliação direta de tais estudos.

2.3.4.1.2 Estimativa do assoreamento através de métodos empíricos

Uma outra metodologia empregada para estimativa do assoreamento, normalmente utilizada para previsão de valores futuros, faz uso de modelos empíricos de retenção de sedimentos, tal como a metodologia apresentada em Bureau of Reclamation (1987), a qual consiste na obtenção dos seguintes tópicos:

- produção de sedimentos e transporte de sedimentos na bacia contribuinte;
- eficiência de retenção;
- peso específico aparente médio;
- volume de sedimentos assoreado ao longo do tempo.

No cálculo do assoreamento, todos os principais termos envolvidos são variáveis ao longo do tempo – a descarga sólida pode aumentar com a erosão na bacia ou diminuir com a implantação de medidas de controle, a eficiência de retenção diminui à medida que os depósitos se formam e o peso específico aparente vai aumentando ao longo do tempo com a compactação do assoreamento.

Normalmente, são adotadas hipóteses simplificadoras no cálculo do assoreamento:

- consideração da capacidade de retenção de sedimentos do reservatório como sendo constante ao longo de todo o período de operação, sendo que a tendência é diminuir com o aumento do assoreamento;
- consideração da distribuição uniforme de sedimentos dentro do corpo d'água (o acúmulo de sedimentos, normalmente, ocorre de forma irregular no reservatório com a formação do delta na sua porção de montante).

Para a definição da entrada de sedimentos no reservatório, deve ser calculada a descarga sólida média anual da bacia a montante no caso de estudo preditivo, ou a própria série de vazões sólidas no caso de estimativa pretérita. A descarga sólida específica média anual pode ser obtida através da curva de descarga de uma ou mais estações hidrossedimentométricas da bacia. Aplica-se essa curva de descarga (equação de regressão) sobre a série de vazões médias diárias do local ou sobre a curva de permanência de vazões, obtendo-se, assim, a descarga sólida específica média anual em t/ano/km².

Para pequenos reservatórios, recomenda-se a utilização da curva de Churchill para estimar a capacidade de retenção de sedimentos em fase de projeto de reservatório (CARVALHO, 2008). Para médios e grandes reservatórios, utiliza-se a curva de Brune (BRUNE, 1953) para determinar a eficiência de retenção de sedimentos de um reservatório.

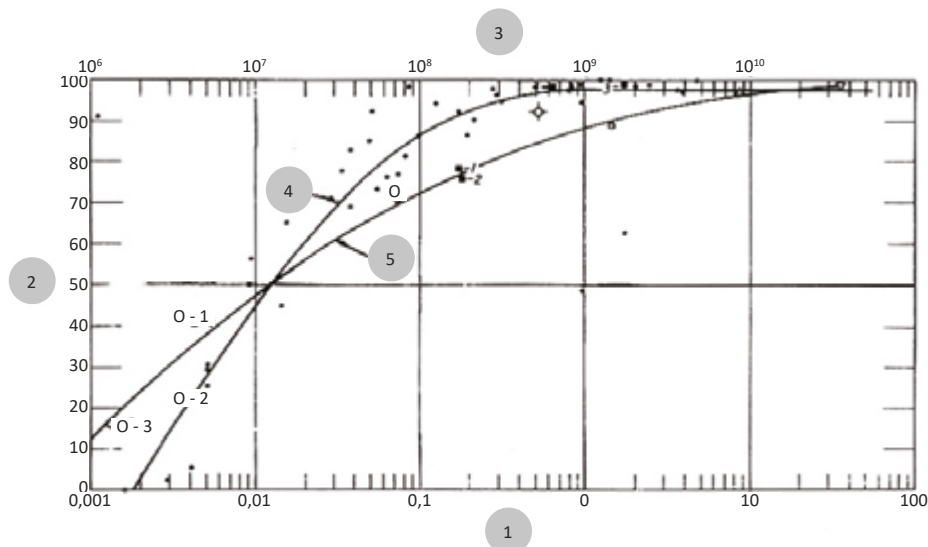
No caso da curva de Churchill, primeiramente, calcula-se o Índice de Sedimentação (IS) expresso por:

$$IS = \frac{g \cdot V_{res}^2}{Q^2 \cdot L}$$

Onde:

- g - constante de aceleração da gravidade;
- V_{res} - volume do reservatório;
- Q - vazão média afluente de longo termo;
- L - comprimento do reservatório.

Com o valor de IS é possível obter, através da Figura 39 (IS - eixo superior das abcissas), o valor da eficiência de retenção E de sedimentos em porcentagem (eixo das ordenadas).

Figura 39 – Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill (Curva 5) e Brune (Curva 4).

Obs.:

- 1: Eixo x - relação volume do reservatório/volume afluente médio anual;
- 2: Eixo y – porcentagem de sedimentos em retenção;
- 3: Eixo x secundário – índice de sedimentação vezes aceleração da gravidade;
- 4: Curva de Brune (médios e grandes reservatórios);
- 5: Curva de Churchill (pequenos reservatórios).

A curva de Brune, também apresentada na Figura 39, possui no eixo das ordenadas o valor da eficiência de retenção de sedimentos no reservatório, em porcentagem ou em fração, e no eixo das abscissas a capacidade de afluência, correspondendo ao volume do reservatório dividido pelo volume médio de água afluente em um ano (utilizar a vazão média de longo termo). Utiliza-se o volume do reservatório correspondente ao nível d'água máximo normal.

Existem vários fatores que influenciam o peso específico aparente do sedimento depositado:

- a maneira como o reservatório é operado;
- a textura e o tamanho das partículas dos sedimentos;
- a taxa de compactação e de consolidação;
- a ação de correntes de densidades, inclinação do talvegue, e o efeito da vegetação na área do reservatório.

Normalmente, não se considera o último fator por ser de difícil caracterização. Entre os fatores acima, a operação do reservatório é provavelmente o mais influente. Lara e Pemberton (apud CARVALHO, 2008) desenvolveram um método para a estimativa do peso aparente inicial baseado na classificação da Tabela 24.

Tabela 24 – Tipos de operação de reservatórios.

Tipo	Operação do reservatório
1	Sedimentos sempre ou quase sempre submersos.
2	Depleção do reservatório de pequena a média.
3	Reservatório normalmente vazio.
4	Reservatório vazio.

Fonte: Carvalho (2008).

Uma vez selecionado o tipo de operação do reservatório, o peso específico aparente inicial (γ_i) do sedimento pode ser estimado utilizando-se a seguinte expressão:

$$\gamma_i = W_c \cdot p_c + W_m \cdot p_m + W_s \cdot p_s$$

Onde:

W_c , W_m , W_s - coeficientes de compactação de argila, silte e areia, respectivamente, obtidos segundo o tipo de operação do reservatório (Tabela 25);

p_c , p_m , p_s - frações (%) de quantidade de argila, silte e areia, respectivamente, contidas no sedimento afluente.

Tabela 25 – Constantes W e K para o cálculo do peso específico aparente.

Tipo de operação do reservatório	Argila		Silte		Areia	
	W_c	K_c	W_m	K_m	W_s	K_s
1	0,416	0,2563	1,121	0,0913	1,554	0,00
2	0,561	0,1346	1,137	0,0288	1,554	0,00
3	0,641	0,00	1,153	0,00	1,554	0,00
4	0,961	0,00	1,169	0,00	1,554	0,00

Fonte: Carvalho (2008).

O peso específico do material aumenta com o tempo que ficar depositado no reservatório. Assim, para cada ano de operação pode ser calculado o novo peso específico aparente. Miller (apud KOELZER; LARA, 1958) propôs a seguinte fórmula:

$$\gamma_T = \gamma_i + 0,4343 \cdot K [\ln(T) \cdot T / (T-1) - 1]$$

Onde:

T - número de anos de consolidação;

$K = K_m \cdot p_m + K_c \cdot p_c + K_s \cdot p_s$;

K_m , K_c , K_s - constantes para cada tipo de material em função do tipo de operação do reservatório (Tabela 25).

O volume assoreado ($V_{\text{assoreado}}$) após T anos de consolidação no reservatório é dado por:

$$V_{\text{assoreado}} = q_{st} \cdot AD \cdot E_{\text{retenção}} \cdot T / \gamma_T$$

Onde:

q_{st} – vazão sólida específica média de longo termo;

AD – área de drenagem no local do reservatório;

$E_{\text{retenção}}$ – eficiência de retenção;

T – tempo de assoreamento;

γ_T - peso específico aparente após T anos.

2.3.4.1.3 Estimativa do assoreamento através do levantamento da batimetria

Carvalho (2008) cita que os levantamentos sedimentométricos de reservatórios incluem levantamentos topobatimétricos, estudos das características do sedimento do leito, conformação e distribuição dos depósitos, investigação de focos de erosão nas margens, degradação do canal a jusante da barragem, bem como aspectos ambientais decorrentes. O levantamento topobatimétrico do reservatório permite:

- determinar o volume de água ou capacidade do reservatório;
- determinar a área do espelho de água;
- determinar o perfil do leito do rio;
- determinar as curvas cota x área e cota x volume;
- verificar características físicas dos sedimentos acumulados;
- quantificar o sedimento assoreado no período, por comparação com levantamentos anteriores ou com o mapa da época da formação do reservatório;
- determinar a capacidade de retenção de sedimentos;
- determinar a descarga sólida média afluente ao reservatório.

Para fazer a previsão do volume de acumulação de sedimentos em um reservatório, devido à sua dificuldade e sujeição a erros, é desejável que se determine o volume e peso do sedimento acumulado, em certos intervalos específicos de tempo, durante toda a vida útil do reservatório (BRUK, 1985 apud CARVALHO, 2008).

A frequência dos levantamentos sedimentométricos em reservatórios depende de alguns fatores, principalmente do valor de acumulação de sedimentos, do tamanho do reservatório e do custo financeiro. O fator mais importante na determinação da frequência de levantamentos em reservatórios é a quantidade de carga sólida afluente, a qual, quando com valor elevado, indica que estes estão sujeitos a serem assoreados em menos tempo e devem ser avaliados com maior frequência (VANONI, 1977). É importante efetuar levantamentos sempre que houver uma mudança na capacidade do reservatório superior a 5% e, também, após a ocorrência de cheias de grande magnitude.

Para realizar o monitoramento das condições do reservatório em função do acúmulo de sedimentos, com o avanço do desenvolvimento tecnológico, utilizam-se ecobatímetros para medição de profundidades sincronizados com receptores Global Navigation Satellite System (GNSS), que permitem o posicionamento planimétrico precisamente acoplado às profundidades. Também há sensores inerciais que corrigem possíveis erros provenientes da movimentação de embarcações, quando necessário (IHO, 2005).

Os ecobatímetros dividem-se em monofeixe (*singlebeam*) e multifeixe (*multibeam*). Os ecobatímetros monofeixe emitem apenas um pulso acústico vertical, ou seja, apenas uma cota de profundidade somente na vertical a cada pulso. Já os ecobatímetros multifeixe proporcionam maior varredura de mapeamento do fundo, sendo assim, otimizando o tempo de execução do serviço e fornecendo maior detalhamento do produto final.

Os dois métodos mais comuns empregados no levantamento de reservatórios são: método de levantamento de contorno e método de levantamento de linhas topobatimétricas. O primeiro usa, essencialmente, os procedimentos de mapeamento topográfico por aerofotogrametria e é adequado para o levantamento original do reservatório, ou seja, antes da sua formação. O volume do reservatório é calculado a partir das áreas correspondentes às diferentes curvas de nível e das diferenças de elevação entre elas.

O segundo consiste na definição e determinação em campo de seções transversais de monitoramento. Pode ser utilizado em todos os tipos de reservatório, mas é mais comum no caso daqueles alongados onde a definição de seções transversais é mais óbvia. No caso de reservatórios com muitos braços secundários, cada braço deve ser levantado separadamente.

Evidentemente, as curvas de nível submersas para aplicação do método do contorno podem ser obtidas por interpolação a partir das seções transversais levantadas. Carvalho (2008) apresenta as seguintes recomendações na definição das seções transversais de monitoramento:

- O levantamento topobatimétrico deve ser realizado em linhas transversais bem definidas e a fim de permitir a comparação posterior. As seções devem ser sempre materializadas com marcos nas margens e amarradas à rede geodésica se existente e/ou a acidentes geográficos notáveis.
- Um exame de levantamentos antigos e de mapas da época da formação do reservatório deve ser feito para auxiliar na escolha das seções, na localização dos marcos e mesmo no desenho das seções, escolha da escala e preparação de novos mapas.
- O levantamento será mais preciso quanto mais próximos forem os perfis levantados, os quais deverão estar mais densos na área do delta de deposição dos sedimentos (entrada do reservatório) e nas proximidades de trechos de forte declividade.
- Seções transversais devem ser locadas na boca de todos os principais braços do reservatório (foz dos principais afluentes), sendo que a rede de linhas deve se estender a todos os tributários e, especialmente, no curso principal até a montante da área de remanso.

Levantamentos feitos em 57 reservatórios com áreas entre 30 e 15.000 hectares mostraram que, em média, o número ideal de seções topobatimétricas pode ser obtido pela relação (MORRIS; FAN, 1998):

$$N_{ST} = 2,942 \cdot A^{0,3652}$$

Onde:

N_{ST} – número de seções topobatimétricas;

A – área do reservatório (ha).

Essa relação deve ser utilizada apenas para estimar preliminarmente o número de seções topobatimétricas, pois estas devem representar satisfatoriamente o volume do reservatório, que depende fundamentalmente de sua geometria.

Já o *Guia de Orientações para Atualização das Curvas Cota x Área x Volume*, publicado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), para atender à Resolução Conjunta ANEEL/ANA nº 3/2010, estabelece diferença na metodologia do trabalho de acordo com o tipo de ecobatímetro (monofeixe

ou multifeixe). Quando forem empregados ecobatímetros monofeixe, os trabalhos no curso d'água principal, braços, afluentes contribuintes e canais do reservatório deverão ser determinados por linhas regulares de sondagem (LS) equidistantes transversais ou longitudinais às curvas isobatimétricas da área de estudo.

Para a definição da equidistância entre as linhas de sondagem/seções topobatimétricas no corpo principal do reservatório de Usinas Hidrelétricas (UHEs), adota-se a fórmula a seguir:

$$E_{st} = \frac{0,35A^{0,35}}{D}$$

Para a definição da equidistância entre as linhas de sondagem/seções topobatimétricas no corpo principal do reservatório de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), adota-se a fórmula a seguir:

$$E_{st} = \frac{0,1A^{0,25}}{D}$$

Onde:

E_{st} - equidistância das seções topobatimétricas transversais (km);

A - área do reservatório em seu nível operacional normal (ha);

D - extensão do reservatório (corpo principal), em nível operacional normal (km).

Essa metodologia descrita deve ser utilizada apenas referencialmente sempre que possível, podendo ser sujeita à flexibilização em sua empregabilidade, dependendo das condições reais de cada reservatório. Com respeito à equidistância das linhas de sondagem longitudinais, tanto para UHEs quanto para PCHs, estas deverão ser de três vezes as praticadas para as linhas de sondagem transversais, conforme região que se encontre no reservatório (ANA, 2013).

Quando o levantamento batimétrico for executado com equipamentos ecobatímetros multifeixe, a equidistância das seções topobatimétricas será variável em função do tipo de equipamento e da sua respectiva cobertura lateral. Destacam-se que as seções topobatimétricas deverão ser necessariamente longitudinais às curvas isobatimétricas da área. Além disso, salienta-se que a observação do leito do reservatório deverá ser plena (100% da área), não sendo aceitos levantamentos com “buracos” (ANA, 2013).

2.3.4.1.4 Reduzindo erros em levantamentos batimétricos

Annadale et al. (2016) destaca que é muito comum conter erros nos produtos gerados em levantamentos batimétricos. Estes, por sua vez, resultam em taxas incertas de sedimentação, mascarando resultados e dados.

O uso das mais diversas metodologias aplicadas em levantamentos batimétricos pode produzir resultados significativamente diferentes no cálculo de volume de reservatórios. O volume, por sua vez, também pode ser calculado por métodos diferentes e cada um destes contendo um grau de erro. Tem se tornado cada vez mais frequente a varredura de todo o reservatório em vez do método tradicional de definição de linhas de sondagem/seções topobatimétricas, o que pode ocasionar diferenças quando comparados com levantamentos passados do mesmo reservatório que foram utilizados o método tradicional.

Devido a esses erros, é necessário realizar pesquisas batimétricas repetidas usando uma metodologia consistente para obter uma medição precisa da taxa de sedimentação. Levantamentos e cálculos de volume devem ser realizados usando a mesma metodologia. Quando a metodologia é alterada, o novo volume deve ser calculado tanto pelas metodologias antigas quanto pelas novas. A comparação dos resultados mostrará quanto da mudança de volume aparente é devido à mudança de metodologia e quanto é atribuível à sedimentação (ANNADALE et al, 2016).

2.3.4.1.5 Implantação das seções de controle topobatimétricas

Conforme a Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), as seções de controle são um meio eficiente de complementar a batimetria do reservatório, pois através delas se pode acompanhar o carregamento de sedimentos para os reservatórios. Estas devem ser monitoradas a cada dois anos.

Além disso, ANA (2013) recomenda que:

- Nos reservatórios de baixa criticidade ao assoreamento, deve ser instalado um conjunto com três seções de controle topobatimétrico, posicionando-as no seu quartil superior (trecho de montante), incluindo a zona de remanso, onde normalmente ocorrem os primeiros depósitos de sedimento, caso venham de fato a ocorrer. O espaçamento entre as três seções de controle deve ser de no mínimo cinco vezes a largura do rio em condições naturais.
- Nos reservatórios com média criticidade ao assoreamento, devem ser instalados dois conjuntos (com três seções de controle topobatimétrico cada) em dois locais distintos do reservatório. O posicionamento dessas seções de controle deve ser o mesmo dos reservatórios de baixa criticidade.
- Para os reservatórios com alta criticidade ao assoreamento, devem ser instalados três conjuntos (com três seções de controle topobatimétrico cada) em três locais distintos do reservatório mais propícios ao assoreamento. O posicionamento dessas seções de controle deve ser o mesmo dos reservatórios de baixa criticidade.

No caso dos reservatórios que possuam mais de um braço ativo, com tributários importantes, deve-se prever a instalação de pelo menos um conjunto de seções de controle topobatimétrico em cada um deles.

Cada seção topobatimétrica será materializada em campo por meio de dois marcos de concreto, posicionados em ambas as margens do reservatório, sobre o álveo, afastado do local da linha de operação normal do empreendimento, preferencialmente após a linha *maximorum*, de forma intervisível e que o alinhamento destes se encontre perpendicularmente ao fluxo do corpo hídrico.

2.3.4.1.6 Estimativa do assoreamento através de modelagem computacional

O transporte de sedimento, assim como alterações da morfologia do fundo do rio (seja por erosão ou assoreamento), pode ser estimado através de simulações matemáticas de modelos hidrodinâmicos associados a modelos de sedimentação e erosão. Essa metodologia é útil quando não se tem uma medição sistemática ao longo do tempo da batimetria que nos daria as variações morfológicas do

fundo do rio. Também é útil para prever as alterações morfológicas do fundo ao longo de vários anos futuros e impor cenários diferentes.

Os modelos hidrodinâmicos associados a modelos de transporte de sedimentos e modelagem morfológica são modelos determinísticos baseados em equações de causa e efeito que simulam o escoamento das águas num canal ou reservatório, a sedimentação e a erosão do fundo. De maneira resumida, as equações envolvidas são as equações da continuidade (conservação de massa), equação de Navier-Stokes (conservação da quantidade de movimento), equação de transporte de constituintes (Lei de Fick, advecção-difusão), entre outras (tensão do vento, de Reynolds, velocidade de queda do sedimento, transporte de carga no leito, dispersão do sedimento, entre outros). Na maioria, são equações diferenciais resolvidas por elementos finitos ou diferenças finitas.

Com a solução das equações dos modelos hidrodinâmicos, estima-se o campo de velocidades do fluxo da água, temperatura da água, pressões e transporte de constituintes (sedimentos, óleos, etc.), e variações morfológicas do fundo.

Existem vários modelos que resolvem essas equações com algumas diferenças no tratamento das equações conforme a aplicação a que se destinam. Pode-se citar alguns desses modelos:

- ECOMSED: formulação mais apropriada para estuários;
- MOHID: mais utilizado em estuários, com pouca utilização em reservatórios e rios;
- SisBaHiA: mais utilizado em estuários, com pouca utilização em reservatórios e rios;
- ELCOM-CAEDYM: pouco utilizado em estuários e reservatórios;
- MIKE (MIKE3, MIKE21C), DELFT3D: utilizados em rios, estuários e reservatórios;
- HEC-RAS: utilizado em rios e reservatórios.

Entre estes, o SisBaHiA e HEC-RAS são gratuitos, enquanto os mais usados são o HEC-RAS, o DELFT3D e o MIKE. O SisBaHiA é bastante utilizado no Brasil em regiões de estuário.

Algumas aplicações no Brasil desses modelos (mostrando a localização, o objetivo e o modelo utilizado) são:

- Bahia de Paranaguá (morfologia do fundo): DELFT3D (INSTITUTOS LACTEC, 2016);
- Reservatório do Estreito (transporte de sedimentos): SisBaHiA (SPIEGELBERG, 2010);
- Reservatório de Aimorés (assoreamento): HEC-RAS (CORTEZ, 2013);
- Reservatório da PCH Pai Joaquim (assoreamento): HEC-RAS (HICON, 2012);
- Ribeirão das Lajes UTE Paracambi (morfologia do fundo): HEC-RAS (HICON, 2008);
- Reservatório de Mauá (gás de efeito estufa): ELCOM_CAEDYM (DARU et al., 2011).

Para a utilização desses modelos, é necessária uma vasta quantidade de dados de entrada de vários parâmetros. Entre esses dados citamos, a batimetria do trecho estudado, o aporte de sedimentos e sua característica, entre outros.

A utilização desses modelos para a modelagem do rio Doce e do estuário/mar na foz do rio Doce será apresentada em uma próxima etapa.

2.3.4.2 Metodologia

A metodologia de avaliação do assoreamento dos reservatórios do rio Doce causado pelo aporte de rejeitos e sedimentos transportados devido à passagem da lama causada pelo rompimento de Fundão se baseou nas informações disponibilizadas pelas usinas afetadas: UHEs Risoleta Neves, Baguari, Aimorés e Mascarenhas. A todas as empresas foram solicitados os estudos de assoreamento realizados ao longo de todo o período de existência (pré e pós-rompimento), incluindo os dados originais dos levantamentos topobatimétricos realizados, de forma a possibilitar a reprodução dos resultados obtidos. Na maioria dos casos foram fornecidos apenas relatórios e mapas da batimetria já processados. Em poucas situações foram recebidos os arquivos brutos contendo a nuvem de pontos levantados. Além disso, normalmente cada usina forneceu informações de apenas alguns levantamentos, sendo que na maioria das vezes as informações vieram incompletas. O detalhamento de tais informações é tratado no item a seguir, onde serão avaliados os relatórios e dados (quando possível). Quando fornecidas as batimetrias de dois levantamentos em diferentes períodos em arquivos com formato propício, foi reestimado o volume assoreado.

2.3.4.3 Resultados

2.3.4.3.1 UHE Risoleta Neves (antiga Candonga)

2.3.4.3.1.1 Informações disponíveis

A UHE Risoleta Neves localiza-se a cerca de 116 km a jusante da barragem de Fundão. O início de sua operação se deu em 2004 com um volume de capacidade total de 54,44 hm³ e cota normal em 327,50 m.

Os levantamentos batimétricos da UHE Risoleta Neves (Candonga) realizados nas campanhas de agosto/2007 e maio/2014 foram feitos pela empresa HDC Engenharia, e para campanhas de novembro/2015, maio/2016, dezembro/2016 e outubro/2017 pela empresa Engenharia CF. Em todos os levantamentos, a cota máxima de 327,50 m foi adotada como o nível máximo de operação (HDC, 2014; ENGENHARIA CF, 2015, 2016a, 2016b). Nos relatórios, existem as curvas cota-volume para os levantamentos supracitados, além de apresentar a curva cota-volume de 2004 (início da operação).

As batimetrias obtidas pela interpolação das curvas de níveis realizada pelos Institutos Lactec são apresentadas na Figura 40 (levantamento de agosto/2007), Figura 41 (levantamento de maio/2014), Figura 42 (levantamento de novembro/2015), Figura 43 (levantamento de maio/2016), Figura 44 (levantamento de dezembro/2016) e Figura 45 (levantamento de outubro/2017). É possível perceber que houve volume retirado próximo à barragem comparando a Figura 44 e a Figura 45 com a Figura 43, portanto os volumes assoreados após o desastre contêm interferência do manejo realizado pela UHE.

Figura 40 – Batimetria realizada pela HDC Engenharia em agosto/2007 (pré-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.

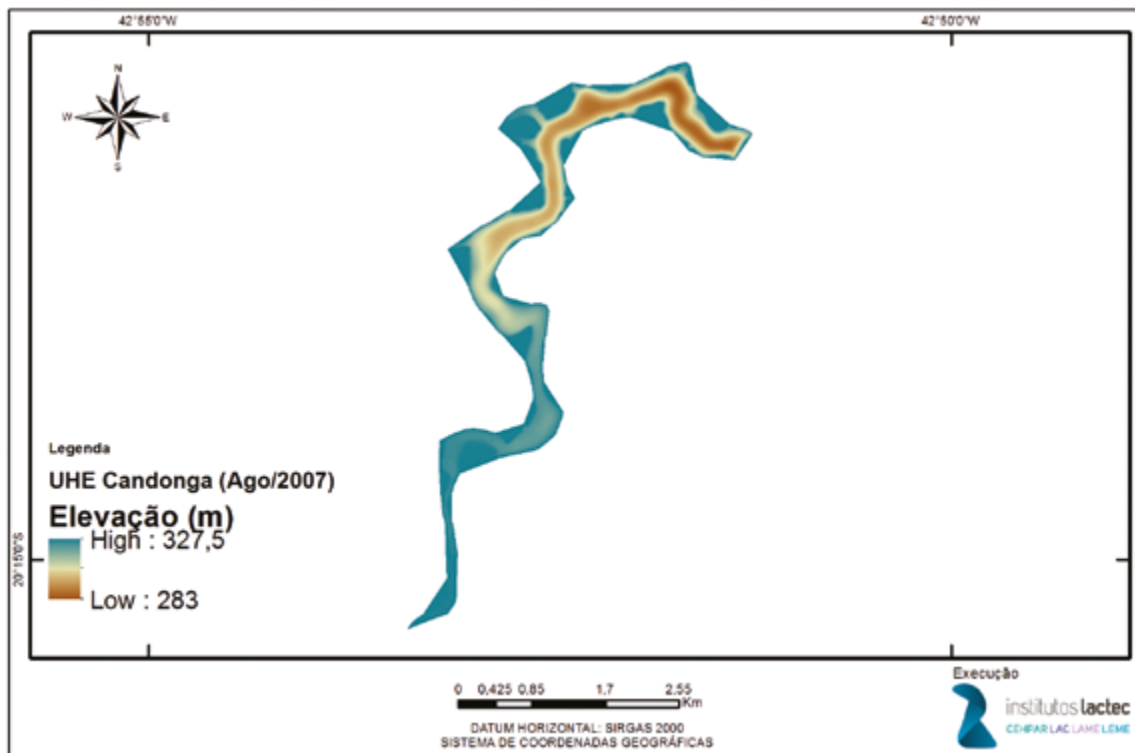


Figura 41 – Batimetria realizada pela HDC Engenharia em maio/2014 (pré-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.

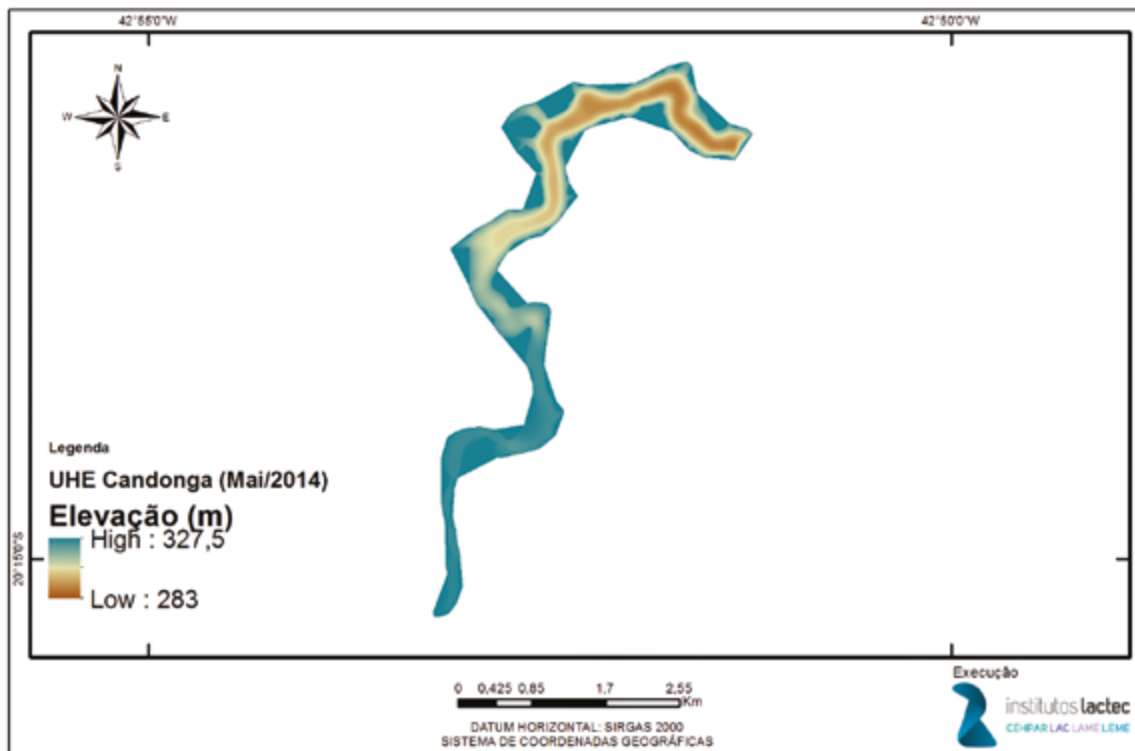


Figura 42 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em novembro/2015 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.

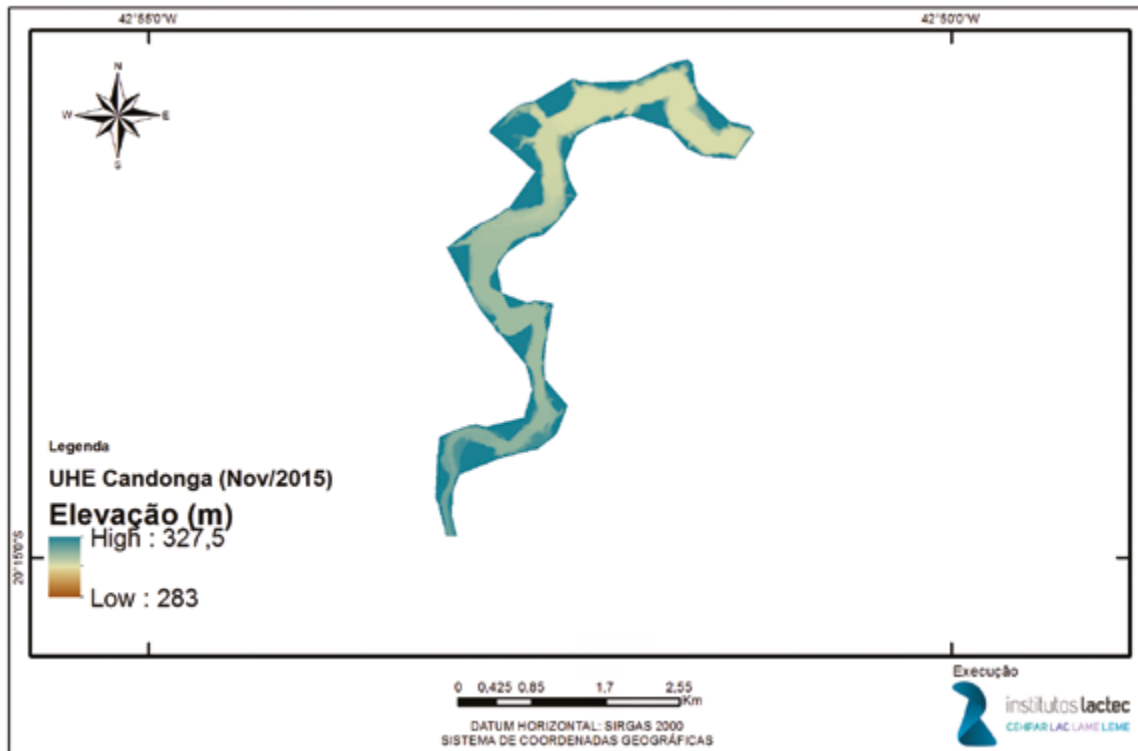


Figura 43 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em maio/2016 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.

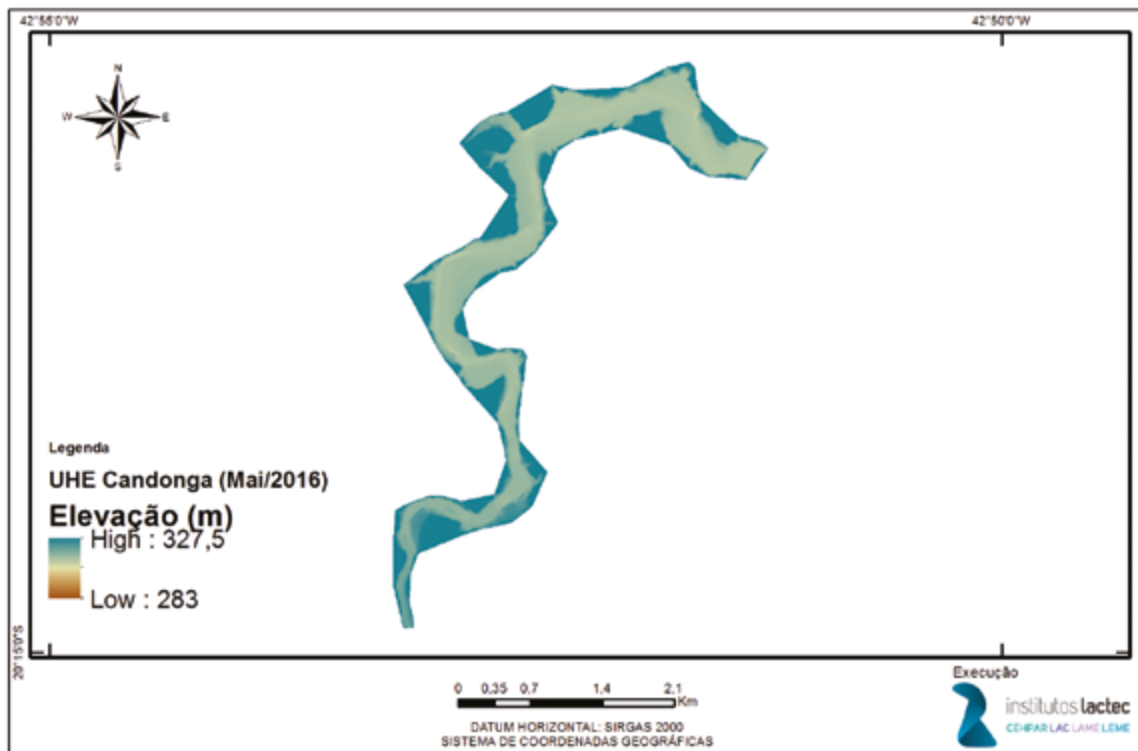


Figura 44 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em dezembro/2016 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.

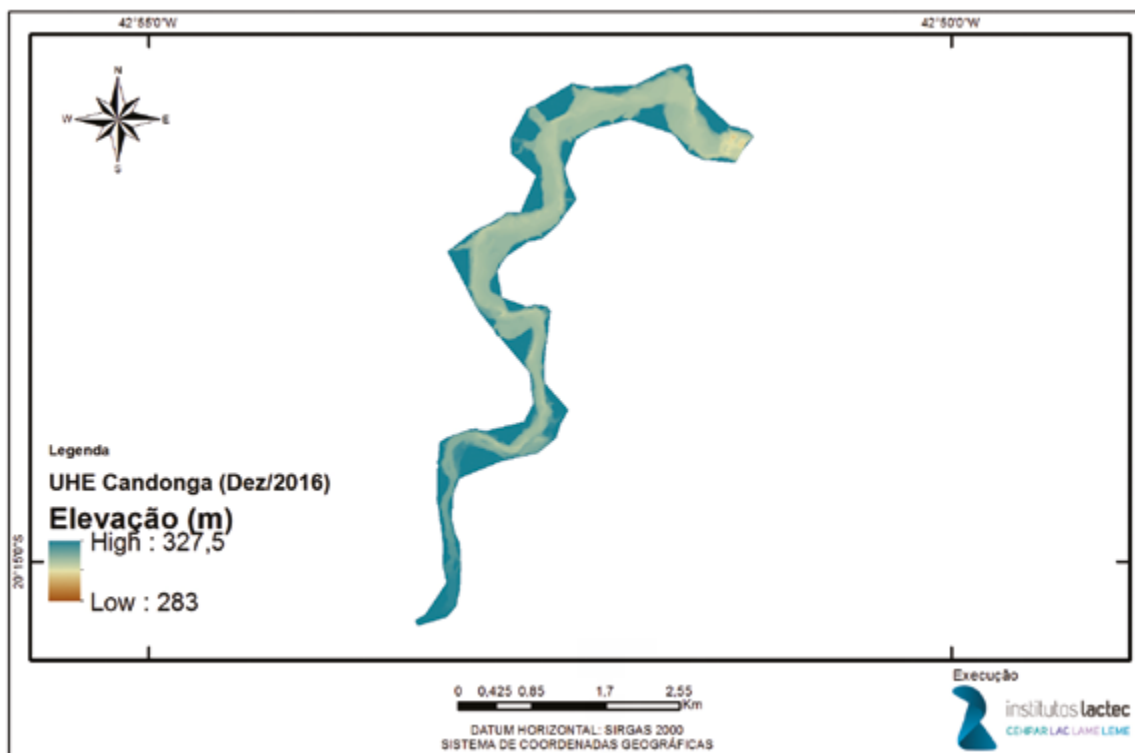
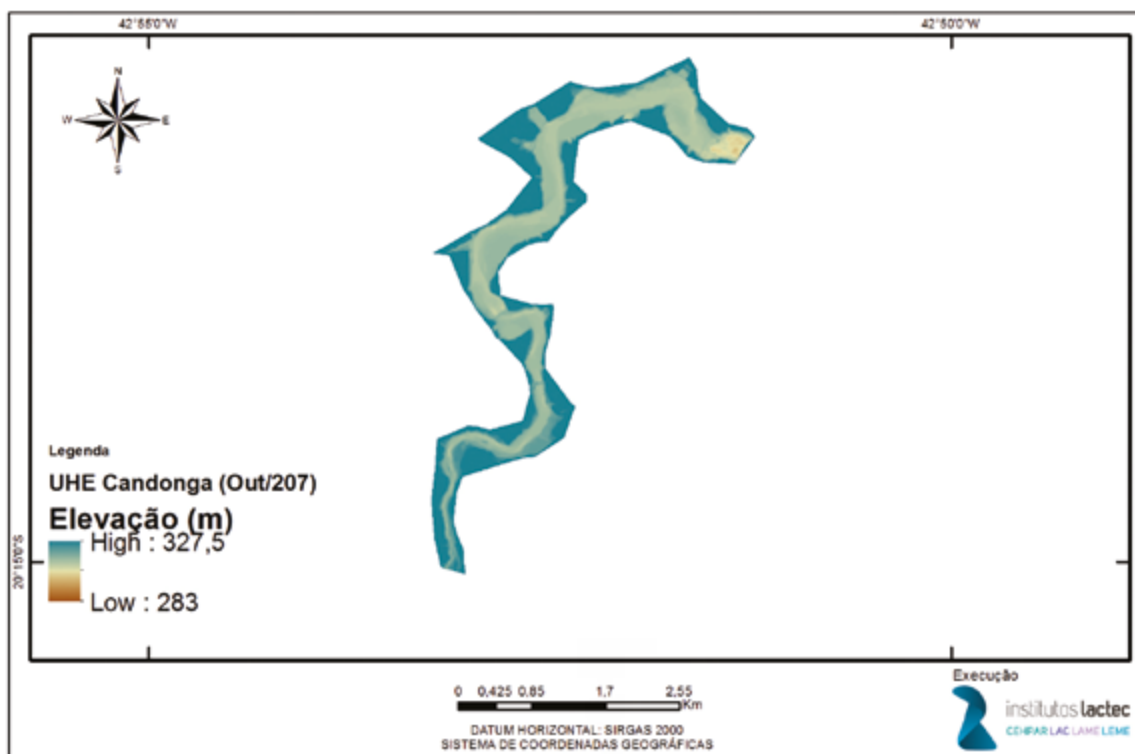


Figura 45 – Batimetria realizada pela Engenharia CF em outubro/2017 (pós-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.



2.3.4.3.2.1 Estimativa dos volumes assoreados

Os volumes estimados pelos Institutos Lactec, por meio da curva de nível e os volumes retirados das curvas cota-volume (ENGENHARIA CF, 2016b), são apresentados na Tabela 26. Os volumes estimados indicam a capacidade de água para cota máxima de 327,5 m. Portanto, a diferença entre dois levantamentos subsequentes indica o volume assoreado, essa diferença também é apresentada nessa tabela.

Tabela 26 – Volume máximo de água para os diversos levantamentos (o incremento do volume é o volume assoreado no intervalo dos levantamentos).

Período	Intervalos entre levantam. (anos)	Volume pela curva cota-volume (hm ³)	Volume assoreado (hm ³)	Volume pela curva de nível (hm ³)	Volume assoreado (hm ³)
2004	-	52,70	0	52,70	-
Ago/2007	≈ 3	46,90	5,80	43,13	9,57
Mai/2014	7,00	41,94	4,96	41,07	2,06
Nov/2015	1,02	32,80	9,14	33,24	7,83
Mai/2016	0,50	31,12	1,68	30,60	2,64
Dez/2016	0,58	30,86	0,26	29,21	1,39

Como não foram disponibilizados os dados brutos aos Institutos Lactec, foi possível utilizar apenas o método de obtenção do volume pelas curvas de níveis, o qual é menos preciso porque a quantidade de pontos é menor e derivada do levantamento original. Já para a construção da curva cota-volume foram (provavelmente) utilizados os dados brutos. Logo, as análises doravante apresentadas se baseiam no método que considera a curva cota-volume.

Para avaliar a parcela do assoreamento atribuído ao evento do rompimento de Fundão, deve ser descontado o volume assoreado pelo aporte de sedimentos advindos da bacia hidrográfica, cuja estimativa pode ser obtida por meio dos levantamentos batimétricos do período pré-desastre. Através da Tabela 26, verifica-se que a taxa média de assoreamento no período de 2004 a 2007 foi de 1,9 hm³/ano (volume assoreado dividido pelo período). Cabe ressaltar que esse valor é maior que o próprio aporte de sedimentos (1,05 hm³/ano) adotado no estudo de projeto básico da usina, conforme apresentado em SPEC (2016). Entre os anos de 2007 e 2014 (81 meses = 6,75 anos) foi verificada uma taxa de assoreamento igual a **0,73 hm³/ano**, uma taxa bem menor que a verificada nos primeiros anos da operação. Essa redução pode ser atribuída a diversos fatores: redução no aporte de sedimentos advindos da bacia e implantação de medidas de controle dos processos erosivos no reservatório, as quais, de fato, foram realizadas segundo SEMAD (2014). Além disso, a redução da taxa de retenção de sedimentos conforme a perda de capacidade de água é um fenômeno que ocorre nos reservatórios (CARVALHO, 2008).

Durante o período de 2016 foi relatada em COPPETEC (2016) e EngenhariaCF (2016a) a presença de dragas no reservatório da UHE Risoleta Neves. Além disso, é notável que as profundidades próximas a barragem aumentaram entre o levantamento de maio/2016 (Figura 43) e o levantamento de dezembro/2016 (Figura 44). Portanto, nesse período houve por algum motivo, ou por dragas ou pela operação das comportas, uma retirada de sedimento.

No levantamento de maio/2016 a menor cota foi de 309 m, já no levantamento de dezembro/2016 a menor cota foi de 301 m. Portanto, esse volume de água que surgiu entre 309 m e 301 m é proveniente da remoção do material depositado. Conforme a curva curva cota-volume apresentada pela EngenhariaCF (2016b) este volume é de 0,11 hm³. Assim, esse valor deve ser somado ao resultado final apesar de se perceber que a ordem de grandeza desse volume é muito pequena.

Considerando a taxa de assoreamento observada no período imediatamente anterior ao evento (0,73 hm³/ano) aplicada sobre o período entre o último levantamento antes do rompimento (maio/2014) e o primeiro levantamento do pós-rompimento (novembro/2015), obtém-se um volume assoreado atribuído à bacia hidrográfica igual a **1,10 hm³** nesses 18 meses de intervalo. Retirando esse assoreamento natural do valor total medido (9,14 hm³), o volume assoreado no reservatório imediatamente após o desastre foi de **8,04 hm³** (até novembro/2015).

Após a passagem da lama pelo reservatório em novembro/2015, o assoreamento devido ao desastre continuou a ocorrer, pois a quantidade de material disponibilizada ao canal e planície de inundação na porção montante da bacia hidrográfica continuou a ser ressuspensa e transportada na passagem das vazões, especialmente as mais altas. Até dezembro/2016 o volume acumulado foi de 1,94 hm³ menos o assoreamento natural de 0,79 hm³ nesse 1 ano e 1 mês mais o volume dragado de 0,11 hm³ resulta em um volume assoreado líquido neste período de 1,26 hm³. Por fim, o volume assoreado devido ao rompimento da barragem de Fundão foi de **9,30 hm³** (até dez/2016).

Em SPEC (2016) é mencionado um levantamento realizado em março de 2016, o qual o LACTEC não teve acesso. Para o período entre novembro/2015 e março/2016, foi considerado o volume obtido em SPEC (2016) igual a 3,98 hm³. Conforme descrito em SPEC (2016), esse levantamento considerou apenas a região mais próxima ao barramento, não permitindo, portanto, aferir com precisão o volume depositado. Entretanto, o estudo avaliou que o assoreamento parecia estar na cota 312,0 m em toda a área, o que justificou uma extrapolação para todo o reservatório e por isso apresentou um valor maior do que os 1,68 hm³ medido em maio de 2016.

Já o relatório apresentado pela GOLDER (2016a) estimou um volume total de 10,5 hm³, porém não existem detalhes de como foram feitos os cálculos desse volume. Acredita-se, entretanto, que as diferenças devem ser fruto do uso de métodos distintos. A diferença entre o volume calculado pelo LACTEC e GOLDER é de aproximadamente 1 hm³.

Dado o exposto anteriormente, considera-se que o **volume de assoreamento causado pelo rompimento ao reservatório de Candonga é de aproximadamente 9,90 ± 0,60 hm³**, considerando que ambas as metodologias empregadas possuem incertezas e portanto o valor mais preciso é um valor intermediário entre estes. Apesar das imprecisões e limitações apontadas para esses levantamentos, considera-se que esta estimativa fornece um valor adequado para a continuidade dos estudos.

2.3.4.3.2 UHE Baguari

A UHE Baguari está localizada no rio Doce a aproximadamente, 322 km a montante de sua foz, com o eixo do barramento posicionado nas coordenadas geográficas de 19°02' (latitude S) e 42°07' (longitude W). A usina entrou em operação em 9 de setembro de 2009 e seu reservatório afeta a zona

ribeirinha dos municípios de Governador Valadares, Periquito, Alpercata, Fernandes Tourinho, Sobrália e Iapu, todos no estado de Minas Gerais (ANEEL, 2009).

O reservatório possui extensão de 20 km ao longo do curso do rio Doce e mais cerca de 5 km no rio Corrente Grande, seu afluente pela margem esquerda num ponto situado a 2 km a montante da barragem. O reservatório é praticamente coincidente com a calha do rio em seu trecho médio superior (montante), com área inundada de, aproximadamente, 14 km² no nível máximo normal (El. 185,00 m), sendo que dessa área cerca de 8 km² já pertenciam ao leito original do rio. Portanto, o reservatório pode ser considerado de pequenas dimensões e sem capacidade de regularização, com volume de água total no nível máximo normal de, aproximadamente, 44 hm³.

A disposição das estruturas da UHE Baguari apresenta a soleira do vertedor próxima ao leito (cota da soleira de 167,20 m) e sua proximidade com a tomada d'água escavada abaixo do leito (cota da soleira de 152,70 m) permite, durante a passagem de uma cheia, que o vertedor seja acionado para manter sempre o nível do reservatório constante, na cota 185 m. Nessas condições de operação nas vazões altas, o reservatório se comporta de maneira similar à condição natural do rio, transferindo os sedimentos diretamente para jusante da barragem. Esse tipo de operação, em que o vertedor permanece aberto, acontece normalmente no período de novembro a março, quando ocorre a maioria das cheias e o transporte de sedimentos nessa época corresponde em média a 87% do total anual transportado (CONSÓRCIO UHE BAGUARI, 2006).

Dessa forma, a preocupação com o transporte de sedimentos recai sobre os meses mais secos, quando as velocidades de escoamento se reduzem bastante com a presença do reservatório, criando condições de sedimentação do material transportado. No entanto, a produção de sedimentos é bem menor nessas épocas de estiagem, com aproximadamente 13% do transporte total anual (CONSÓRCIO UHE BAGUARI, 2006).

Portanto, embora a produção de sedimentos da bacia do rio Doce seja elevada, tendo sido estimada para o local da UHE Baguari uma descarga sólida total de 11.480.000 t/ano, não foram detectados nos estudos para implantação da usina problemas de assoreamento nesse reservatório.

Entretanto, apesar do grande aporte de sedimentos previstos ao longo do tempo, não há a previsão de assoreamento do reservatório, em função da disposição das estruturas. A cota de instalação da soleira do vertedouro é próxima do fundo do rio, fazendo com que, durante o escoamento das vazões de cheia, o rio tenha um comportamento próximo de seu natural, carreando os sedimentos para jusante do barramento. Essa forma de disposição das estruturas é positiva para o empreendimento, uma vez que o reservatório previsto, com reduzido volume de acumulação não deverá ser assoreado com o aporte de sedimentos e, sendo assim, poderá ter vida útil indefinida. (ANA, 2005).

Com relação a levantamentos topobatimétricos do reservatório, existem três conjuntos de informações, listados aqui em ordem cronológica: (i) curva cota-área-volume de 2012, descrita como sendo representativa do volume original do reservatório; (ii) levantamento topobatimétrico parcial do reservatório realizado entre 5 e 11 de dezembro de 2015, logo após o rompimento de Fundação (05/11/2015); e (iii) levantamento topobatimétrico detalhado do reservatório, realizado entre novembro e dezembro/2016.

O levantamento de 2015 foi realizado pela empresa ERG Engenharia por solicitação da Samarco. Foram levantadas nove seções de controle ao longo do reservatório e realizado levantamento mais detalhado nas proximidades da barragem, notadamente no canal de adução, onde um comparativo com o projeto original resultou em um assoreamento de 27.909 m³ (ERG, 2015). O relatório descreve que os resultados apresentados “são de caráter descritivo, portanto, qualquer análise quantitativa ou qualitativa ficará a critério dos responsáveis pela gestão das mesmas” (ERG, 2015). Dessa forma, o estudo não apresenta e não permite conclusões sobre um eventual processo de assoreamento do reservatório, durante e nos dias subsequentes ao desastre.

O levantamento de 2016 também foi realizado pela ERG Engenharia, agora por solicitação do Consórcio UHE Baguari. Foi realizado um mapeamento preciso de todo o reservatório, permitindo a geração de MDT de alta resolução e de nova curva cota-área-volume bem detalhada do reservatório.

O relatório apresenta nova estimativa do assoreamento no canal de adução, que resultou num volume total de material assoreado de 74.378 m³ desde a construção da obra até 2016 (ERG, 2017). Descontando-se o volume obtido anteriormente para dezembro/2015 (27.909 m³), resulta um assoreamento de 46.469 m³ nesse período anual até dezembro/2016. Nota-se que o volume assoreado nesse ano imediatamente após o rompimento de Fundão (dezembro/2015 a dezembro/2016) é superior ao assoreamento ocorrido anteriormente e durante o evento, no canal de adução da UHE Baguari.

O relatório apresenta ainda uma estimativa de assoreamento na região próxima da barragem, comparando os dados batimétricos medidos em dezembro/2015 e dezembro/2016, resultando em 79.926 m³ de material depositado nas proximidades da barragem nesse período anual pós-rompimento de Fundão (ERG, 2017).

Destaca-se que esses resultados estão restritos a duas áreas bem específicas do reservatório, canal de adução e proximidades da barragem, e, também, a um período específico de tempo. No entanto, embora não reflitam as condições de assoreamento da totalidade do reservatório, indicam a possibilidade de ocorrência desse processo em determinados locais, muito embora as características estruturais e operativas da usina não sejam favoráveis a deposição de sedimentos.

A curva cota-área-volume de 2012 é mostrada em ERG (2017) como tabela e apresenta valores de área e volume a partir da cota 180 m, portanto bem acima da cota mínima do reservatório e das soleiras da tomada d'água (152,7 m) e do vertedor (167,2 m). Esses dados, além de representarem apenas uma faixa altimétrica do reservatório, também apresentam incerteza quanto à data exata do levantamento. Nesse sentido, permitem apenas um indicativo parcial e preliminar do assoreamento no período. O acesso aos dados originais desse levantamento é fundamental para revisão dos resultados.

Comparando-se os volumes parciais na faixa entre as cotas 180 e 185 m, entre os levantamentos de 2012 e 2016, pode-se obter um indicativo preliminar do assoreamento neste período. Como a taxa de assoreamento esperada em condições normais é praticamente nula nesse reservatório, eventualmente esse volume pode ser significativamente atribuído aos sedimentos oriundos do rompimento de Fundão.

Portanto, como resultado preliminar obteve-se um volume assoreado de 3,36 hm³ no reservatório da UHE Baguari. Destaca-se que esse resultado é parcial, relativo a uma determinada faixa altimétrica do reservatório, e deverá ser revisto à luz de uma base de dados mais robusta.

2.3.4.3.3 UHE Eliezer Batista (Aimorés)

2.3.4.3.3 Informações disponíveis

A UHE Eliezer Batista está localizada no rio Doce e abrange os municípios de Baixo Guandu (ES), Aimorés (MG), Itueta (MG) e Resplendor (MG), sendo a sua construção iniciada em 2003 e operação em 2006. A usina possui um volume de reservatório de 185,11 hm³, potência instalada de 330 MW e energia média assegurada em operação de 172 MW.

As informações sobre a batimetria da UHE Aimorés (Eliezer Batista) foram todas realizadas pela HIDROTOPO®. Foram fornecidos os dados brutos somente para o período de junho/2015, dezembro/2015 e agosto/2016, sendo, então, um período logo antes do rompimento e outro logo depois. O posicionamento horizontal foi realizado através de um DGPS com precisão submétrica e a aferição de profundidade utilizando-se um ecobatímetro monofeixe com duas frequências (200 kHz e 33 kHz) com precisão de 1 cm e 10 cm, respectivamente. As informações sobre os levantamentos foram retiradas dos relatórios HIDROTOPO (2015, 2016a, 2016b). As profundidades levantadas estão referidas ao nível normal máximo do reservatório (90 m). Os levantamentos de junho e dezembro/2015 cobrem quase toda área do reservatório, porém o levantamento de agosto/2016 deixou de cobrir uma área com aproximadamente 7 km² (20% da área total) devido à presença de macrófitas.

As densidades de pontos em cada levantamento estão apresentadas na Figura 46, Figura 47 e Figura 48. O volume no início da operação em 2005 foi de 184,6 hm³ (CBDB, 2009).

O assoreamento do reservatório da UHE Aimorés foi tópico de uma dissertação de mestrado (CORTEZ, 2013). Metodologias empíricas e semiempíricas foram avaliadas e comparadas com dados medidos para o período setembro/2007 a setembro/2008. Nesse estudo, os volumes assoreados estimados variaram entre 1,9 hm³/ano e 4,9 hm³/ano, sendo que o valor medido foi de 4,87 hm³.

Figura 46 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em junho/2015 antes do desastre.

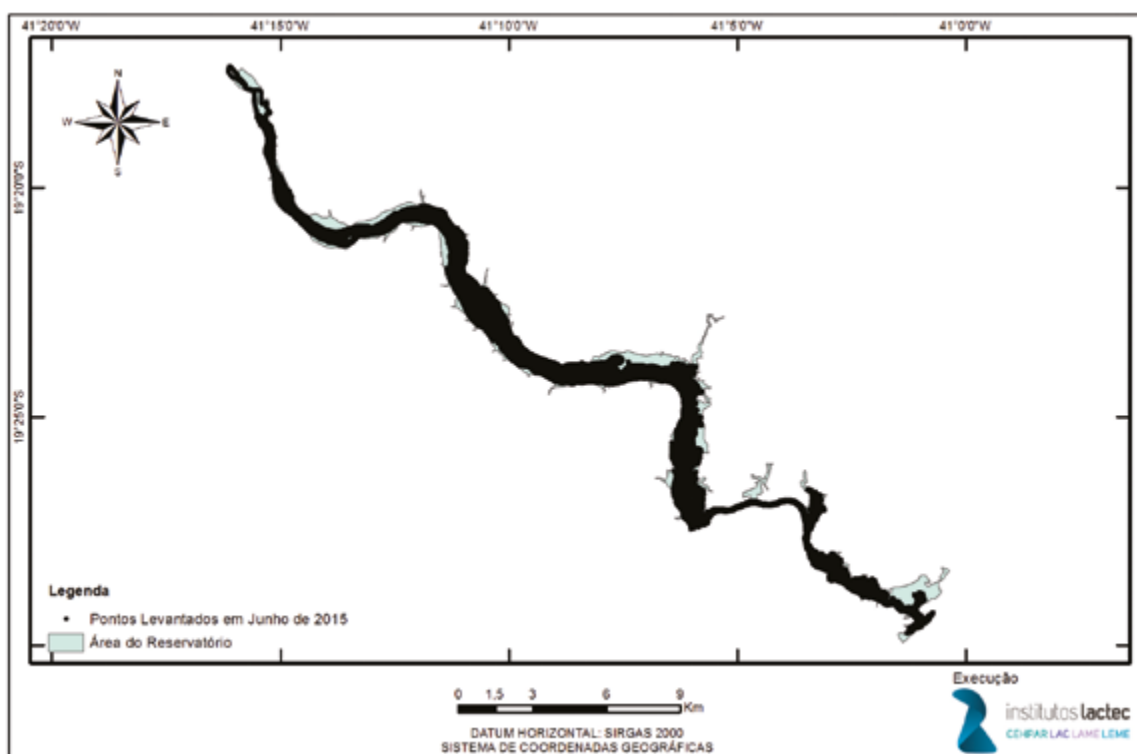


Figura 47 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em dezembro/2015 após o desastre.

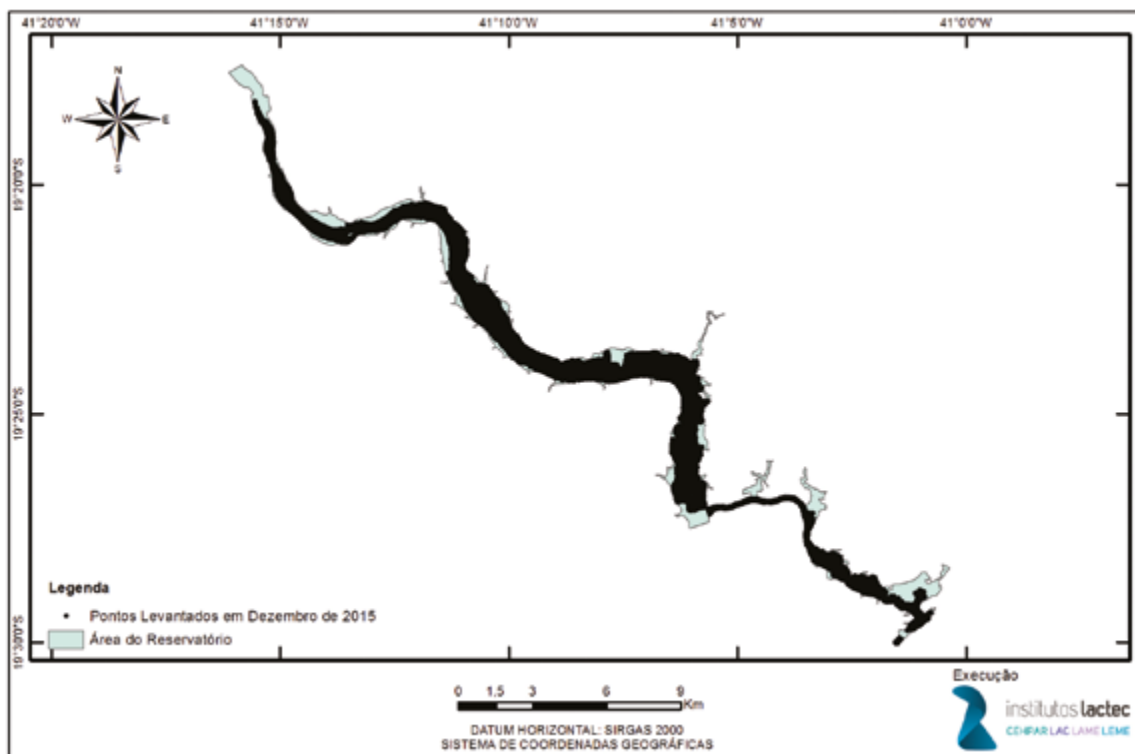
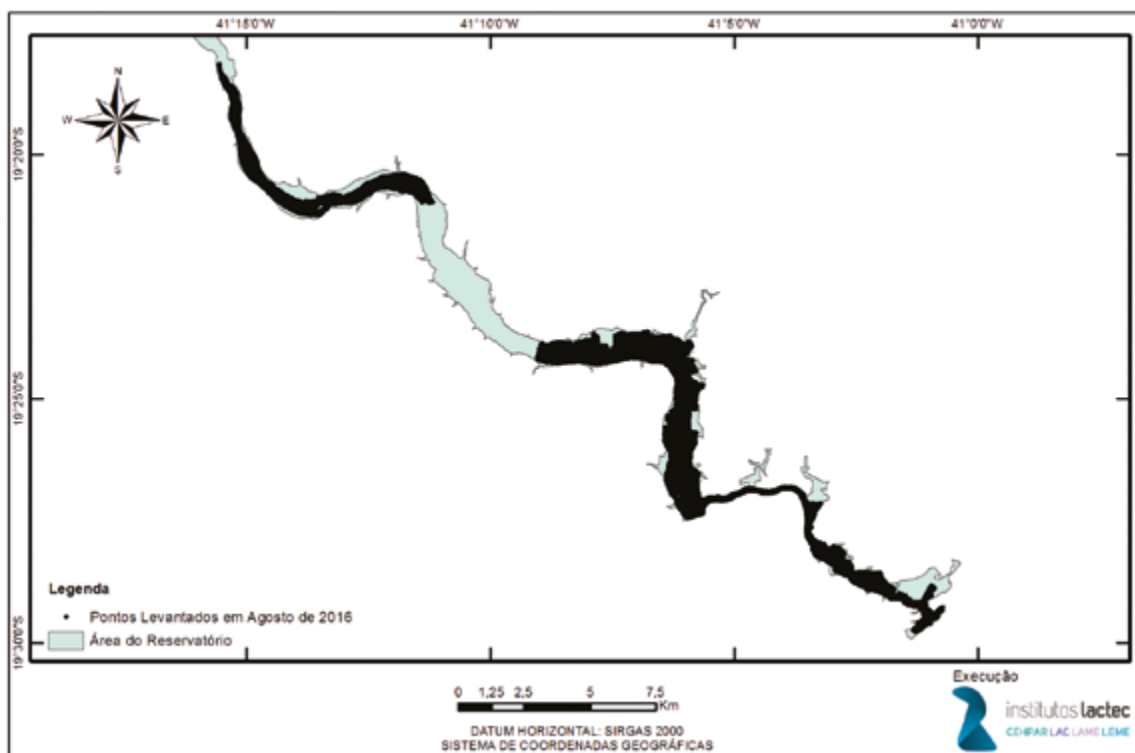


Figura 48 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em agosto/2016 após o desastre (nota-se que há uma região sem dados).



2.3.4.3.2 Estimativa dos volumes

Os volumes de cada levantamento foram estimados pelos Institutos Lactec por meio da interpolação de redes de triangulação irregular (TIN). As profundidades e o contorno do reservatório (profundidade de 0 m) foram os dados de entrada para interpolação. A interpolação foi gerada em uma grade 1 m x 1 m, e o volume estimado pela multiplicação da profundidade pela área da grade (1 m²).

A Tabela 27 mostra as estimativas dos volumes para cada período realizadas pelos Institutos Lactec, além do volume inicial determinado por CBDB (2009). Os resultados das interpolações são apresentados na Figura 49, Figura 50 e Figura 51 em ordem cronológica do levantamento.

Tabela 27 – Volume máximo de água para os diversos levantamentos.

Data	Mês	Volume (hm ³)	Fonte do Processamento
2005	–	184,6	CBDB (2009)
2015	Jun.	161,5	Institutos Lactec
2015	Dez.	155,7	Institutos Lactec
2016	Ago.	130,2 ¹	Institutos Lactec

Nota: [1] O valor foi estimado com a batimetria realizada parcialmente no reservatório (80% da área do reservatório).

Figura 49 – Profundidades máximas de água, levantamento de junho/2015.

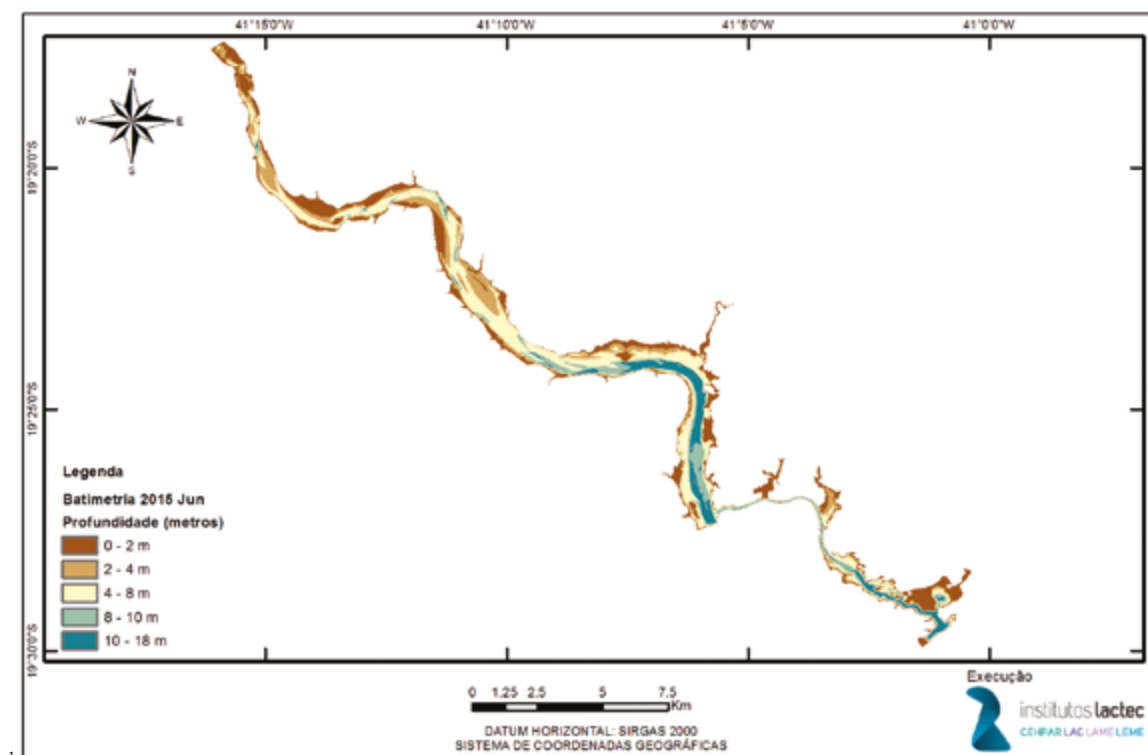


Figura 50 – Profundidades máximas de água, levantamento em dezembro/2015 após o desastre.

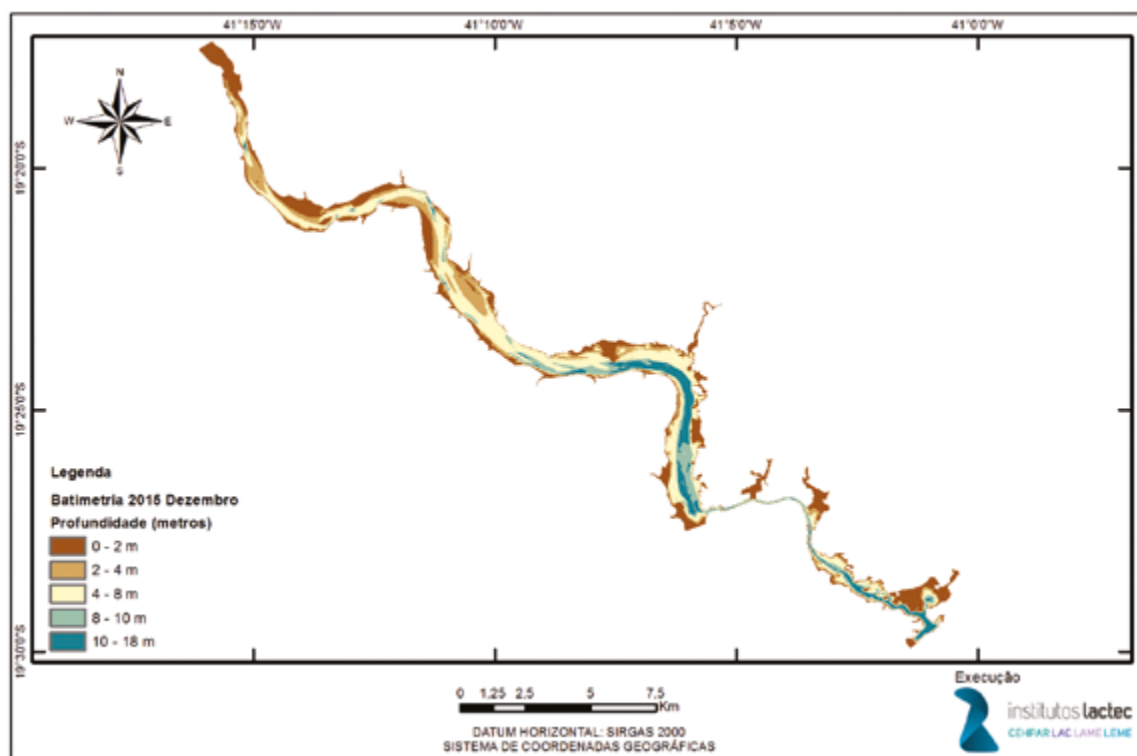
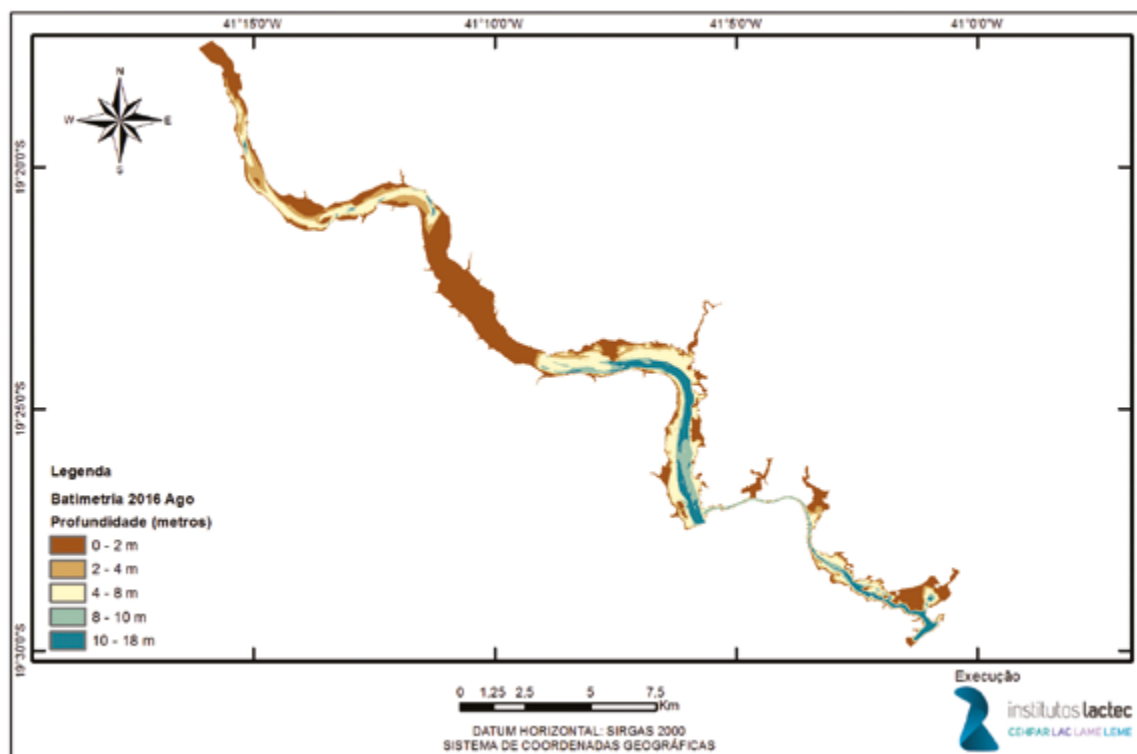


Figura 51 – Profundidades máximas de água, levantamento em agosto/2016 após o desastre.



A Tabela 28 apresenta os volumes assoreados considerando diferentes períodos.

Tabela 28 – Volumes assoreados para diversos períodos.

Data	Volume Assoreado (hm ³)	Intervalos entre Levantamentos (anos)
2007 – 2008	4,9	1
2005 – Jun./2015	23,7	10
Jun./2015 – Dez./2015	5,8	0,5

A taxa de assoreamento entre setembro/2007 e setembro/2008 foi de 4,9 hm³/ano (CORTEZ, 2013). Realizando o cálculo do período entre 2005 e 2015 essa taxa seria de 2,2 hm³/ano. No entanto, esse último valor pode ter sido afetado pela realização de limpezas dentro do reservatório durante esse período e não será utilizado como base comparativa. De fato, utilizando a curva de Brune para recalcular a retenção do reservatório de 5 em 5 anos para o período 2005-2015, além de um método empírico (MILLER apud KOELZER; LARA, 1958) para estimar volume específico aparente de sedimentos depositados (item 2.3.4.1.2), obteve-se taxas de assoreamento natural entre 5,29 e 5,77 hm³/ano. A Tabela 29 apresenta todos os valores adotados e calculados nessa estimativa.

Tabela 29 – Estimativa de taxas de assoreamento pelo método empírico.

Período	Volume inicial (hm ³)	Taxa de retenção (%)	Volume assoreado (hm ³)	Volume final (hm ³)	Taxa de assoreamento (hm ³ /ano)
2005-2010	184,60	48,29	28,85	155,75	5,77
2010-2015	155,75	44,21	26,45	129,30	5,29

Nota: valores adotados: vazão média mensal – 508,76 m³/s; vazão sólida específica – 154 t/ano/km² (valor para o posto Tumiritinga obtido em Institutos Lactec, 2017); granulometria do sedimento depositado recomendado por Carvalho (2008).

Assim, para estimar a parcela do volume assoreado entre junho/2015 e dezembro/2015 relativa ao aporte natural da bacia hidrográfica e fatores externos ao rompimento de Fundão, adotou-se a taxa de assoreamento natural obtido entre setembro/2007 e setembro/2008 em Cortez (2013). Com essa taxa, o volume assoreado naturalmente em seis meses resulta em 2,45 hm³. Portanto, o valor do aporte de sedimentos e rejeitos advindos do rompimento de Fundão até dezembro/2015 resultou em **3,35 hm³**.

Dado que o levantamento de agosto/2016 cobriu apenas cerca de 80% da área total do reservatório, não foi possível estimar o assoreamento após dezembro/2015 utilizando dados batimétricos. No entanto, considera-se que o aporte após este período é significativamente menor, dado que grande parte do material remanescente liberado gradativamente de Fundão devido à ocorrência das chuvas pôde ser retido na UHE Risoleta Neves e na bacia a montante desta. Assim, adotou-se como volume representativo do assoreamento em Aimorés dado o rompimento de Fundão, o valor mínimo de 3,5 hm³.

2.3.4.3.4 UHE Mascarenhas

A UHE Mascarenhas está localizada no rio Doce logo a jusante da barragem da UHE Mascarenhas e abrange o município de Baixo Guandu (ES), sendo a sua construção iniciada em 1968 e operação em 1974. Em 2000 a usina foi repotencializada. A usina possui um volume de reservatório aproximado de 21,8 hm³, potência instalada de 180,5 MW e energia média assegurada em operação de 127 MW.

Esta usina vem sofrendo com o assoreamento do seu reservatório há vários anos. O reservatório foi inaugurado em 1974 e em 1979 após um período de cheias e ficou quase totalmente assoreado, com sedimentos chegando a atingir os condutos forçados (ALMEIDA; CARVALHO, 1993).

Miranda et al. (2013) comenta que o reservatório se encontrava com capacidade de armazenamento comprometida pelo assoreamento, passando por constantes dragagens e operando em cotas acima das previstas no projeto original. Carvalho e Lou (1986 apud MIRANDA et al., 2013, p.71) cita que:

A bacia hidrográfica onde o reservatório se encontrava produzia uma grande quantidade de sedimentos acarretando no assoreamento do reservatório e exigindo limpezas periódicas a elevados custos.

Também segundo Almeida e Carvalho (1993), o reservatório teria vida útil até 2003, mas mesmo antes desse período teve problemas de assoreamento junto à entrada dos condutos forçados devido à má concepção do arranjo do empreendimento.

O projeto original da UHE Mascarenhas não contemplou estudos sedimentológicos. Assim, o arranjo escolhido para o aproveitamento exige dragagens constantes e restauração frequente das turbinas. Ainda segundo os autores poder-se-ia, à época do projeto, ter sido estudada uma concepção de projeto com arranjo diferente do escolhido (que não possui estruturas para atenuar os efeitos de assoreamento), para procurar reduzir tais problemas. Os autores obtiveram uma vida útil de 10 anos para o reservatório (sedimentos atingindo a cota da soleira da tomada d'água).

Segundo Engevix (1997 apud ANA, 2007, p.9), o assoreamento ainda não tinha atingido o nível mínimo normal (volume útil do reservatório): “se for considerado o volume útil do reservatório (volume contido entre o NA max normal e o NA min), não houve redução” (redução de volume do reservatório).

Também segundo Engevix (1997 apud ANA, 2007, p.9 e 10), foi previsto que em 2015 o assoreamento afetaria substancialmente a operação do reservatório:

Por outro lado, se for mantida a taxa atual de assoreamento do volume morto do reservatório (cerca de 0,75 hm³/ano), em cerca de 18 anos a cota correspondente ao NA min normal seria atingida pelo depósito de sedimentos. Considerando que já se passaram 10 anos desde o último levantamento batimétrico, restariam apenas 8 anos para que o NA min normal fosse atingido pelo assoreamento do reservatório. Assim, aparentemente, a UHE Mascarenhas, dentro de alguns anos, perderá sua capacidade de deplecionamento (nem para uma regularização diária de vazões, como ocorre atualmente), passando a operar totalmente a fio d'água, o que deverá causar uma redução da geração de energia neste aproveitamento.

Outra possível consequência futura do processo de assoreamento será a dificuldade de se cumprir a restrição operativa de vazão mínima defluente de 210 m³/s, uma vez que a vazão mínima média mensal registrada é de 191 m³/s.

Segundo Continho et al. (2001 apud EUCLYDES et al., 2009), a barragem de Mascarenhas opera em cota acima da prevista em projeto e passa por constantes dragagens por já estar com avançado nível de assoreamento, o que compromete a capacidade de armazenamento.

O Centro de Estudos Hidráulicos do Paraná (CEHPAR, 2001) avaliou, através da estimativa de retenção pelo método de Churchill (20%), que o assoreamento atingiria a cota do mínimo operativo (58,0 m) em 2014:

Com uma retenção média de sedimentos da ordem de $0,8 \text{ hm}^3$ anuais, a cota do mínimo operativo (58m; $10,471 \text{ hm}^3$ em 2001) será assoreada completamente em pouco mais de 13 anos. A cota do máximo normal (60,75 m; $18,677 \text{ hm}^3$ em 2001) terá seu completo preenchimento por sedimentos em pouco mais de 23 anos, partindo-se de 2001.

Destaca-se que esta estimativa de vida útil do reservatório considera as condições atuais, portando as previsões devem ser vistas com cautela pois a eficiência de retenção de sedimentos pelo reservatório diminui com o assoreamento, ou seja, diminui juntamente com a diminuição do volume ao longo do tempo.

Outro ponto a ser considerado é que, em função do estágio atual de assoreamento do reservatório da UHE Mascarenhas, os métodos teóricos de estimativa da vida útil tornam-se pouco precisos. Assim, a forma mais segura de avaliar o processo de assoreamento é através da combinação dos métodos teóricos com levantamentos topobatimétricos, sendo este último o melhor e mais confiável.

2.3.4.3.4.1 Estudos batimétricos realizados

Os levantamentos batimétricos realizados no reservatório da UHE Mascarenhas que se tem conhecimento estão relacionados na Tabela 30, onde são mostradas as curvas cota-volume calculadas através desses levantamentos batimétricos. Os valores foram transcritos dos estudos originais. Esses valores foram plotados na Figura 52.

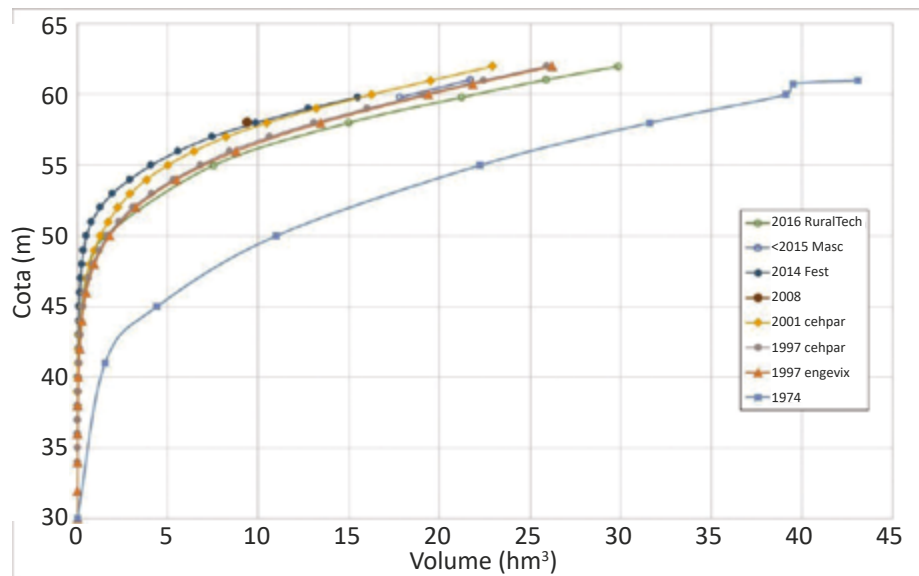
Tabela 30 – Evolução das curvas cota-volume do reservatório da UHE Mascarenhas.

Cota (m)	Volume (hm³)							
	Original (1974)	Engevix (1997)	CEHPAR (1997)	CEHPAR (2001)	EDP (2008) apud FEST(2014)	FEST (2014)	Mascarenhas¹	RuralTech (2016)
30	0	0						
31								
32		0.01						
33								
34		0.01	0					
35			0.01					
36		0.01	0.01			0		0
37			0.02			0.01		0.01
38		0.03	0.02	0		0.02		
39			0.04	0.01		0.02		
40		0.07	0.06	0.01		0.03		0.04
41	1.53		0.09	0.04		0.04		
42		0.13	0.12	0.07		0.05		
43			0.17	0.11		0.07		0.12
44		0.25	0.22	0.17		0.09		
45	4.40		0.31	0.26		0.11		0.25
46		0.48	0.43	0.36		0.14		
47			0.62	0.5		0.19		0.51
48		0.94	0.87	0.69		0.25		
49			1.22	0.95		0.35		
50	10.97	1.78	1.66	1.27		0.51		1.54
51			2.29	1.71		0.80		
52		3.22	3.06	2.24		1.27		
53			4.1	2.93		1.94		
54		5.49	5.32	3.82		2.91		
55	22.22		6.8	4.99		4.09		7.53
56		8.77	8.43	6.43		5.57		
57			10.61	8.22		7.44		
58	31.60	13.43	13.08	10.47	9.4	9.87		14.97
59			16	13.18		12.76		
59.8						15.47	17.81	21.2
60	39.12	19.39	19.09	16.24				
60.75	39.50	21.85						
61	43.08		22.42	19.51				
61.05							21.71	25.87
62		26.22	25.93	22.93				29.85

Nota: [1] sem informações de data do levantamento batimétrico.

Fonte: Adaptado de CEHPAR (2001).

Figura 52 – Evolução das curvas cota-volume do reservatório da UHE Mascarenhas.



FEST (2014) apresenta os resultados do levantamento batimétrico realizado em novembro/2013. Foram levantadas seções transversais a cada 20 m nos primeiros 500 m a montante do barramento e a cada 100 m no restante do reservatório. Eles utilizaram um ecobatímetro analógico/digital, com transdutor de 200 kHz de frequência, acoplado a um sistema de posicionamento DGPS submétrico. Os dados de profundidade foram transformados em cotas ortométricas a partir dos registros horários de cotas do nível de água do reservatório.

RuralTech (2016, 2017) apresentam o levantamento batimétrico do reservatório de Mascarenhas realizado em 20 e 24/05/2016, portanto após o desastre do rompimento de Fundão. Foi utilizado um ecobatímetro multifeixe e um monofeixe, sendo que o erro na planimetria é de no máximo 10 cm. O monofeixe foi utilizado apenas nas margens menos profundas e com distância entre passadas de 60 cm. A transformação das profundidades batimétricas para cotas ortométricas foi feita através da amarração com a leitura de 3 réguas referenciadas dispostas ao longo do reservatório com medições realizadas a cada 60 min durante o levantamento batimétrico. Essas réguas possuem cotas ortométricas obtidas pelo modelo geoidal local: “Implantação de rede de vértices geodésicos (RVG) no entrono do reservatório, por nivelamento geométrico e rastreamento GNSS L1/L2, a partir das RN-s oficiais do IBGE mais próximas, com leitura dos níveis sobre a régua de operação localizada na barragem” (RURALTECH, 2017, p.4). Os autores citam que a densidade das passadas do sensor multifeixe possibilitou a leitura contínua das cotas em toda a extensão do lago. Entretanto, até o momento, não foi disponibilizado o MDT em *shape* conforme solicitado, restando a disponibilidade das informações através de figura única no relatório.

RuralTech (2016) compara o volume do reservatório nas cotas mínima normal e máxima normal com o estudo anterior disponibilizado pela EDP, mas não menciona a referência. A Tabela 31 foi transcrita desse estudo.

Tabela 31 – Comparação do volume do reservatório nas cotas mínima normal e máxima normal entre levantamento de 2016 e levantamento anterior.

Cotas de Interesse	Cota SGB(m)	Cota referência local (m)	Volume (hm ³)		Diferença (%) (b - a)
			Curva antiga (a)	Curva nova (b)	
Mínima Normal	59,80	59,50	17,81	21,20	19,01%
Máximo Normal	61,05	60,75	21,71	25,87	19,14%
Máxima Maximorum	62,70	62,40	-	33,05	-

Fonte: RuralTech (2016).

O volume do reservatório calculado pelo levantamento de 2017 foi 19% maior que o do levantamento anterior. RuralTech (2016) concluiu que as diferenças de metodologias dos levantamentos (com técnicas atuais mais modernas) que originaram esse aparente “aumento” de volume de água pode parecer estranho, pois mesmo com a lama da ruptura da barragem de Fundão o reservatório ficou mais fundo do que antes.

A diferença de 19% que parece a princípio relativamente grande é na realidade 19% sobre a diferença dos volumes nas cotas máxima e mínima (volume útil para a operação do reservatório) e não sobre o volume total do reservatório. A diferença de volume é de 0,77 hm³, que correspondente a mesma ordem de grandeza da retenção anual de sedimentos no reservatório segundo CEHPAR (2001), portanto, um valor relativamente pequeno. Outro assunto não abordado por RuralTech (2016) é relativo a dragagens que o reservatório possa ter sido submetido.

Os autores não citam quando e por quem foi feita a curva cota-volume anterior sobre a qual eles fizeram a comparação, entretanto, supõem que seja a curva do levantamento de 1997 (Engevix ou CEHPAR) pela similaridade dos valores. Não parece ser o levantamento de FEST (2014), pela não concordância dos valores.

Pelos resultados dos levantamentos batimétricos realizados ao decorrer dos anos, verificou-se um grande assoreamento no início do funcionamento da barragem, que de 1974 até 2001 assoreou numa taxa de 0,78 hm³/ano para a cota de 58 m. De 2001 a 2008 ocorreu um assoreamento bem inferior de 0,15 hm³/ano. De 2008 a 2013 ocorreu uma pequena erosão de 0,09 hm³/ano. O último levantamento ocorrido de 2016, portanto após o desastre de Fundão, apresenta uma erosão que na média desde 2013 é da ordem de 1,7 hm³/ano. Cabe lembrar, que os valores de erosão podem ser oriundos de processos de limpeza do reservatório.

2.3.4.3.4.2 Considerações

Vários estudos apontam para um reservatório com problemas de assoreamento e com acúmulo de sedimentos já afetando os condutos forçados da casa de força, obrigando a constantes dragagens realizadas pelo empreendedor desse a década de 1980. Segundo Almeida e Carvalho (1993), esses problemas são, principalmente, pela má concepção de projeto no arranjo do empreendimento devido à falta de estudo sedimentométrico. A previsão para o assoreamento do volume morto (na cota mínima de operação) foi estimada para ocorrer nos anos de 2014 (CEHPAR, 2001) e 2015 (ENGEVIX, 1997). CEHPAR (2001, p.33) ressalta que:

em função do estágio atual de assoreamento do reservatório da UHE Mascarenhas, os métodos teóricos de estimativa da vida útil tornam-se pouco precisos. Assim, a forma mais segura de avaliar o processo de assoreamento é através da combinação dos métodos teóricos com levantamentos topobatimétricos, sendo este último o melhor e mais confiável.

Também reforça que, à medida que o reservatório vai assoreando, a eficiência de retenção diminui e o assoreamento também diminui, aumentando a vida útil.

O estado de assoreamento medido após o desastre em 2016 indica um reservatório menos assoreado do que era em 2014. A explicação dada por RuralTech (2016) pode ser plausível, pois, de fato, sensores atuais mais precisos, e cálculo de cotas ortométricas via satélite atuais mais precisas podem impactar nos resultados dos diversos levantamentos batimétricos. Além disso, o simples fato de alterar significativamente a distância entre seções transversais pode afetar de maneira expressiva os resultados. Entretanto, isso pode não ser o único e mais importante fator que explica o fato da erosão. Reservatório com pequeno volume, por estar já bastante assoreado, e com o formato alongado tem menos tendência de assoreamento podendo, inclusive, ocorrer erosão. O reservatório de Mascarenhas tem esse formato alongado e, depois de 30 anos de assoreamento, se transformou num reservatório de pouca profundidade onde o assoreamento é mínimo, podendo ocorrer o processo erosivo. Nesse caso, a erosão ocorre até atingir um equilíbrio. RuralTech (2016) classifica o reservatório de Mascarenhas, quanto ao potencial de assoreamento, conforme fórmulas recomendadas pela ANA, resultando em índices baixos quanto à suscetibilidade ao assoreamento. A partir de 2005, com a inauguração do reservatório de Aimorés, o aporte de sedimentos ao reservatório de Aimorés diminuiu significativamente devido à retenção ocorrida em Aimorés. Esse fato contribui para a diminuição do assoreamento. Essa data (2005) coincide com a diminuição da taxa de assoreamento de Mascarenhas.

A determinação do verdadeiro impacto no assoreamento de Mascarenhas devido o rompimento será possível se forem disponibilizados os levantamentos batimétricos de 2014 e 2016 de maneira mais detalhada, para que possam ser verificados possíveis erros de processamento que justifiquem o aumento do volume do reservatório ou para garantir que realmente tenha ocorrido o processo de erosão.

2.3.4.4 Considerações finais

As análises do volume de rejeito defluente de Fundão em conjunto com a análise de volumes retidos nos reservatórios potencialmente permitirão a verificação da estimativa de volume liberado. Até o momento, mesmo métodos diferentes de avaliação resultaram em valores de assoreamento próximos. O total de rejeito liberado pelo desastre foi estimado em $44,1 \pm 0,3 \text{ hm}^3$. Em um cenário otimista, com a análise integral dos volumes, aliado com um balanço de massa, consiga se definir a quantidade de rejeito distribuída entres os trechos 1, 2 e 3.

2.3.5 ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Nesta seção é analisado o transporte de sedimentos na bacia do rio Doce. Esta análise foi dividida em duas etapas: a primeira delas envolveu a construção e consistência de curvas-chave de sedimentos; e a segunda comparou múltiplas fontes de dados, sendo elas a concentração de sedimentos em suspensão (CSS), turbidez, sólidos suspensos totais (SST), reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho (RefVER) e do infravermelho próximo (RefIVP). Ambas comparam as diferenças entre o período anterior e posterior ao desastre. A primeira análise compara a diferença entre **a descarga de sedimentos (fluxo de sedimentos)** e a segunda a **concentração de sólidos na água**.

2.3.5.1 Revisão bibliográfica

Todo o material bibliográfico utilizado na presente análise está contemplado em Institutos Lactec (2017).

2.3.5.2 Materiais e Métodos

2.3.5.2.1 *Análise da Descarga Sólida*

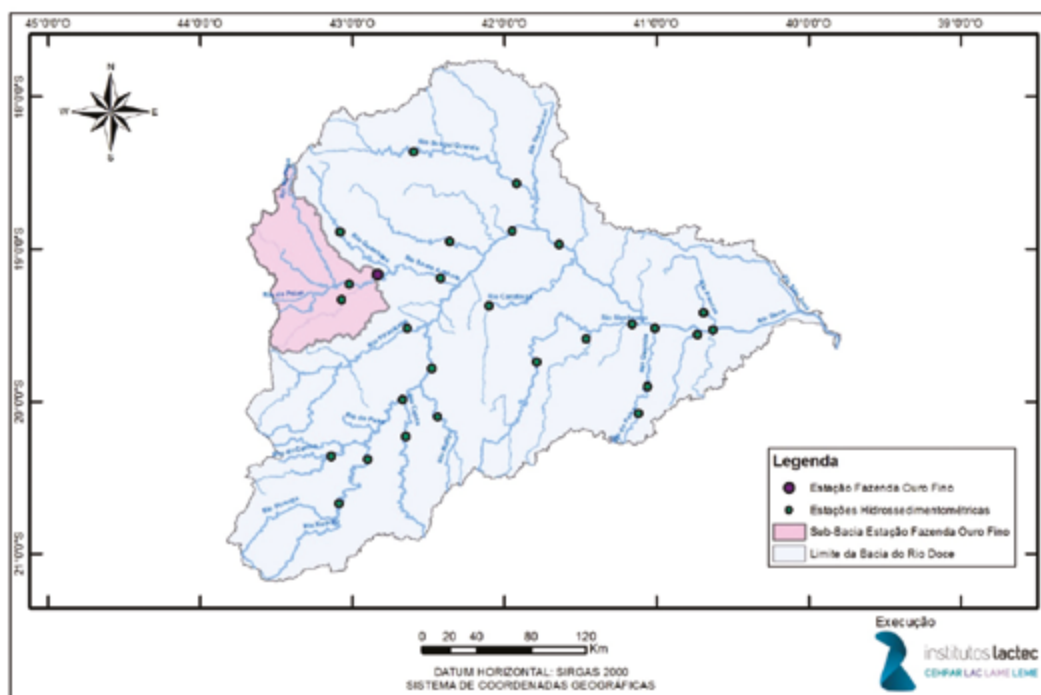
São diversas as instituições responsáveis pela coleta de dados de vazão e sedimentos na bacia hidrográfica do rio Doce, mas podemos citar como fontes mais relevantes, dada a sistematização e a quantidade de levantamentos, aquelas representadas pelo IGAM, IEMA, CPRM, ANA e Fundação RENOVA. No presente trabalho será considerado o conjunto de informações levantadas por estas instituições, exceto os dados da Fundação RENOVA, os quais serão futuramente avaliados.

Os dados do pós-desastre levantados, especialmente, pelas instituições IGAM, IEMA, CPRM e ANA serão utilizados para a comparação com os resultados de linha base. Esta análise corresponde a uma extensa e contínua atividade, que será realizada ao longo do desenvolvimento do projeto.

2.3.5.2.1 .1 Análise da metodologia de extrapolação da curva chave de sedimentos

Para a avaliação da metodologia de extrapolação da curva de descarga sólida, foi realizada uma análise dos dados de concentração da estação Fazenda Ouro Fino (56776500). Esse posto foi selecionado por ser o único da bacia que apresentava medições diárias de concentração de sedimentos. Ressalta-se que, apesar de terem sido realizadas medições pontuais de concentração na seção dessa estação (e não integralizadas, o que seria o ideal), estas medições foram adequadas para se confirmar a metodologia de extrapolação. Além de ilustrar outras estações utilizadas nessa análise, a Figura 53 aponta a localização da estação Fazenda Ouro Fino (56776500) e destaca a sua sub-bacia.

Figura 53 – Localização da estação Fazenda Ouro Fino.



Para esse estudo, foram utilizados dados de vazões sólidas e líquidas específicas (por km^2) entre os anos de 2002 e 2013. A partir disso, duas curvas de tendência foram geradas em um gráfico, uma com os dados totais de vazões do período e outra com vazões líquidas (l/s/km^2) menores ou iguais a um quarto da vazão máxima e suas correspondentes vazões sólidas (t/ano/km^2). Isso foi adotado pelo fato dos dados de concentração medidos esporadicamente para as outras estações da bacia, na maioria das vezes, se relacionavam às vazões correspondentes até 25% da máxima no período.

2.3.5.2.1.2 Análise das alterações na descarga sólida

Para a análise sobre as alterações no transporte de sedimentos após o rompimento, foram realizados dois tipos diferentes de comparação. Inicialmente, utilizaram-se as estações que possuíam medições completas de sedimentos e vazões (estações da ANA), as quais já haviam sido utilizadas na linha-base, apenas adicionando dados pós-desastre.

Em seguida, dados de concentração obtidos a partir de medições pontuais provenientes de estações do IGAM/MG e IEMA/ES foram utilizados em conjunto com vazões líquidas obtidas de estações vizinhas a elas (estações da ANA). As metodologias detalhadas estão dispostas a seguir.

Estações com medições completas de sedimentos e vazões (Estações da ANA)

A Tabela 32 e a Figura 54 apresentam a rede de monitoramento selecionada. Na tabela estão indicados os períodos utilizados, selecionados segundo o critério de adotar um período base comum – 1998 a 2017 (dados mais recentes).

Apesar de todas as estações representadas na Tabela 32 terem sido usadas como base para análise e conclusões, apenas algumas foram expostas (gráficos) no corpo do texto. O restante se encontra no APÊNDICE A, intitulado *Análise das alterações no transporte de sedimentos*.

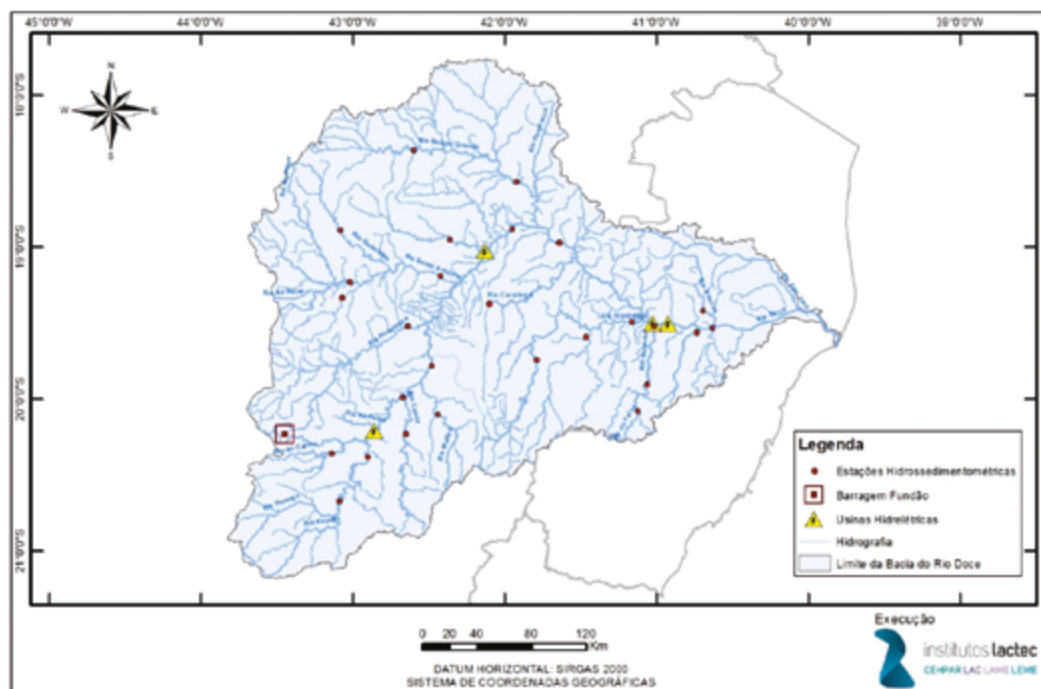
Tabela 32 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas (ANA).

Código	Nome	Rio	Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude	1ª medição	Última medição
56075000	Porto Firme	Piranga	4260	-20,67	-43,09	26/04/1998	11/07/2017
56110005	Ponte Nova Jusante	Piranga	6230	-20,38	-42,9	29/01/1998	19/05/2017
56335001	Acaiaca Jusante	do Carmo	1370	-20,36	-43,14	29/01/1998	13/07/2017
56415000	Rio Casca	Casca	2030	-20,23	-42,65	30/04/1998	19/07/2017
56425000	Fazenda Cachoeira d'Antas	Doce	10100	-19,99	-42,67	21/08/1998	11/04/2017
56484998	Raul Soares Montante	Matipó	1350	-20,1	-42,44	02/05/1998	18/07/2017
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	Doce	15900	-19,78	-42,48	20/04/1999	07/04/2017
56696000	Mario de Carvalho	Piracicaba	5270	-19,52	-42,64	28/09/1999	07/07/2017
56775000	Ferros	Santo Antônio	4090	-19,23	-43,02	30/03/1998	11/07/2017
56787000	Fazenda Barraca	do Tanque	1260	-19,33	-43,07	30/03/1998	20/07/2017
56800000	Senhora do Porto	Guanhães	1520	-18,89	-43,08	26/03/1998	17/07/2017
56825000	Naque Velho	Santo Antônio	10200	-19,19	-42,42	04/04/1998	10/07/2017
56846000	Porto Santa Rita	Corrente Grande	1970	-18,95	-42,36	08/07/1998	11/07/2017
56850000	Governador Valadares	Doce	40500	-18,88	-41,95	14/12/1998	23/08/2017
56860000	São Pedro do Suaçuí	Suaçuí Grande	2570	-18,36	-42,6	31/03/1998	13/07/2017
56891900	Vila Matias Montante	Suaçuí Grande	9770	-18,57	-41,92	02/04/1998	12/07/2017
56920000	Tumiritinga	Doce	55100	-18,97	-41,64	22/06/2001	22/08/2017
56935000	Dom Cavati	Caratinga	775	-19,37	-42,1	20/10/1998	08/08/2017
56976000	Fazenda Bragança	Manhuaçu	2260	-19,74	-41,79	17/10/1998	14/07/2017
56989400	Assarai-Montante	José Pedro	3190	-19,59	-41,46	15/10/1998	09/08/2017
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	Manhuaçu	8720	-19,49	-41,16	05/04/1998	13/12/2016
56990990	Afonso Cláudio Montante	Guandu	435	-20,08	-41,12	24/03/1998	12/07/2017
56991500	Laranja da Terra	Guandu	1330	-19,9	-41,06	25/03/1998	11/07/2017
56992000	Baixo Guandu	Guandu	2130	-19,52	-41,01	26/03/1998	18/08/2017
56993551	Jusante Córrego da Piaba	Santa Joana	893	-19,56	-40,73	27/03/1998	16/08/2017
56994500	Colatina	Doce	76400	-19,53	-40,63	27/03/1998	14/08/2017
56995500	Ponte do Pancas	Pancas	920	-19,42	-40,69	30/03/1998	10/08/2017

Verifica-se pela tabela que, apenas para três estações entre as selecionadas, o período disponível inicia pouco depois de 1998 (1999 e 2001) e finaliza em 2017. As estações foram utilizadas para determinar vazões sólidas em suspensão e totais.

Conforme mencionado anteriormente, em Institutos Lactec (2017), foi apresentada uma análise comparando diversas metodologias aplicadas em algumas estações fluviométricas situadas na bacia do rio Doce. A análise desses resultados auxiliou na escolha do método de Colby para determinação da descarga sólida total, visto que o presente estudo dispõe de informações confiáveis apenas para tal aplicação.

Figura 54 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométrica.



Para os locais indicados na Tabela 32, foram obtidas as curvas-chave sólidas considerando a estimativa das descargas sólidas totais pelo método de Colby e das descargas sólidas em suspensão (baseadas apenas nos dados de concentração) para o período comum adotado.

O objetivo principal foi realizar uma comparação, ainda que com poucos dados medidos após o acontecimento, dos dados de vazões sólidas (totais e suspensas) entre os períodos pré e pós-rompimento da barragem de Fundão. Espera-se com isso começar a análise do real impacto resultante sobre a hidrologia da bacia do rio Doce.

Após a obtenção dos dados mais recentes para cada estação no *site* da HidroWeb da ANA, foram comparados as curvas-chave de sedimento e os dados mais recentes para cada uma, separando devidamente os períodos analisados.

Estações com medições pontuais de sedimentos (estações do IGAM e IEMA)

Para essa análise, inicialmente, foram levantados dados de concentração de sedimentos obtidos a partir da realização de medições pontuais nas estações do IGAM e IEMA. Em seguida, movido pelo fato de que as vazões líquidas não são medidas nessas estações, foram buscadas estações vizinhas que possuísem tais dados (estações da ANA).

Visto que as estações correlacionadas, algumas vezes, não possuíam a mesma área de drenagem, notou-se a necessidade de adotar um fator de correção linear entre elas para que se pudesse obter uma vazão líquida corrigida para as estações do IGAM e IEMA.

A Tabela 33 apresenta a rede de monitoramento escolhida, bem como a sua vizinha correspondente para obtenção das vazões líquidas e o fator de correção adotado por uma relação linear (divisão entre as áreas de drenagem).

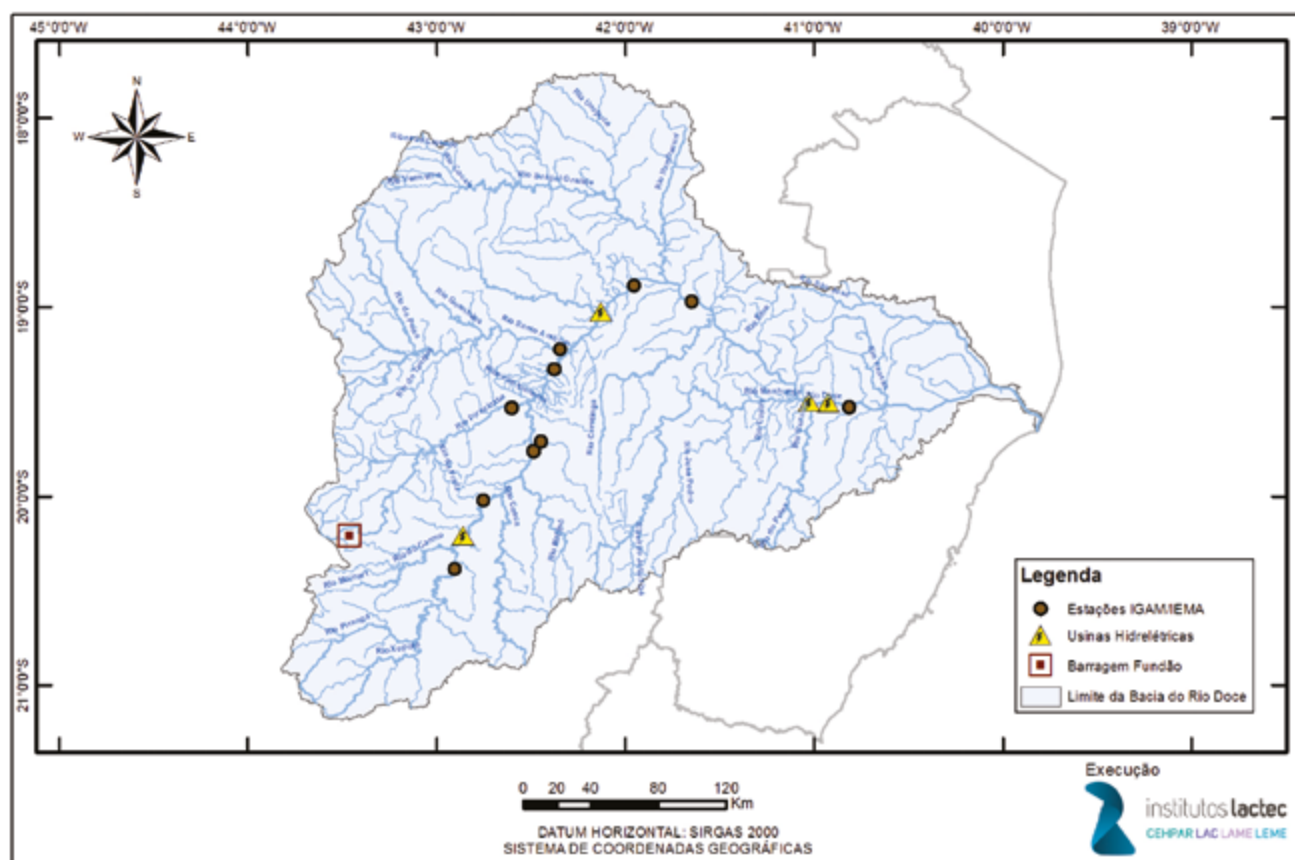
Apesar de todas as estações representadas na Tabela 33 terem sido usadas como base para análise e conclusões, apenas algumas foram expostas (gráficos) no corpo do texto, o restante se encontra no APÊNDICE A, intitulado *Análise das alterações no transporte de sedimentos*.

Tabela 33 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas (IGAM/IEMA).

Código	Órgão responsável	Rio	Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude	Código Estação ANA*	Fator de correção
RD013	IGAM	Rio Piranga	6230	-20,3835	-42,9026	56110005	1
RD019	IGAM	Rio Doce	12600	-20,0221	-42,7526	56425000	1,24752
RD023	IGAM	Rio Doce	16100	-19,7602	-42,4854	56539000	1,01258
RD073	IGAM	Ribeirão Sacramento	840	-19,7094	-42,4458	56570000	1
RD034	IGAM	Rio Piracicaba	5380	-19,5305	-42,6029	566969000	1,02087
RD033	IGAM	Rio Doce	24200	-19,3277	-42,3760	56719998	1
RD039	IGAM	Rio Santo Antônio	10400	-19,2241	-42,3432	56825000	1,01961
RD044	IGAM	Rio Doce	40300	-18,8838	-41,9532	56850000	0,99506
RD053	IGAM	Rio Doce	55100	-18,9699	-41,6473	56920000	1
RDC1E010	IEMA	Rio Doce	74200	-19,5281	-40,8128	56994500	0,97889

A Figura 55 aponta a localização das estações do IGAM/IEMA. As estações correspondentes da ANA não foram colocadas no mapa por uma questão visual, entretanto, na tabela é possível perceber pelas semelhanças entre coordenadas e áreas de drenagem que elas se encontram realmente próximas.

Figura 55 – Estações IGAM e IEMA.



Por fim, o processo adotado para a comparação foi similar ao realizado com as estações da ANA apresentado no item anterior, entretanto, como as medições foram pontuais, não foi possível a aplicação do método de Colby nesse caso. Para a comparação final, foram consideradas apenas as vazões sólidas em suspensão ($t/ano/km^2$).

Apesar disso, um número maior de medições foi realizado nessas estações e, consequentemente, houve mais dados levantados, tornando possível separá-los em diferentes períodos (Tabela 34).

Tabela 34 – Períodos adotados para a análise das estações IGAM e IEMA.

Período	Abrangência	
	Início	Final
Pré-rompimento	*	*
Pós-rompimento chuvoso	Nov/15	
Pós-rompimento chuvoso	Dez/15	Mar/16
Pós-rompimento seco	Abr/16	Set/16
Pós-rompimento chuvoso	Out/16	Mar/17

Nota-se que, para o período pré-rompimento, cada estação tem uma data de primeira e última medições diferentes, sendo esta sempre perto da data do rompimento. A decisão de separar o mês de novembro do primeiro período chuvoso se tornou necessário, pois os dados medidos nesse mês do evento foram extremamente maiores. De resto, os períodos secos se estendem de abril a setembro e os chuvosos de outubro a março.

2.3.5.2.2 Análise da Concentração de Sólidos na Água

Ná análise de concentração de sólidos foram utilizados cinco conjuntos de dados fornecendo informações acerca da concentração de sedimentos na bacia do rio Doce e com diferentes características, acurácia e detalhamento espaço-temporal. Os conjuntos de dados são: CSS, turbidez, SSTs, RefVER) e RefIVP. Para cada conjunto de dados, foram selecionadas tanto estações no caminho da onda de rejeitos quanto a montante no rio principal e, também, em alguns afluentes. Isso foi realizado para verificar se possíveis tendências eram resultantes do desastre ou um comportamento comum da bacia para o período em análise. Para cada conjunto de dados, calculou-se a anomalia padrão (Equação 1) e a anomalia removendo a sazonalidade (Equação 2) da série histórica de cada posto.

$$\Delta x = \frac{X - \bar{X}}{\sigma} \quad (2)$$

$$\Delta xm = \frac{X - \bar{X}_k}{\sigma_k} \quad (2)$$

em que Δx é a razão entre a variação do valor medido (X) em relação à média histórica ($\bar{X}$) e ao desvio padrão da série (σ); e Δxm é a razão entre a variação do valor medido em relação à média mensal ($\bar{X}_k$) em que aquele valor ocorre e o desvio padrão (σ_k) dos valores da série para cada mês. k varia de 1 até 12 e corresponde a cada mês do ano. Destaca-se que tanto as médias quanto o desvio foram calculados considerando os dados das séries para o período que antecede o desastre.

Os dados de CSS foram adquiridos do Sistema de Informações hidrológicas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>), disponibilizados pela ANA e através dos relatórios 01, 03 e 04 do monitoramento especial da bacia do rio Doce, realizados pela CPRM (2015, 2016a, 2016b). As sete estações sedimentométricas utilizadas na análise e o número de medições em cada uma delas são apresentados na Tabela 35 e na Figura 56.

Tabela 35 – Estações de monitoramento sedimentométrico na bacia do rio Doce operadas por ANA e CPRM.

Código	Rio	Latitude	Longitude	1ª medição	Última medição	nº medições	Medições/ano
56075000	Piranga	-20,67	-43,09	26/04/1998	11/07/2017	50	5.6
56425000	Doce	-19,99	-42,67	21/08/1998	11/04/2017	51	5.7
56539000	Doce	-19,78	-42,48	20/04/1999	18/02/2017	52	6.5
56696000	Piracicaba	-19,52	-42,64	21/02/1988	07/07/2017	70	3.7
56850000	Doce	-18,88	-41,95	14/12/1998	23/08/2017	36	4.0
56920000	Doce	-18,97	-41,64	26/03/1998	18/08/2017	55	6.1
56994500	Doce	-19,53	-40,63	09/12/1976	14/08/2017	93	2.3

Os dados de turbidez e SSTs foram obtidos do portal de informações sobre recursos hídricos do estado de Minas Gerais, o InfoHidro (<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/>), incluindo dados do monitoramento rotineiro, como do monitoramento emergencial no rio Doce; da planilha de dados consolidada do monitoramento especial do rio Doce disponibilizada pela ANA (<http://www2.ana.gov.br/Paginas/Riodoce/default.aspx>); e do IEMA, via solicitação por correio eletrônico. As vinte estações de qualidade de água utilizadas e o número de medições em cada uma delas são apresentados na Tabela 36 e na Figura 57.

Tabela 36 – Estações de monitoramento de qualidade de água na bacia do rio Doce operadas pelo IGAM e pelo IEMA.

Código	Rio	Latitude	Longitude	1ª medição	Última medição	nº medições turbidez	nº medições SST	Medições/ano
RD001	Piranga	-20.69	-43.3	22/07/1997	09/01/2017	76	76	3.8
RD013	Piranga	-20.38	-42.9	23/07/1997	21/02/2017	97	96	4.9
RD019	Doce	-20.02	-42.75	02/09/1997	21/02/2017	154	142	7.7
RD032	Piracicaba	-19.62	-42.8	16/02/2000	12/01/2017	67	67	3.9
RD033	Doce	-19.33	-42.38	30/07/1997	22/02/2017	155	140	7.8
RD035	Doce	-19.49	-42.49	05/08/1997	21/02/2017	143	135	7.2
RD039	Santo Antônio	-19.22	-42.34	30/07/1997	18/01/2017	76	76	3.8
RD044	Doce	-18.88	-41.95	21/02/2000	22/02/2017	142	132	8.4
RD045	Doce	-18.86	-41.83	30/07/1997	22/02/2017	150	140	7.5
RD053	Doce	-18.97	-41.65	04/09/1997	23/02/2017	145	135	7.3
RD058	Doce	-19.17	-41.46	22/02/2000	23/02/2017	138	129	8.1
RD059	Doce	-19.35	-41.24	04/09/1997	23/02/2017	147	138	7.4
RD067	Doce	-19.51	-41.01	25/03/1998	23/02/2017	145	140	7.6
RD071	do Carmo	-20.28	-43.03	01/10/2008	20/02/2017	71	64	7.9
RD072	Doce	-19.25	-42.89	01/10/2008	21/02/2017	111	102	12.3
RD083	Doce	-19.1	-42.15	08/07/2008	22/02/2017	111	102	12.3
RD089	Suaçuí Grande	-18.85	-41.78	10/07/2008	18/01/2017	33	33	3.7
RD110*	Doce	-19.53	-40.81	28/06/2007	19/07/2016	73	-	8.1
RD115*	Doce	-19.54	-40.65	28/06/2007	31/01/2017	62	-	6.2
RD130*	Doce	-19.43	-39.94	13/03/2007	16/01/2017	80	-	8.0

Nota: * Se referem, respectivamente, às estações do IEMA RDC1E010, RDC1D015 e RDC1E030.

Figura 56 – Estações sedimentométricas selecionadas para análise das concentrações de sedimentos em suspensão.

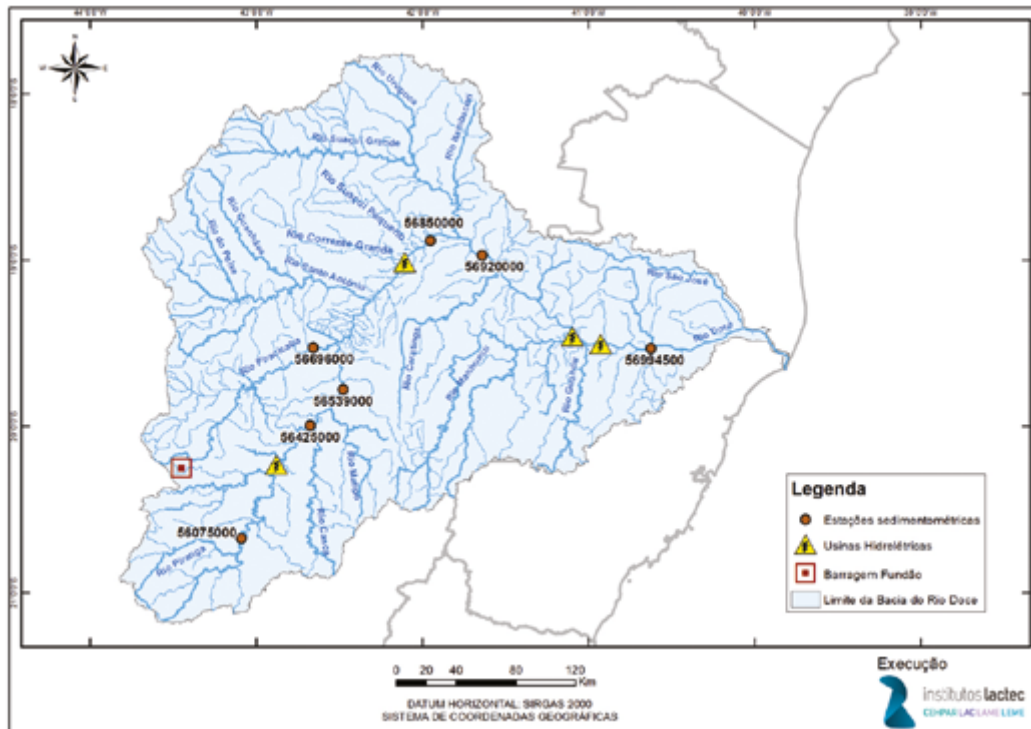
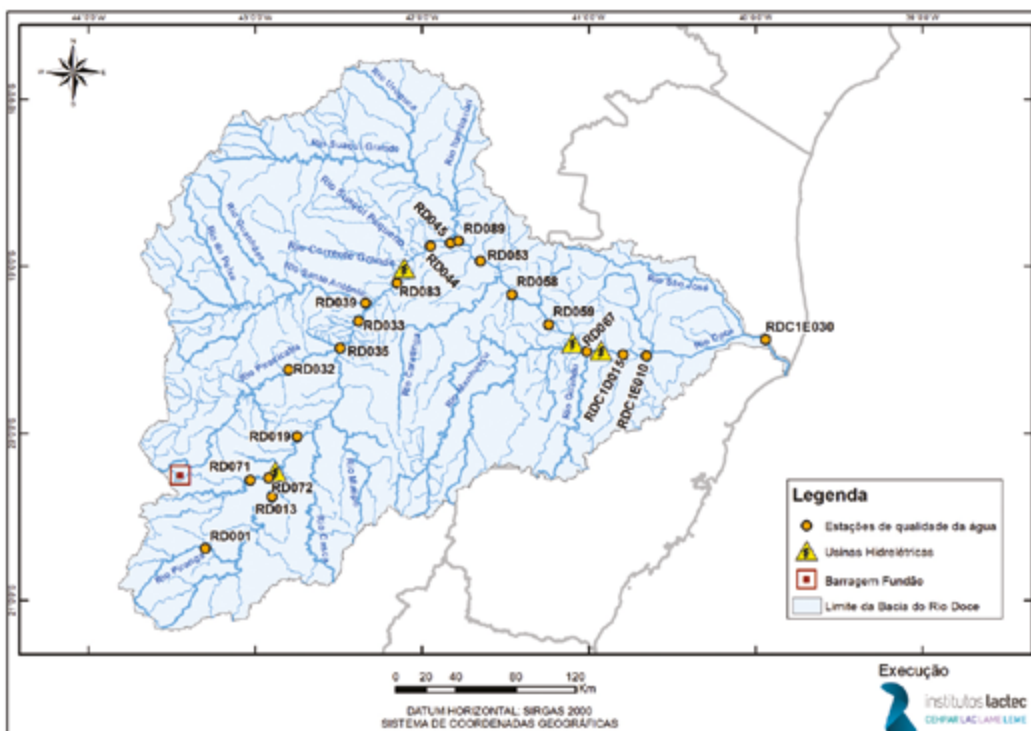


Figura 57 – Estações de qualidade da água selecionadas para análise da turbidez e dos sólidos suspensos totais.

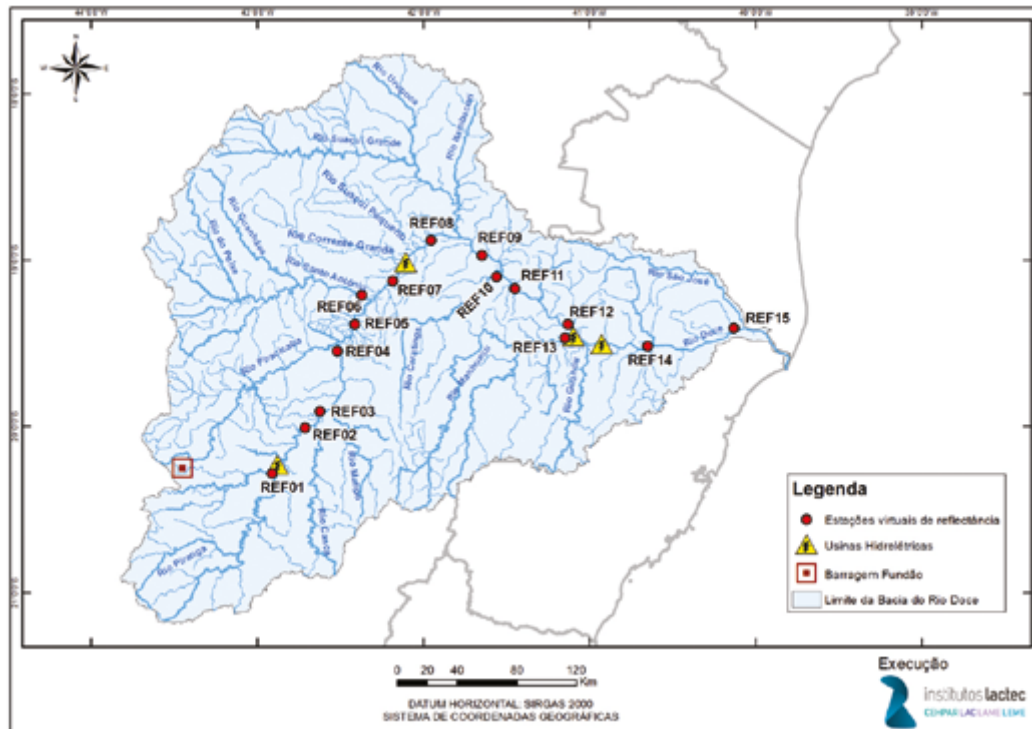


Os dados de reflectância de superfície foram adquiridos a partir das imagens dos satélites Landsat 5 (1995-2011) e Landsat 8 (2013-2017), com resolução espacial de 30 m, repetição temporal a cada 16 dias, e que já possuíam correções atmosféricas satisfatórias (VERMOTE et al., 2016). As imagens foram adquiridas da base de dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) e extração da reflectância foi realizada de forma automática, seguindo a metodologia apresentada em Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017). As imagens que cobrem a área de interesse apresentam quatro localizações do tipo órbita/ponto: 216/073, 216/074, 217/073 e 217/074. As estações virtuais criadas, bem como o número de dados alcançados em cada uma delas, são apresentados na Tabela 37 e na Figura 58.

Tabela 37 – Estações virtuais de monitoramento de reflectância espectral na faixa do vermelho e infravermelho com dados dos satélites Landsat 5 e 8, com *proxy* da concentração de sedimentos nos rios da bacia do rio Doce.

Código	Rio	Latitude	Longitude	1ª medição	Última medição	nº medições	Medições/ano
REF01	Doce	-20.28	-42.91	13/05/1995	14/09/2017	201	9.1
REF02	Doce	-20.00	-42.69	27/04/1995	14/09/2017	211	9.6
REF03	Doce	-19.92	-42.61	27/04/1995	16/10/2017	211	9.6
REF04	Doce	-19.57	-42.50	29/05/1995	17/11/2017	174	7.9
REF05	Doce	-19.34	-42.41	27/04/1995	17/11/2017	199	9.0
REF06	Santo Antônio	-19.23	-42.35	27/04/1995	17/11/2017	201	9.1
REF07	Doce	-19.14	-42.19	27/04/1995	17/11/2017	187	8.5
REF08	Doce	-18.89	-41.96	27/04/1995	17/11/2017	194	8.8
REF09	Doce	-18.97	-41.66	19/03/1995	09/10/2017	202	9.2
REF10	Caratinga	-19.07	-41.55	19/03/1995	07/09/2017	179	8.1
REF11	Doce	-19.17	-41.45	19/03/1995	09/10/2017	198	9.0
REF12	Doce	-19.43	-41.10	19/03/1995	09/10/2017	215	9.8
REF13	Manhuaçu	-19.49	-41.11	19/03/1995	25/10/2017	209	9.5
REF14	Doce	-19.51	-40.61	19/03/1995	26/11/2017	231	10.5
REF15	Doce	-19.42	-40.08	19/03/1995	26/11/2017	214	9.7

Figura 58 – Estações virtuais selecionadas para análise das reflectâncias espectrais de superfície na faixa do vermelho e do infravermelho.



2.3.5.2.2.1 Análise Estatística

Nesta análise foram utilizados dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS), turbidez, sólidos suspensos totais (SST) e reflectância de superfície na faixa do vermelho (RefVER) e do infravermelho próximo (RefIVP). Considerou-se que as médias e variâncias de cada estação de cada conjunto de dados não possuem viés. Foram utilizados os testes de hipóteses *t de student* para as médias e F de Snedecor para as variâncias.

O comportamento dessas variáveis é estudado usando as séries de dados, análise crítica e testes de hipóteses. Os testes de hipóteses são testes estatísticos muito utilizados na área de engenharia para a tomada de decisões, geralmente quando essa envolve certo grau de subjetividade, e facilitar a comunicação entre os diferentes atores envolvidos diante de um determinado problema. O objetivo dos testes é que diferentes tomadores de decisão cheguem a mesma conclusão diante de um determinado resultado.

Os testes de hipóteses existentes podem ser paramétricos ou não paramétricos, e podem ser usados para identificar diferenças significativas entre as médias ou variâncias das variáveis analisadas. De forma sucinta, os testes consistem em adotar uma hipótese, chamada de hipótese nula (H_0), que sirva como regra para a tomada de decisões. Além da hipótese nula, adota-se um nível de significância

α , que é a probabilidade de se rejeitar incorretamente a hipótese nula quando ela é verdadeira. Rejeitar H_0 implica em aceitar a hipótese alternativa (H_1) para aquele nível de significância sendo, portanto, mutuamente exclusivas.

Nesse sentido, a presente etapa de trabalho teve por objetivo verificar, estatisticamente, quais pontos de monitoramento apresentaram uma alteração significativa nos seus valores medidos antes e após o rompimento da barragem de Fundão. Para isso, foram escolhidos dois testes de hipóteses paramétricos, um para as médias das amostras e outro para as variâncias.

2.3.5.2.2.1.1 *Teste t de student para as médias*

O teste t é um teste para comparar médias amostrais que utiliza a distribuição *t de Student* (BENJAMIN; CORNELL, 1970). O teste supõe que existe uma média amostral $\bar{X}$ que pode ser considerada equivalente à média verdadeira μ de uma série de dados. No entanto, geralmente não se conhece verdadeiramente μ nem sua variância σ^2 . Assim, utiliza-se os dados da amostra para estimar μ e σ (desvio padrão) de uma série e então calcular a variável de teste t (Equação 1) que irá indicar se, estatisticamente, as médias podem ser consideradas iguais para determinado nível de significância.

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (1)$$

em que t é a variável calculada da distribuição *t de Student*; que $\bar{X}$ é a média amostral; μ é a média verdadeira da série histórica; σ é o desvio padrão verdadeiro da amostra e n é o número de registros da amostra.

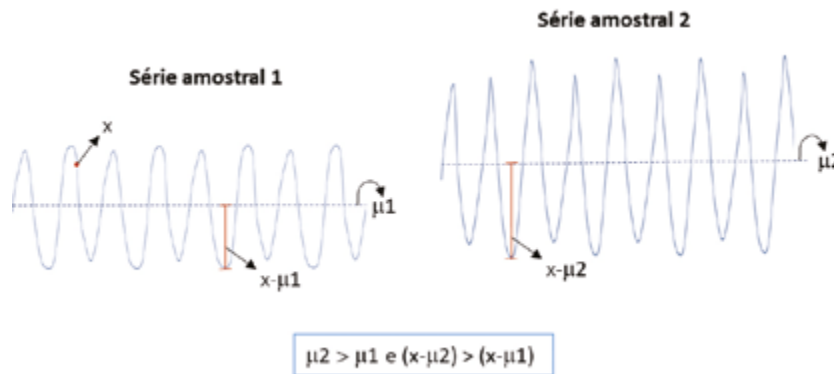
O desvio padrão é calculado como a raiz quadrada da variância σ^2 . A variância pode ser entendida como uma medida de dispersão que mostra o quão distante os valores de um conjunto de dados está do valor médio da amostra. Quanto maior a variância, mais distantes da média esses valores se encontram. Matematicamente pode ser calculada a partir da Equação 2.

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + (x_3 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n - 1} \quad (2)$$

em σ^2 é a variância amostral da série; $x_1, x_2, \dots, x_n$ são os valores observados da amostra; μ é a média amostral da série; n é o número de registros da amostra.

Para facilitar a compreensão sobre as medidas de tendência central (média) e de dispersão da amostra (variância), apresenta-se a Figura 59, que ilustra o comportamento de duas séries de dados de uma mesma variável “x”. Pela Figura 59, a média e variância da série amostral 1 são menores que da série amostral 2. Os testes de hipóteses podem ser utilizados, por exemplo, para confirmar se, estatisticamente, essas séries possuem médias e variâncias iguais.

Figura 59 – Séries amostrais de uma mesma variável “x”, com diferentes médias e variâncias.



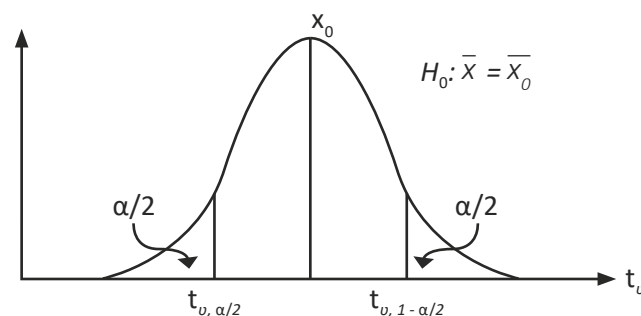
Após o cálculo da variável de teste *t de Student*, calcula-se o valor teórico da mesma a partir de tabelas que podem ser facilmente encontradas na literatura. Para encontrar o valor teórico de *t*, adota-se um nível de significância α e os graus de liberdade da amostra, que pode ser estimado a partir da Equação 3.

$$v = n - 1 \quad (3)$$

em que v são os graus de liberdade da amostra e n é o número de registro da amostra.

Na Figura 60 se apresenta uma ilustração do *t de Student* para o caso da H_0 considerar que duas médias são iguais, ou seja, $\bar{X} = \bar{X}_0$. Observa-se, que quando o valor de *t* calculado se encontrar nas regiões externas da figura, ou seja, quando *t* for maior que $t_{v, 1-\alpha/2}$ ou menor que $t_{v, \alpha/2}$, estatisticamente a hipótese nula deve ser rejeitada ao nível de significância α .

Figura 60 – Ilustração do teste *t* de Student para médias.



2.3.5.2.2.1 Teste F de Snedecor para as variâncias

O teste estatístico F de Snedecor é um teste de hipótese que envolve duas populações em que o teste busca verificar a igualdade de suas variâncias (BENJAMIN; CORNELL, 1970). Como as variâncias verdadeiras são desconhecidas, calcula-se as variâncias de duas amostras e a partir da razão entre elas, calcula-se a variável de teste F (Equação 4).

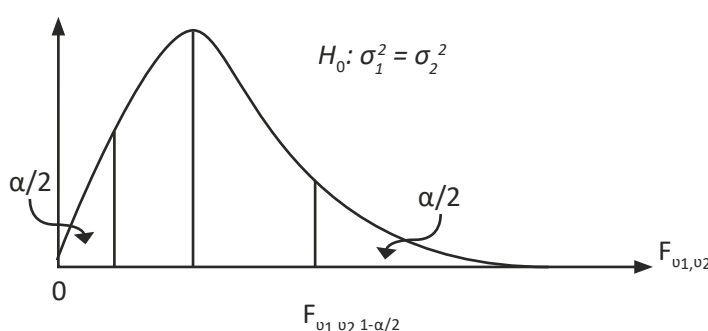
$$F = \frac{\max(\sigma_1^2, \sigma_2^2)}{\min(\sigma_1^2, \sigma_2^2)} \quad (4)$$

em que σ_1^2 é a variância da amostra 1; σ_2^2 a variância da amostra 2 e *F* a variável de teste calculada.

Após o cálculo da variável F, calcula-se o F teórico, que pode ser estimado a partir de tabelas que podem ser encontradas na literatura. Para se encontrar o valor de F teórico, precisa-se definir um nível de significância α e calcular os graus de liberdade de cada amostra, que podem estimados da mesma forma que no teste *t de Student* para as médias, utilizando a Equação 3, em que v são os graus de liberdade da amostra e n é o número de registro da amostra.

Na Figura 61 se apresenta uma ilustração do teste F de Snedecor para o caso da H_0 considerar que duas variâncias são iguais, ou seja, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$. Observa-se, que quando o valor de F calculado se encontrar nas regiões externas da figura, ou seja, quando F calculado for maior que $F_{v_1, v_2, 1-\alpha/2}$ ou menor que $F_{v_1, v_2, \alpha/2}$, estatisticamente a hipótese nula deve ser rejeitada ao nível de significância α .

Figura 61 – Ilustração do teste F de Snedecor.



2.3.5.3 Aplicação dos testes

Os testes *t de student* e F de Snedecor foram aplicados para os dados das estações apresentadas no capítulo anterior.

Para o teste *t*, adotou-se o valor amostral $\bar{X}$ como sendo a média dos dados observados após o rompimento da barragem de Fundão. Como os valores da μ e σ são desconhecidos, esses foram estimados a partir dos dados observados que antecedem o rompimento da barragem de Fundão. A H_0 foi definida como “As médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão são iguais”, ou seja, $\mu = \bar{X}$ e a H_1 foi definida como “As médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão são diferentes”, ou seja $\mu \neq \bar{X}$. Nesse relatório, visando uma abordagem mais conservadora, adotou-se $\alpha = 1\%$.

Para o teste F a variância σ_1^2 foi calculada considerando os dados antes do rompimento da barragem de Fundão e a variância σ_2^2 foi calculada com os dados registrados após o rompimento da barragem de Fundão. A H_0 foi definida como “As variâncias antes e após o rompimento da barragem de Fundão são iguais”, ou seja, $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ e a H_1 foi definida como “As médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão são diferentes”, ou seja $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$. Para esse teste, também se adotou $\alpha = 1\%$.

Além desses dois testes, também foram calculadas as diferenças relativas percentuais (Equação 5) das médias de cada estação. Os resultados encontrados são apresentados em tabelas e mapas para cada conjunto de dados a fim de facilitar a compreensão dos mesmos.

$$Diff (\%) = 100 * \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \quad (5)$$

em que *Diff* é a diferença relativa percentual das médias; μ_1 é a média antes do rompimento da barragem de Fundão; e μ_2 é a média após o rompimento da barragem de Fundão.

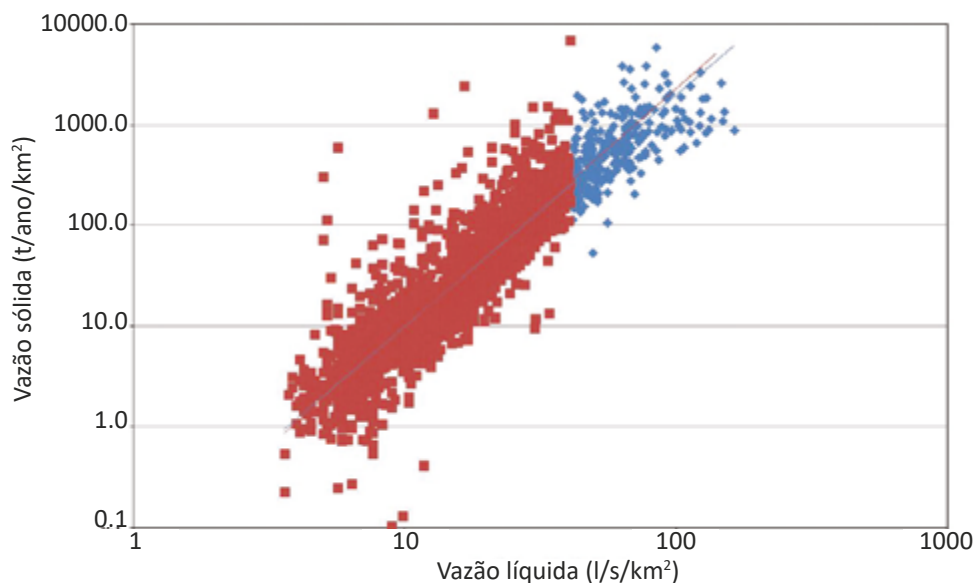
2.3.5.4 Resultados

2.3.5.4.1 Verificação da extrapolação da curva chave de sedimentos

O objetivo da análise apresentada nesse item é verificar se a tendência da descarga sólida se altera durante o período de vazões altas. Assim, foi comparada a reta de tendência em dois conjuntos de dados (i) contendo todos os dados da estação e outra (ii) excluindo os maiores valores de vazões líquidas mantendo 75% dos dados.

Afim de se ter uma informação local e completa foi escolhida a estação com a série histórica mais completa. A estação com base na Fazenda Ouro Fino foi a estação que atendeu este requisito. A vazões sólidas em função das vazões líquidas (curva chave de sedimentos) considerando duas faixas de vazão líquida: até 25% da máxima vazão observada (vermelho) e para toda a faixa de vazões (azul) são apresentadas na Figura 62. Para cada grupo de pontos foram construídas as regressões lineares. Comparando as linhas de tendência de ambas as regressões, percebe-se que a diferença entre elas é muito pequena, confirmando que o método de extrapolação adotado no presente estudo e estendido para as outras estações é adequado.

Figura 62 – Comparação entre as linhas de tendência na estação Fazenda Ouro Fino (56776500).



Nota: Os pontos em vermelho são as vazões que correspondem até 25% da vazão máxima.
Os pontos azuis representam todos os dados da estação.
As linhas são o resultado da regressão linear para cada série.

2.3.5.4.1. Análise da Descarga Sólida

2.3.5.4.2.1 Estações com medições completas de sedimentos e vazões (estações da ANA)

Inicialmente, considerando-se apenas as estações localizadas em afluentes do rio Doce, é possível chegar a duas conclusões principais. Primeiro, analisando as três estações localizadas em afluentes que desaguam a montante da usina hidrelétrica Risoleta Neves (Candonga) – Porto Firme (56075000 – Rio Piranga), Ponte Nova Jusante (56110005 – Rio Piranga) e Acaiaca Jusante (56335001 – Rio do Carmo) – as quais, teoricamente, seriam os casos mais críticos entre os afluentes por estarem mais próximas do local do desastre, não apresentaram alterações significativas sobre as vazões sólidas analisadas. A Figura 63, Figura 64 e Figura 65 apresentam a comparação dos dados posteriores ao rompimento com as curvas-chave geradas na linha-base respectivamente para as estações Porto Firme, Ponte Nova Jusante e Acaiaca Jusante.

Isso se deve, provavelmente, ao fato de que as estações localizadas nos afluentes estão situadas a uma considerável distância da sua exutória no rio Doce, ou seja, o remanso não teria magnitude suficiente para tal alcance.

Apesar disso, percebe-se uma leve alta na estação Ponte Nova Jusante (Figura 64), o que pode ter sido alterado por algum fator pontual, que não o rompimento da barragem, mas por falta de dados não se pode afirmar que fator fora este.

Cabe ressaltar que a quantidade de medições realizadas pós-evento não era suficiente para se gerar uma nova curva-chave.

Figura 63 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Porto Firme (560750000).

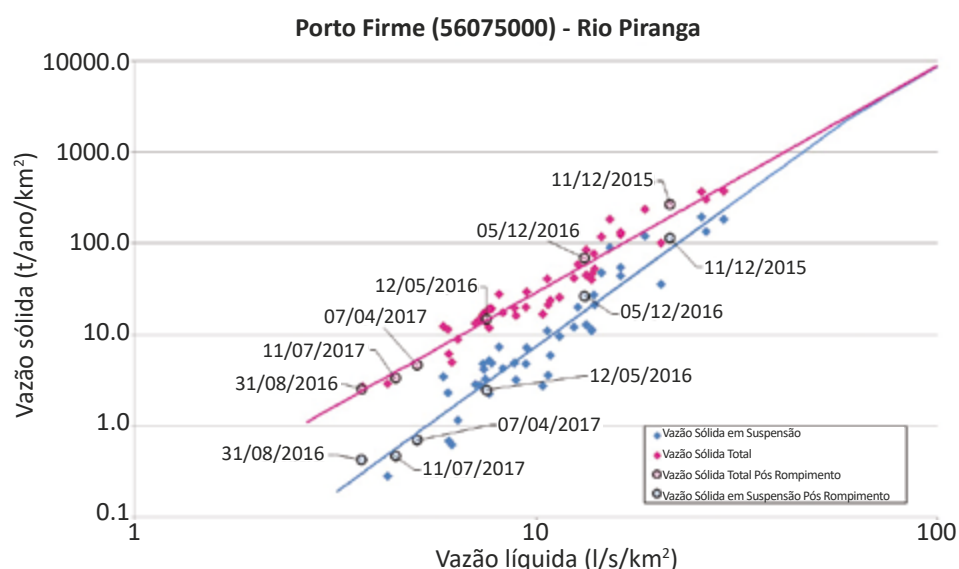


Figura 64 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Ponte Nova Jusante (56110005).

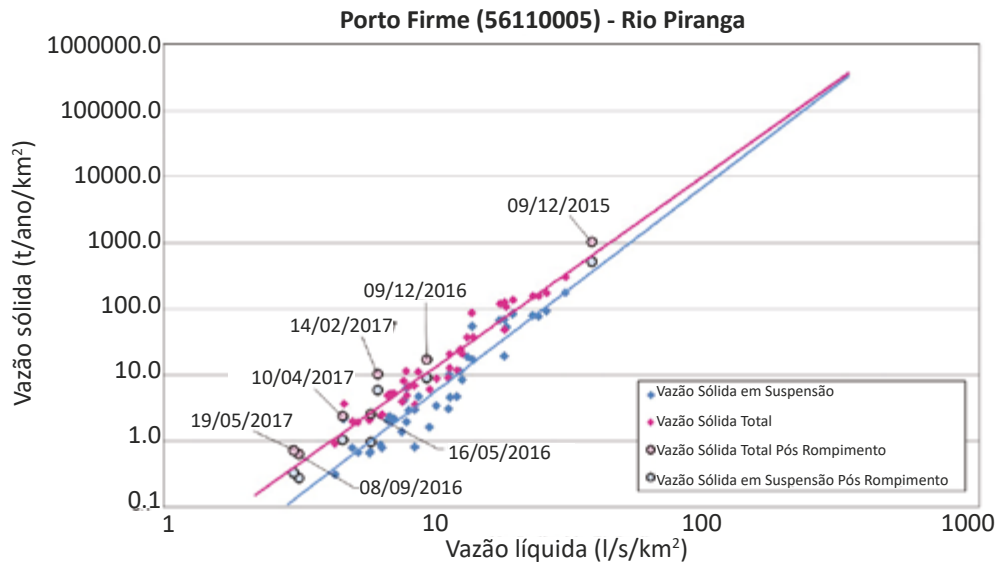
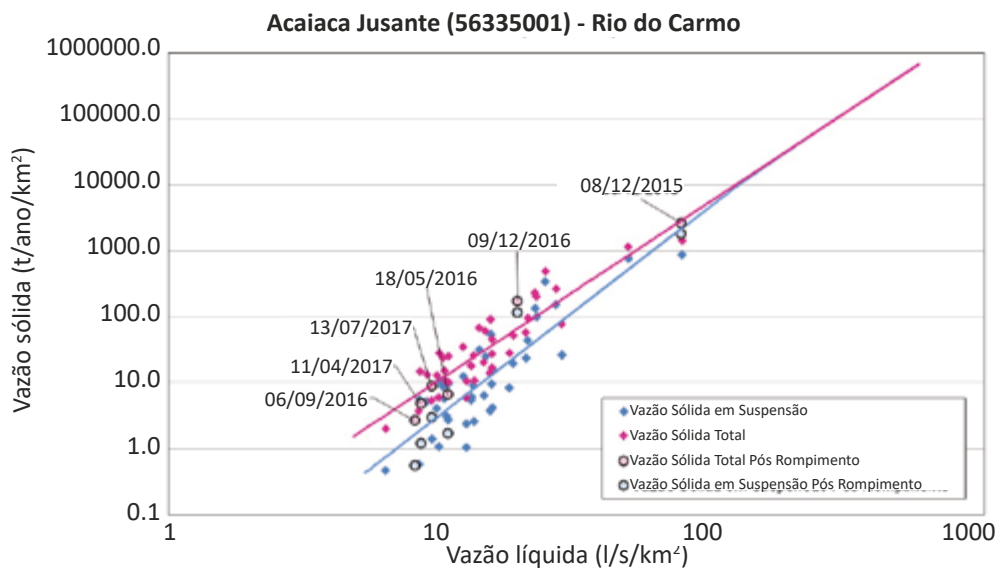
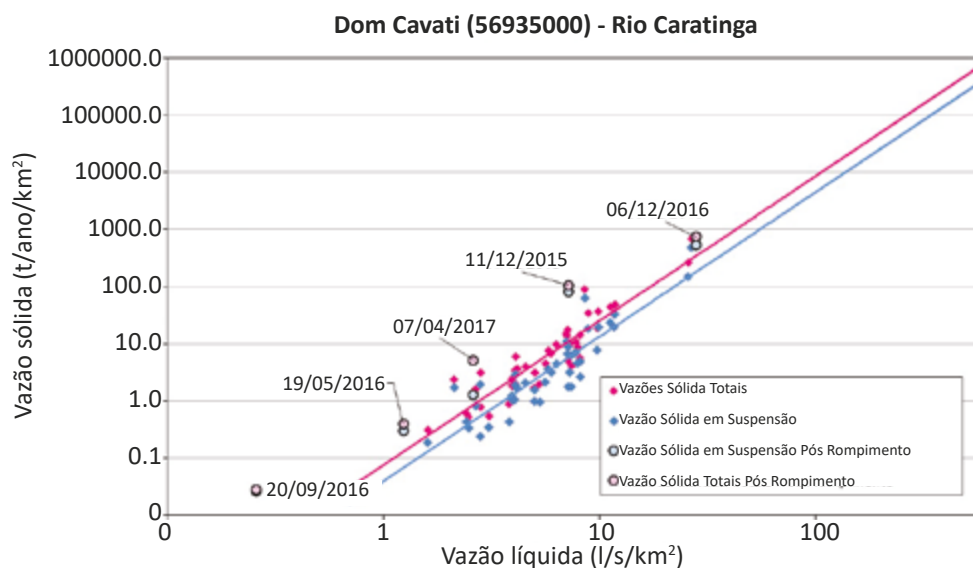


Figura 65 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Acaiaca Jusante (56335001).



Dando seguimento à análise dos afluentes, é notório o caso da estação Dom Cavati (Figura 66), a qual se localiza em afluente que desagua muito a jusante da barragem de Fundão. Esta estação apresentou valores pós-rompimento acima da linha de tendência gerada a partir dos dados históricos da linha-base. Entretanto, considerando a grande distância entre ela e sua exutória no rio Doce (sem alcance do remanso), além de outros fatores, como a existência de reservatórios a montante que retiveram grande parte dos sedimentos, e que na região das exutórias destes afluentes a calha do rio Doce não foi extravasada (CPRM, 2016), conclui-se que esse aumento deve ter sido gerado por outros fatores que não por sedimentos oriundos da barragem de Fundão.

Figura 66 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Dom Cavati (56935000).

Para a análise comparativa das estações situadas no rio Doce, foram consideradas as cinco estações que possuíam dados hidrossedimentológicos em toda sua extensão. A partir dos dados das duas primeiras estações – Fazenda Cachoeira d’Antas (56425000 – Figura 67) e Cachoeira dos Óculos Montante (56539000 – Figura 68) – conclui-se que, mesmo considerando que grande parte dos sedimentos ficaram retidos no reservatório da UHE Risoleta Neves, situado a montante, bem como na calha e planícies do trecho a montante deste reservatório, os valores de vazões sólidas se encontram, cerca de um ano e meio depois, bem acima da linha de tendência. A provável causa seria a ressuspensão dos sedimentos em períodos de cheias.

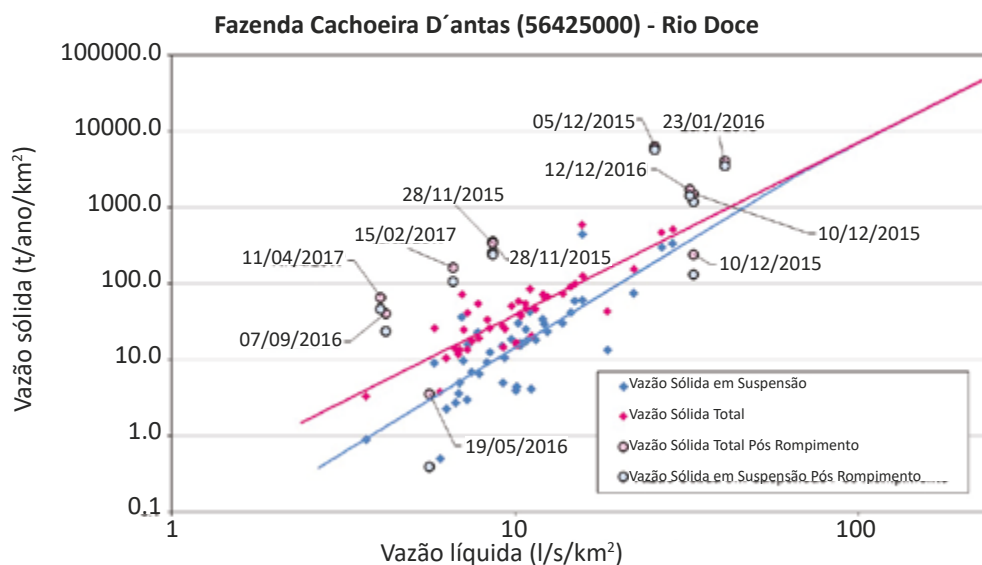
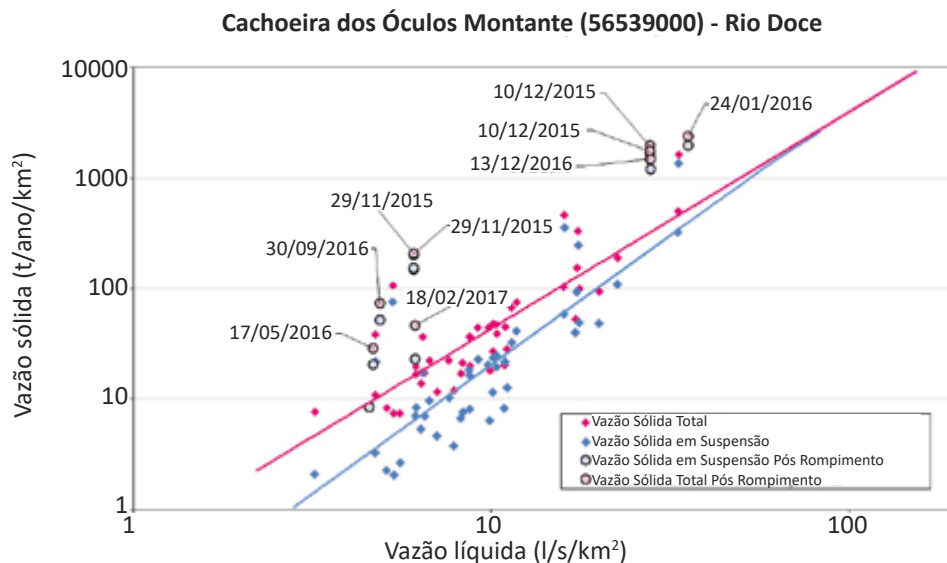
Figura 67 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Fazenda Cachoeira d’Antas (56425000).

Figura 68 – Alterações no transporte de sedimentos estação Cachoeira dos Óculos Montante (56539000).



Observa-se que Cachoeira dos Óculos Montante, a qual está mais a jusante, já apresenta uma tendência de estabilização ao se verificar os dados medidos em fevereiro/2017. Nesse evento, o qual se observou vazão líquida da mesma ordem de grandeza de novembro/2015, ocorre um abatimento da vazão sólida.

Para as outras três estações analisadas – Governador Valadares (56850000 – Figura 69), Tumiritinga (56920000 – Figura 70) e Colatina (56994500 – Figura 71) –, essa tendência de dados mais elevados em novembro e dezembro/2015 se mantém. Para os valores medidos em 2016 e 2017, ocorre uma estabilização em geral. Entretanto, verificam-se casos pontuais fora dessa tendência em medições de Tumiritinga e Colatina.

Analisando a medição realizada em 28/01/2016 em Tumiritinga (Figura 70), percebe-se uma proximidade da linha de tendência, ou seja, um valor próximo do registrado historicamente para tal vazão. Entretanto, no dado medido em 27/01/2016 (um dia antes), em Colatina (Figura 71), esta diferença é visivelmente maior. Devido à falta de dados, não é possível ter certeza sobre a real causa dessas alterações, mas provavelmente ocorrera algum fator pontual e/ou erros de medição.

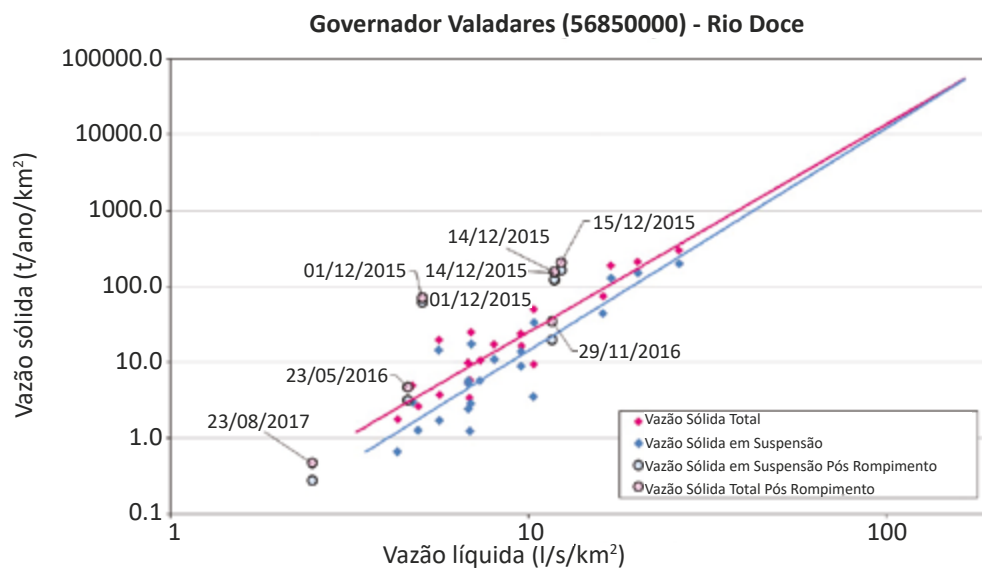
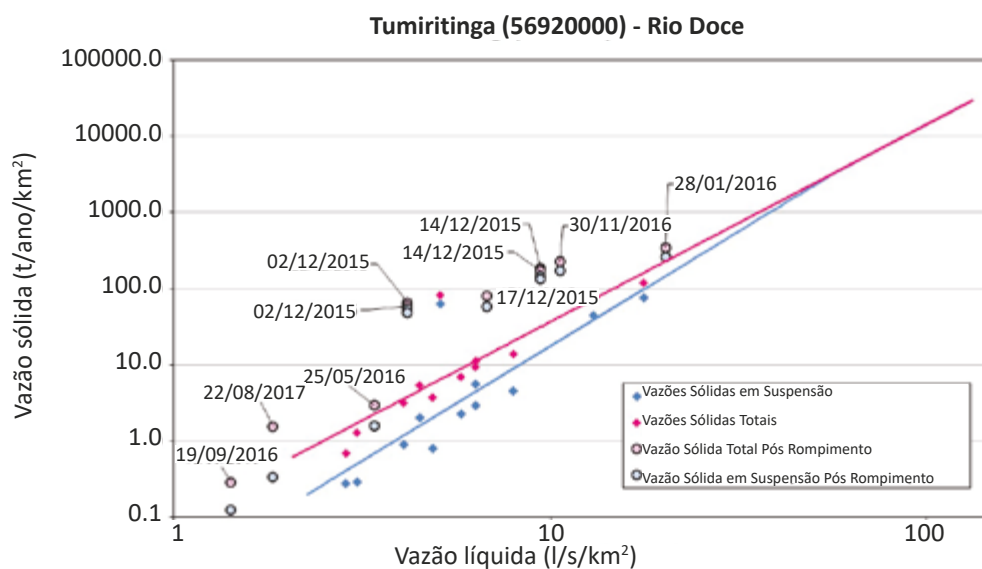
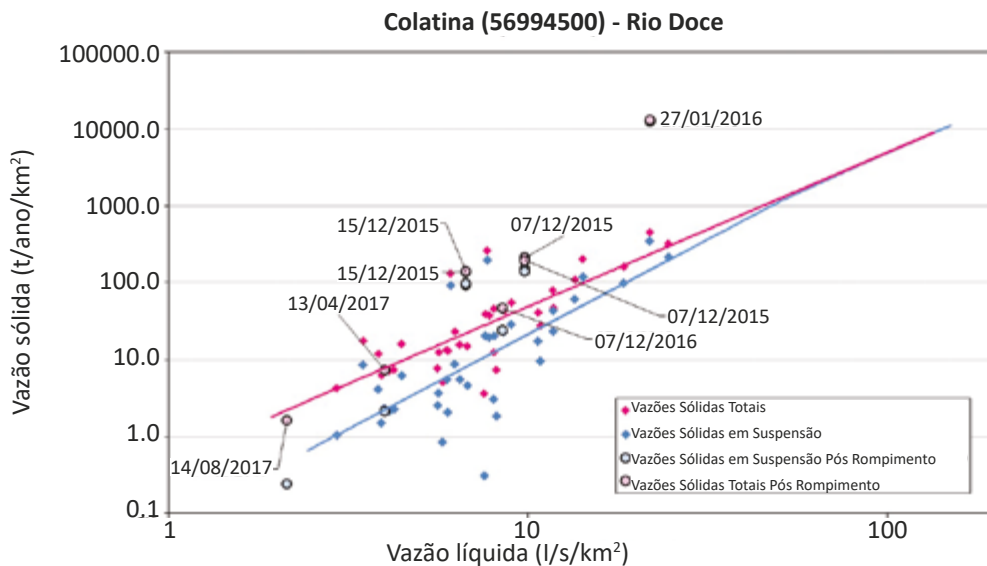
Figura 69 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Governador Valadares (56850000).**Figura 70** – Alterações no transporte de sedimentos na estação Tumiritinga (56920000).

Figura 71 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Colatina (56994500).

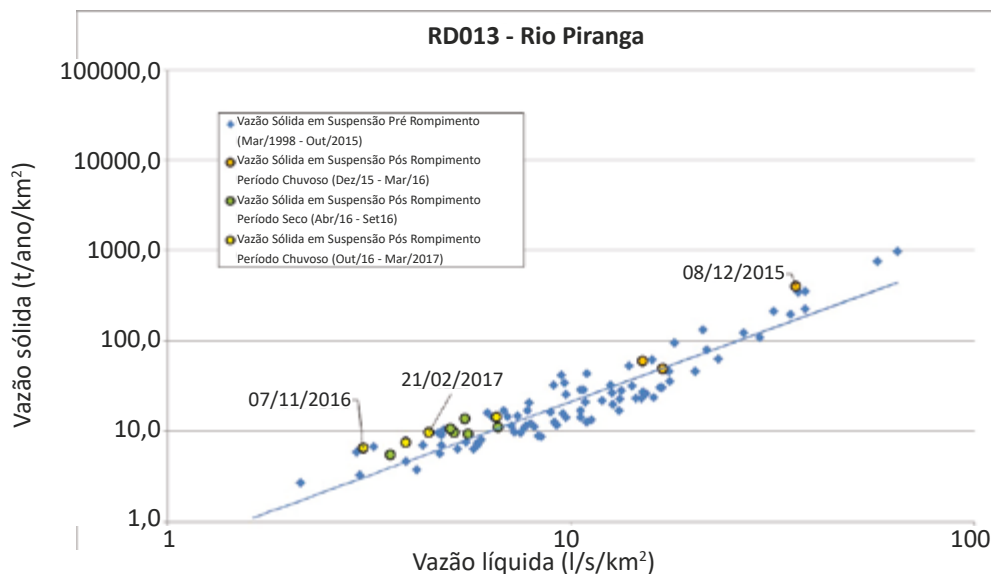


2.3.5.4.2.2 Estações com medições pontuais de sedimentos (Estações do IGAM e IEMA)

Para as estações do IGAM e IEMA, os resultados, como já eram esperados, são semelhantes aos citados no item referente às estações da ANA. Os afluentes como um todo possuem uma quantidade escassa de dados pós-rompimento, entretanto, nenhum apresenta uma diferença considerável se comparado com os dados históricos.

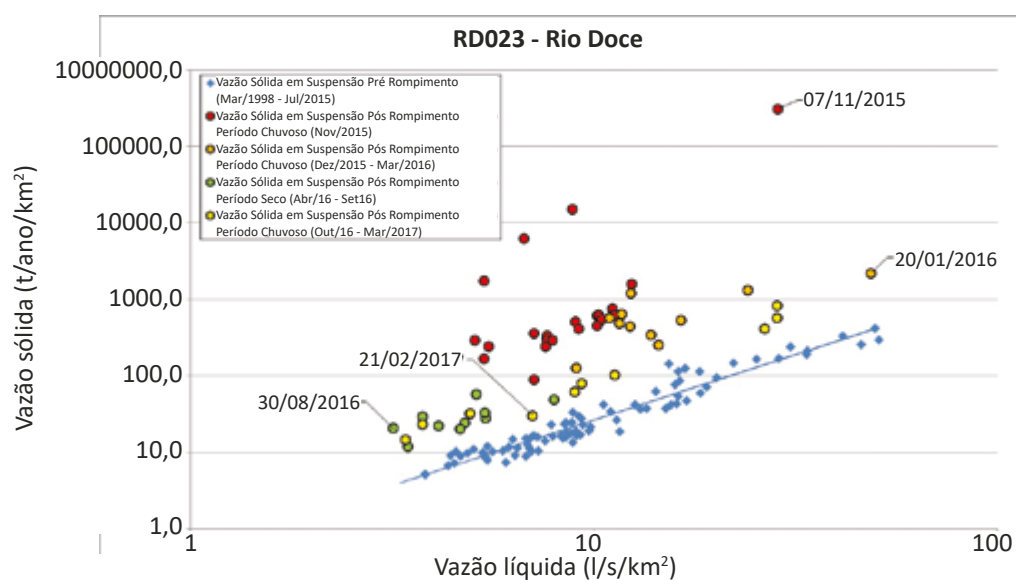
Assim como concluído anteriormente, em alguns afluentes que apresentaram uma leve alta, não pode ser confirmada a hipótese de haver relação com o rompimento da barragem de Fundão, especialmente pela grande distância da estação até a sua exutória com o rio Doce e diferença altimétrica (sem alcance do remanso). Este é o caso da estação RD013 (Figura 72), a qual se encontra a quase 60 km a montante da foz no rio Doce.

Figura 72 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD013.



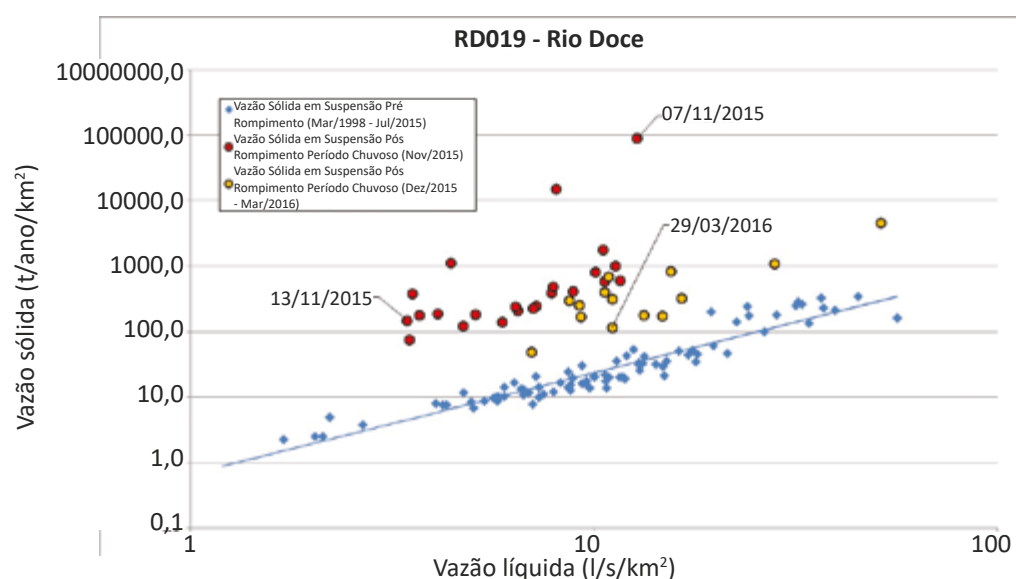
No que tange às estações presentes no rio Doce, as conclusões também se assemelham em relação ao item 2.3.5.4.2.1. Inicialmente logo após o desastre os postos mais próximos ao local do rompimento, mesmo localizados a jusante do reservatório de Candonga, apresentaram valores altos com uma leve tendência de baixa nas medições mais recentes (período seco e chuvoso 2016/2017), mas ainda altos, como é o caso da estação RD023 (Figura 73).

Figura 73 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD023.



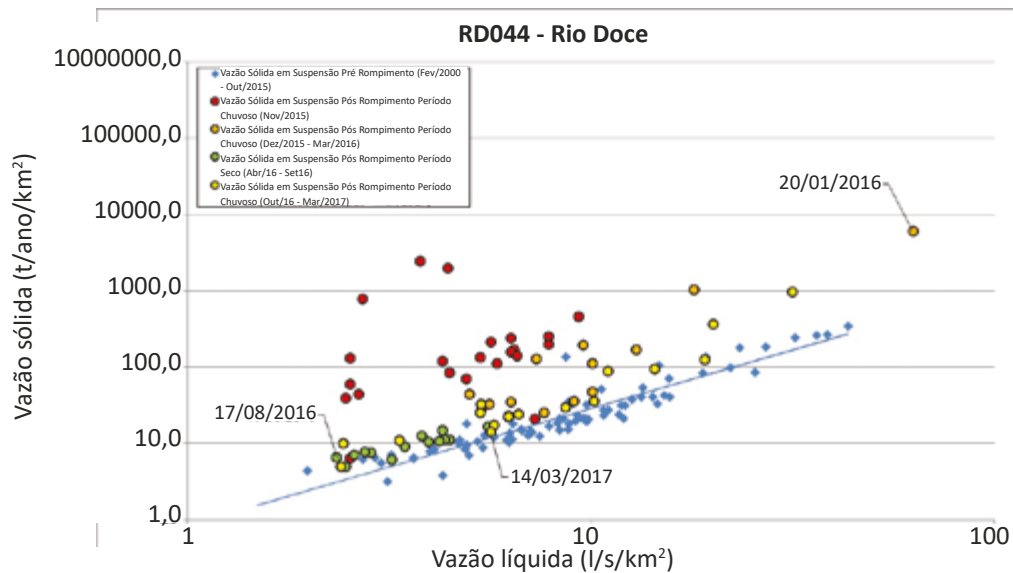
Algumas exceções apareceram nessa análise, como é o caso da estação RD019 (Figura 74), na qual foram realizadas medições até março/2016. Por isso, apresentam apenas valores muito acima da linha de tendência.

Figura 74 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD019.



À medida que são analisados dados mais a jusante no rio Doce, percebe-se uma tendência de aproximação com a linha de tendência ainda maior nos períodos seco e chuvoso dos anos de 2016 e 2017, ou seja, os dados mais recentes. Este é o caso da estação RD044.

Figura 75 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD044.



Por fim, vale frisar que, em termos de valores, as medições de estações da ANA e IGAM foram diferentes, isso se justifica por causa do tipo de medição realizado, completa ou pontual, respectivamente. Entretanto, quando as tendências são analisadas, existe uma semelhança notável entre elas. Futuramente, com a modelagem em conjunto com essas análises, será possível ter uma conclusão mais concreta sobre a real situação da bacia do rio Doce em geral.

2.3.5.4.3 Análise da Concentração de Sólidos

Conforme a metodologia empregada, foram utilizadas 42 estações de monitoramento relacionados aos sedimentos. A partir dessas, foram gerados 222 gráficos que são apresentados, de forma completa no APÊNDICE B e de forma resumida no presente item.

Primeiramente são apresentados os resultados para cada conjunto de dados e, posteriormente, uma análise integrada de todos os resultados. Devido ao grande número de resultados obtidos, busca-se aqui resumir as informações mais relevantes.

2.3.5.4.3.1 Concentração de sedimentos em suspensão

A primeira observação que pode ser realizada a partir dos dados de CSS foi o pico que ocorreu após o desastre no rio Doce. A Figura 76, Figura 77 e Figura 78 apresentam as séries históricas, respectivamente, das estações 56075000 (no rio principal, a montante do desastre), 56696000 (no rio Piracicaba, afluente do rio Doce) e 56994500 (no rio Doce, a jusante do desastre). Nas figuras apresentadas, pode-se observar a média antes e após o rompimento da barragem de Fundão, representada pela barra vertical nos gráficos que divide os dois períodos.

Figura 76 – Série histórica de CSS (azul) para a estação 56075000, localizada no rio Piranga. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

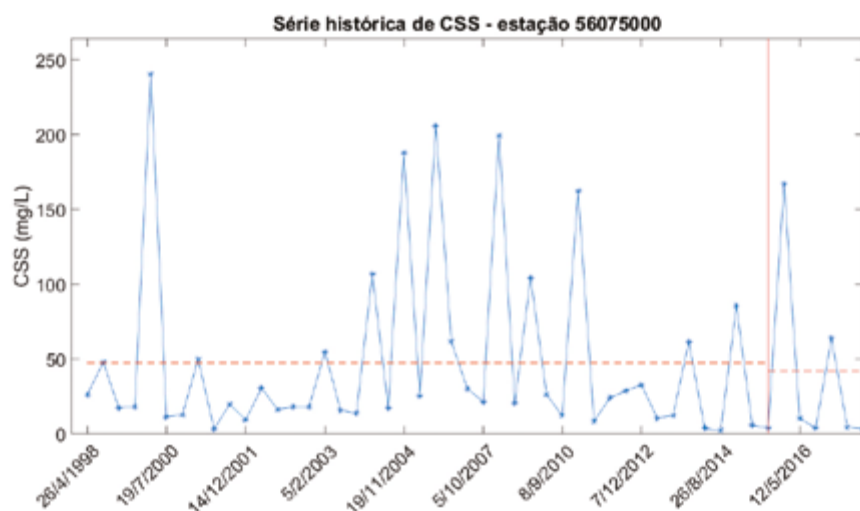


Figura 77 – Série histórica de CSS para a estação 56696000, localizada no rio Piracicaba. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

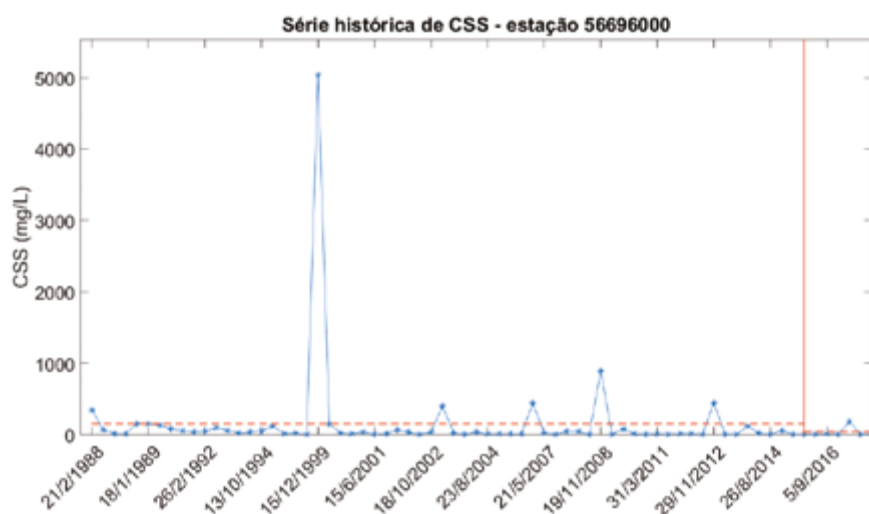
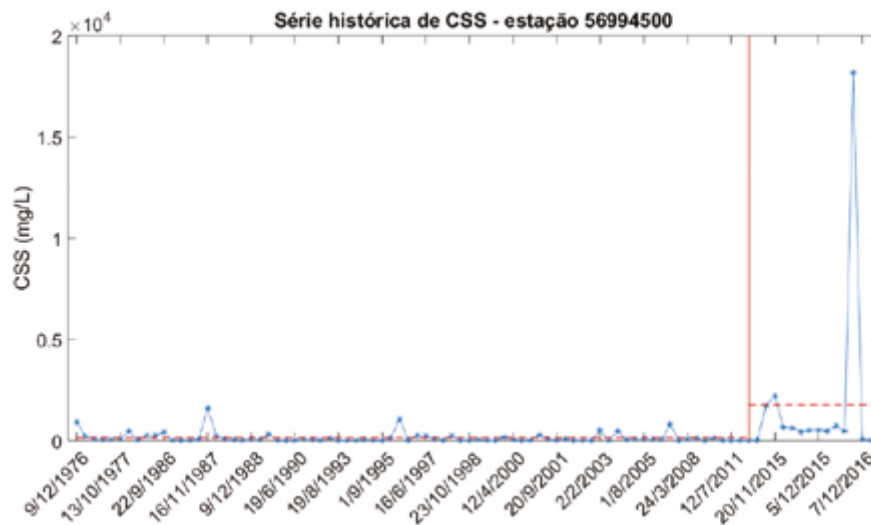


Figura 78 – Série histórica de CSS para a estação 56994500, localizada no rio Doce. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



A Figura 76 e a Figura 77 mostram que a média dos valores de CSS após o desastre é inferior à média antes desse evento, fato que não ocorre para a série histórica apresentada na Figura 78. Também se percebe que até o pico de concentração de 18.190 mg/L, registrado no dia 27 de janeiro de 2016, na estação de Colatina, as CSSs se mantiveram elevadas, acima da média histórica. É importante lembrar aqui que as medições não são contínuas e nem realizadas nos mesmos dias para cada posto, o que limita a análise das informações.

Sabe-se que a bacia do rio Doce apresenta comportamento sazonal devido ao regime de precipitações, o que influencia diretamente a quantidade de sedimentos que chegam e são transportados através dos cursos d'água. Assim, no período seco, a CSS nos rios é baixa e no período chuvoso é alta. Devido ao fato de que existem poucas medições ao longo do ano (cerca de 4 a 6 medições) e, muitas vezes com essas ocorrendo no período seco, existe uma tendência da média ser um pouco inferior ao valor real. Assim, para tentar diminuir a influência da sazonalidade e da escassez de dados na análise, como apresentado na Equação 2, utiliza-se a anomalia dos valores considerando as médias e o desvio padrão para cada mês e avalia-se o quanto aquele valor está variando com relação a essas informações.

Novamente, a partir da Figura 79, Figura 80 e Figura 81 percebe que, após o rompimento da barragem de Fundão, existe um pico na estação 56994500, o que não é percebido nas demais estações. Percebe-se ainda que na estação 56696000 o pico de concentração não é notado na Figura 80, o que mostra que é possível remover os efeitos de sazonalidade e da pouca quantidade de dados existentes. Pela Figura 81, nota-se um comportamento anômalo após o rompimento da barragem de Fundão, tanto com o pico quanto uma tendência de valores elevados, assim como percebido na Figura 78. Contudo, para as medições realizadas após a data do pico, que foram nos dias 07/12/2016, 13/4/2017 e 14/8/2017, os valores de Δx_m foram negativos.

Figura 79 – Anomalia sem sazonalidade da CSS para a estação 56075000, localizada no rio Piranga. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

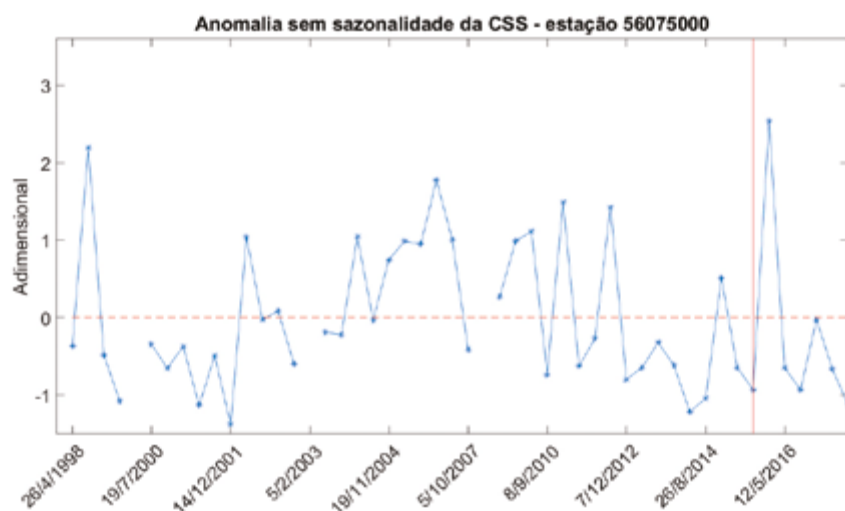


Figura 80 – Anomalia sem sazonalidade da CSS para a estação 56696000, localizada no rio Piracicaba. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

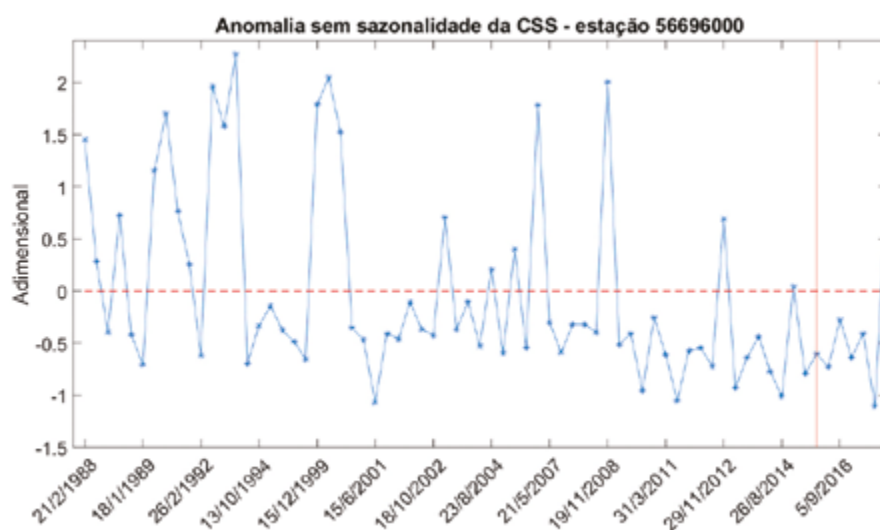
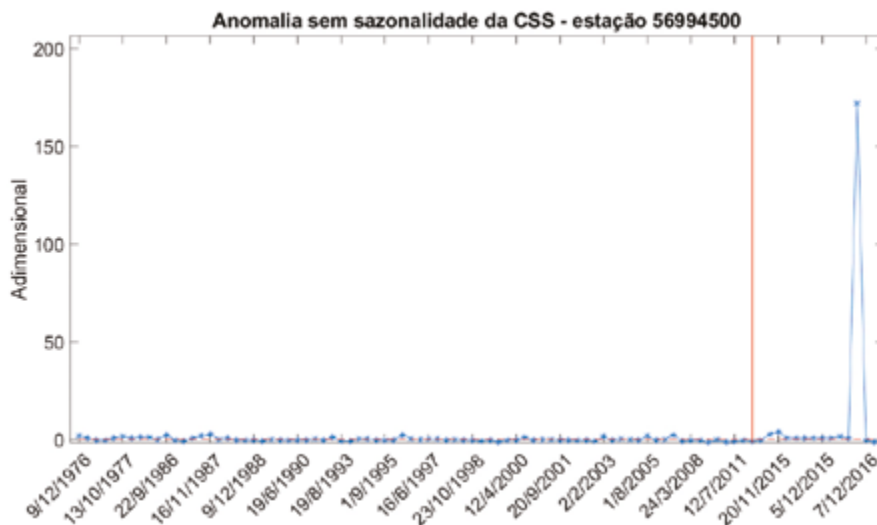


Figura 81 – Anomalia sem sazonalidade da CSS para a estação 56994500, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



As demais estações localizadas no rio Doce, de forma geral, apresentaram um comportamento parecido, sendo o mais distinto aquele encontrado na estação 56425000 (Figura 82). Essa estação é aquela que se encontra mais próxima da confluência do rio do Carmo com o rio Doce, e demonstra que mesmo nos meses de setembro e dezembro/2016 e abril/2017, os registros mostraram valores elevados de CSS.

Figura 82 – Anomalia da CSS para a estação 56425000, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



2.3.5.4.3.2 Turbidez

As observações de turbidez são mais numerosas que as de CSS, principalmente após o rompimento da barragem de Fundão, e, também, com maior densidade espacial de estações. Da Figura 83 a Figura 86, é possível observar séries históricas de turbidez para as estações RD013, RD032, RD089 e RD071, todas localizadas em afluentes do rio Doce.

Na Figura 83, percebe-se um pico de turbidez após o rompimento da barragem de Fundão, contudo não é maior que picos já registrados anteriormente e essa estação se localiza no rio Piranga, a montante da confluência com o rio do Carmo. Na Figura 84, novamente observa-se um pico antes do desastre, entretanto, em um período distinto daquele observado na série de CSS.

Na Figura 85, observa-se um pico de 1317 NTU no dia 22 de janeiro de 2016 de o que poderia ser ocasionado pelo remanso do rio Doce, visto que a estação RD089 se encontra próximo à foz. Entretanto, as estações RD049 (rio Suaçuí Grande) e RD088 (rio Itambacuri), ambas localizadas na bacia do rio Suaçuí Grande, a montante da estação RD089, mostram que houve realmente um pico de turbidez nos rios da bacia nesse período, com valores de 1799 NTU e 1273 NTU, respectivamente, no dia 21 de janeiro de 2016.

Figura 83 – Série histórica da turbidez para a estação RD013, localizada no rio Piranga. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

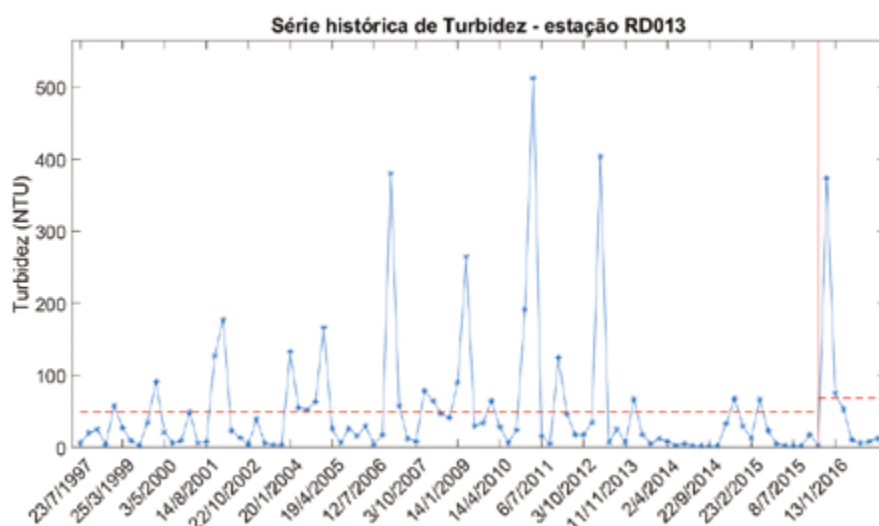


Figura 84 – Série histórica da turbidez para a estação RD032, localizada no rio Piracicaba. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

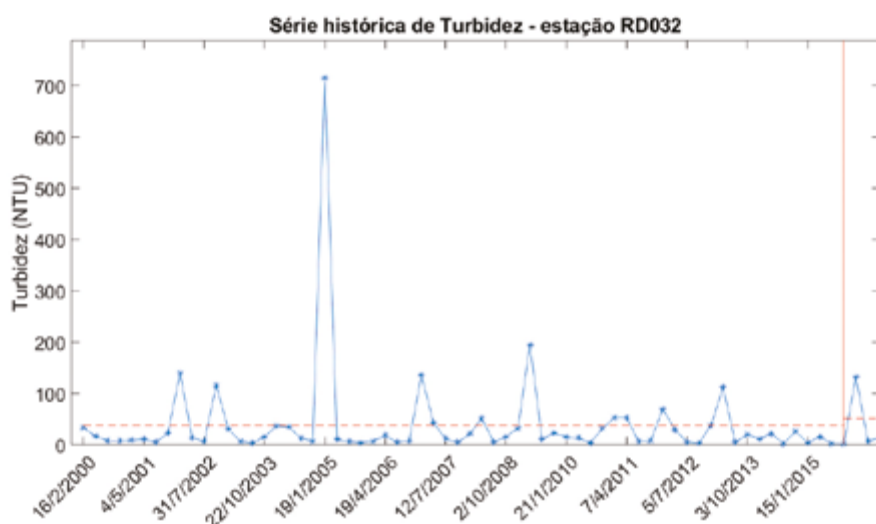
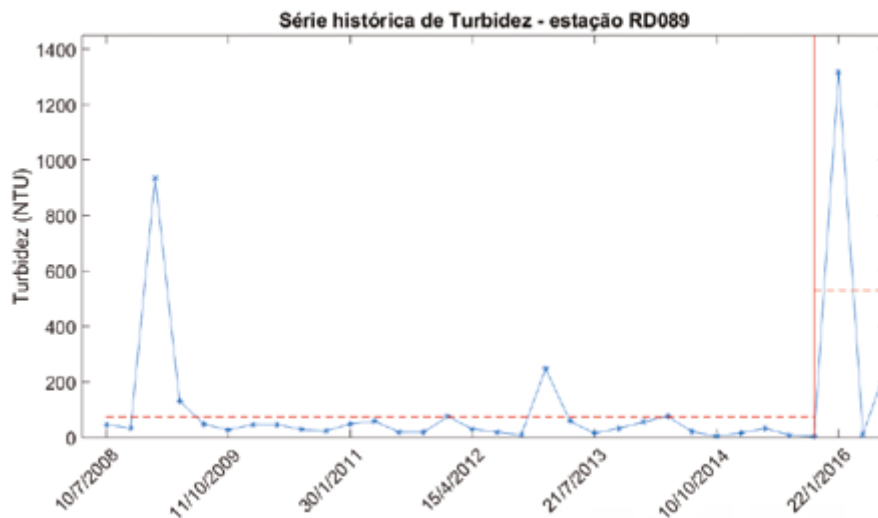
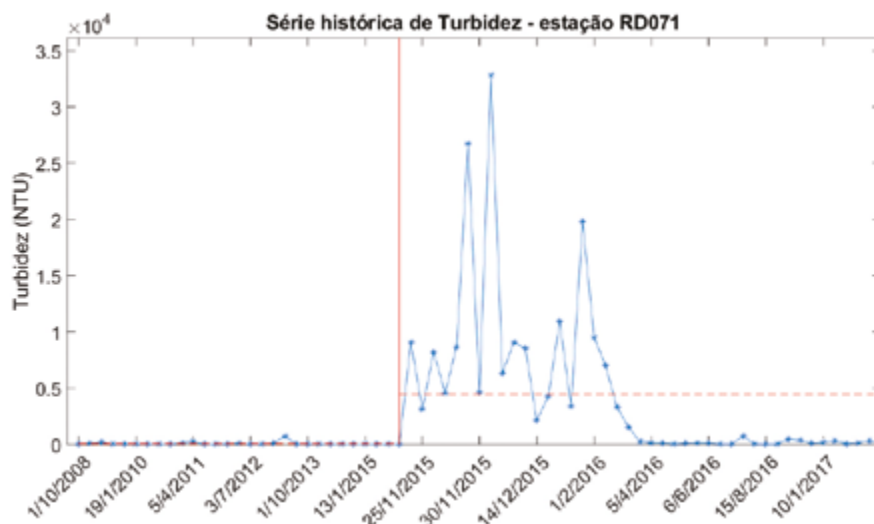


Figura 85 – Série histórica da turbidez para a estação RD089, localizada no rio Suaçuí Grande. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Diferentemente, a Figura 86 mostra mais de um pico de turbidez após o desastre. A estação RD071 é a que se encontra mais próximo do local onde houve o rompimento da barragem. É perceptível que os sedimentos carregados para os rios afetaram a turbidez nessa região por alguns meses.

Figura 86 – Série histórica da turbidez para a estação RD071, localizada no rio do Carmo. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



A seguir, apresentam-se as anomalias das estações RD019, localizada no alto Doce; RD083, localizada no médio Doce; e RD130, localizada no baixo Doce.

A Figura 87 nos mostra que o valor Δx_m de ultrapassa 5.000, observa-se que, mesmo depois do pico, Δx_m parece apresentar valores acima daqueles encontrados antes do rompimento da barragem de Fundão. Assim, a Figura 88 nos mostra com maior detalhe o que ocorreu após o dia 05/11/2015. Nota-se que todos os valores são muito próximos ou maiores que zero, o que demonstra que, para esse período, a quantidade de sedimentos em suspensão nessa região do rio Doce está acima do normal, mesmo no período seco.

Figura 87 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD019, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Figura 88 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD019, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Um pouco mais a jusante, na estação RD083, a Figura 89 nos mostra um valor máximo de Δx_m próximo de 300, um pico menor que aquele encontrado na estação RD019. Nota-se que, na estação RD083, ainda em 2016 e 2017, os valores de turbidez estão acima do normal para o período.

Já no baixo Doce, esses valores são ainda menores, com um Δx_m máximo inferior a 100 (Figura 90). A Figura 90 apresenta algumas falhas, isso porque no período anterior ao desastre não havia registros de turbidez em todos os meses do ano, o que limitou a análise para todos os dados no período posterior ao desastre. Ainda assim, percebe-se que, ainda no meio do ano de 2016, os valores apresentam anomalia positiva superior aos valores antes do desastre.

Figura 89 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD083, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Figura 90 – Anomalia sem sazonalidade da turbidez para a estação RD130, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

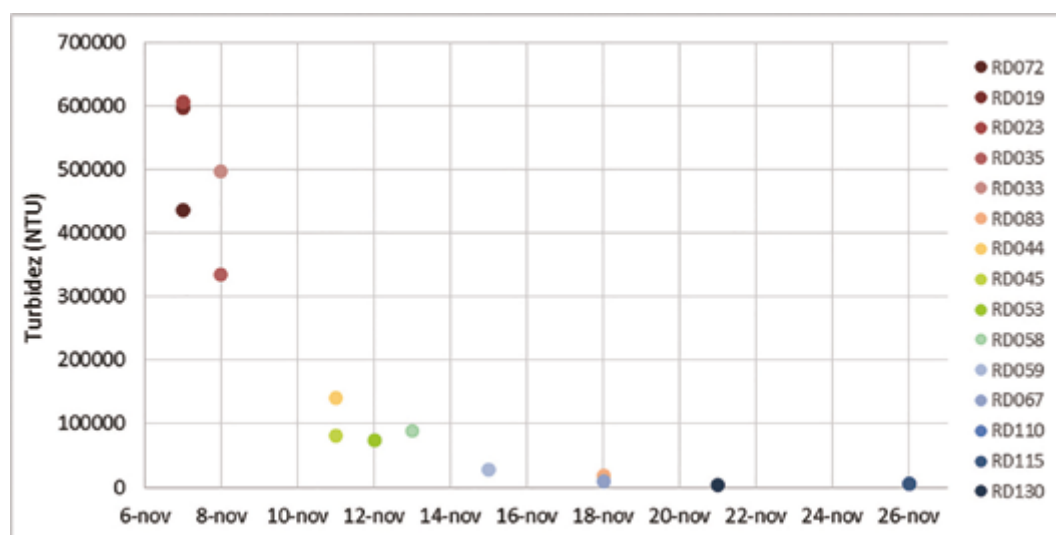


Foi possível observar também o comportamento da turbidez ao longo de todo o percurso percorrido pelos sedimentos provenientes do rompimento da barragem no mês de novembro/2015. A Figura 91 apresenta os valores máximos de turbidez encontrados em cada uma das estações no caminho da onda de rejeitos ao longo do mês de novembro/2015, sendo a estação RD072 a mais a montante e a RD130 a mais a jusante nesse percurso. A partir dessa figura, nota-se que os maiores valores foram registrados nas estações RD023 e RD019 no dia 7 de novembro, valores próximos de 600.000 NTU e os menores valores nas estações RD110 e RD130, próximos de 5.000 NTU.

Percebe-se da Figura 91 que os valores máximos de turbidez tendem, no geral, a diminuir de forma exponencial de montante para jusante. A diminuição desses valores pode estar associada a alguns fatores, tais como: (i) diluição, devido à contribuição de volumes de água dos afluentes; (ii) processos de deposição no leito do rio; e (iii) presença de reservatórios.

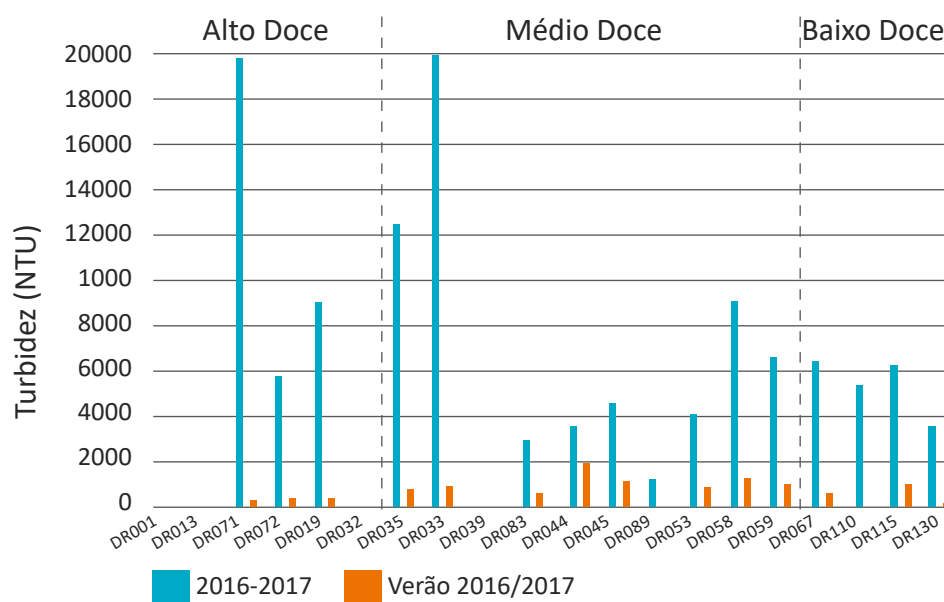
Ressalta-se aqui que fatores como chuvas nas regiões próximas à barragem de Fundão ou mesmo em outras localidades que possam remobilizar os sedimentos com a energia provida do escoamento e a operação dos reservatórios podem influenciar o comportamento da propagação dos sedimentos.

Figura 91 – Valor máximo de turbidez registrado em cada uma das estações localizadas no caminho da onda de rejeitos, sendo a estação RD072 a mais a montante e a RD130 a mais a jusante nesse percurso.



Na Figura 92 apresenta-se uma comparação da turbidez máxima encontrada nas estações localizadas no caminho da onda de rejeitos nos anos de 2016 e 2017 e apenas no verão 2016/2017. Para o período que considera os anos de 2016 e 2017, os maiores valores encontrados foram quase sempre no mês de janeiro/2016 (valores em azul). Já para o período seguinte de análise, o verão de 2016/2017, os maiores valores foram encontrados quase que na totalidade em dezembro/2016. Observa-se que a turbidez máxima diminuiu consideravelmente de janeiro para dezembro e os maiores valores no verão 2016/2017 ocorrem nas estações no médio Doce e não mais no alto Doce.

Figura 92 – Comparação da turbidez máxima encontrada nas estações localizadas no caminho da onda de rejeitos nos anos de 2016 e 2017 (azul) e apenas no verão 2016/2017 (laranja).



A partir dos resultados apresentados nesta seção, observa-se um padrão espacial de diminuição da turbidez, ou seja, de montante para jusante, no período próximo ao rompimento da barragem; e uma diminuição temporal, com valores de turbidez menores a partir do segundo semestre de 2016. Ainda que esses valores sejam menores, ao se comparar com os valores da média histórica global ou das médias mensais, nota-se que os valores de turbidez estão elevados.

2.3.5.4.3.3 Sólidos suspensos totais

As medições de SSTs, geralmente, coincidem com as medições de turbidez e ambas são relacionadas com os sedimentos em suspensão na água e, assim, apresentam séries históricas com padrão semelhante. Na Figura 93 e Figura 94, estão apresentadas as anomalias padrão (Δx) dos SSTs para as estações RD001 e RD039, respectivamente. Na Figura 93 observa-se que, após o rompimento, o maior valor encontrado é negativo, indicando que é inferior à média histórica. Já na Figura 94, observa-se um valor positivo de Δx no dia 20 de janeiro de 2016, mas que não é o mais elevado se comparado com outros picos da série histórica.

Figura 93 – Anomalia padrão dos SSTs para a estação RD001, localizada no rio Piranga. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

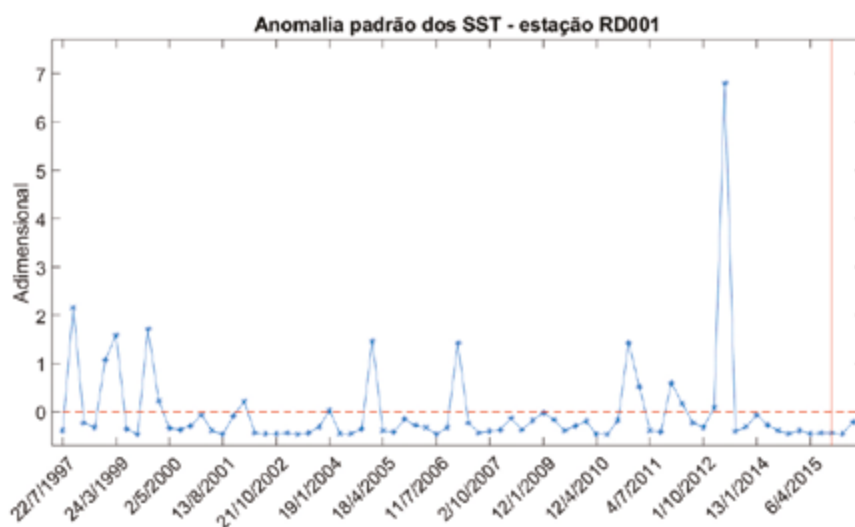


Figura 94 – Anomalia padrão dos SSTs para a estação RD039, localizada no rio Santo Antônio. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



A seguir, apresenta-se a anomalia sem sazonalidade (Δx_m) das estações RD072 (alto Doce), RD033 (médio Doce) e RD059 (médio Doce). Para a estação RD072, observam-se dois grandes picos de concentração, acima de 50.000 (Figura 95). Na Figura 96, percebe-se que o valor da anomalia já diminuiu significativamente, mas que ainda assim os valores de SSTs na estação RD033 estão elevados. Na Figura 97, podemos ver de forma mais detalhada o que ocorre no período pós-desastre no que se refere à variação dos SSTs na estação RD033. Nota-se que até mesmo no final do período seco de 2016 os valores de Δx_m são elevados.

Figura 95 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD072, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

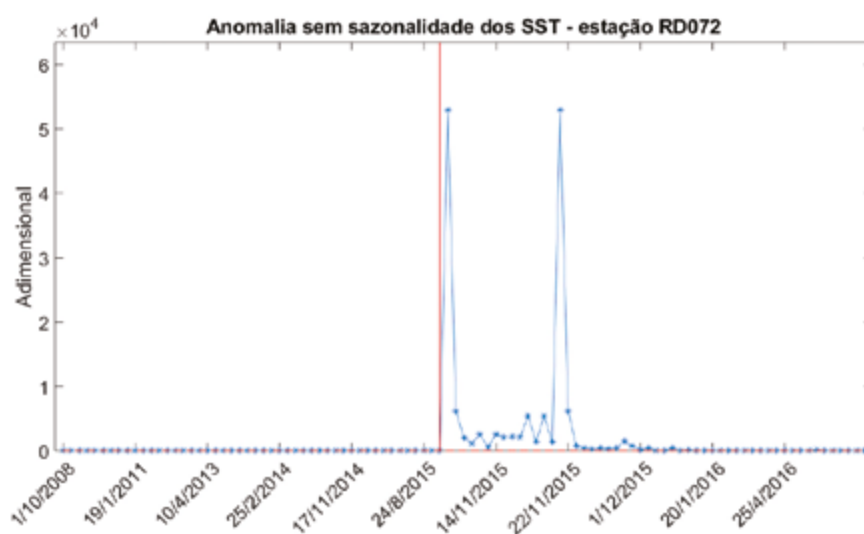


Figura 96 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD033, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Figura 97 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD033, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

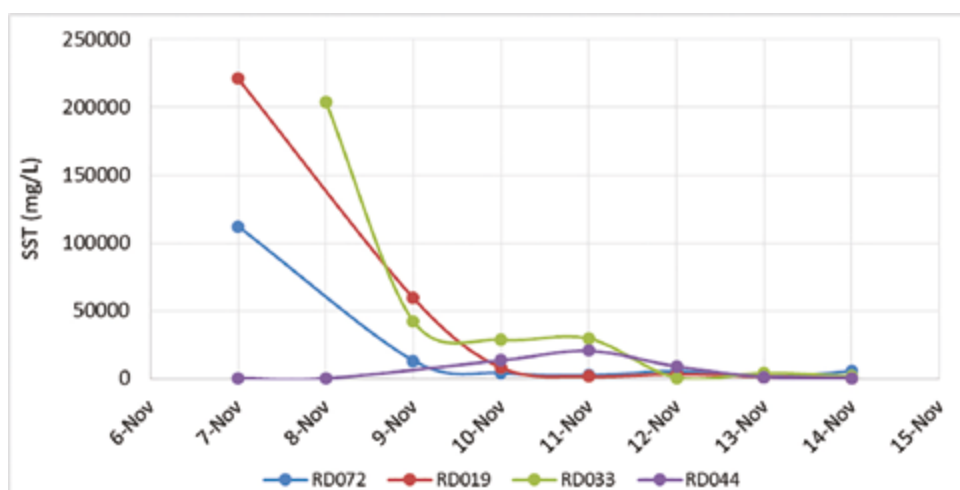


Na estação RD059, localizada próximo ao baixo Doce, percebe-se que o valor de Δx_m é ainda menor (Figura 98). Entretanto, os valores de SSTs continuam elevados, sendo representados por anomalias positivas acima da média histórica. Essa diminuição do valor de SSTs das estações de montante para jusante podem ser observados melhor na Figura 99.

Figura 98 – Anomalia sem sazonalidade dos SSTs para a estação RD059, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Figura 99 – Valores de SSTs ao longo do caminho da onda de rejeitos em novembro/2015.



Observa-se que os picos de SSTs diminuem de montante para jusante. O valor de pico na estação RD072 no dia 7 de novembro é menor que o da estação RD019, que se encontra um pouco a jusante. Possivelmente, um pico ainda maior ocorreu antes do dia 7 e não foi registrado. Nota-se que os picos de SSTs (mg/L) se deslocam no tempo e seus valores máximos diminuem, com o maior pico da estação RD044, no dia 11 de novembro, sendo menor que o valor registrado na estação RD033.

O trecho do rio Doce compreendido entre as estações RD072 e RD044 é um trecho de baixa declividade, o que pode ter feito com que grande parte dos sedimentos depositasse nesse trecho por falta de capacidade de transporte do escoamento. Percebe-se que não existe ainda uma uniformidade ou linearidade quanto à distribuição da concentração de SSTs no rio nesse período, visto que no dia 14 de novembro o valor de SSTs na estação RD072 é superior aos demais.

2.3.5.4.3.4 Reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho

A Figura 100 e Figura 101 apresentam as séries históricas de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho das estações REF06 e REF10, respectivamente. Não se observa a partir das imagens, logo após o desastre, picos de reflectância. Essas estações estão nos afluentes e não se observa também uma tendência de valores elevados no período pós-desastre.

Figura 100 – Série histórica de RefVER para a estação REF06, localizada no rio Santo Antônio. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

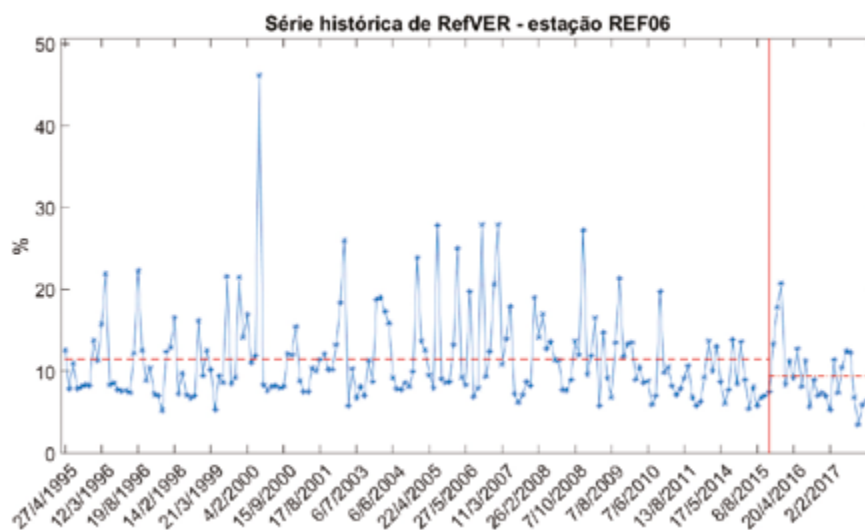
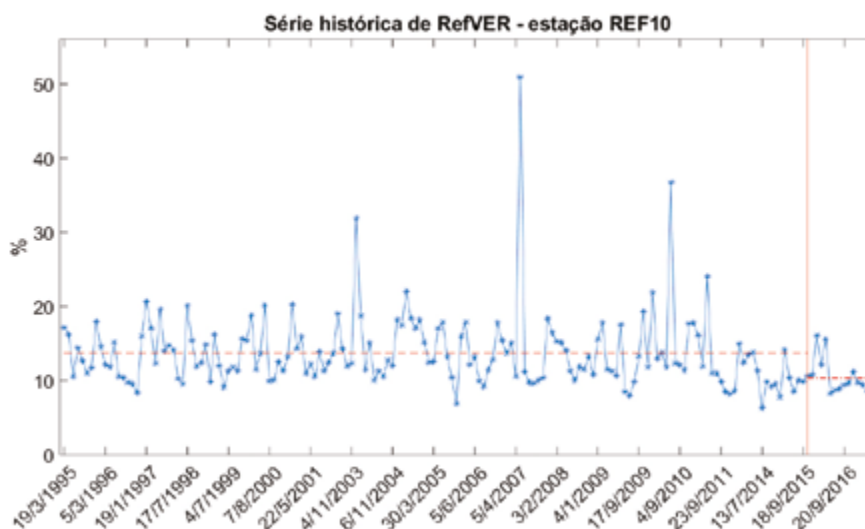


Figura 101 – Série histórica de RefVER para a estação REF10, localizada no rio Caratinga. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



Ao observar a Figura 102 e Figura 103, percebe-se que ocorrem valores elevados de reflectância por alguns meses após o rompimento da barragem de Fundão. As anomalias sem sazonalidade da Figura 104 e Figura 105 mostram valores de anomalias positivas mesmo no período seco de 2016. Por outro lado, no próximo período chuvoso são registrados os menores valores de anomalias de todo o período estudado, tanto para a estação REF02, no dia 1 de janeiro de 2017, quanto para a REF15, no dia 16 de abril de 2017.

Figura 102 – Série histórica de RefVER para a estação REF02, localizada no rio Doce. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

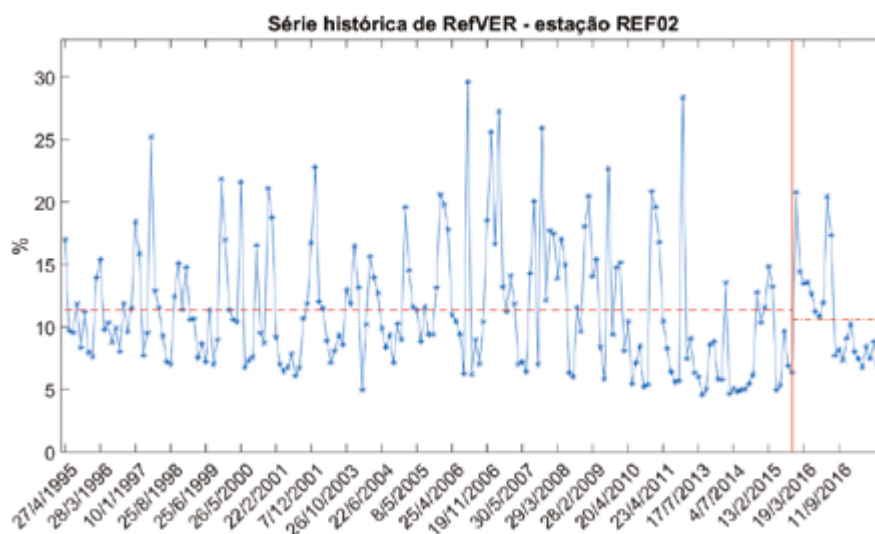


Figura 103 – Série histórica de RefVER para a estação REF15, localizada no rio Doce. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de RefVER antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

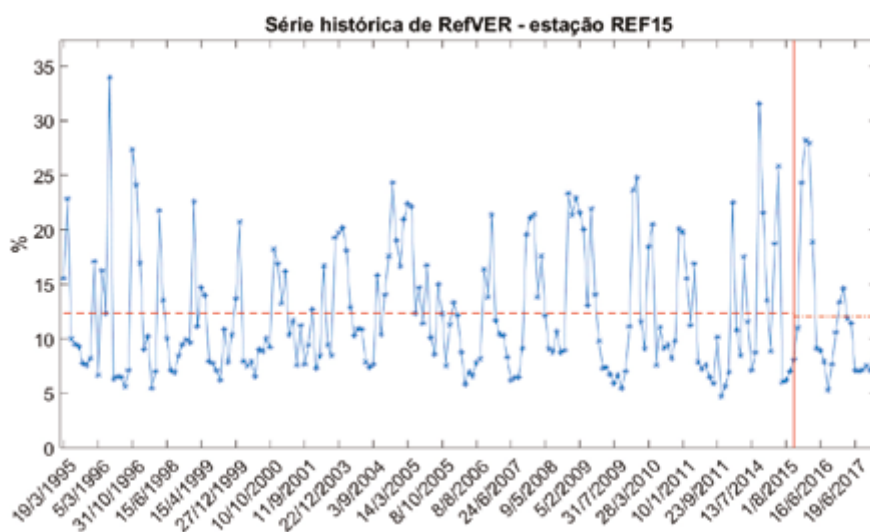


Figura 104 – Anomalia sem sazonalidade da RefVER para a estação REF02, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

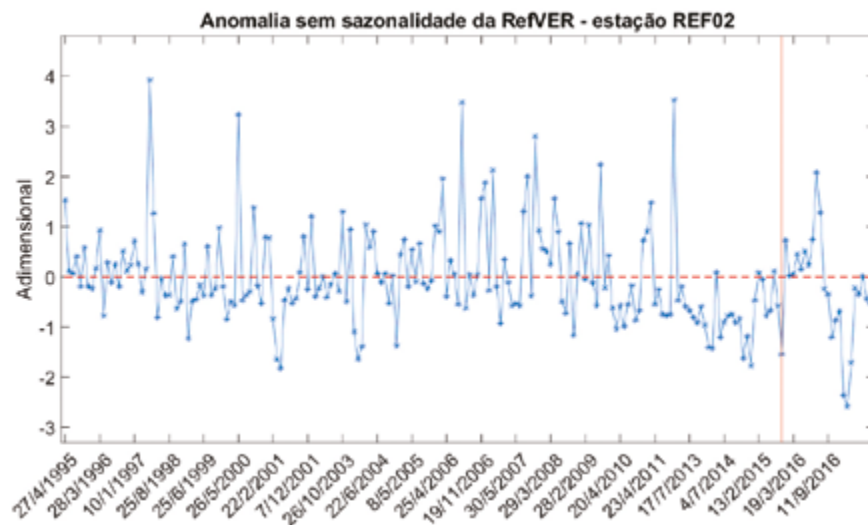
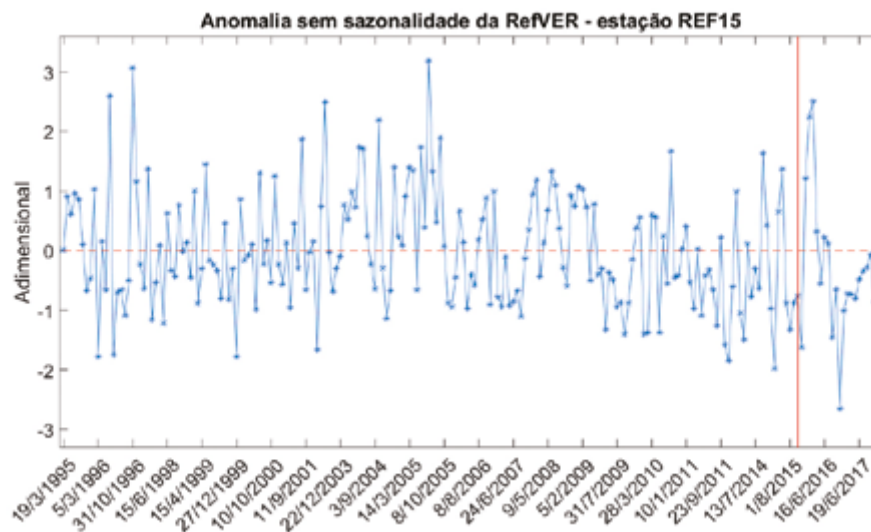


Figura 105 – Anomalia sem sazonalidade da RefVER para a estação REF15, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



2.3.5.4.3.5 Reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo

A Figura 106 mostra que, no rio Manhuaçu, logo após o rompimento da barragem de Fundão houve um pico na reflectância, e a Figura 107 mostra que esse pico representa uma das maiores anomalias positivas no período analisado. Cabe destacar que esse pico foi registrado no próprio dia 5 de novembro, assim, descarta a possibilidade de o registro ter sofrido interferência da onda de rejeitos, pois nesse dia a onda ainda não tinha alcançado a região.

Figura 106 – Série histórica da ReflVP para a estação REF13, localizada no rio Manhuaçu. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de ReflVP antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

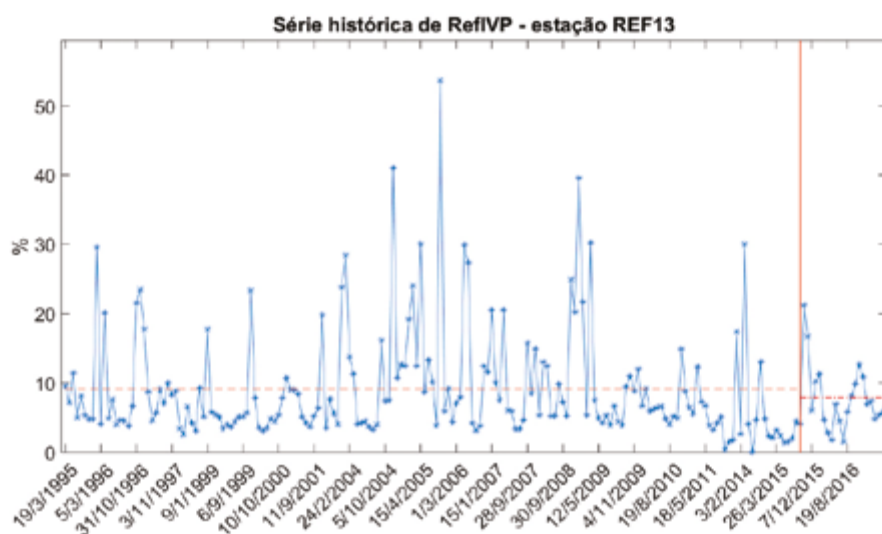
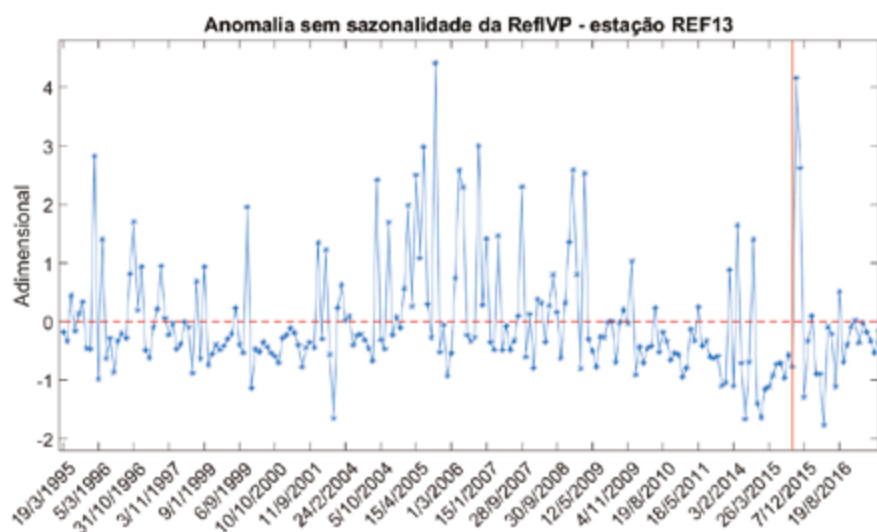


Figura 107 – Anomalia sem sazonalidade da ReflVP para a estação REF13, localizada no rio Manhuaçu. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



A Figura 108, Figura 109 e Figura 110 mostram as anomalias sem sazonalidade para as estações REF03 (alto Doce), REF08 (médio Doce) e REF14 (baixo Doce), respectivamente. Observa-se que a estação mais a jusante, REF14, possui menos registros com anomalias positivas do que a estação REF03, mais a montante. Observa-se também que todas elas apresentam um pico de Δx_m logo após o rompimento da barragem de Fundão. Cabe ressaltar que a média após o desastre para cada uma dessas estações localizadas no caminho da onda de rejeitos foi maior que a média histórica.

Figura 108 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF03, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

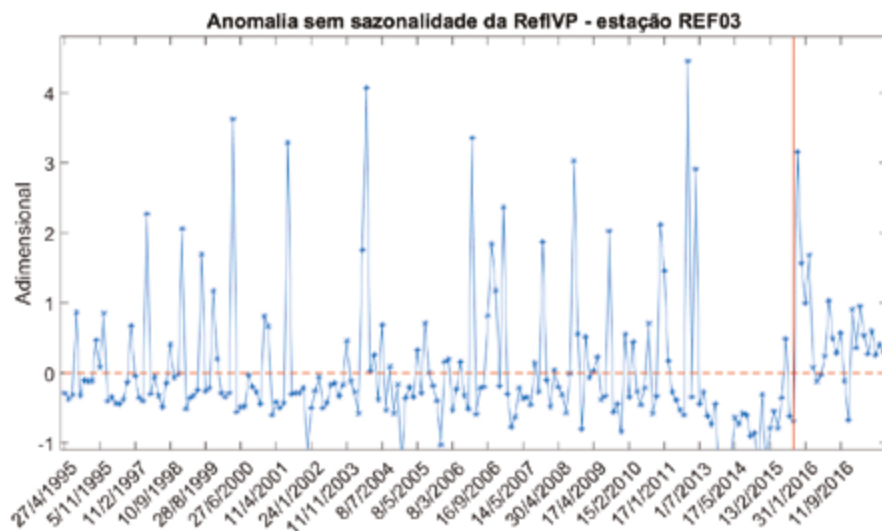


Figura 109 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF08, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).

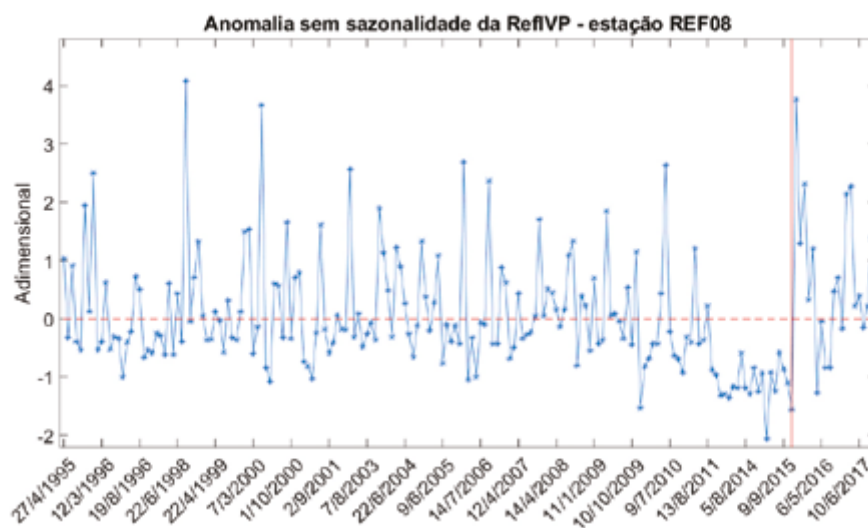
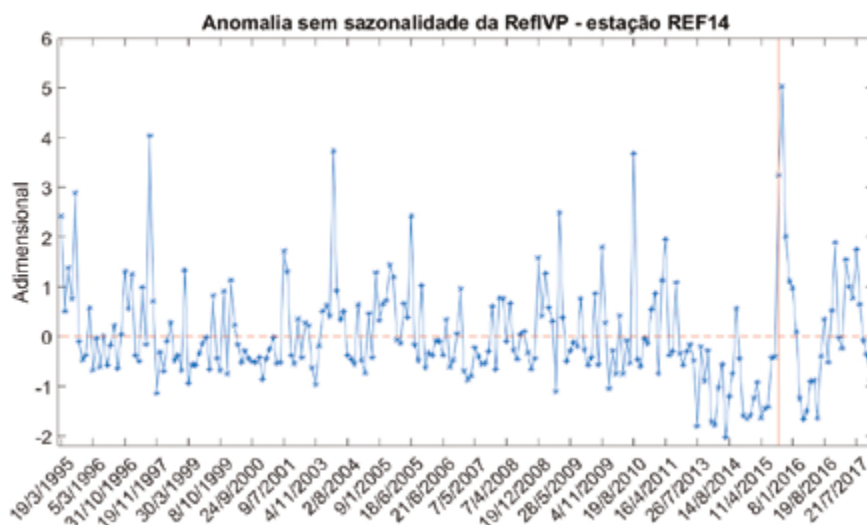


Figura 110 – Anomalia sem sazonalidade da RefIVP para a estação REF14, localizada no rio Doce. Anomalia igual a zero (linha vermelha tracejada) antes e após a data do rompimento da barragem de Fundão (linha vermelha contínua).



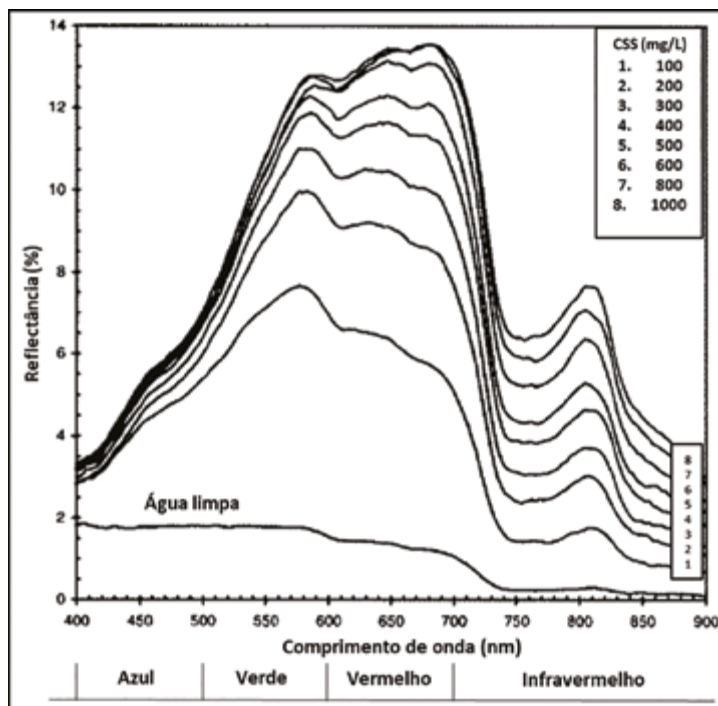
2.3.5.4.3.6 Análise integrada dos resultados

Os dados utilizados para as análises realizadas nas seções anteriores estão todos relacionados aos sedimentos, porém de formas distintas, o que faz com que seja necessária cautela ao analisar seus resultados.

A metodologia utilizada para calcular a CSS utiliza apenas os sedimentos inorgânicos em suspensão na água. Já a turbidez pode ser influenciada tanto pela matéria inorgânica quanto pela matéria orgânica, que pode estar em suspensão ou dissolvida na água (ASTM INTERNATIONAL, 2003). Os SSTs são calculados a partir da filtragem de amostras com posterior secagem, o que faz com que os materiais dissolvidos e eventuais componentes orgânicos, que podem se volatilizar em uma temperatura próxima de 103 °C, sejam excluídos da pesagem.

A reflectância espectral de superfície é a quantidade de radiação emitida pelo sol que é refletida pela mistura de água e sedimentos. Ao observarmos a Figura 111, nota-se que, para os comprimentos de onda na faixa do vermelho, é onde ocorre o pico da reflectância para as misturas água e sedimentos, por isso é bastante indicada para a análise de sedimentos em suspensão. Contudo, percebe-se que, para elevadas concentrações, a resposta da reflectância nessa faixa, diante do aumento da CSS, começa a atingir um patamar que dificulta diferenciar a quantidade de sedimentos existentes na água. Assim, para elevadas CSS, a faixa do infravermelho próximo se torna mais adequada, pois a reflectância continua a aumentar de forma proporcional ao aumento da CSS.

Figura 111 – Reflectância espectral da água com vários níveis de concentração de sedimentos suspensos.



Fonte: Adaptado de Lodhi et al. (1998).

Pode-se perceber a partir das análises que a turbidez foi aquela que mais indicou influência do rompimento da barragem de Fundão nos meses que sucederam o evento, o que pode indicar que a presença de materiais orgânicos ou dissolvidos estivesse presente em grandes quantidades no material que escoou da barragem para os cursos d'água.

Todas as análises mostraram que a presença dos sedimentos nos cursos d'água diminui de montante para jusante e, também, ao longo do tempo e que as estações mais próximas da região da barragem apresentam valores de anomalias maiores por um maior período de tempo. Os dados de CSS são os mais escassos, o que dificulta uma análise mais aprofundada da quantidade de sedimentos inorgânicos que estão sendo transportados pelos cursos d'água. Os dados de reflectância são os que estão disponíveis em maior quantidade e indicam que, em 2016 (após o período seco) e em 2017, a reflectância observada no rio Doce tende a voltar aos valores antes do rompimento da barragem de Fundão.

Os dados de turbidez e SSTs, que estão disponíveis com maior frequência de medição no período imediato após o desastre até março/2017, mostram que os reservatórios foram de grande importância para a retenção dos sedimentos. Não apenas os reservatórios, mas a região do rio Doce entre Ipatinga e Governador Valadares, que apresenta pouca declividade, possivelmente contribuíram para a deposição dos sedimentos.

2.3.5.4.4 Análise Estatísticas da Concentração de Sólidos

Aqui é apresentada uma análise estatística que visa complementar o estudo realizado e apresentado nos itens anteriores com as séries históricas de diferentes estações de concentração de sedimentos em suspensão, turbidez, sólidos suspensos totais, reflectância de superfície na faixa do vermelho e do infravermelho próximo obtidas do satélite LANDSAT.

Para cada um dos conjuntos de dados é apresentada uma tabela que resume as principais informações utilizadas nos testes estatísticos e três mapas: um com os resultados das diferenças relativas percentuais (*Diff*) em cada posto, outro para o teste *t de Student* para as médias e outro para o teste F de Snedecor para as variâncias.

2.3.5.4.4.1 Concentração de Sedimentos em Suspensão

Os resultados apresentados na Tabela 38 mostram que as diferenças relativas percentuais (*Diff*) entre as médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão variaram entre -74%, na estação 56696000, e 37.67% na estação 56539000.

Os resultados do teste *t de student* para as médias mostraram que apenas as estações 56075000 e 56696000, que não estavam no caminho da onda de rejeitos, não apresentaram alteração significativa ao nível de significância de 1% (Tabela 38). Já quanto ao teste F de Snedecor, observa-se que somente a estação 56075000 não apresentou alteração significativa da variância.

Destaca-se que em todas as estações localizadas no rio Doce a média após o rompimento da barragem de Fundão foi significativamente maior, tanto no teste *t* quanto no teste F. Os resultados apresentados na Tabela 38 podem ser visualizados de forma espacial nos mapas das Figura 112 a Figura 115.

Tabela 38 – Resultados dos testes estatísticos *t de student* e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de CSS. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.

Estação	Rio	μ antes (mg/L)	μ depois (mg/L)	σ antes (mg/L)	σ depois (mg/L)	η antes	η depois	Diff (%)	F	H0 - teste <i>t</i> ($\alpha=1\%$)*	H0 - teste F ($\alpha=1\%$)**
56075000	Piranga	47,3	42,0	60,7	65,4	44	6	-11	1,1	Aceita	Aceita
56425000	Doce	87,9	1.593,4	146,8	2.190,9	42	9	1.713	14,9	Rejeitada	Rejeitada
56539000	Doce	125,1	47.260,5	226,4	139.347,2	43	9	37.666	616,6	Rejeitada	Rejeitada
56696000	Piracicaba	153,6	40,3	635,5	68,7	64	6	-74	9,2	Aceita	Rejeitada
56850000	Doce	64,4	4.700,0	79,0	12.763,9	21	15	7.199	161,6	Rejeitada	Rejeitada
56920000	Doce	192,6	620,7	267,1	1.257,6	49	6	222	4,7	Rejeitada	Rejeitada
56994500	Doce	148,7	1.781,7	262,1	4.580,7	78	15	1.098	17,5	Rejeitada	Rejeitada

*H0: as médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

**H0: as variâncias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

Figura 112 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de CSS.

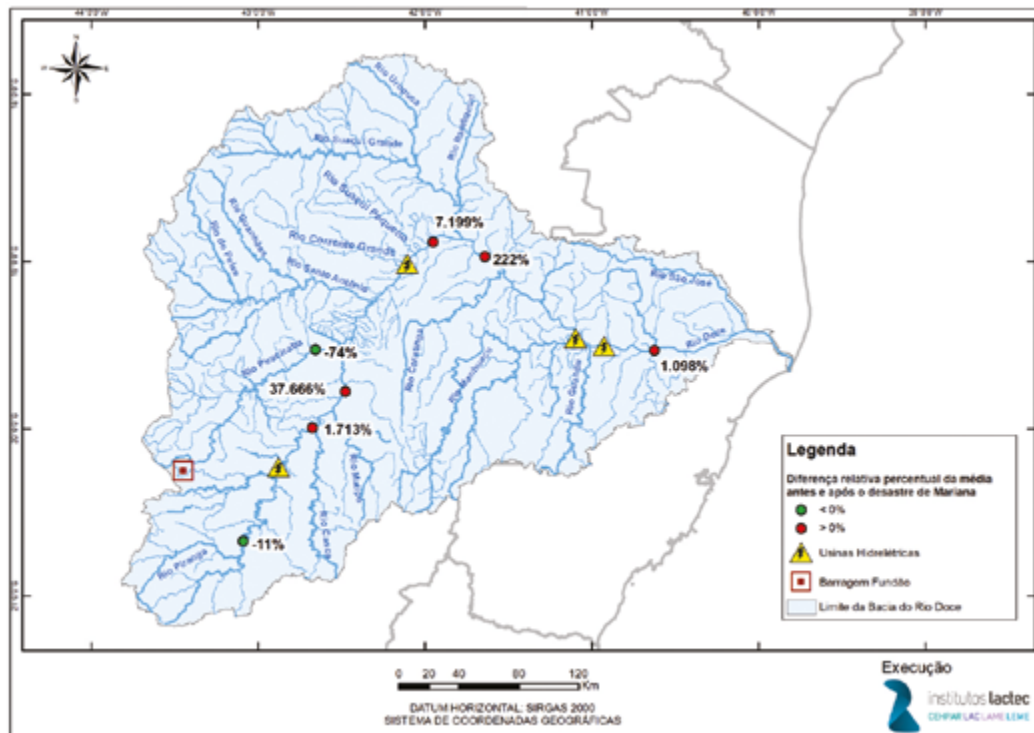


Figura 113 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de CSS.

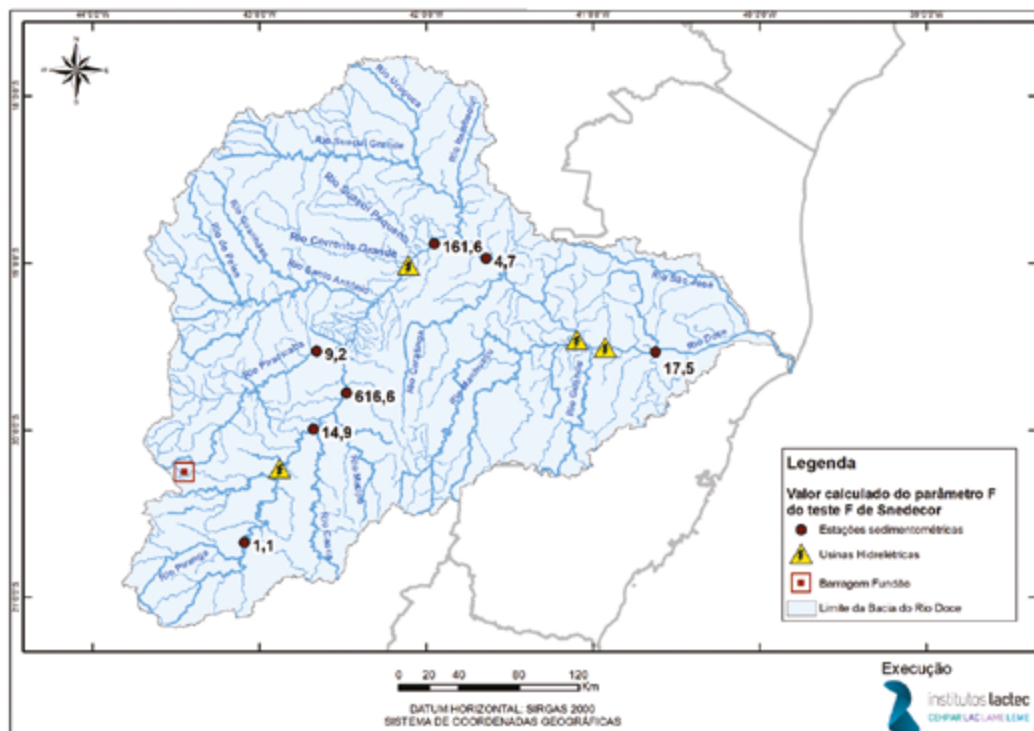


Figura 114 - Resultado do teste estatístico *t de student* para as estações de CSS ao nível de significância $\alpha = 1\%$.

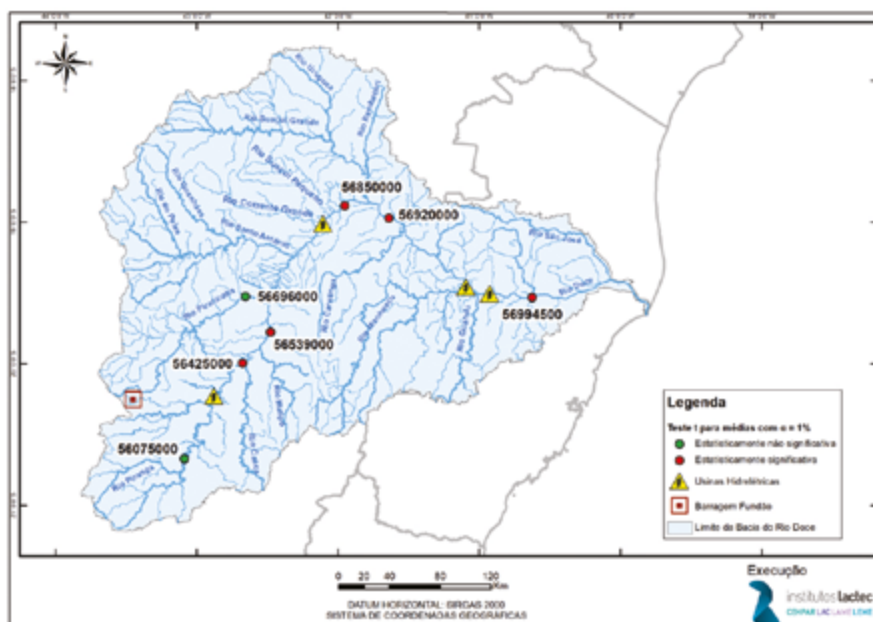
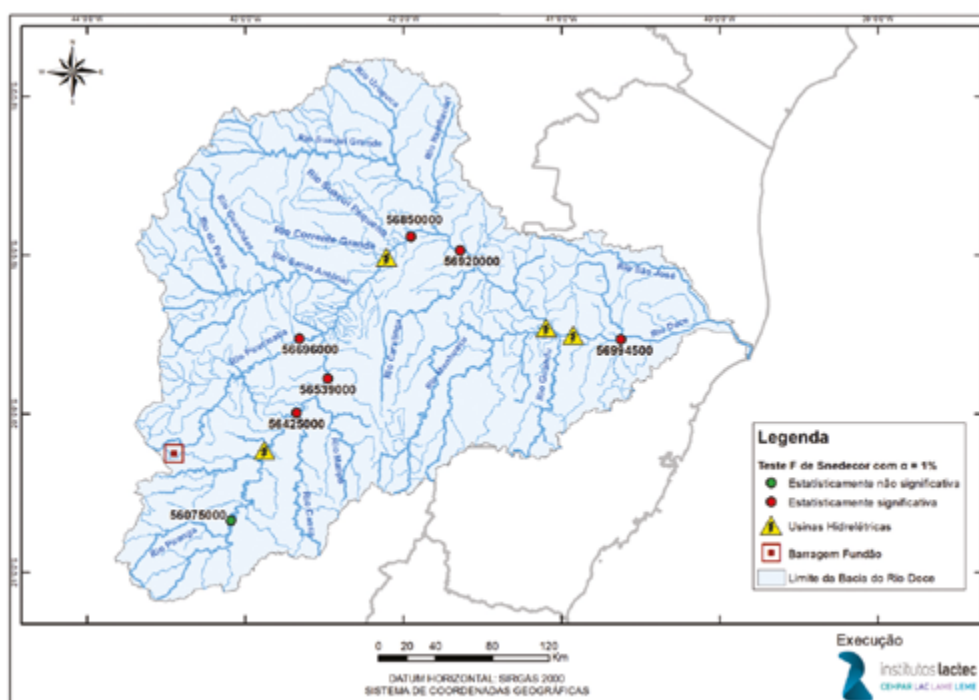


Figura 115 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de CSS ao nível de significância $\alpha = 1\%$.



2.3.5.4.4.2 Turbidez

Ao analisar as séries de turbidez, observou-se que todas as estações localizadas no caminho na onda sofreram alteração significativa no valor da média e da variância (Tabela 39, Figura 116 e Figura 117). A menor *Diff* é observada na estação RD001 (-79%) e a maior na estação RD033 (36.72%). A maior alteração no valor das variâncias foi na RD019, com um F de 1.100,2.

Ao compararmos o teste t (Figura 118) e o teste F (Figura 119), observa-se duas possíveis divergências, uma na estação RD001 e outra na estação RD089, ambas localizadas em afluentes. Na estação RD001, antes do rompimento da barragem de Mariana a média era de 47,6 NTU e após diminuiu para 9,9 NTU. Já o desvio padrão variou de 124,0 antes para 0,8 após, indicando que houve um contínuo período sem grandes variações no valor da turbidez e que houve uma diminuição significativa nos valores de turbidez após o desastre. Já na estação RD089, percebe-se que por estar muito próxima a confluência com o rio Doce, essa pode ter sido influenciada pela onda de rejeitos, o que provocou um aumento de 621% na média após o rompimento da barragem de Fundão, o que poderia explicar o resultado encontrado com o teste t. Destaca-se ainda que no período analisado após o desastre, só houveram três medições de turbidez na estação.

Tabela 39 – Resultados dos testes estatísticos *t de student* e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de turbidez. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.

Estação	Rio	μ antes (mg/L)	μ depois (mg/L)	σ antes (mg/L)	σ depois (mg/L)	η antes	η depois	Diff (%)	F	H0 - teste t ($\alpha=1\%$)*	H0 - teste F ($\alpha=1\%$)**
RD001	Piranga	47,6	9,9	124,0	0,8	73	3	-79	124,0	Aceita	Rejeitada
RD013	Piranga	49,4	68,5	86,3	126,1	89	8	39	1,5	Aceita	Aceita
RD019	Doce	51,5	15.208,2	71,4	78.113,1	91	59	29.410	1.100,2	Rejeitada	Rejeitada
RD032	Piracicaba	37,9	51,0	93,8	70,2	64	3	35	1,3	Aceita	Aceita
RD033	Doce	67,3	24.775,6	120,2	84.536,5	92	63	36.718	704,5	Rejeitada	Rejeitada
RD035	Doce	60,5	14.539,3	80,0	49.293,3	85	58	23.946	616,2	Rejeitada	Rejeitada
RD039	Santo Antônio	52,9	71,8	90,1	86,5	73	3	36	1,0	Aceita	Aceita
RD044	Doce	57,9	5.064,4	104,6	19.337,6	83	59	8.651	184,2	Rejeitada	Rejeitada
RD045	Doce	62,8	4.043,1	119,7	12.672,7	92	58	6.336	105,6	Rejeitada	Rejeitada
RD053	Doce	61,5	3.552,8	106,9	11.344,6	91	54	5.676	106,0	Rejeitada	Rejeitada
RD058	Doce	62,2	4.055,2	95,7	13.211,1	83	55	6.425	137,6	Rejeitada	Rejeitada
RD059	Doce	69,6	2.101,9	134,4	4.458,5	92	55	2.920	33,3	Rejeitada	Rejeitada
RD067	Doce	60,2	1.280,7	101,8	2.069,5	90	55	2.028	20,3	Rejeitada	Rejeitada
RD071	do Carmo	63,7	4.458,9	140,8	7.210,0	29	42	6.902	5,1	Rejeitada	Rejeitada
RD072	Doce	56,0	12.569,2	121,3	55.000,7	48	63	22.363	454,6	Rejeitada	Rejeitada
RD083	Doce	41,9	3.532,5	81,0	5.131,5	49	62	8.341	63,3	Rejeitada	Rejeitada
RD089	Suaçuí Grande	73,5	530,3	169,2	692,9	30	3	621	4,1	Rejeitada	Aceita
RDC1E010	Doce	46,6	907,8	55,6	1.301,9	26	47	1.850	23,3	Rejeitada	Rejeitada
RDC1D015	Doce	46,8	875,7	57,1	1.312,7	11	51	1.770	23,0	Rejeitada	Rejeitada
RDC1E030	Doce	32,1	778,2	31,9	1.080,7	28	52	2.326	33,8	Rejeitada	Rejeitada

*H0: as médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

**H0: as variâncias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

Figura 116 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de turbidez.

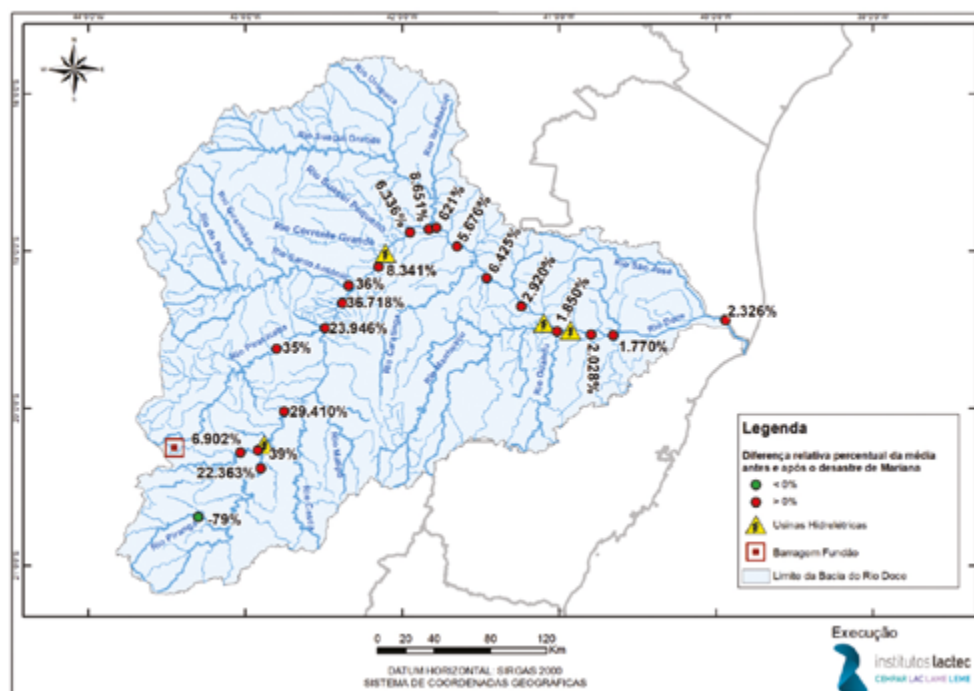


Figura 117 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de Qualidade de Água com dados de turbidez.

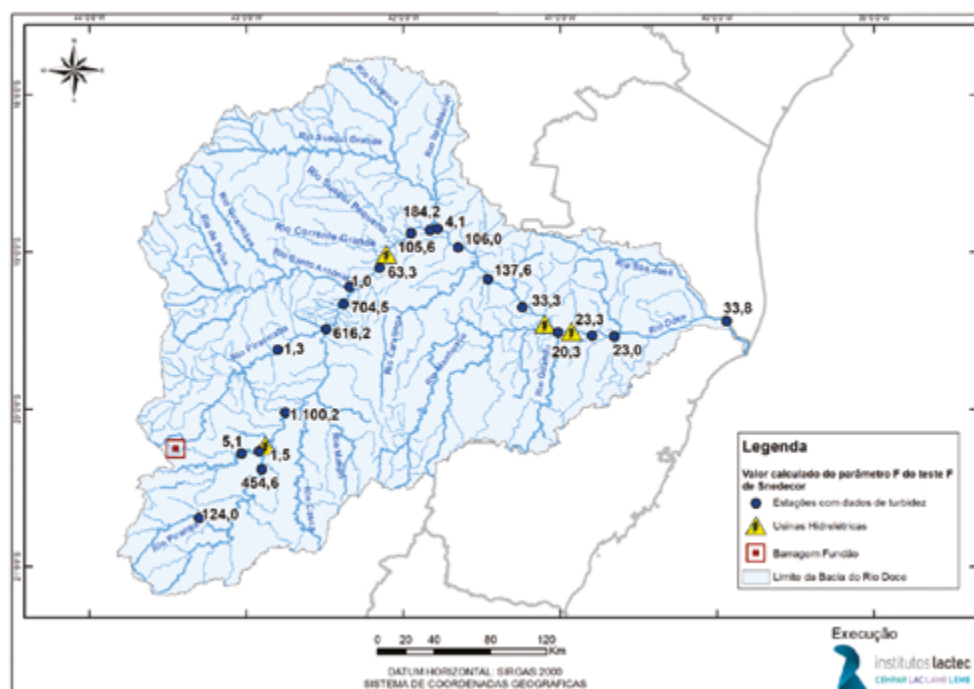


Figura 118 – Resultado do teste estatístico t de *student* para as estações de turbidez ao nível de significância $\alpha = 1\%$.

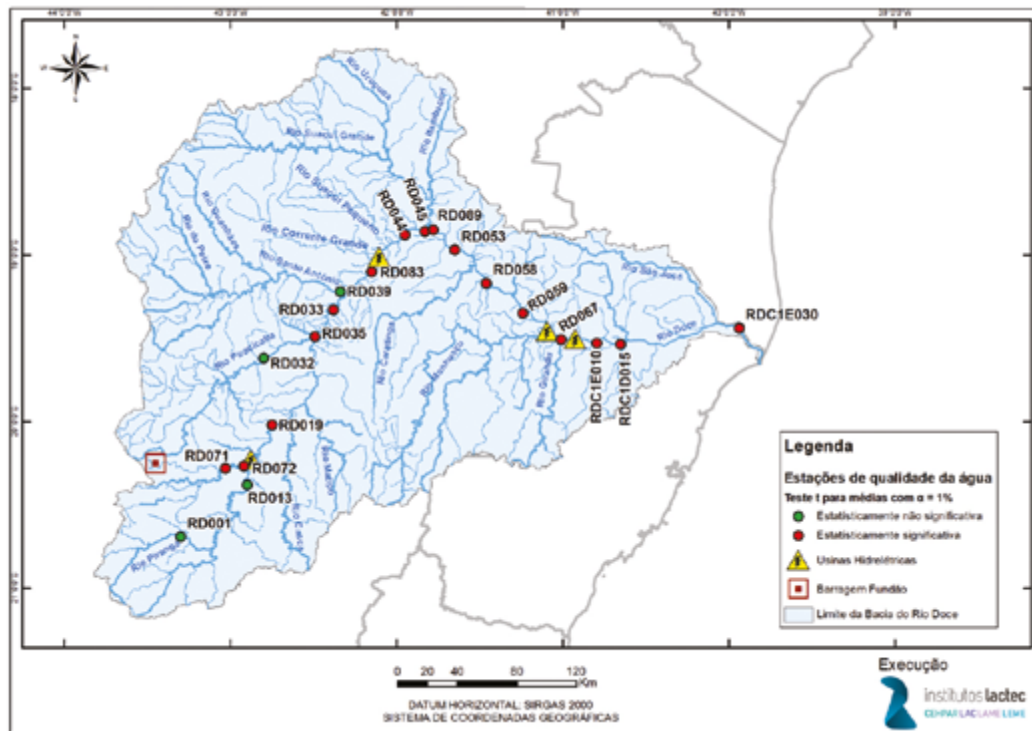
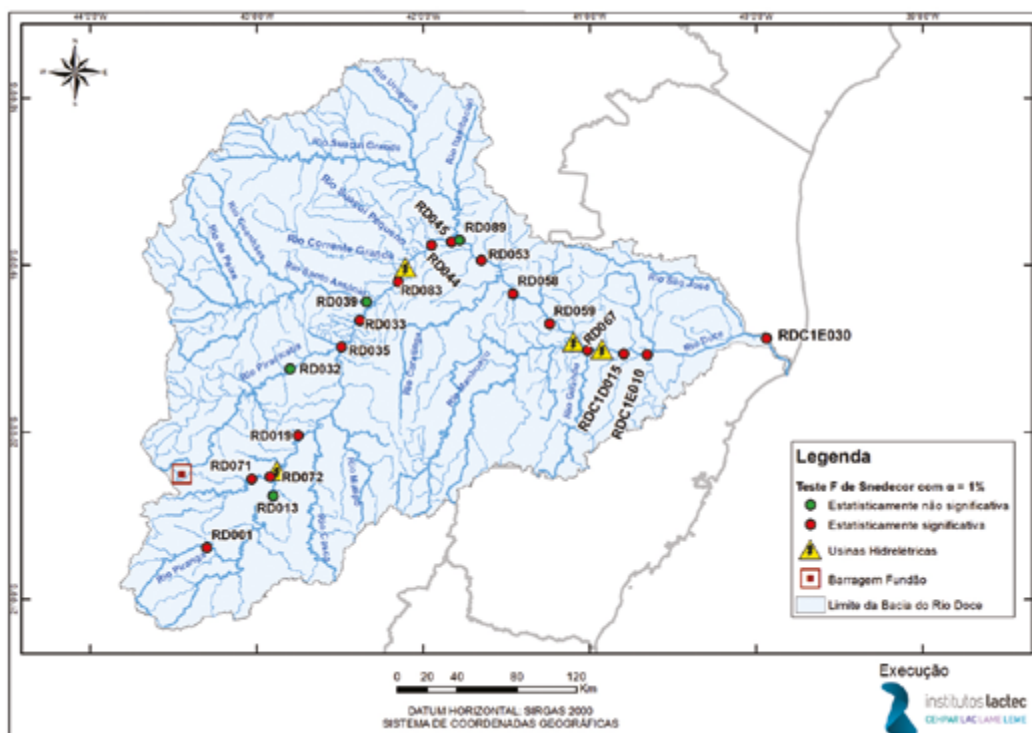


Figura 119 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de turbidez ao nível de significância $\alpha = 1\%$. Sólidos Suspensos Totais



As medições se SST geralmente coincidem com as medições de turbidez, pelo fato que as estações de qualidade de água são as mesmas. A *Diff* entre as médias variaram um pouco menos que a turbidez, com valores entre -72% e 14.09% (Tabela 40), mostrando que a variável turbidez foi mais sensível à alteração provocada pela onda de rejeitos. De forma semelhante à turbidez, todas as estações localizadas no caminho da onda de rejeitos apresentaram alterações significativas, tanto para as médias quanto para as variâncias.

Para as estações localizadas nos afluentes, os resultados encontrados com os testes *t* e *F* mostraram que nas estações RD032 e RD089 a variação da média foi significativa, mas da variância não. A discussão a respeito do resultado para a RD089 é a mesma apresentada para o caso da turbidez. Quanto a estação RD032, a diferença principal pode estar relacionada ao fato de que essa também só apresenta três registros após o desastre, com o primeiro deles apresentando um valor alto de SST que fez com a média fosse maior que a do período anterior.

Os resultados da Tabela 40 podem ser visualizados de forma espacial nos mapas da Figura 120, Figura 121, Figura 122 e Figura 123. Observa-se na Figura 120, bem como na Figura 116 (para os dados de turbidez), que existe uma tendência das médias das estações diminuírem de montante para jusante no caminho da onda de rejeitos.

Tabela 40 – Resultados dos testes estatísticos *t de student* e *F* de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de SST. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.

Estação	Rio	μ antes (mg/L)	μ depois (mg/L)	σ santes (mg/L)	σ depois (mg/L)	η antes	η depois	Diff (%)	F	H0 - teste <i>t</i> ($\alpha=1\%$)*	H0 - teste F ($\alpha=1\%$)**
RD001	Piranga	46,8	13,0	99,0	12,1	73	3	-72	3,6	Rejeitada	Rejeitada
RD013	Piranga	42,3	50,6	71,0	86,5	88	8	20	1,2	Aceita	Aceita
RD019	Doce	46,3	6.572,9	62,8	32.064,0	92	50	14.090	142,9	Rejeitada	Rejeitada
RD032	Piracicaba	20,1	34,0	33,2	42,6	64	3	70	1,7	Rejeitada	Aceita
RD033	Doce	59,3	7.337,2	88,4	30.142,6	92	48	12.274	124,4	Rejeitada	Rejeitada
RD035	Doce	59,6	5.007,2	64,4	18.098,5	85	50	8.308	83,5	Rejeitada	Rejeitada
RD039	Santo Antônio	41,2	58,7	66,6	80,2	73	3	42	1,4	Aceita	Aceita
RD044	Doce	38,8	1.249,8	62,5	3.604,0	83	49	3.119	3,2	Rejeitada	Rejeitada
RD045	Doce	48,7	1.367,9	87,4	3.697,4	92	48	2.708	27,9	Rejeitada	Rejeitada
RD053	Doce	50,6	1.389,4	77,9	4.776,2	91	44	2.645	27,2	Rejeitada	Rejeitada
RD058	Doce	55,7	1.102,4	85,2	2.261,3	83	46	1.878	19,7	Rejeitada	Rejeitada
RD059	Doce	54,2	673,9	100,6	1.092,9	92	46	1.143	12,5	Rejeitada	Rejeitada
RD067	Doce	41,1	339,4	72,5	577,0	89	51	726	8,3	Rejeitada	Rejeitada
RD071	do Carmo	87,4	3.139,7	204,3	6.446,2	29	35	3.492	3,6	Rejeitada	Rejeitada
RD072	Doce	68,6	6.634,8	161,4	21.219,7	48	54	9.574	96,2	Rejeitada	Rejeitada
RD083	Doce	29,5	1.132,1	64,9	1.988,9	49	53	3.734	37,7	Rejeitada	Rejeitada
RD089	Suaçuí Grande	62,7	332,3	138,0	464,5	30	3	430	5,3	Rejeitada	Aceita

*H0: as médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

**H0: as variâncias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais

Figura 120 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de SST.

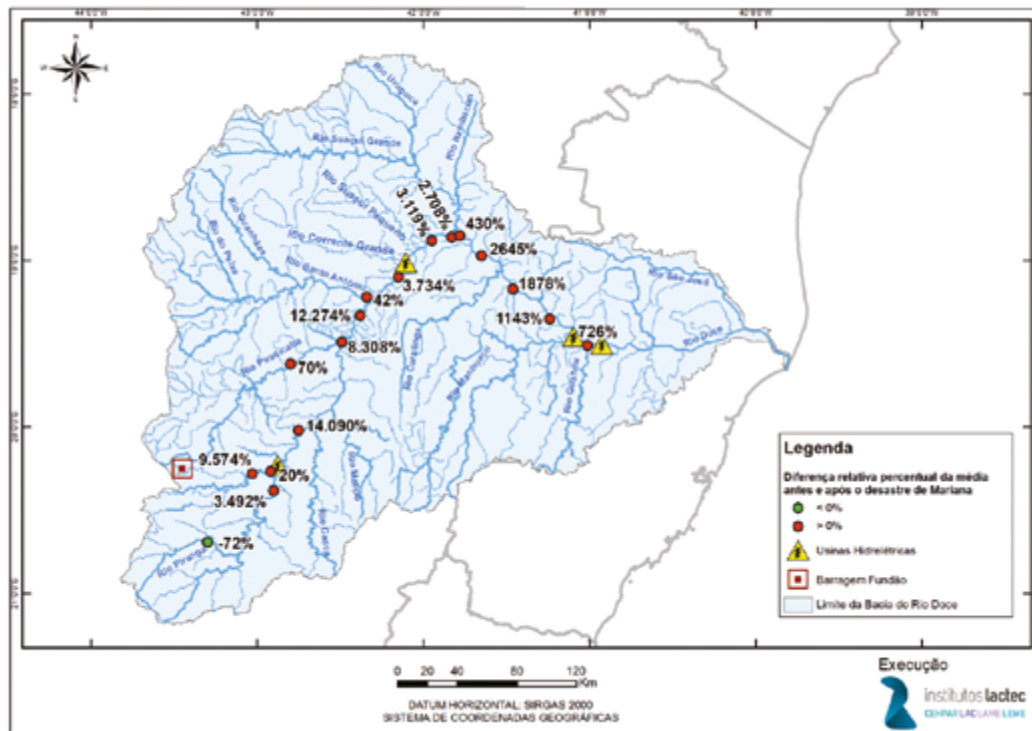


Figura 121 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de Qualidade de Água com dados de SST.

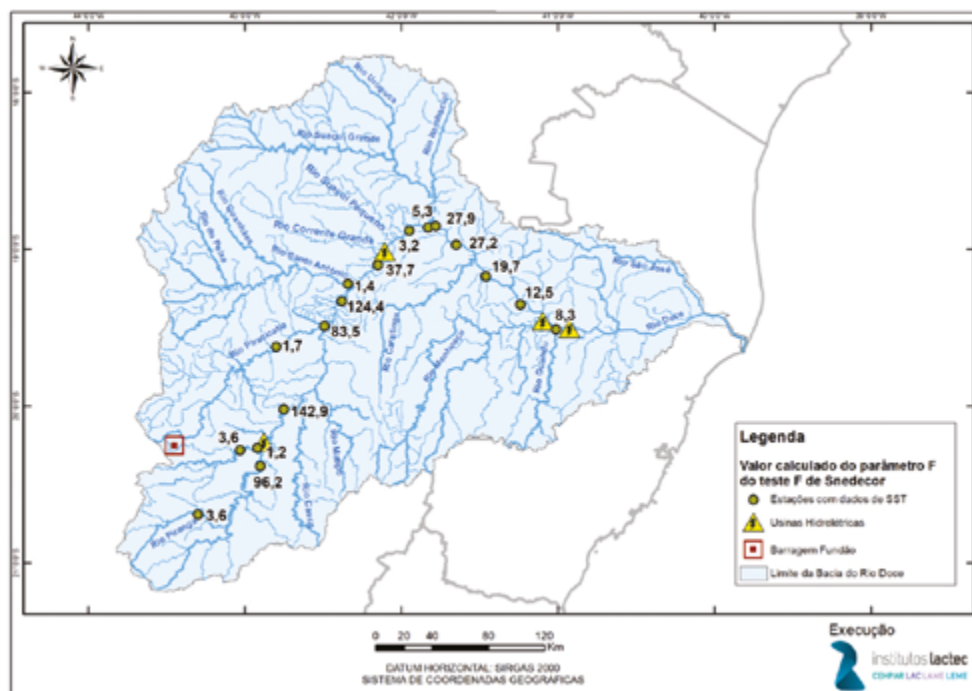


Figura 122 – Resultado do teste estatístico *t* de student para as estações de SST ao nível de significância $\alpha = 1\%$.

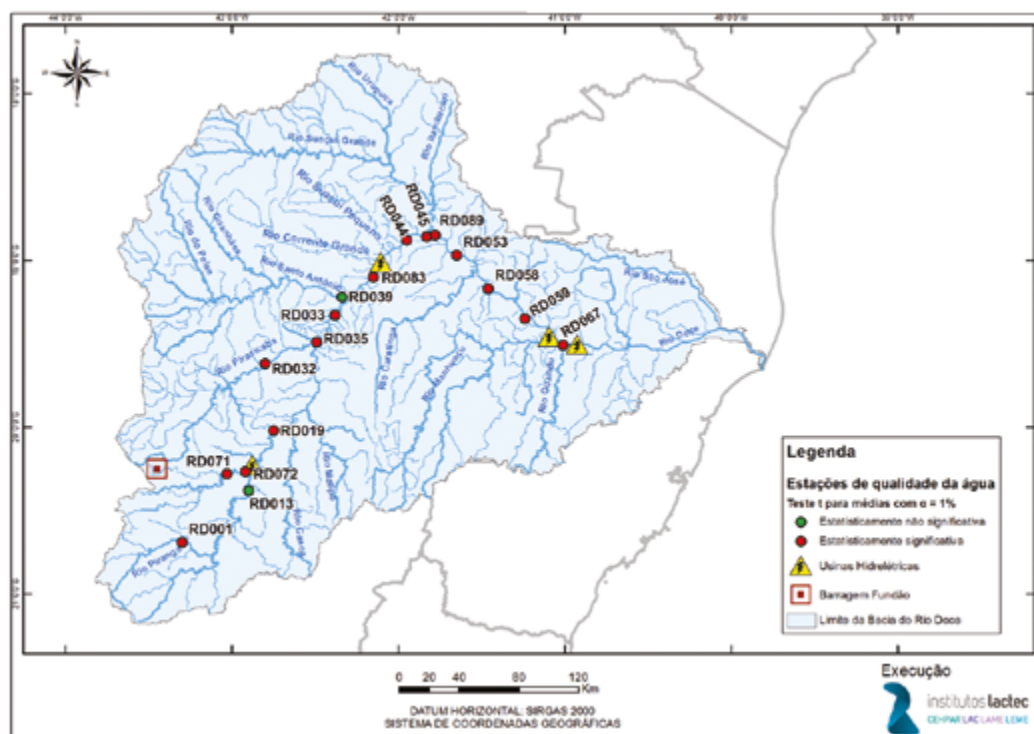
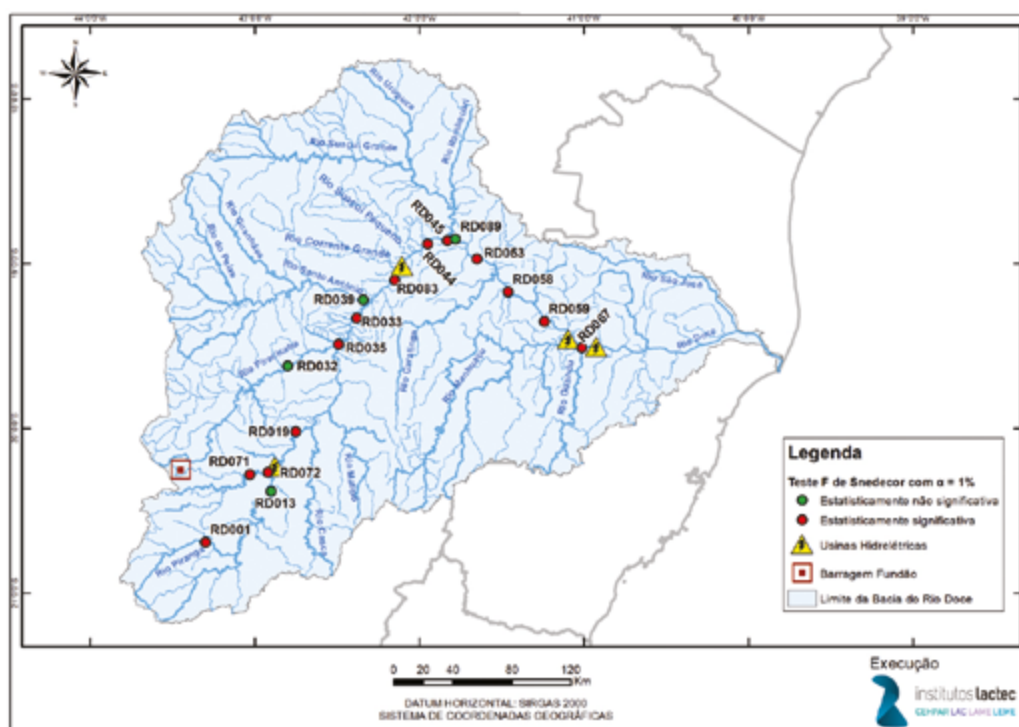


Figura 123 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de SST ao nível de significância $\alpha = 1\%$. Reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho



Na Tabela 41 são apresentados os resultados utilizando os dados de reflectância de superfície na faixa do vermelho. Percebe-se que não existe um padrão para os rios principais e nem para os afluentes como observado para os dados de CSS, turbidez e SST. No caminho da onda de rejeitos, somente a estação REF08 apresentou alteração significativa quando aplicado o teste *t* e somente a estação REF05 quando aplicado o teste F. Os resultados encontrados também podem ser visualizados nos mapas da Figura 124, Figura 125, Figura 126 e Figura 127.

Observa-se que a variação dos valores de reflectância é pequena e ressalta-se que na faixa do vermelho ocorre a saturação para elevados valores de CSS. Os valores de *Diff* variaram entre -43% (REF01) e 16% (REF08), sendo que para a maioria das estações os valores foram negativos, indicando que no período pós desastre os valores da média foram menores do que o período pré-desastre. Os testes aplicados pressupõem uma variação significativa no valor das médias e/ou das variâncias o que não ocorre para as estações de RefVER.

Tabela 41 – Resultados dos testes estatísticos *t de student* e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de RefVER. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.

Estação	Rio	μ antes (mg/L)	μ depois (mg/L)	σ antes (mg/L)	σ depois (mg/L)	η antes	η depois	Diff (%)	F	H0 - teste <i>t</i> ($\alpha=1\%$)*	H0 - teste F ($\alpha=1\%$)**
REF01	Doce	11,4	6,4	7,2	3,3	179	22	-43	2,2	Aceita	Rejeitada
REF02	Doce	11,3	10,6	5,2	4,2	187	24	-7	1,2	Aceita	Aceita
REF03	Doce	11,9	10,9	6,2	4,7	187	24	-8	1,3	Aceita	Aceita
REF04	Doce	11,5	11,0	5,6	4,2	150	24	-4	1,3	Aceita	Aceita
REF05	Doce	11,8	10,7	6,0	3,9	173	26	-10	1,5	Aceita	Rejeitada
REF06	Santo Antônio	11,4	9,4	5,5	3,9	175	26	-18	1,4	Aceita	Aceita
REF07	Doce	12,1	12,6	5,3	4,4	163	24	5	1,2	Aceita	Aceita
REF08	Doce	11,9	13,8	6,0	5,9	174	20	16	1,0	Rejeitada	Aceita
REF09	Doce	12,6	10,5	6,5	6,1	182	20	-16	1,1	Aceita	Aceita
REF10	Caratinga	13,7	10,3	5,0	2,5	164	15	-25	2,0	Aceita	Rejeitada
REF11	Doce	12,1	9,5	6,3	5,5	179	19	-21	1,1	Aceita	Aceita
REF12	Doce	11,5	11,9	6,3	8,6	194	21	3	1,4	Aceita	Aceita
REF13	Manhuaçu	12,5	9,2	6,0	4,3	187	22	-26	1,4	Aceita	Aceita
REF14	Doce	12,6	11,5	6,5	7,8	204	27	-9	1,2	Aceita	Aceita
REF15	Doce	12,3	12,0	5,8	6,7	192	22	-2	1,2	Aceita	Aceita

*H0: as médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

**H0: as variâncias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

Figura 124 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de RefVER.

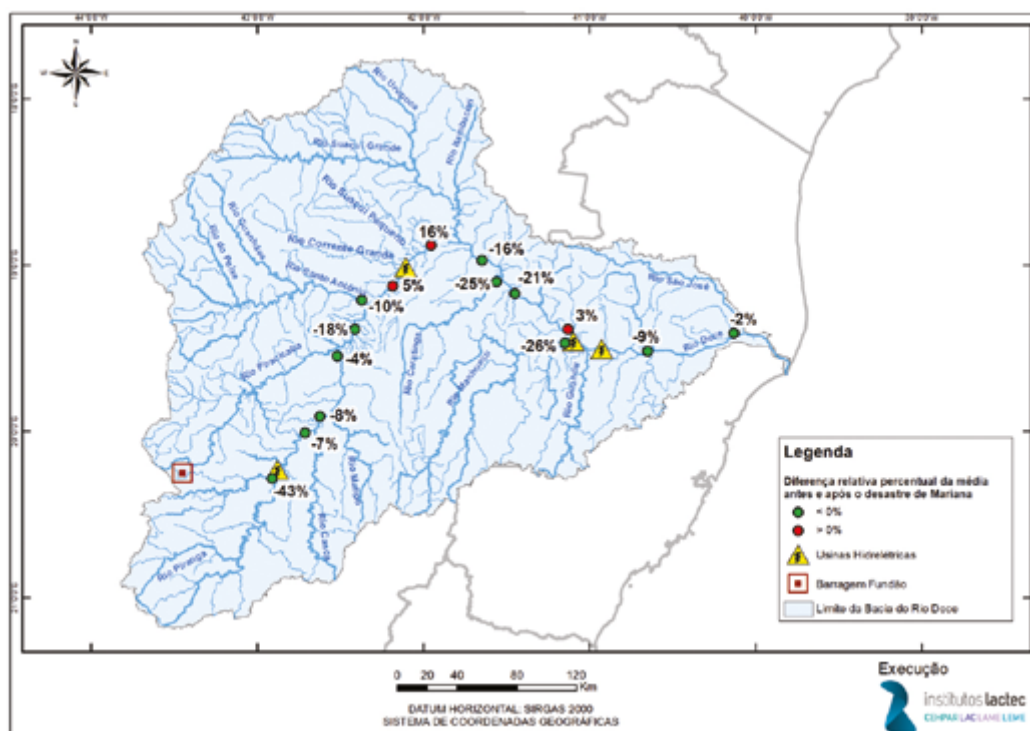


Figura 125 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de RefVER.

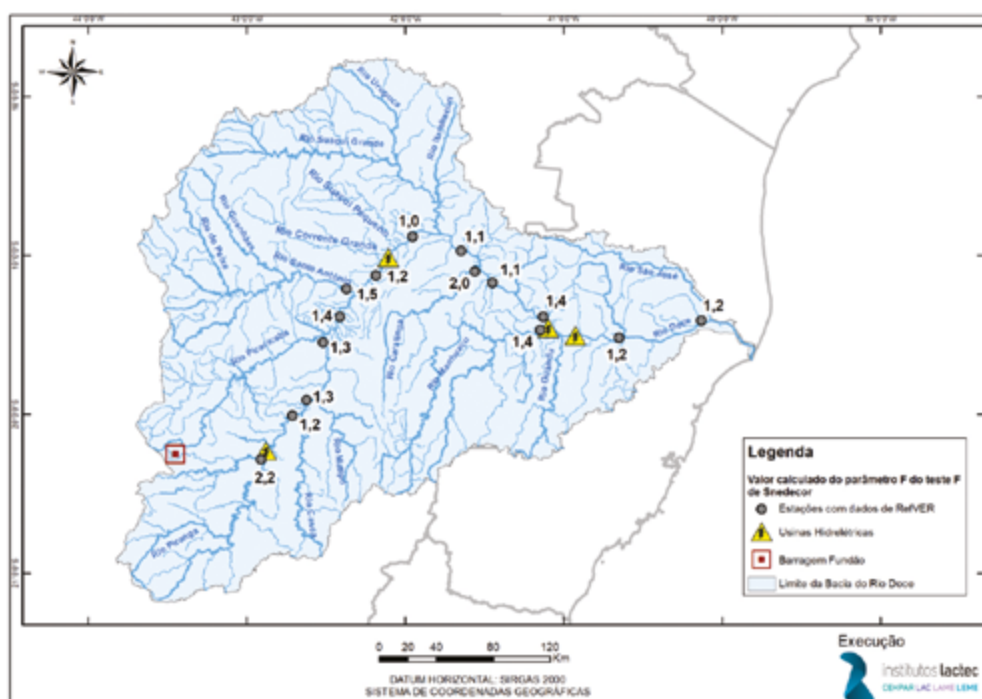


Figura 126 – Resultado do teste estatístico *t de student* para as estações de RefVER ao nível de significância $\alpha = 1\%$.

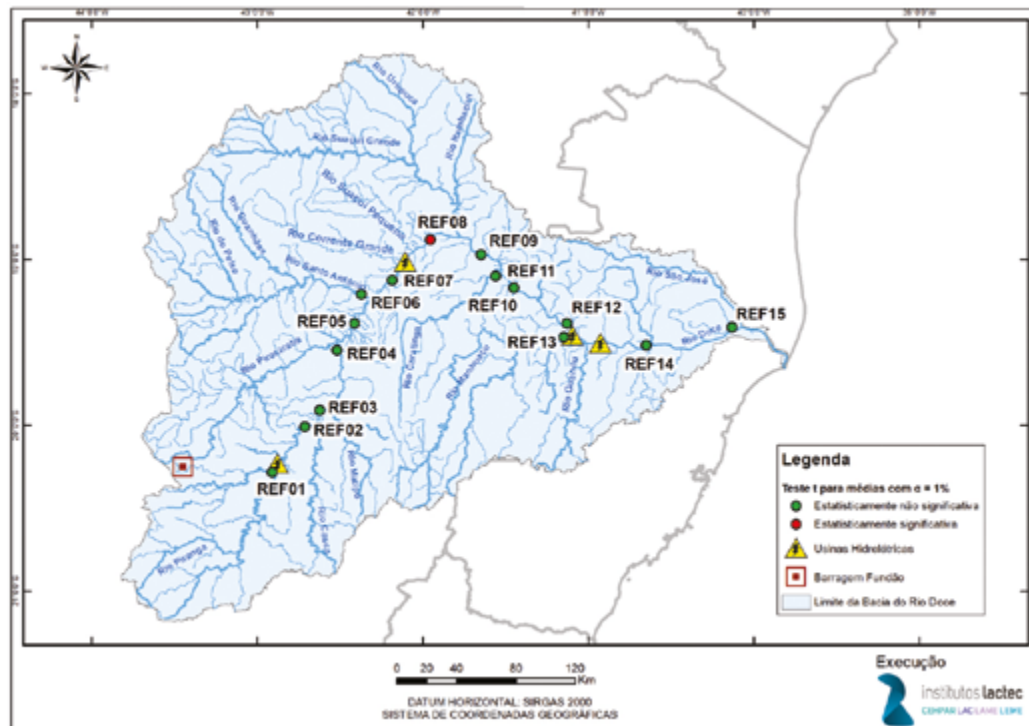
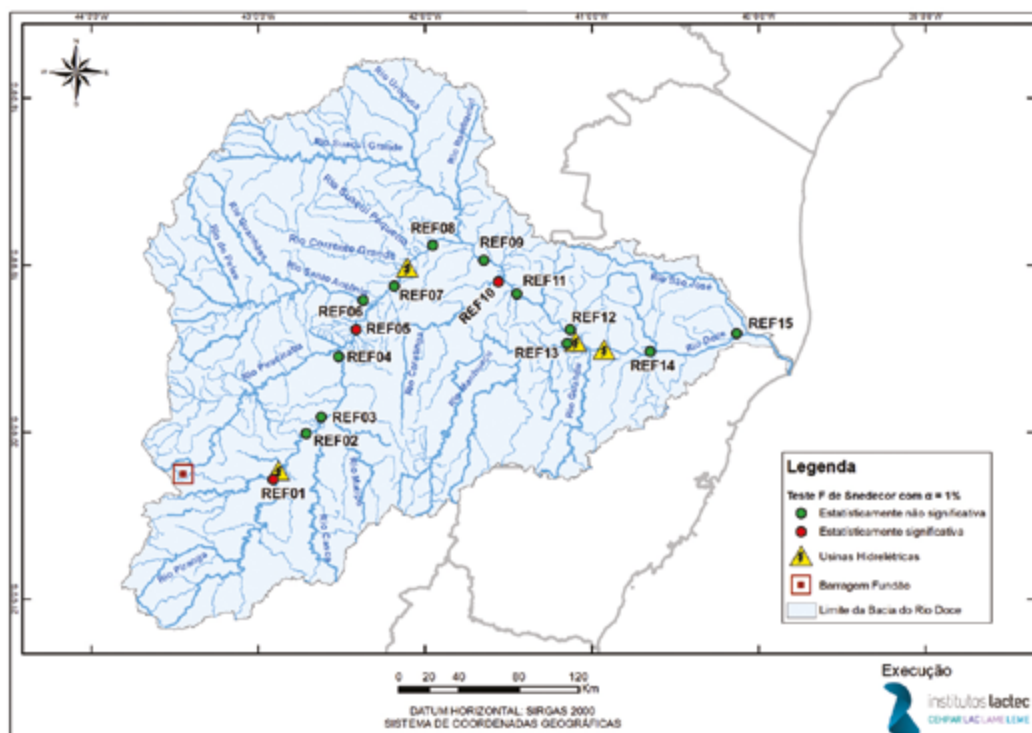


Figura 127 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de RefVER ao nível de significância $\alpha = 1\%$



2.3.5.4.4.3 Reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo

Na Tabela 42 são apresentados os resultados utilizando os dados de reflectância de superfície na faixa do infravermelho próximo. Os valores das *Diff* variaram entre -47% e 60% (Figura 128), mostrando que a RefIVP (reflectância do infravermelho próximo) foi mais sensível à ocorrência do rompimento da barragem de Fundão do que a RefVER (reflectância do vermelho). Isso pode estar relacionado ao fato de que na faixa do infravermelho próximo a saturação é menor que na faixa do vermelho. Quanto a variação das variâncias, pelo parâmetro F, observa-se que seu maior valor é na estação REF01 (Figura 129).

Para o teste F, observa-se que nas estações localizadas no rio Doce, somente as estações REF01, REF02 E REF03 apresentaram alterações significativas para as variâncias. Já para o teste *t*, observa-se que todas as estações no caminho da onda de rejeitos até Governador Valadares (REF08) apresentaram alterações significativas no valor das médias. Entretanto, as estações REF12 e REF15 também apresentaram alterações significativas, o que dificulta definir um padrão de variações. Mesmo as estações REF09, REF11 e REF14 não apresentando variações significativas, as médias e as variâncias foram sempre maiores após o rompimento da barragem de Fundão. A Figura 130 e Figura 131 apresentam, espacialmente, os resultados dos testes *t de Student* e F de Snedecor, respectivamente.

Tabela 42 – Resultados dos testes estatísticos *t de student* e F de Snedecor ao nível de significância de 1% para as estações de RefIVP. Os termos ‘antes’ e ‘depois’ se referem, respectivamente, aos períodos que precedem e sucedem o rompimento da barragem de Fundão.

Estação	Rio	μ antes (mg/L)	μ depois (mg/L)	σ antes (mg/L)	σ depois (mg/L)	η antes	η depois	<i>Diff</i> (%)	F	H0 - teste t ($\alpha=1\%$)*	H0 - teste F ($\alpha=1\%$)**
REF01	Doce	9,8	5,2	8,6	2,9	179	22	-47	3,0	Aceita	Rejeitada
REF02	Doce	8,5	12,2	6,7	3,9	187	24	42	1,7	Rejeitada	Rejeitada
REF03	Doce	8,9	12,6	8,0	4,4	187	24	42	1,8	Rejeitada	Rejeitada
REF04	Doce	8,4	13,5	7,5	5,3	150	24	60	1,4	Rejeitada	Aceita
REF05	Doce	8,7	12,0	7,6	4,9	173	26	38	1,6	Rejeitada	Aceita
REF06	Santo Antônio	8,3	8,9	7,4	4,7	175	26	8	1,6	Aceita	Rejeitada
REF07	Doce	8,0	11,7	6,0	5,0	163	24	46	1,2	Rejeitada	Aceita
REF08	Doce	7,9	12,3	6,4	7,9	174	20	57	1,2	Rejeitada	Aceita
REF09	Doce	8,7	9,0	7,5	8,0	182	20	3	1,1	Aceita	Aceita
REF10	Caratinga	16,1	16,5	8,9	7,9	164	15	3	1,1	Aceita	Aceita
REF11	Doce	8,1	8,1	6,9	7,0	179	19	0	1,0	Aceita	Aceita
REF12	Doce	6,9	10,5	5,2	8,0	194	21	51	1,5	Rejeitada	Aceita
REF13	Manhuaçu	9,0	7,8	8,0	4,7	187	22	-13	1,7	Aceita	Rejeitada
REF14	Doce	7,6	8,7	6,1	7,1	204	27	14	1,2	Aceita	Aceita
REF15	Doce	7,5	10,3	5,5	6,3	192	22	37	1,1	Rejeitada	Aceita

*H0: as médias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

**H0: as variâncias antes e após o rompimento da barragem de Fundão foram iguais.

Figura 128 – Diferenças relativas percentuais antes e depois do rompimento da barragem de Fundão para as estações de RefIVP.

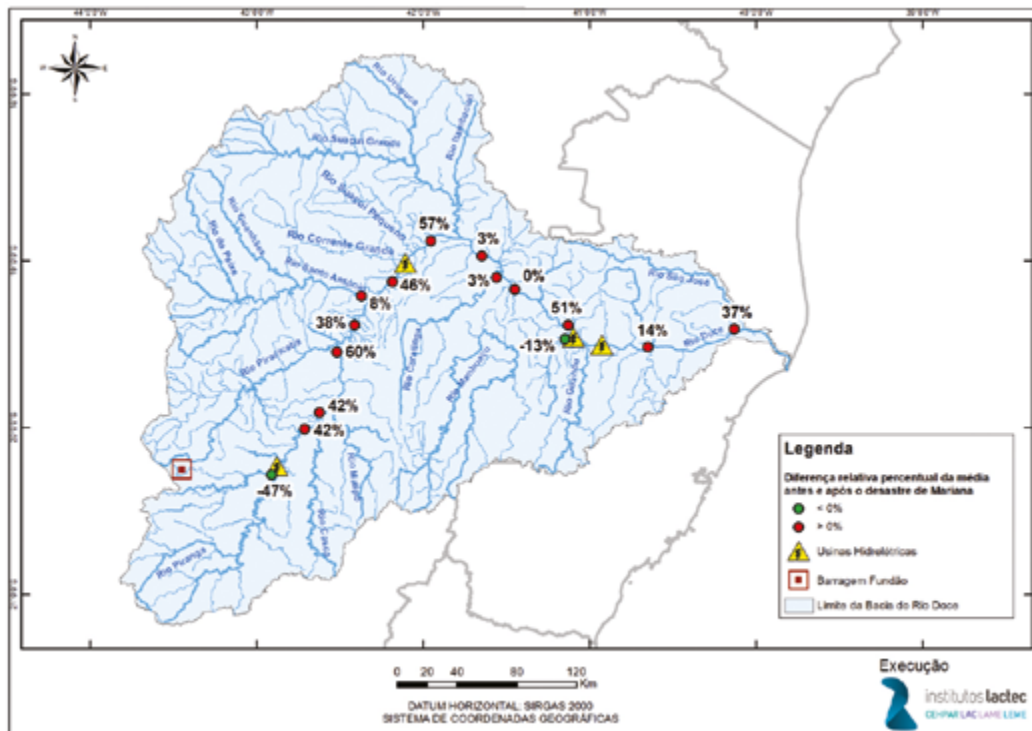


Figura 129 – Valores do parâmetro estatístico F para as estações de RefIVP.

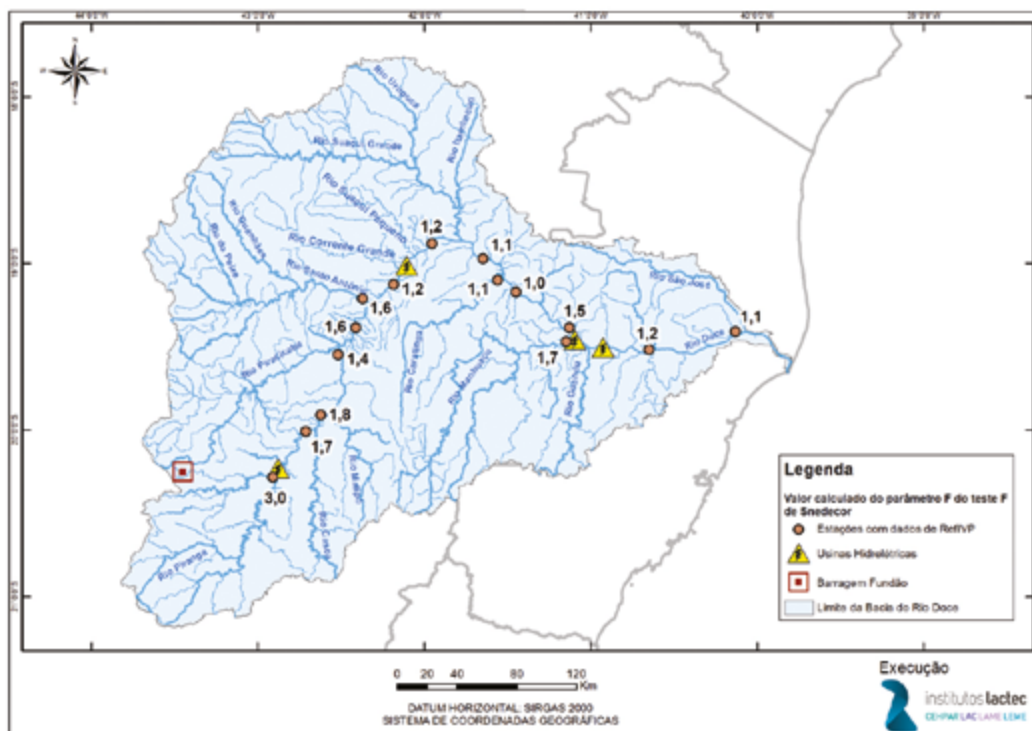


Figura 130 – Resultado do teste estatístico t de student para as estações de RefIVP ao nível de significância $\alpha = 1\%$

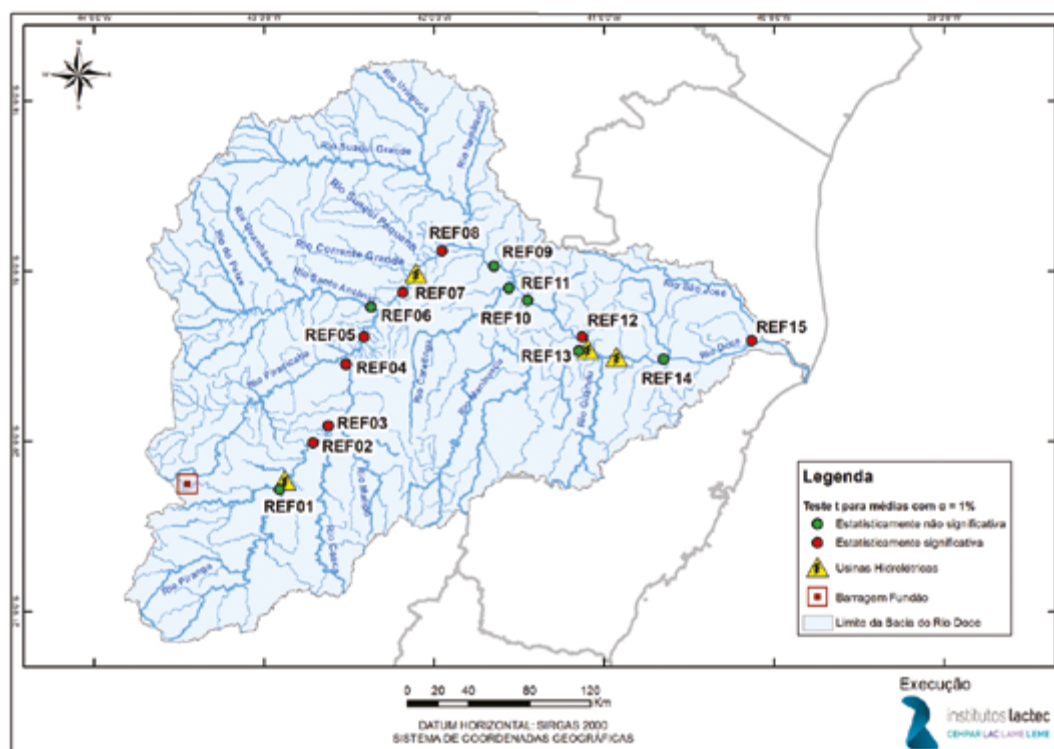
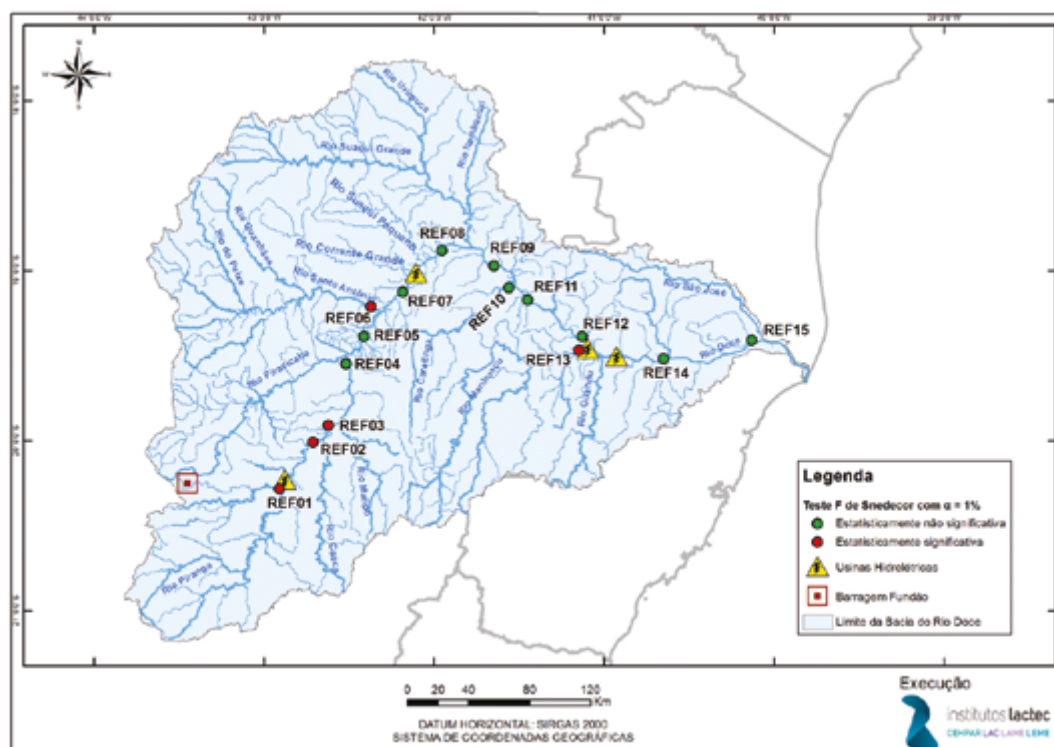


Figura 131 – Resultado do teste estatístico F de Snedecor para as estações de RefIVP ao nível de significância $\alpha = 1\%$



2.3.5.4.4. Conclusão

A aplicação dos testes de hipótese *t de student* para as médias e F de Snedecor para as variâncias, ao nível de significância $\alpha = 1\%$, apresentaram resultados que, no geral, permitem corroborar as análises realizadas com as séries históricas e as anomalias apresentadas.

Para as estações de concentração de sedimentos em suspensão, turbidez e sólidos suspensos totais, localizadas no caminho da onda de rejeitos, os resultados do teste *t* e F mostraram, respectivamente, alterações significativas nos valores das médias e das variâncias antes e após o rompimento de fundão, indicando aumento na quantidade e na variabilidade dos sedimentos no rio.

Com os valores das diferenças relativas percentuais (*Diff*) das médias, observou-se que existe uma tendência de os valores das médias e das variâncias serem maiores nas estações mais próximas ao rompimento da barragem, o que pode ser um reflexo da deposição dos sedimentos ao longo do rio Doce.

Para os afluentes, destaca-se a estação de turbidez e sólidos suspensos totais RD089 que apresentou valores elevados tanto para a média quanto para a variância, o que pode ter sido ocasionado por um remanso do rio Doce e da onda de cheia na ocasião do rompimento. Para as demais estações localizadas nos afluentes, os resultados estatísticos ora apresentaram alterações significativas, como para os dados de turbidez, ora não apresentaram como para os dados de CSS. Assim, não é possível afirmar que exista uma tendência ou padrão de sub ou superestimativas nessas estações nos afluentes do Rio Doce.

Quanto as estações de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho (RefVER) e do infravermelho próximo (RefIVP) obtidas com o sensor do satélite Landsat, os resultados não apresentaram os padrões observados para os demais conjuntos de dados. Para as estações de RefVER, os testes *t* e F, mostraram que, no geral, não houve alterações estatisticamente significativas nos valores das médias e das variâncias, respectivamente, e que houve uma tendência desses valores após o rompimento de Fundão serem menores do que no período que o antecede. Para as estações de RefIVP o teste *t* mostrou que em 8 de 11 estações localizadas no caminho da onda de rejeitos houve alterações significativas nos valores das médias. Já o teste F mostrou que apenas nas duas estações mais próximas ao local do rompimento ocorreram alterações significativas nos valores das variâncias. Todavia, ressalta-se que o uso da RefVER e da RefIVP é muito mais limitado para a elaboração de um diagnóstico preciso do que os demais dados utilizados. Por exemplo, o fato dos resultados destes dois conjuntos de dados terem resultados bem distintos dos demais conjuntos de informação pode estar relacionado a saturação da reflectância para elevadas concentrações de sedimentos. De qualquer forma, apesar de não existir um consenso nos resultados obtidos para as estações de RefVER e RefIVP, percebe-se que existe uma tendência de as estações mais próximas ao rompimento sofrerem maior influência do rompimento do que as demais, o que já é esperado.

2.3.5.5 Considerações finais

Os dados observados relacionados aos sedimentos em suspensão na bacia do rio Doce mostram diferentes situações, pois suas medições ocorrem em diferentes períodos e as metodologias de cálculos também são diferentes. Após o rompimento da barragem de Fundão, nas estações localizadas no caminho da onda de rejeitos, as medições relacionadas aos sedimentos em suspensão, em geral, apresentam valores acima da média histórica de cada mês até próximo de setembro/2016. No entanto, para as estações localizadas próximas à região do rompimento da barragem, os valores observados continuaram acima da média histórica mesmo em 2017, como observado na estação 56425000.

A observação somente desses resultados indica que grande parte dos sedimentos foram retidos nos reservatórios e depositados ao longo das planícies de inundações e no leito do rio Doce, principalmente entre os municípios de Ipatinga e Governador Valadares, que é uma região de baixa declividade. As tendências observadas nas estações no caminho feito pela onda de rejeitos não foram observadas nos afluentes, o que indica a ausência de um fenômeno natural que elevasse as concentrações de sedimentos no rio Doce no período após novembro/2015.

2.3.6 CONSIDERAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

As análises do volume de rejeito defluente de Fundão em conjunto com a análise de volumes retidos nos reservatórios potencialmente permitirão a verificação da estimativa de volume liberado. Até o momento, mesmo métodos diferentes de avaliação resultaram em valores de assoreamento próximos. O total de rejeito liberado pelo desastre foi estimado em $44,1 \pm 0,3 \text{ hm}^3$. Em um cenário otimista, com a análise integral dos volumes, aliado com um balanço de massa, consiga se definir a quantidade de rejeito distribuída entres os trechos 1, 2 e 3.

As alterações do transporte de sedimentos na região do alto e médio rio Doce ainda não atingiram os níveis da linha-base, usando tanto os dados de vazões sólida de sedimento quanto comparando as concentrações de sólidos suspensos por diversos métodos. Já na parte do baixo rio Doce, atualmente já estão nos mesmos níveis dos valores de linha-base.

Conforme mencionado anteriormente, mesmo com as alterações impostas pelo desastre, a maioria dos sistemas afetados tenderá a uma nova condição de equilíbrio, cuja taxa de sucesso será determinada pelas características de resiliência. Em etapas futuras, quando a capacidade de adaptação for avaliada (taxa de recuperação, medidas necessárias etc.), será possível analisar com mais profundidade os ajustamentos de cada sistema afetado, no ponto de vista das conformações morfológicas. Conforme a classificação proposta por Fernandez (1990 apud COELHO, 2007), os ajustamentos morfológicos de canais se dividem em três intervalos de acordo com escalas de tempo (geológica, humana e de dias) dos acontecimentos e fatos ocorridos (COELHO, 2009, p. 24):

1. Ajustamentos de longo prazo consistem na mudança gradual e progressiva das características físicas do canal, as quais são causadas por alterações climáticas ou por influências tectônicas em intervalos que variam de centenas a milhares de anos.
2. Ajustamentos a médio prazo são mais frequentes, pois são atribuídos às atividades humanas, as quais criam um desequilíbrio temporal nas formas do canal, em questão de anos e décadas.
3. Ajustamentos de intervalos curtos de tempo decorrentes dos eventos de extrema magnitude, a exemplo de inundações que podem causar expressivas mudanças, seja nas características em planta (planform) ou na seção transversal do canal, em questão de horas ou dias. As mudanças que ocorrem

em escalas temporais de curta duração são sensíveis e significantes para o estudo das cheias, o uso do solo rural/urbano e para a predição do comportamento dos cursos fluviais.

Conforme a classificação de Fernandez (1990 apud COELHO, 2007), o evento gerado pelo rompimento da barragem de Fundão pode ser caracterizado tanto como ajustamento a médio prazo, por ser relativo à atividade humana, quanto de curto intervalo de tempo, por ser de extrema magnitude e de ocorrência em intervalo de dias. Logo, conforme esse critério, a nova condição de equilíbrio poderia ser atingida entre um período de alguns meses a algumas décadas. Essa premissa será avaliada em etapas futuras quando forem modeladas cenarizações do transporte de sedimentos ao longo do tempo.

Logo, a recuperação do equilíbrio dos ambientes afetados do ponto de vista do ajustamento morfológico dos canais fluviais poderá levar um extenso período. Pretende-se com os estudos de modelagem hidrodinâmica e morfológica, que serão conduzidos nas etapas futuras, avaliar, entre outros resultados, a estimativa do tempo de equilíbrio dos corpos hídricos afetados.

2.4 QUALIDADE DE SEDIMENTOS

Neste capítulo é apresentada uma avaliação dos dados obtidos por outras instituições, no período após o rompimento da barragem de Fundão. Foram obtidos dados físicos e químicos de granulometria e concentração de metais e dados biológicos, representados através da comunidade de macroinvertebrados bentônicos.

2.4.1 INTRODUÇÃO

Sedimento é definido como todo material não consolidado, constituído por partículas de diferentes tamanhos, formas e composição química, transportadas por água, ar ou gelo, distribuído ao longo dos vales do sistema de drenagem e orientado a partir da interação constante dos processos de intemperismo e erosão (MOREIRA; BOAVENTURA, 2003 apud MARTINS, 2008).

Uma razão para a diferença observada entre solos e sedimentos é o envolvimento íntimo desse último com a água, salgada ou doce. Essa água pode ser considerada como intersticial (contida entre as partículas por forças de tensão), contendo altas concentrações de íons metálicos, em comparação com as soluções de solo (FERGUSSON, 1982 apud SANTOLIN, 2015). Desta forma, neste capítulo são analisados apenas os sedimentos presentes na calha dos corpos d'água.

Quanto aos tipos de sedimento, para fins de análise de qualidade, estes podem ser classificados basicamente em:

- sedimentos em suspensão;
- sedimentos de fundo ou sedimentos de corrente (LICHT, 1998).

Os sedimentos em suspensão são aqueles correspondentes à fração mais fina, que, pelo seu pequeno tamanho e pouca massa, tendem a ficar suspensos na coluna d'água. Os sedimentos com tamanhos de partícula maiores e mais densos tendem a sedimentar, permanecendo no fundo. Neste capítulo são avaliados apenas os dados obtidos para os sedimentos de fundo.

2.4.2 OBJETIVO

Este capítulo tem como objetivo a avaliação da qualidade dos sedimentos de fundo, também chamados de sedimentos de corrente, dos corpos hídricos afetados pela lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG. Foram avaliados dados obtidos por outras instituições, em coletas realizadas nas regiões dos rios afetados na bacia do rio Doce. Neste relatório foi avaliado apenas o trecho fluvial, sendo que os resultados da região costeira serão avaliados posteriormente.

2.4.3 METODOLOGIA

Foram analisados os resultados de estudos desenvolvidos após o rompimento da barragem de Fundão. Para melhor compreensão dos estudos selecionados, serão apresentadas a malha amostral e a metodologia de cada estudo.

As variáveis que continham uma série de dados mais robusta e que eram mais representativas, no sentido de estarem presentes na lama e no rejeito da Samarco, foram agrupadas e avaliadas por

trecho afetado, para a análise da distribuição espacial dos dados. A metodologia utilizada para a elaboração da distribuição espacial está apresentada no item 2.4.3.1.

Os resultados das análises foram comparados à Resolução CONAMA nº 454/2012, que estabelece valores orientadores para a qualidade do sedimento representada em função da concentração de contaminantes, com vistas à proteção da vida aquática, e foi baseada nos valores estabelecidos pelo Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2002) para arsênio, metais pesados e compostos orgânicos. De acordo com essa resolução, existem dois níveis de limiares:

- **Nível 1** – limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota;
- **Nível 2** – limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

2.4.3.1 Distribuição espacial dos dados físico-químicos

Para melhor entendimento dos dados levantados pela bibliografia analisada, foi realizada uma análise de distribuição espacial dos elementos (metais e semimetals) mais abundantes em número de dados e mais representativos quanto à sua presença na região de estudo. Dessa forma, os elementos analisados foram: Arsênio (As), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni) e Zinco (Zn). Para a avaliação, a área de estudo da região fluvial foi dividida em oito trechos:

- Trecho 1 – Gualaxo do Norte, da sua nascente até a sua foz no rio do Carmo;
- Trecho 2 – rio do Carmo, até a confluência com o rio Gualaxo do Norte no município de Barra Longa;
- Trecho 3 – rio Doce, do final do trecho 2 até a barragem da UHE Candonga;
- Trecho 4 – rio Piracicaba, da nascente até a sua foz no rio Doce;
- Trecho 5 – rio Doce, da jusante da barragem da UHE Candonga até a confluência com o rio Piracicaba em Ipatinga;
- Trecho 6 – rio Doce, do final do trecho 5 até a ilha dos Araújo em Governador Valadares;
- Trecho 7 – rio Doce, do final do trecho 6 até o limite do estado de Minas Gerais;
- Trecho 8 – do limite do estado de Minas Gerais até o ponto de amostragem mais próximo da costa do Espírito Santo.

A escolha dos trechos se baseou em alguns critérios, como a separação em rios, confluências de rios e características geomorfológicas semelhantes. Além disso, foi auxiliado por métodos de agrupamento de dados, os quais buscam captar, de forma conjugada, conjuntos de locais que possuem quantidades parecidas dos elementos analisados. As variáveis agrupadas por trecho foram representadas em gráficos de setores, construídos usando como base as proporções observadas em cada uma das classes estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 454/2012: abaixo do Nível 1, “acima do Nível 1” e “acima do Nível 2”. Exceção se fez para os elementos alumínio, ferro e manganês, uma vez que estes não possuem limites na referida resolução. Para a avaliação desses elementos, foram criados intervalos de porcentagem para cada um deles, de acordo com os resultados obtidos. Os intervalos foram

definidos através da avaliação da dispersão dos dados e de acordo com a amplitude de cada variável, independentemente do trecho. Para todos os elementos, os resultados foram apresentados espacialmente em mapas que mostram a hidrografia que compõe o rio Doce e os principais afluentes onde foram encontrados os dados. Esses mapas foram elaborados com a assistência do *software* ArcGIS.

2.4.3.2 Parâmetros físico-químicos para avaliação da qualidade de sedimentos

Neste item serão descritos os principais parâmetros que serão utilizados para a avaliação da qualidade dos sedimentos. Para comparação, serão utilizados os mesmos parâmetros utilizados para a definição da linha-base, apresentados a seguir.

2.4.3.2.1 Granulometria

É o parâmetro que define o tamanho dos grãos do sedimento. Os sedimentos são classificados de acordo com o tamanho de partícula (BRASIL, 2012). A Tabela 43 apresenta a classificação granulométrica do sedimento de acordo com o tamanho da partícula.

Tabela 43 – Classificação granulométrica de sedimento de acordo com o tamanho da partícula.

Classificação	(mm)
Areia muito grossa	2 a 1
Areia grossa	1 a 0,5
Areia média	0,5 a 0,25
Areia fina	0,25 a 0,125
Areia muito fina	0,125 a 0,062
Silte	0,062 a 0,00394
Argila	0,00394 a 0,0002

Fonte: Brasil (2012).

2.4.3.2.2 Metais e semimetais

Os metais em sedimentos são provenientes do intemperismo de rochas e solos, deposições atmosféricas e despejos de origem antropogênica. Por meio da capacidade de retenção dos sedimentos, os metais podem ficar acumulados, podendo ser remobilizados através de sistemas cíclicos complexos que envolvem fatores químicos, biológicos e hidrodinâmicos (RAMIRO PASTORINHO et al., 2012 apud SANTOLIN, 2015).

Alguns metais fazem parte da composição de seres vivos, servindo como nutrientes. Alguns são considerados macronutrientes, como, por exemplo, o cálcio e o magnésio. Outros são considerados micronutrientes, ou seja, devem estar presentes em pequenas concentrações na alimentação dos seres vivos. Acima da concentração ideal, esses elementos podem causar algum dano à saúde, já os elementos classificados como elementos tóxicos podem causar efeitos nocivos mesmo em concentrações muito baixas. A Tabela 44 apresenta a classificação dos elementos químicos com base nos efeitos à biota. Neste relatório será dada prioridade para os resultados dos elementos tóxicos.

Tabela 44 – Classificação dos elementos químicos com base nos efeitos à biota.

Elementos essenciais		Elementos tóxicos
Macronutrientes	Micronutrientes	
C, Ca, K, N, Na, Mg, O, P, S	B, Co, Cr, Cr ³⁺ , Cu, Fe, I, Mn, Mo, Ni, Se, Zn	Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Cd, Cr ⁶⁺ , Hg, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V

Fonte: Fergusson (1982), Poletto (2008 apud SANTOLIN, 2015).

2.4.3.3 Macroinvertebrados bentônicos

Foram levantados dados secundários dos macroinvertebrados bentônicos límnicos coletados após o rompimento da barragem de Fundão, possibilitando posterior comparação com os resultados obtidos pelos Institutos Lactec no diagnóstico ambiental na bacia do rio Doce. Foram levantados dados sobre o grupo na bacia do rio Doce, a maior parte coletada para fins acadêmicos apresentando estudos de curta duração em sub-bacias do rio Doce. Como exceção, temos a região próxima à UHE Baguari onde foi realizado monitoramento antes e após o desastre pela concessionária responsável pela operação da usina. Esses dados, assim como os coletados pela Fundação Renova e pelo Grupo Independente para Avaliação do Impacto Ambiental (GIAIA), irão compor o relatório pós-desastre do grupo.

2.4.4 RESULTADOS

Neste item estão apresentados os estudos consultados que foram selecionados para este relatório, conforme citado no item 2.4.3. Na sequência estão apresentados os resultados da análise estatística dos dados obtidos para cada trecho estudado.

2.4.4.1 Fundação COPPETEC (2016)

O trabalho desenvolvido pela Fundação COPPETEC (2016) mostra a distribuição e o alcance dos rejeitos liberados com a ruptura da barragem e as alterações provocadas, principalmente, pelo arraste de solo e de saibro das margens e pela deposição seletiva dos sedimentos.

Foram analisados apenas os dados obtidos na primeira campanha de amostragem, realizada em setembro/2016, pois estes estavam mais completos.

Foi realizada amostragem de rejeitos e sedimentos em um total de 60 pontos, em perfis de 50 e 100 cm, na barragem de Santarém, córrego Santarém, rio Gualaxo do Norte, do distrito de Bento Rodrigues até a confluência com o rio do Carmo, rio do Carmo, ao longo desse rio a partir de Barra Longa, rio Doce, Usina Hidroelétrica Risoleta Neves (Candonga), e rio Doce, até o litoral em Linhares/Regência, no Espírito Santo. Também foram amostrados sedimentos depositados em Bento Rodrigues, nas ruínas da PCH Bicas, em Paracatu de Baixo e Gesteira de Baixo. Foram coletadas amostras de saibro das margens de barrancos erodidos nas margens do rio Gualaxo do Norte. Ao todo, foram coletadas cerca de 200 amostras. A Figura 132, Figura 133 e Figura 134 mostram a localização dos pontos amostrados. Neste relatório, serão apresentados apenas os resultados dos pontos localizados nos rios, descartando o ponto 60, localizado na região costeira.

Figura 132 – Localização das estações de amostragem no trecho de Mariana até o município de rio Doce, utilizadas no relatório da Fundação COPPETEC (2016).

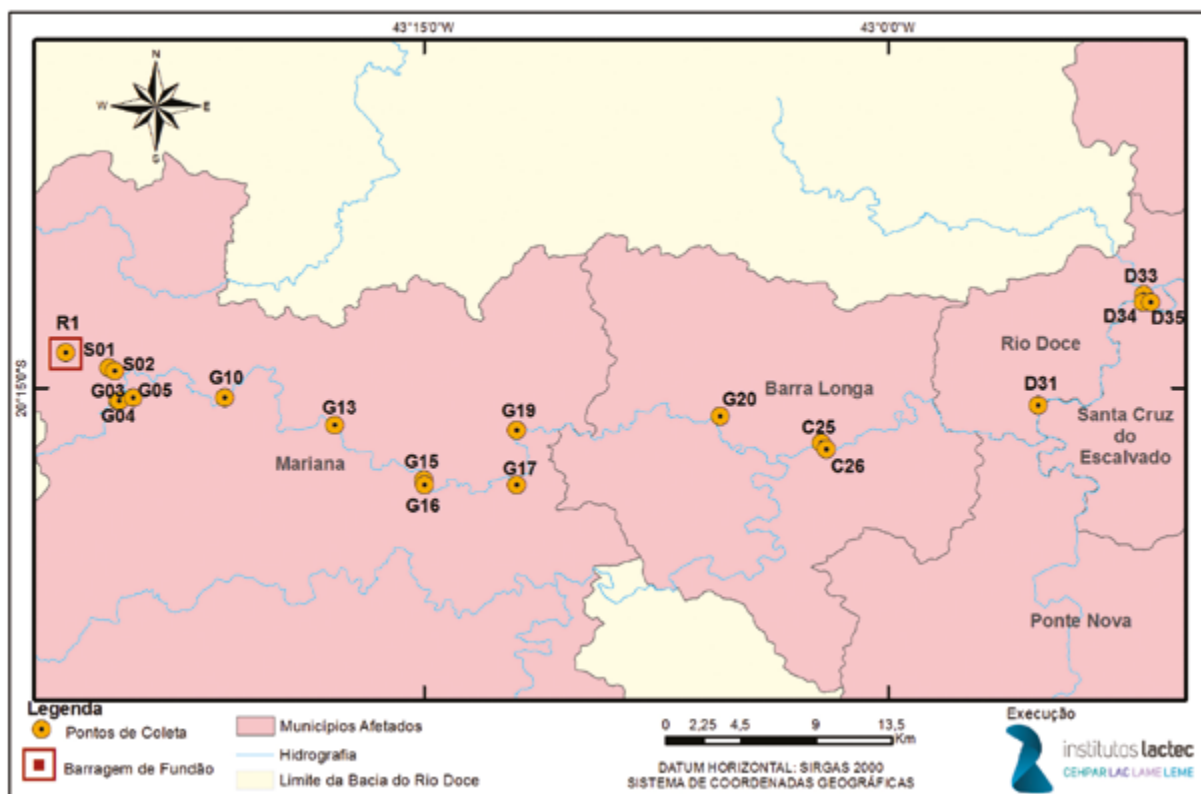


Figura 133 – Localização das estações de amostragem no trecho de São Pedro dos Ferros em Minas Gerais a Colatina no Espírito Santo, Fundação COPPETEC (2016).

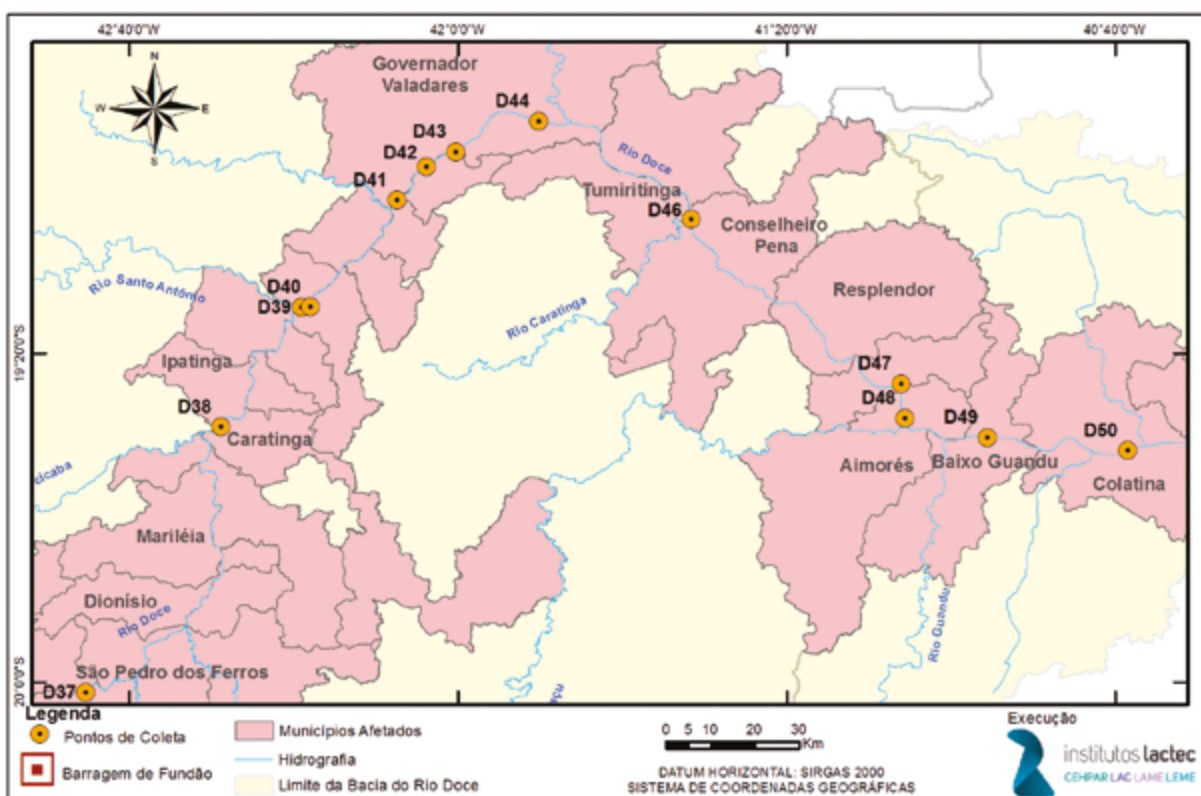
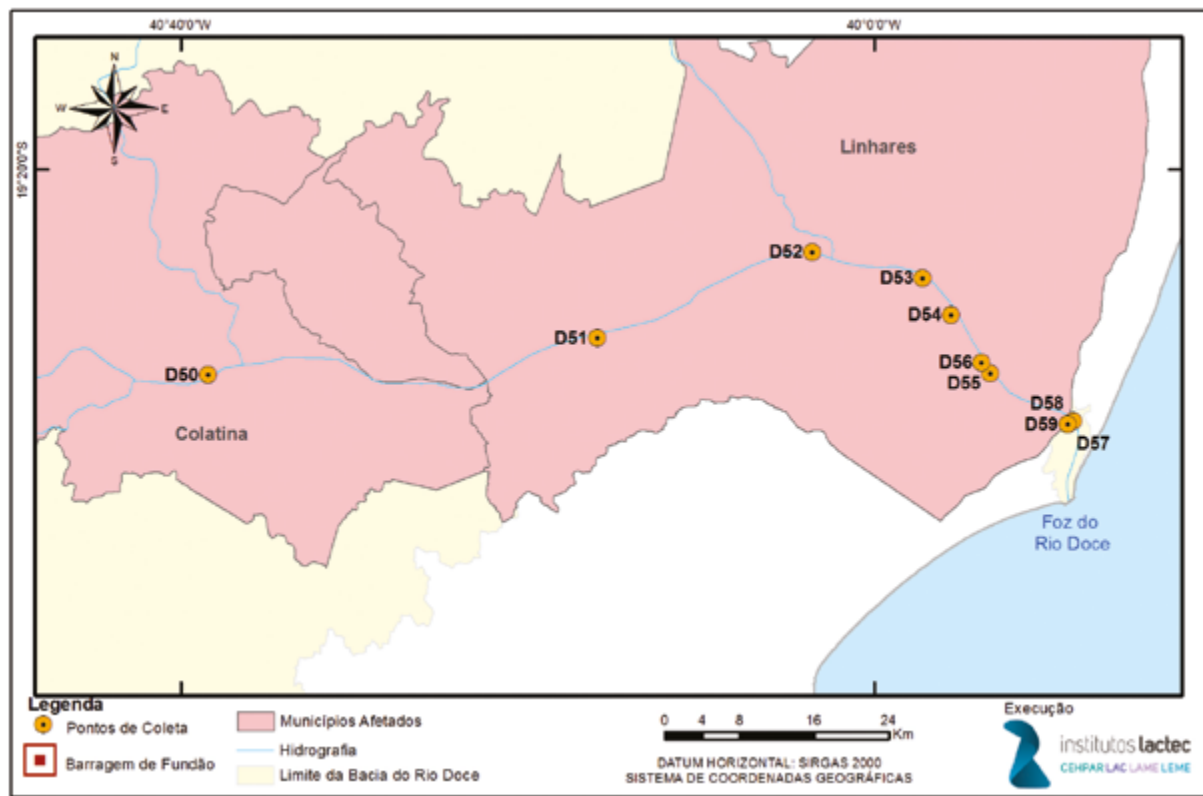


Figura 134 – Localização das estações de amostragem no trecho de Colatina até a foz do rio Doce, Fundação COPPETEC (2016).

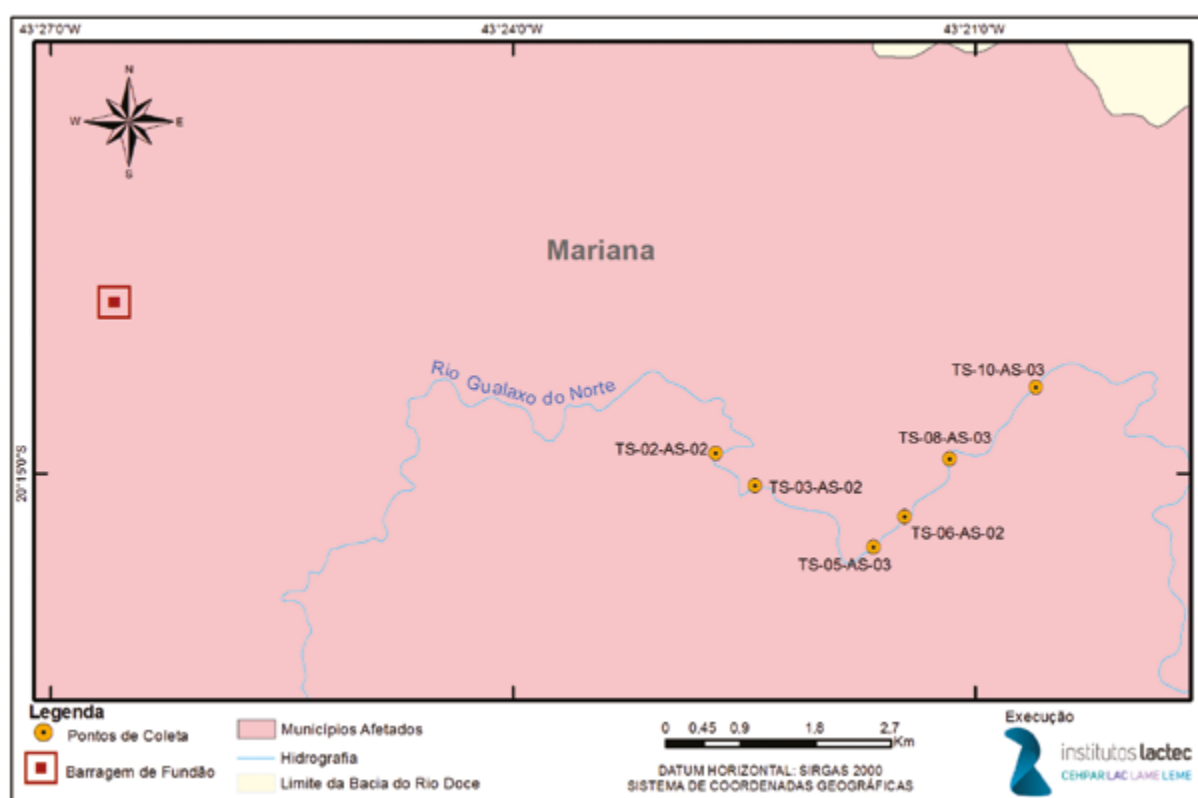


Para a análise estatística dos dados e comparação com os dados obtidos na linha-base, foram analisados os dados da concentração de ferro e manganês. Apesar deste trabalho ter analisado a granulometria das amostras, esses dados não puderam ser aproveitados, por estar faltando a diferenciação entre silte e areia.

2.4.4.2 CH2M (2017)

A empresa CH2M elaborou o Plano de Manejo do Rejeito para a Fundação Renova, publicado em 20 de abril de 2017. Esse trabalho contém os resultados das análises realizadas em amostras coletadas na calha do rio Gualaxo do Norte, em seis pontos, apresentados na Figura 135. Foram analisados os dados da concentração de manganês, zinco, cromo, cobre, cobalto, níquel, arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio.

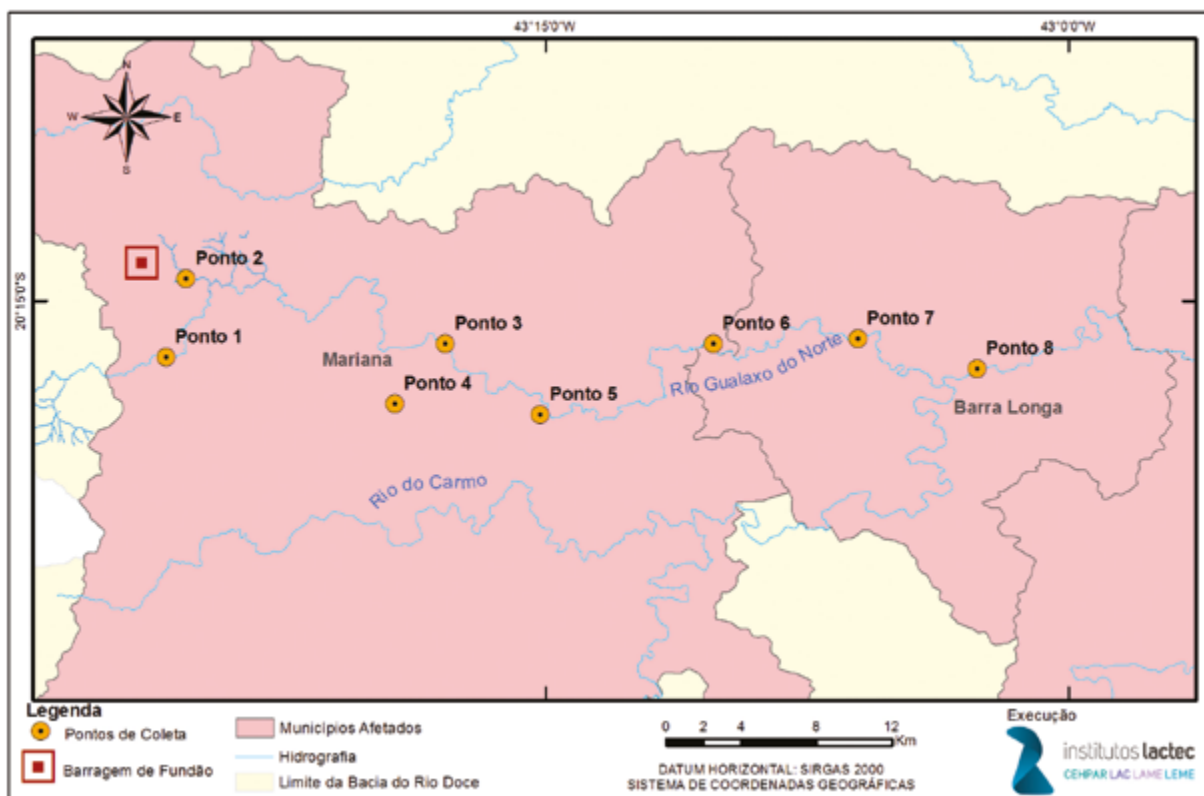
Figura 135 – Localização das estações de amostragem no rio Gualaxo do Norte trecho de Colatina até a foz do rio Doce, CH2M (2017).



2.4.4.3 Canatto (2017)

Canatto (2017) analisou em seu trabalho de conclusão de curso amostras de sedimento coletadas em oito pontos distribuídos no córrego Santarém, ao longo do rio Gualaxo do Norte e logo após a confluência com o rio do Carmo, no município de Barra Longa. Dos dados produzidos pelo autor, foram analisadas as concentrações obtidas para os elementos: arsênio, alumínio, ferro, manganês, cromo, níquel, zinco, cobre, cádmio e chumbo. Os dados de granulometria não puderam ser utilizados por não diferenciarem silte e argila.

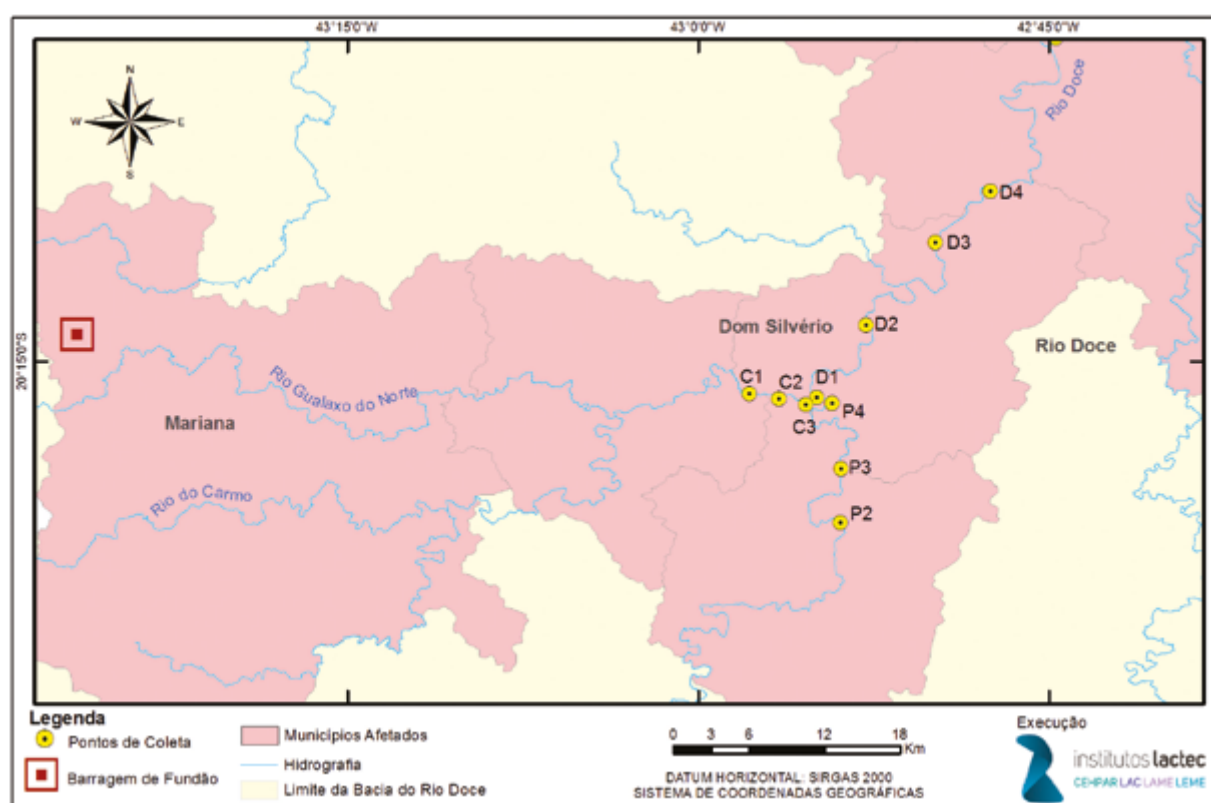
Figura 136 – Localização das estações de amostragem no trabalho de Canatto (2017).



2.4.4.4 Maia (2017)

Maia (2017) analisou, em sua dissertação de mestrado, amostras em 12 pontos nos rios Piranga, do Carmo e Doce em trechos localizados nos municípios mineiros de Ponte Nova, Barra Longa, Rio Doce, Sem Peixe e São José do Goiabal, nos dias 11 e 12 de junho de 2016 (estação seca). Foram quatro (P1, P2, P3 e P4), três (C1, C2 e C3) e cinco pontos (D1, D2, D3, D4 e D5) amostrados nos rios Piranga, do Carmo e Doce, respectivamente (Figura 137). Dos resultados obtidos pelo autor, foram analisadas as concentrações de cobre, cromo, zinco, níquel, arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio.

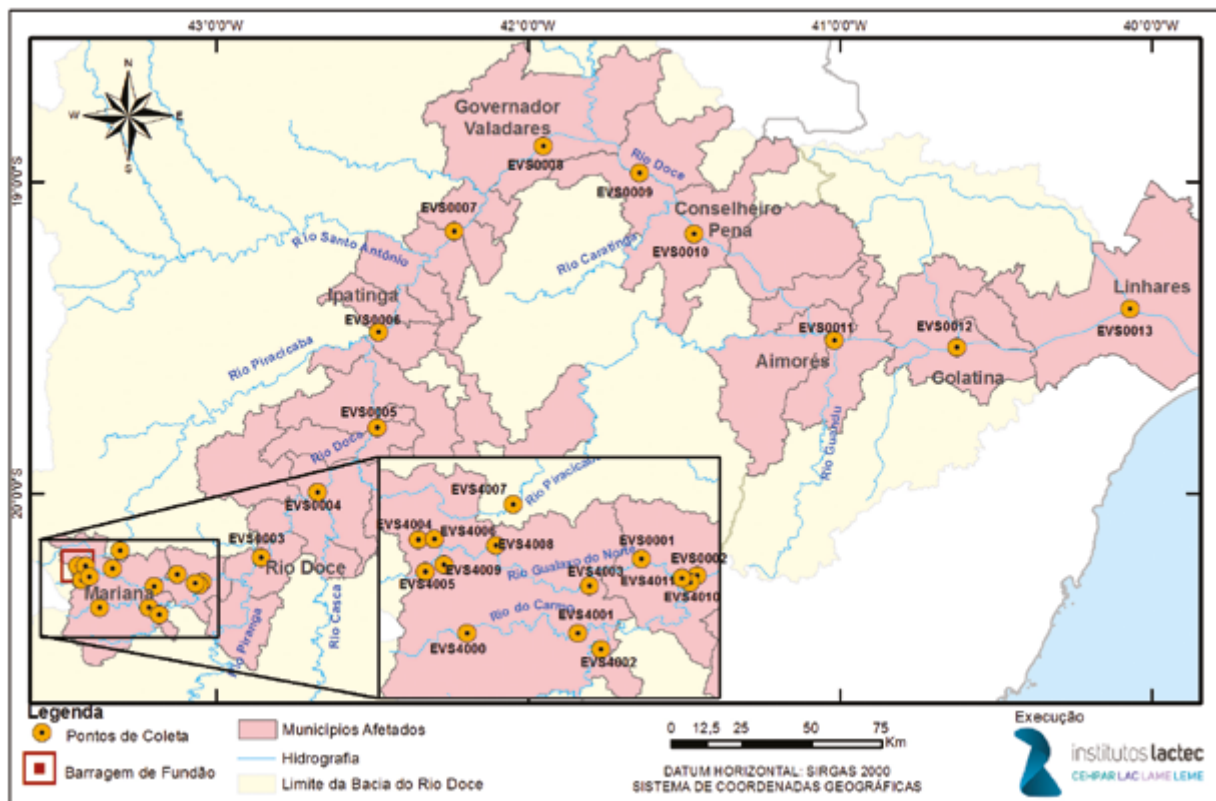
Figura 137 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizado por Maia (2017).



2.4.4.5 CPRM (2015)

O trabalho realizado pela CPRM (2015) analisou amostras coletadas em 25 pontos amostrais, apresentados na Figura 138. Dos dados produzidos no trabalho, foram analisados estatisticamente os dados de arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, níquel e zinco.

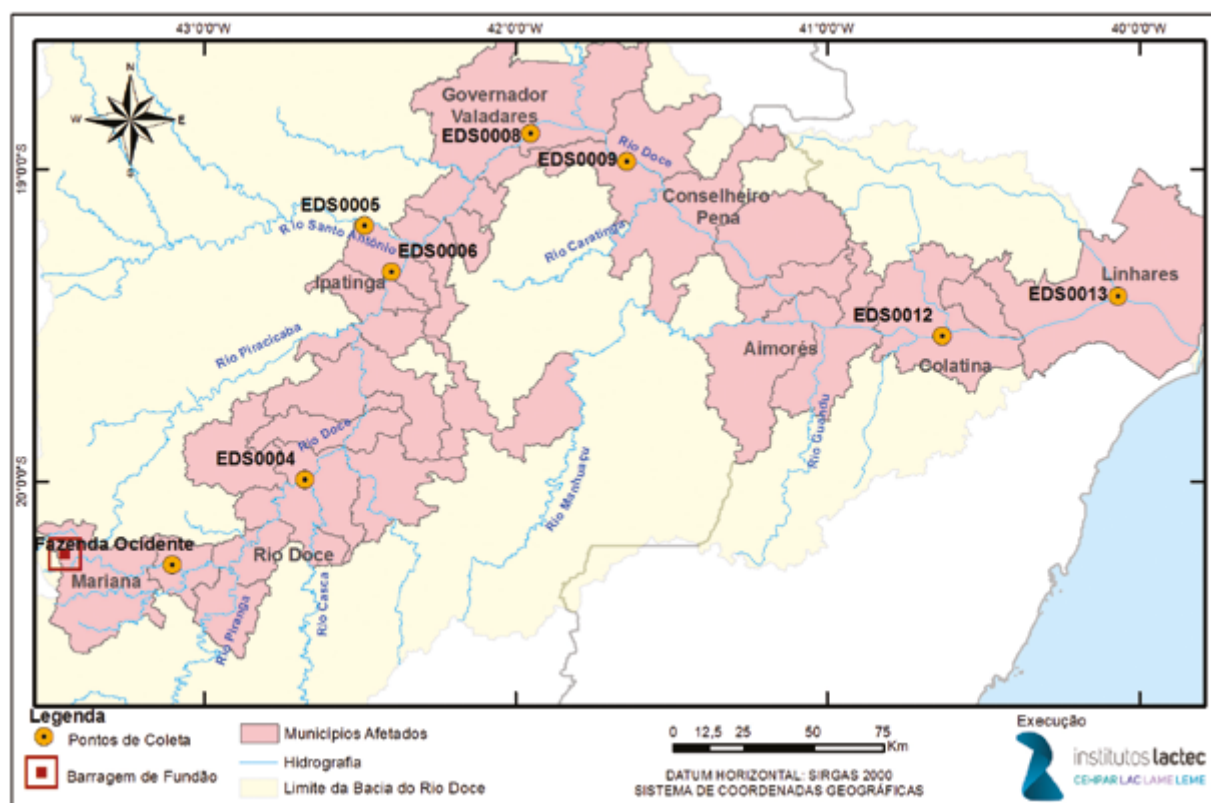
Figura 138 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizados pelo CPRM (2015).



2.4.4.6 CPRM (2016)

Em 2016, a CPRM (2016) publicou resultados de análises de sedimentos coletados em oito pontos, cuja localização está apresentada na Figura 139.

Figura 139 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizados pela CPRM (2016).



2.4.4.7 Golder Associates (2016)

O relatório elaborado pela empresa Golder Associates (2016a) compilou os resultados obtidos para as amostras coletadas entre os dias 6 de novembro de 2015 e 14 de junho de 2016.

Foram coletadas amostras em 154 pontos no total, porém para muitos deles o relatório não apresenta a coordenada geográfica. Pela falta da informação da localização dos pontos, não foram elaborados mapas como para os demais estudos analisados. A Tabela 45 apresenta a distribuição desses pontos por trecho.

Tabela 45 – Distribuição dos pontos amostrais por trecho.

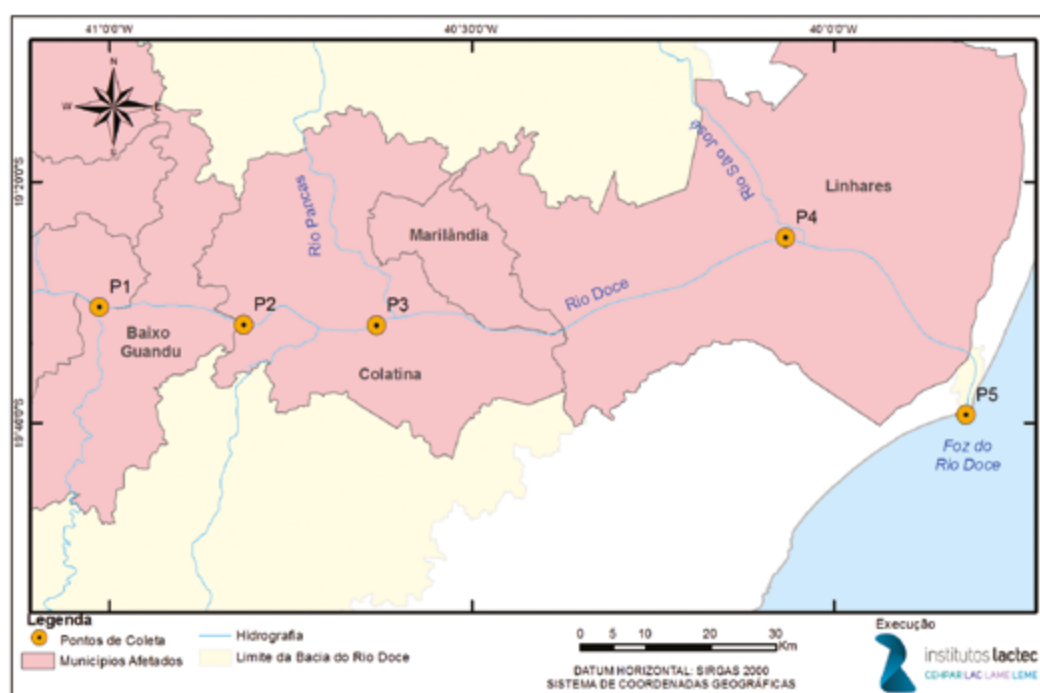
Trechos	Quantidade de pontos
Trecho 1	32
Trecho 2	9
Trecho 3	25
Trecho 4	2
Trecho 5	14
Trecho 6	27
Trecho 7	12
Trecho 8	33
TOTAL	154

Dos dados apresentados no relatório, foram analisados os dados de granulometria e concentrações dos elementos alumínio, arsênio, ferro, cádmio, cobre, chumbo, cromo, manganês, mercúrio, níquel e zinco.

2.4.4.8 IEMA (2015-2016)

No monitoramento realizado pelo IEMA (2015-2016) foram analisados 5 pontos, localizados no trecho denominado “trecho 8” do item Qualidade de Sedimentos, compreendido entre o limite do estado de Minas Gerais e a foz do rio Doce. Para a análise estatística, foi excluído o ponto P5, pois este estava localizado na zona estuarina e costeira, não contemplada neste relatório. Os dados foram fornecidos diretamente aos Institutos Lactec por meio eletrônico e compreendiam coletas de 45 campanhas, realizadas entre novembro/2015 e dezembro/2016. Foram analisados estatisticamente os dados de granulometria, e concentrações dos elementos alumínio, arsênio, ferro, cádmio, cobre, chumbo, cromo, manganês, mercúrio, níquel e zinco.

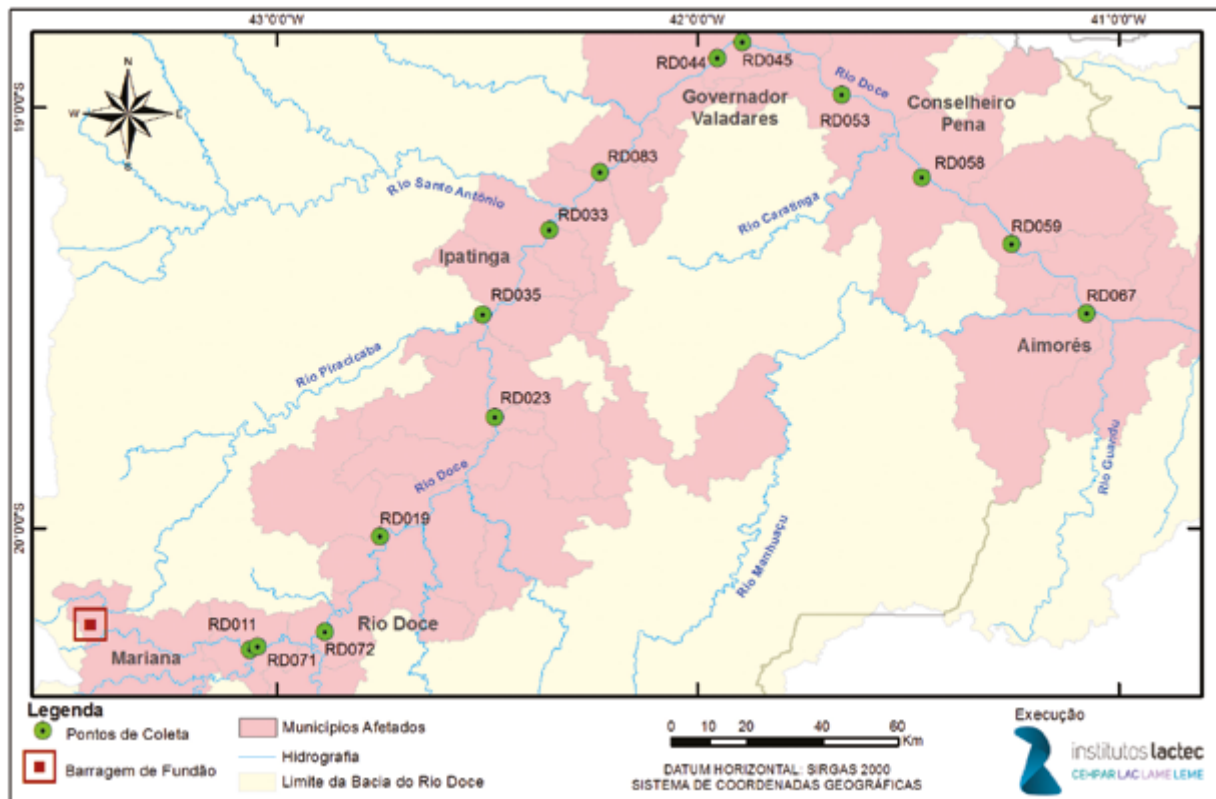
Figura 140 – Localização das estações de amostragem no trabalho realizado pelo IEMA (2015-2016).



2.4.4.9 IGAM (2016)

Os dados disponíveis do monitoramento realizado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM, 2016) compreendem 14 estações de monitoramento, localizadas na porção mineira da bacia do rio Doce e apresentadas na Figura 141. Foram analisados dados de campanhas realizadas entre novembro/2015 e outubro/2016, com os resultados dos elementos alumínio, arsênio, ferro, cádmio, cobre, chumbo, cromo, manganês, mercúrio, níquel e zinco.

Figura 141 – Localização das estações de amostragem do monitoramento realizado pelo IGAM (2016).



2.4.4.10 Distribuição espacial dos dados dos autores

Conforme citado no item 2.4.3.1, para melhor entendimento dos dados levantados pelos autores supracitados, foi realizada uma análise de distribuição espacial da frequência de cada elemento. Os resultados da análise estatística descritiva realizada com os dados dos autores utilizada para a elaboração da distribuição espacial se encontram no APÊNDICE C e os gráficos de dispersão se encontram no APÊNDICE D. Da Figura 142 à Figura 145 estão apresentadas as figuras que contêm as informações citadas.

Como pode ser observado na Figura 142, o elemento arsênio apresenta a maior frequência de valores acima do Nível 2 no trecho 4 (rio Piracicaba) com 100% dos resultados. O trecho 5 (entre a UHE Risoleta Neves e Ipatinga) também apresenta uma frequência significativa de concentrações acima do Nível 2, com 26% dos dados. Esse trecho também apresentou 48% dos dados acima do Nível 1. Os demais trechos apresentaram frequência de resultados acima de 50% abaixo do Nível 1.

O elemento cádmio apresentou maior frequência de valores acima do Nível 2 no trecho 4, no rio Piracicaba, com 100% dos valores acima do Nível 1. Vale salientar que, para o trecho 4, estavam disponíveis apenas dois dados, provenientes do relatório da Golder.

O chumbo, o cobre e o zinco apresentaram predominância dos resultados abaixo do Nível 1 em todos os trechos analisados, sem nenhum resultado acima do Nível 2.

O cromo apresentou valores acima do Nível 2 nos trechos 3, 5, 6 e 7 e em baixa frequência (4%, 3%, 5% e 12%, respectivamente). A predominância da frequência é de valores abaixo do Nível 1. Valores acima do Nível 1 são observados em todos os trechos, com exceção do trecho 4, sendo que os maiores valores foram observados nos trechos 5, 6 e 7 (42%, 30% e 23%, respectivamente).

O elemento mercúrio apresentou predominância de valores abaixo do Nível 1 em todos os trechos analisados. Valores acima do Nível 2 foram observados apenas no trecho 3, com 14% de frequência. Valores de frequência inferiores a 13% foram observados nos trechos 1, 3, 5, 6, 7 e 8.

Figura 142 – Distribuição dos resultados de arsênio por trecho.

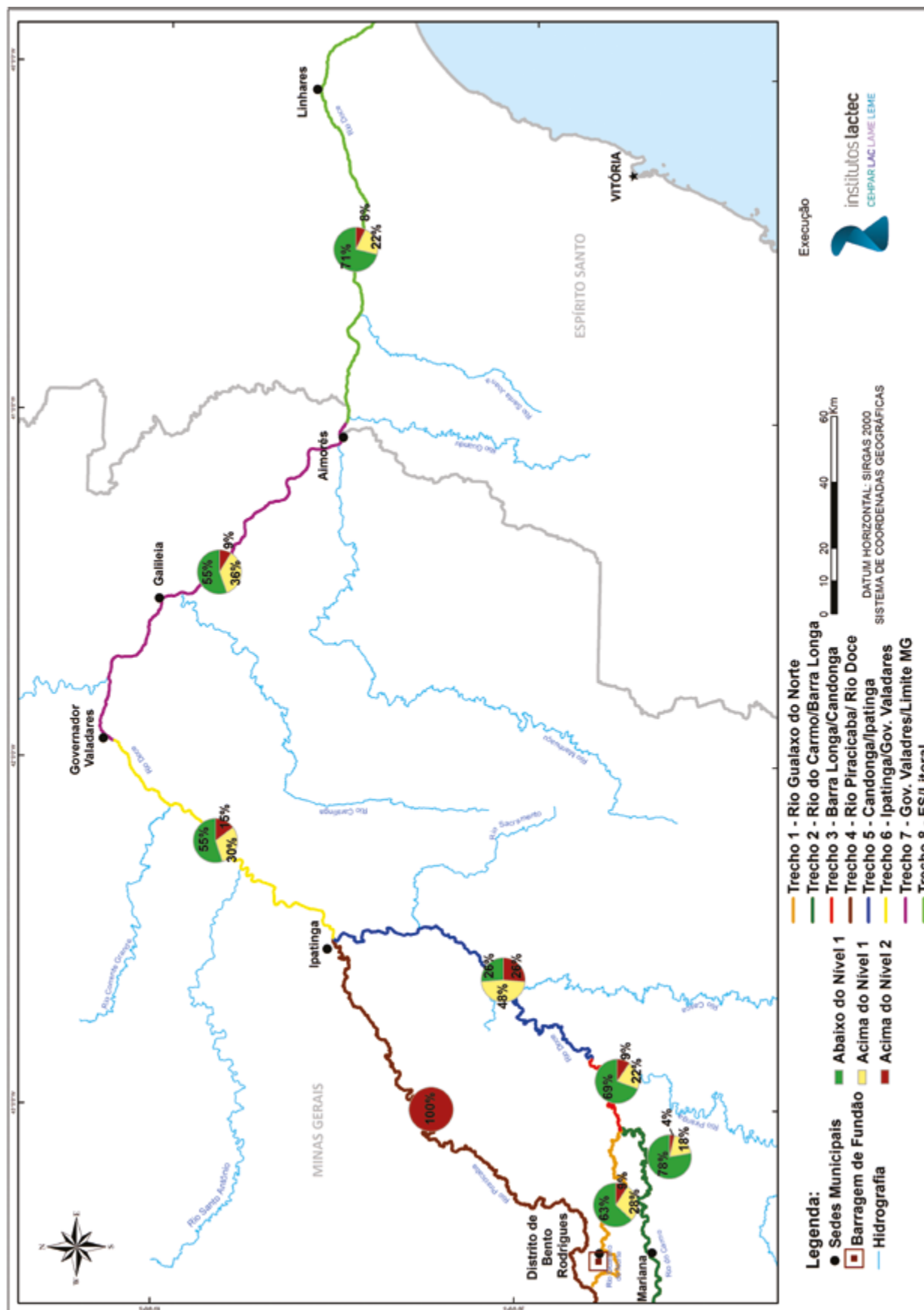


Figura 143 – Distribuição dos resultados de cádmio por trecho.

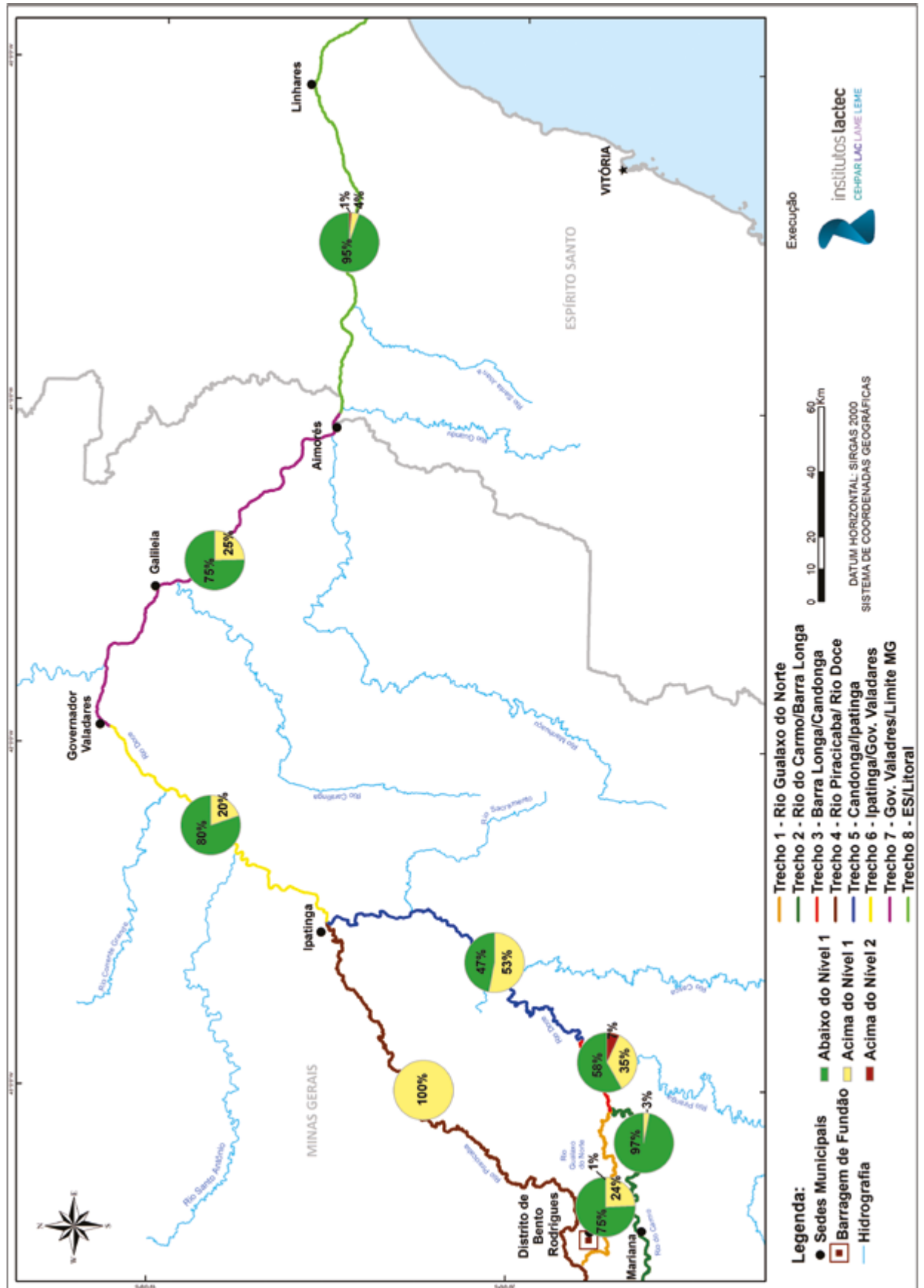


Figura 144 – Distribuição dos resultados de chumbo por trecho.

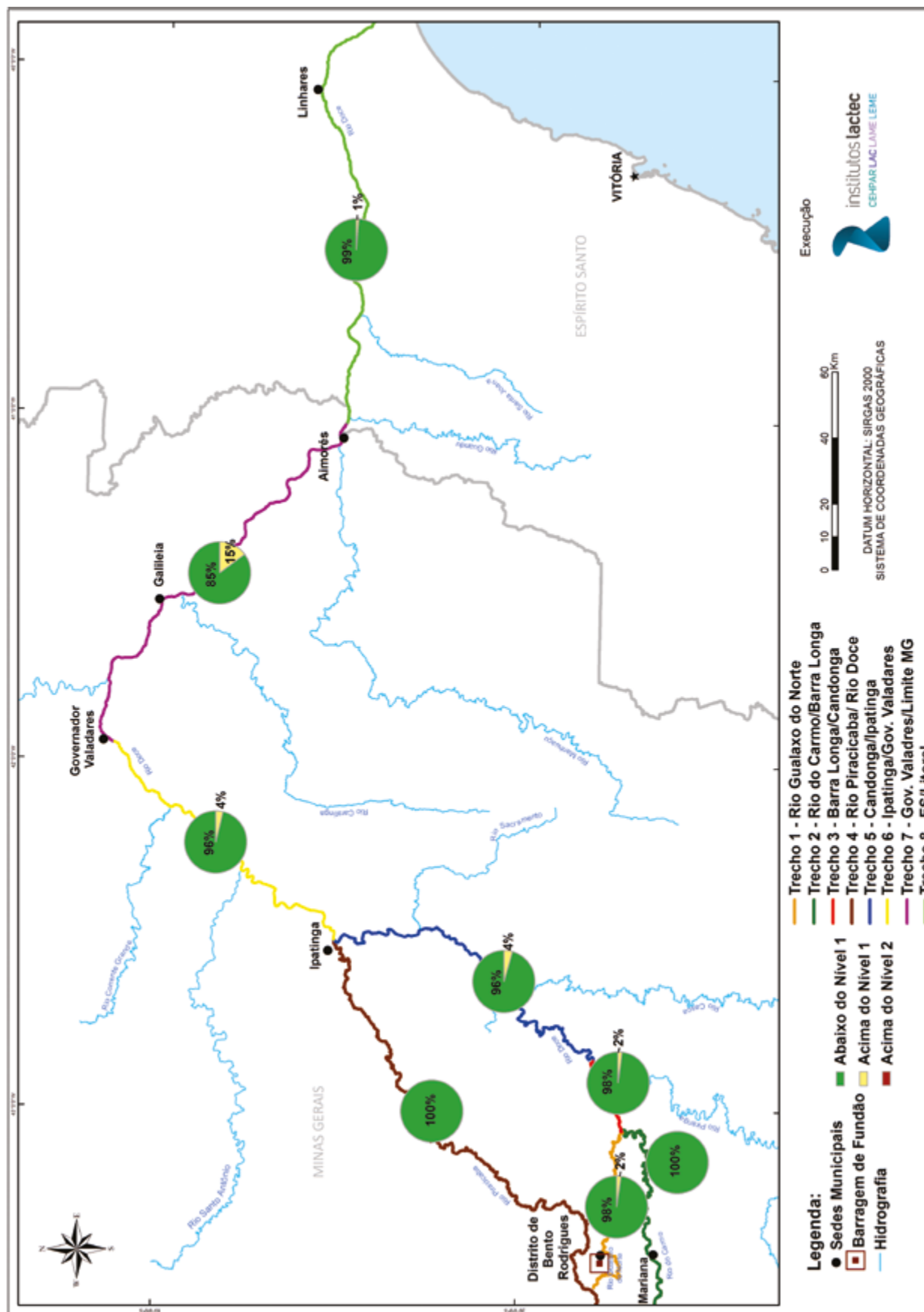


Figura 146 – Distribuição dos resultados de cromo por trecho.

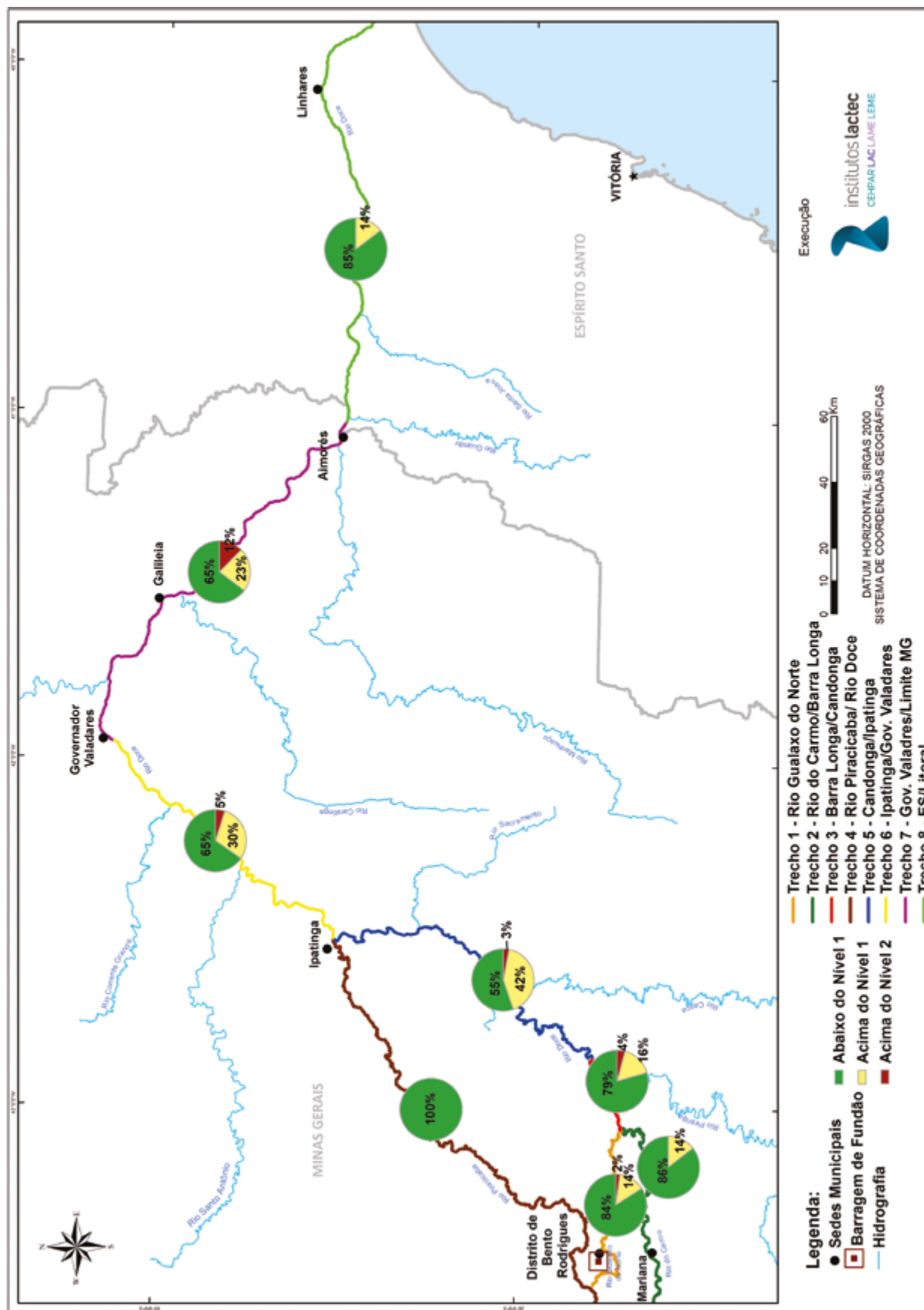


Figura 147 – Distribuição dos resultados de mercúrio por trecho.

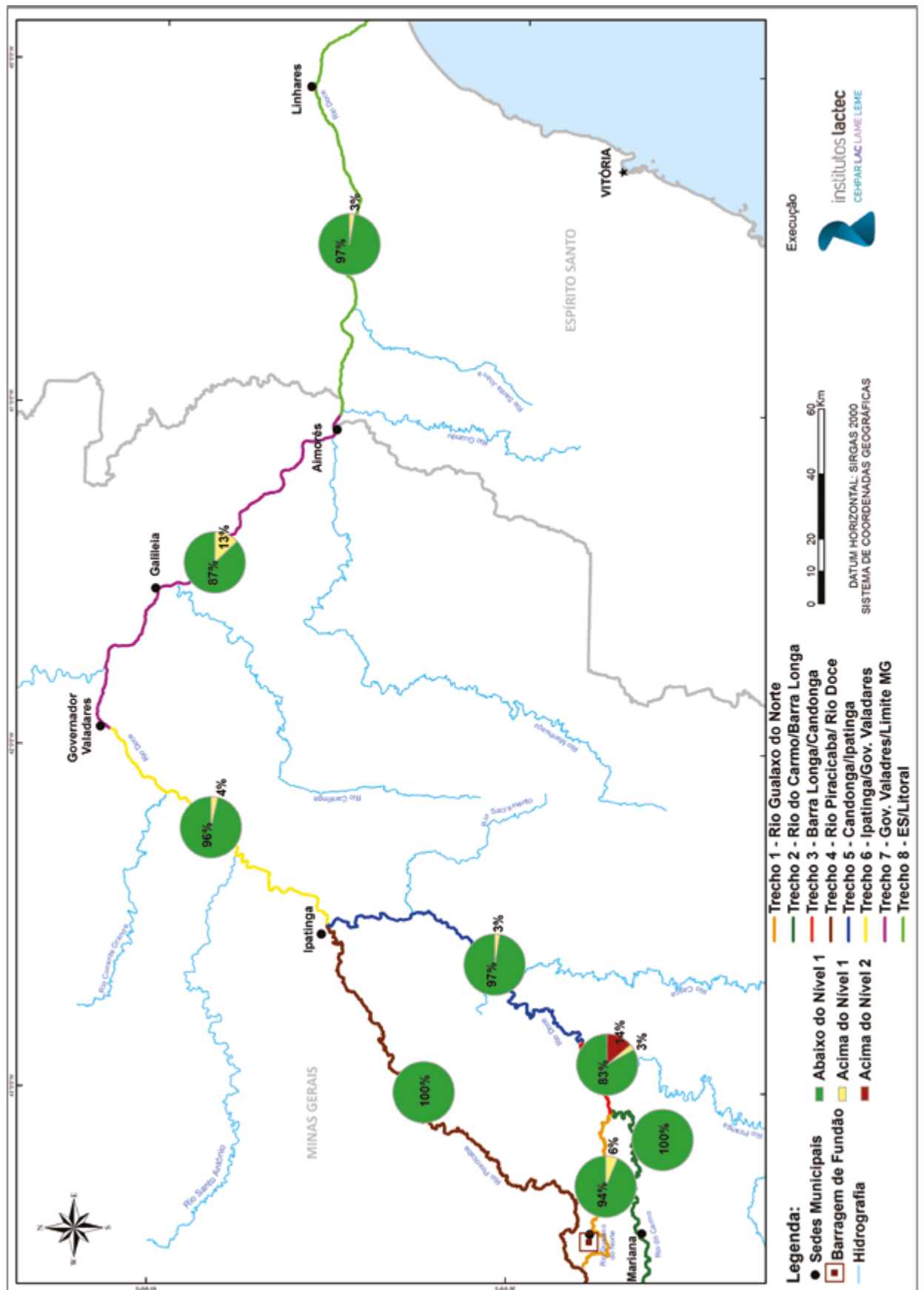
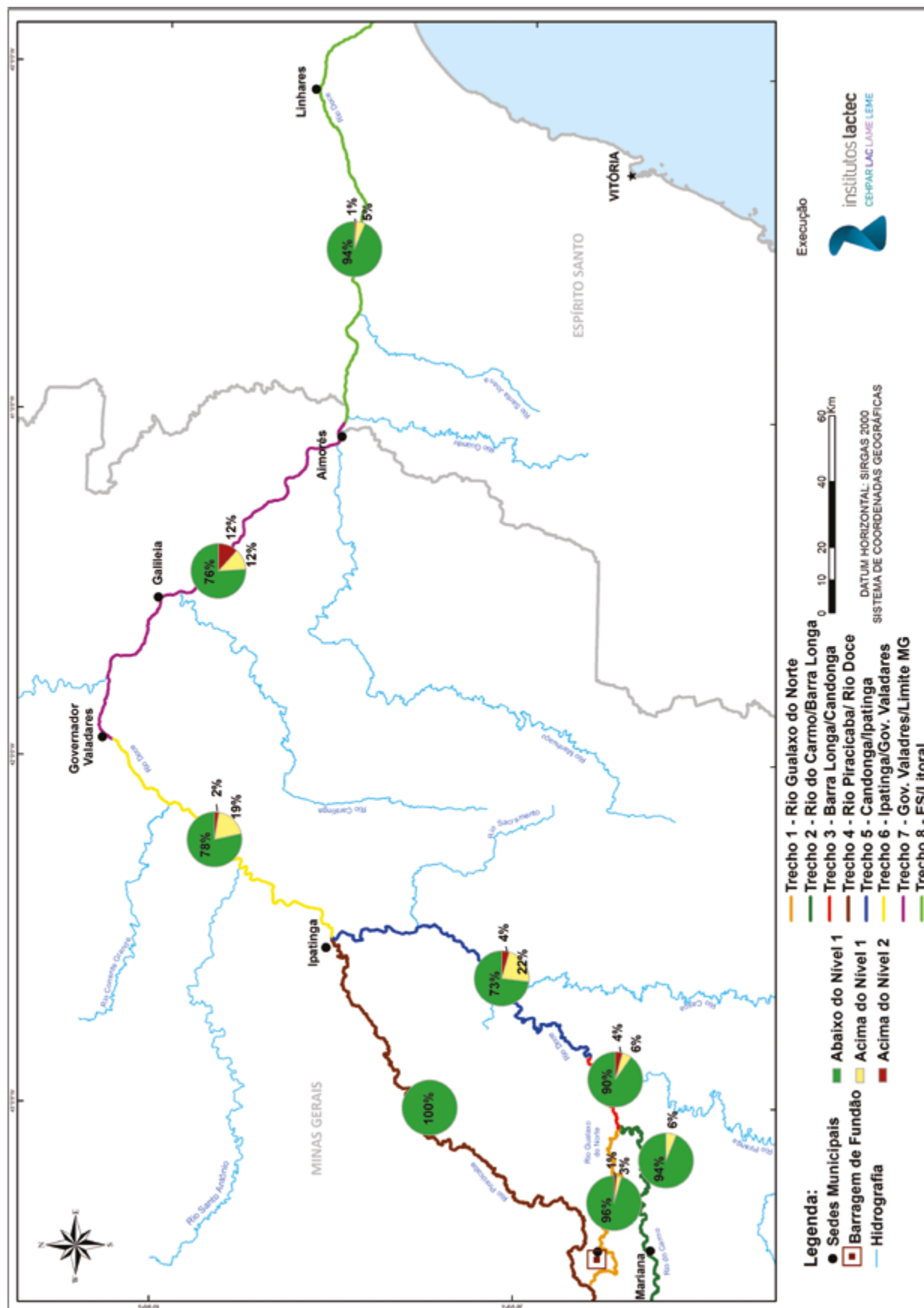


Figura 148 – Distribuição dos resultados de níquel por trecho.



Mapa da Bacia do Rio Doce

Legenda:

- Sedes Municipais
- Barragem de Fundão
- Hidrografia
- Abaixo do Nível 1
- Acima do Nível 1
- Acima do Nível 2

Trechos do Rio Doce:

- Trecho 1 - Rio Gualaxo do Norte
- Trecho 2 - Rio do Carmo/Barra Longa
- Trecho 3 - Barra Longa/Candonga
- Trecho 4 - Rio Piracicaba/ Rio Doce
- Trecho 5 - Candonga/Ipatinga
- Trecho 6 - Ipatinga/Gov. Valadares
- Trecho 7 - Gov. Valadares/Limite MG
- Trecho 8 - ES/ RJ

Dados de Qualidade da Água (Pontos de Amostragem):

- 96%
- 4%
- 99%
- 1%
- 100%
- 100%
- 100%
- 100%
- 100%

Localidades e Características:

- Mariana
- Ipatinga
- Governador Valadares
- Galiléia
- Almorós
- Linhares
- Vitória
- ESPIRITO SANTO
- MINAS GERAIS

Escala: 0 10 20 40 60 Km

DATUM HORIZONTAL: SIRGAS 2000

SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

institutos lactec
CEPAR LAC LAME LEME

Conforme mencionado no item 2.4.3.1, como os elementos alumínio, ferro e manganês não apresentam limites ou níveis definidos na Resolução CONAMA nº 454/2012, para a avaliação destes, foram criados intervalos de porcentagem para cada um deles, de acordo com os resultados obtidos. Os intervalos foram definidos através da avaliação da dispersão dos dados e de acordo com a amplitude de cada variável, independentemente do trecho. Os resultados estão apresentados da Figura 150 à Figura 152.

Os valores de alumínio e de ferro apresentados na Figura 150 e na Figura 151 representam a porcentagem desses elementos em 1 kg de massa seca de amostra.

Para o elemento alumínio, os valores encontrados foram predominantemente inferiores a 5% em todos os trechos avaliados. O trecho 7 apresentou uma porcentagem de 12% dos dados acima do Nível 1.

O ferro apresentou as concentrações mais elevadas no trecho 5, porém com predominância da fração com menos de 10% de ferro na composição da amostra. Em geral, todos os trechos analisados apresentaram predominância dessa fração com baixa concentração de ferro. Esses resultados não são condizentes com o conhecimento que se tem da composição geológica do solo da região.

Quanto ao manganês, este foi avaliado conforme a sua concentração em mg/kg. A primeira classe de concentração (até 1.000 mg/kg) foi definida a partir do valor máximo encontrado em solos na bacia do rio Doce, de acordo com dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM (SOUZA et al., 2015). As maiores concentrações foram observadas nos trechos 2 e 7. A concentração de manganês encontrada foi predominantemente inferior a 1.000 mg/kg em todos os trechos analisados.

Figura 150 – Distribuição dos resultados de alumínio por trecho.

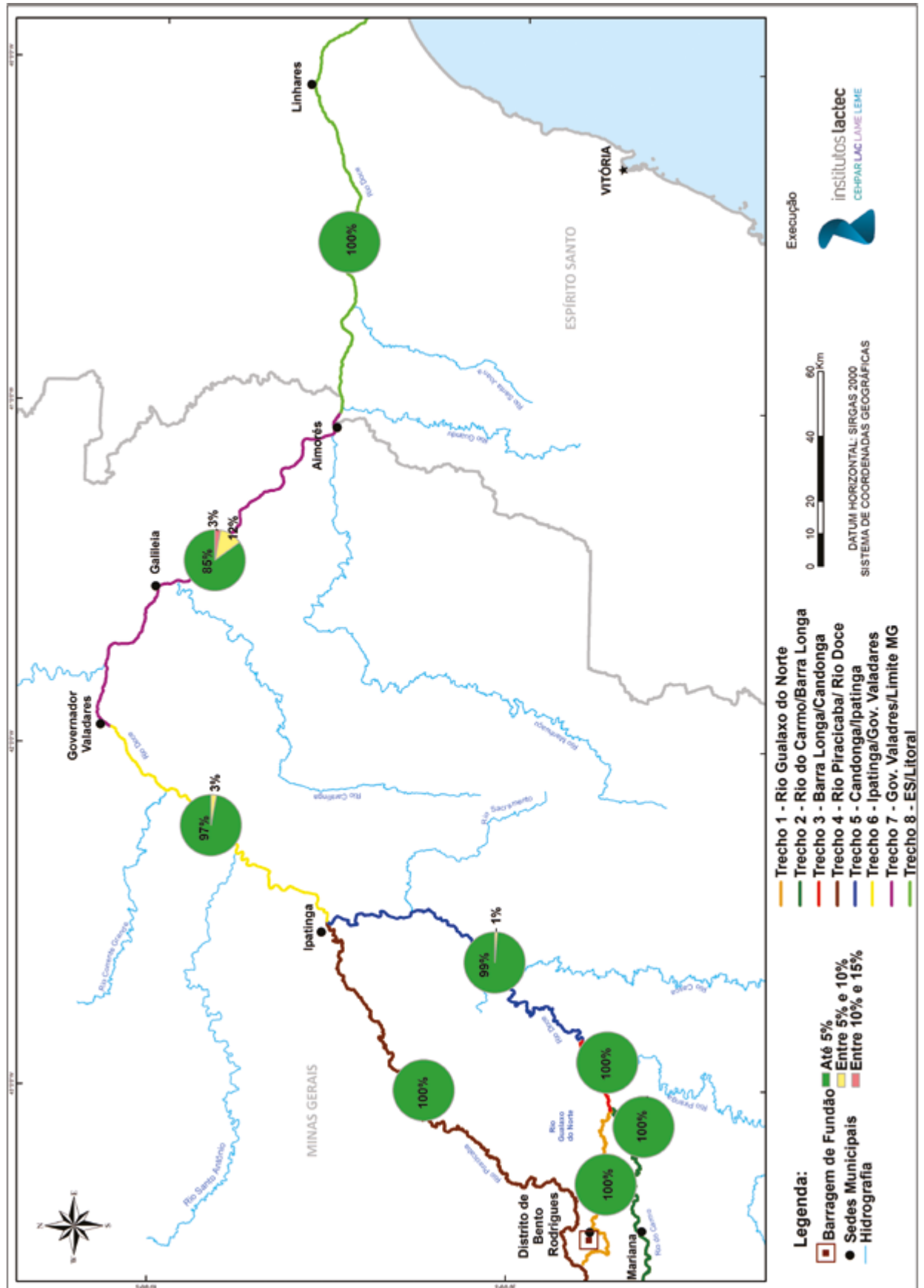
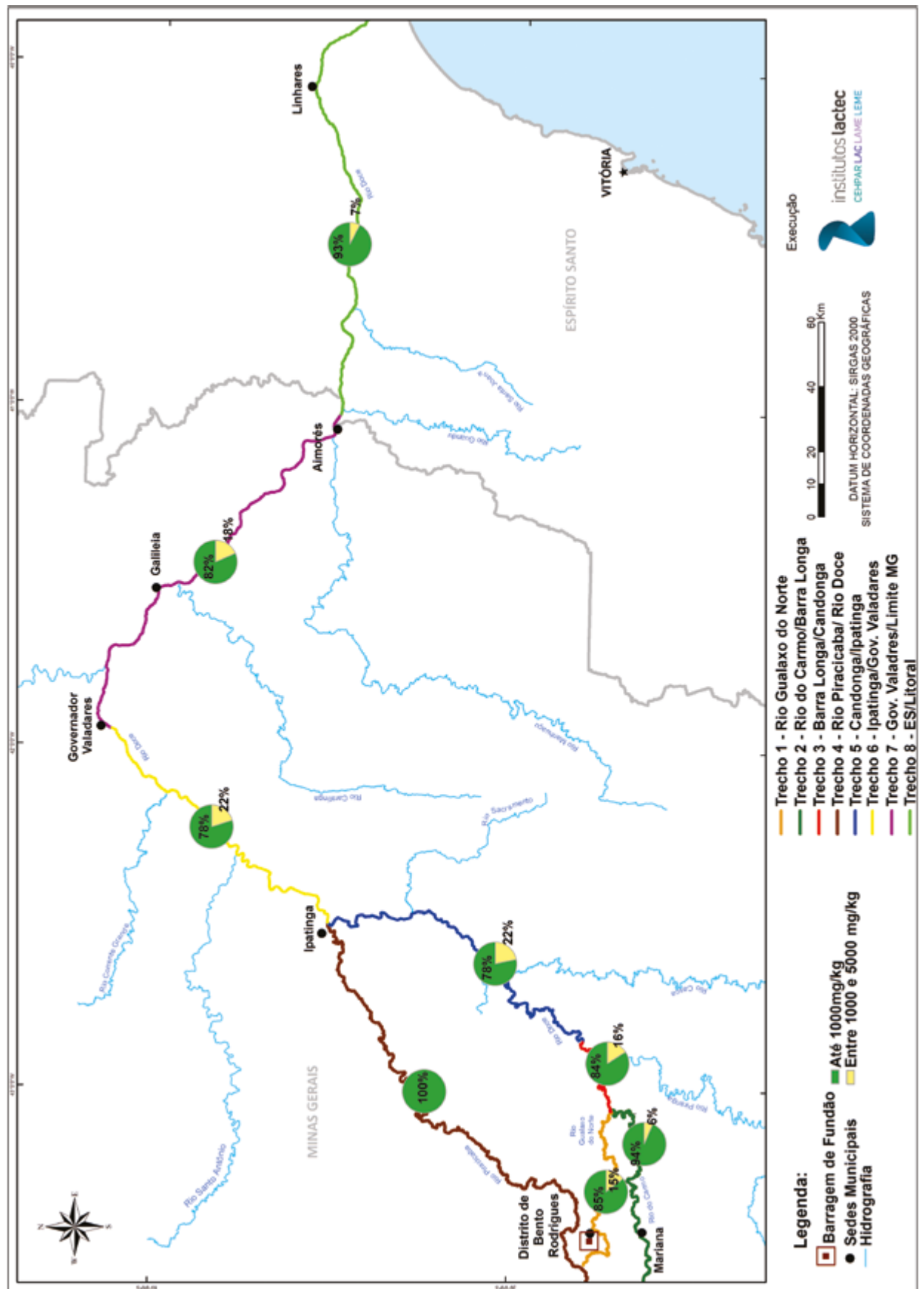




Figura 152 – Distribuição dos resultados de manganês por trecho.



2.4.4.11 Análise Granulométrica

A análise das dimensões das partículas é fundamental em estudo sedimentológico com enfoque ambiental. Entre as publicações consultadas, apenas os trabalhos da Golder Associates (2016a) e os dados do monitoramento do IEMA continham dados possíveis de serem analisados por conterem as classes de tamanho de partícula necessárias para a análise, divididas em areia, silte e argila.

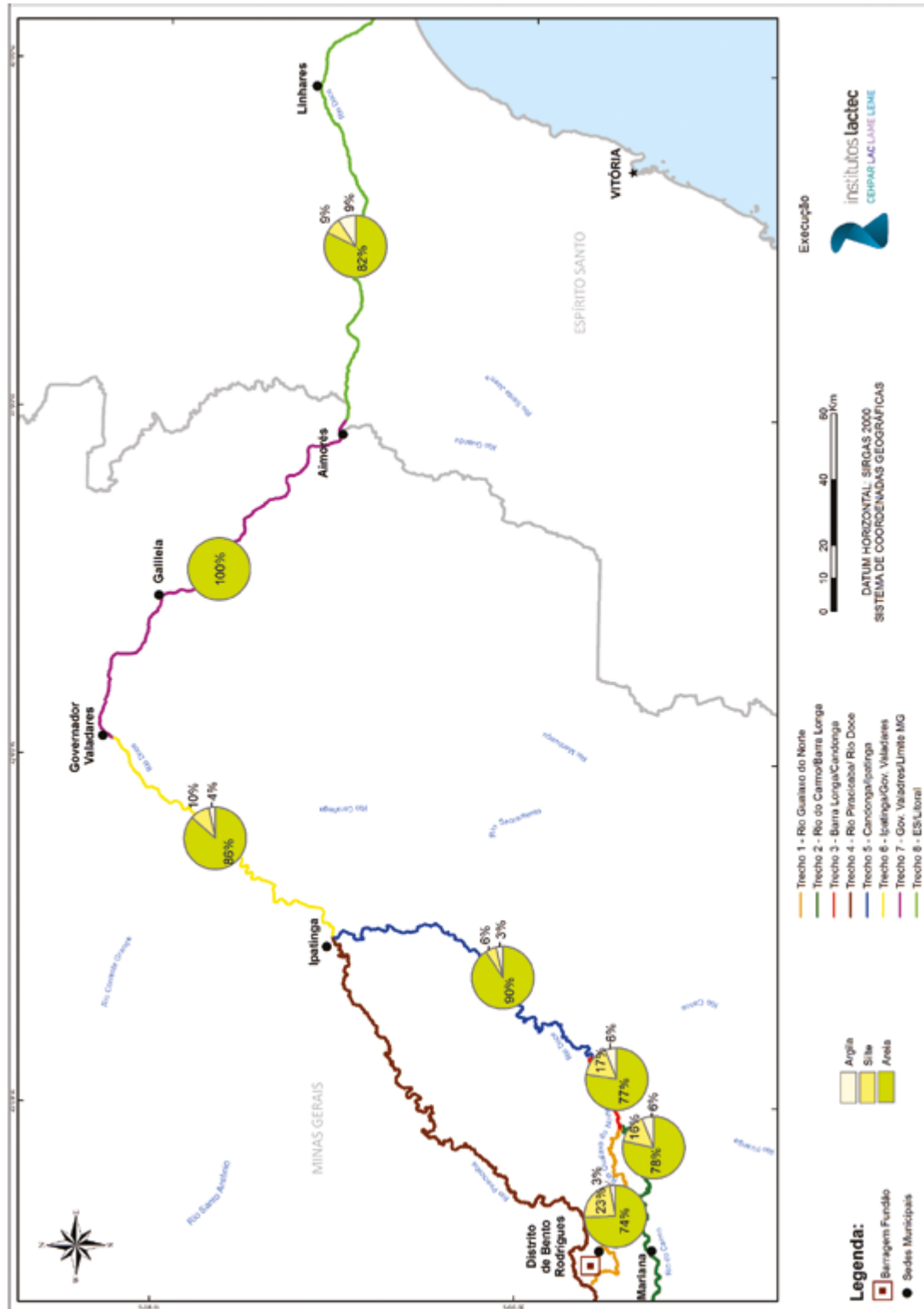
2.4.4.11.1 *Distribuição espacial dos dados granulométricos*

A distribuição espacial dos dados de granulometria está apresentada na Figura 153. Para o trecho 4, não foi possível utilizar os dados disponíveis, pois a soma das frações de tamanho de partícula somava valores muito abaixo de 100% (menos de 85%), o que reduziu muito a confiabilidade dos dados.

Conforme pode ser observado, a fração areia é predominante na grande maioria dos trechos analisados. O silte aparece em maiores concentrações nos trechos 1 e 2, com concentração máxima de 23% no trecho 1. Argila foi detectada em concentrações abaixo de 10% em quase todos os trechos, com exceção do trecho 7, que apresentou 100% de areia em sua composição.

Comparando com os resultados obtidos para a linha-base, a fração de areia encontrada foi maior após o rompimento da barragem de Fundão.

Figura 153 – Distribuição espacial dos dados granulométricos.



2.4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ANTES E DEPOIS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

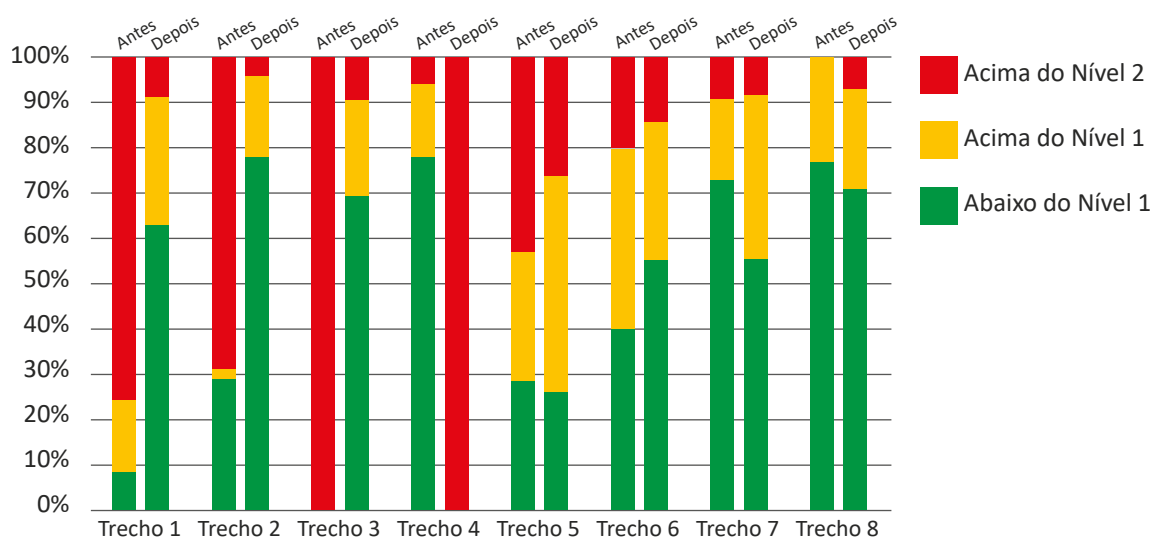
Neste item serão apresentados gráficos de comparação dos resultados obtidos através da análise dos dados considerados para a linha-base com os dados da análise com os resultados obtidos por outros autores, após o rompimento da barragem de Fundão. A primeira coluna dos gráficos apresenta os resultados obtidos antes do rompimento da barragem de Fundão, e a segunda coluna apresenta os resultados obtidos após o rompimento da referida barragem, para cada trecho analisado.

2.4.5.1 Arsênio

Na Figura 154 está apresentado o comparativo dos resultados obtidos para o elemento arsênio. Observando-se o gráfico é possível perceber uma diminuição na concentração de arsênio nos sedimentos nos trechos 1, 2, 3, e 6, enquanto os trechos 4, 5, 7 e 8 apresentaram aumento da concentração deste elemento.

Figura 154 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento arsênio.

Arsênio

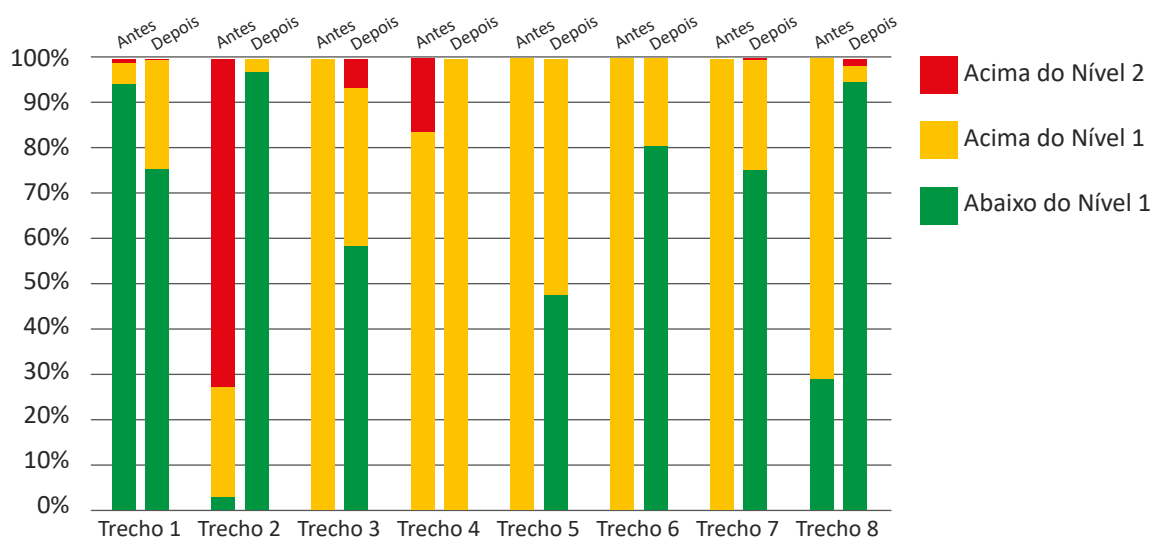


2.4.5.2 Cádmi

A Figura 155 apresenta o comparativo dos resultados obtidos para o elemento cádmio. Comparando os resultados de antes e depois, pode se observar uma diminuição na concentração de cádmio em todos os trechos analisados.

Figura 155 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento cádmio.

Cádmi

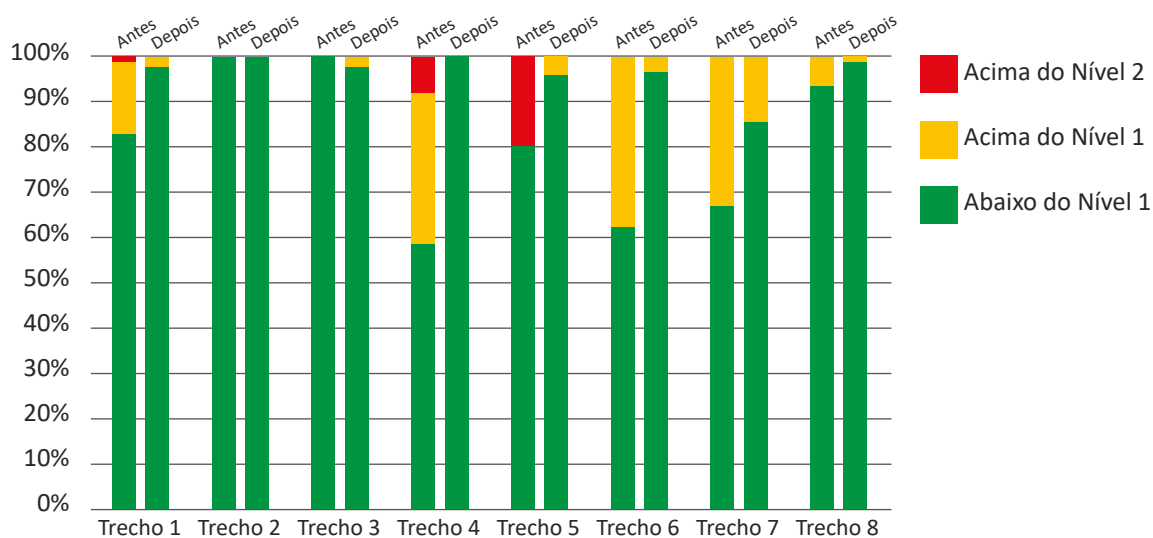


2.4.5.3 Chumbo

Na Figura 156 está apresentado o comparativo dos resultados obtidos para o elemento chumbo. Comparando os resultados de antes e depois, pode se observar uma diminuição na concentração de chumbo em quase todos os trechos analisados, com exceção dos trechos 2 e 3, onde foram observados resultados iguais ou muito próximos nos dois períodos.

Figura 156 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento chumbo.

Chumbo

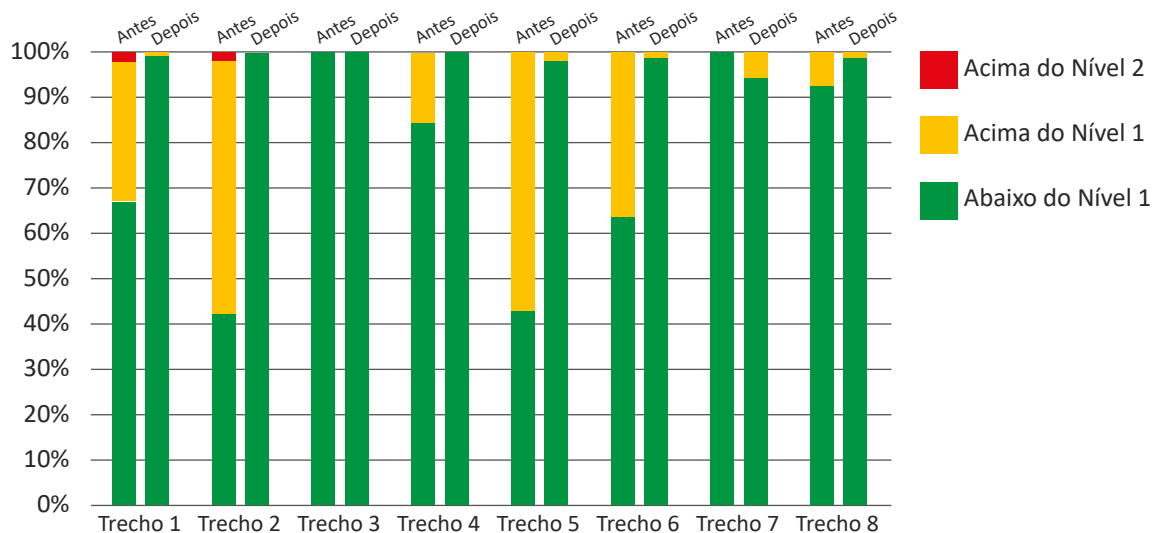


2.4.5.4 Cobre

A Figura 157 apresenta o comparativo dos resultados obtidos para o elemento cobre. Com exceção dos trechos 3 e 7, onde foram observados resultados iguais ou muito próximos nos dois períodos, os demais trechos apresentaram diminuição na concentração desse elemento.

Figura 157 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento cobre.

Cobre

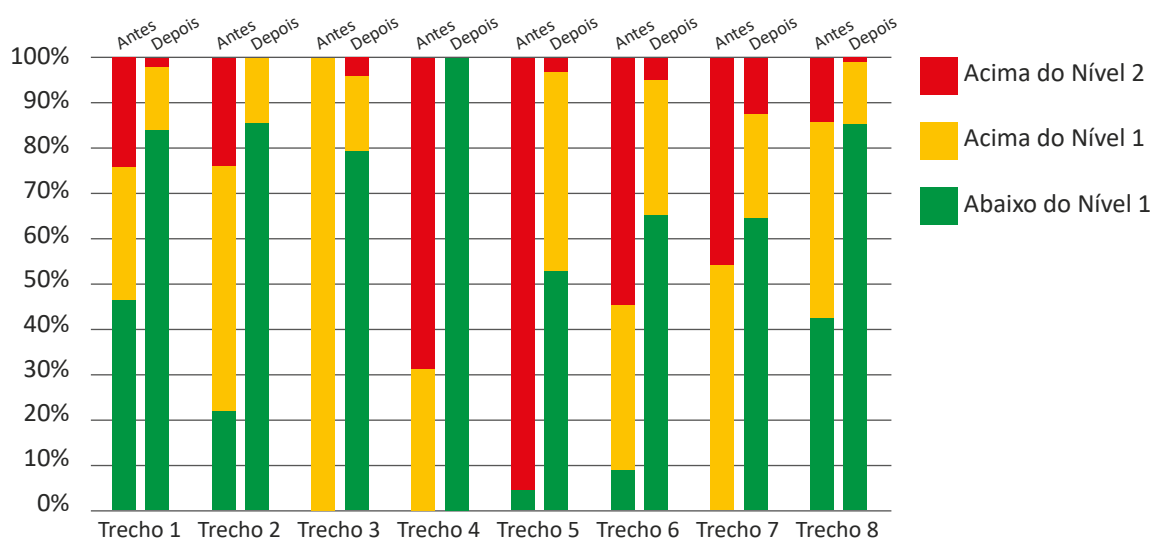


2.4.5.5 Cromo

No gráfico da Figura 158 pode se observar que a concentração de cromo foi menor no período após o rompimento da barragem de Fundão, em todos os trechos analisados.

Figura 158 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento cromo.

Cromo

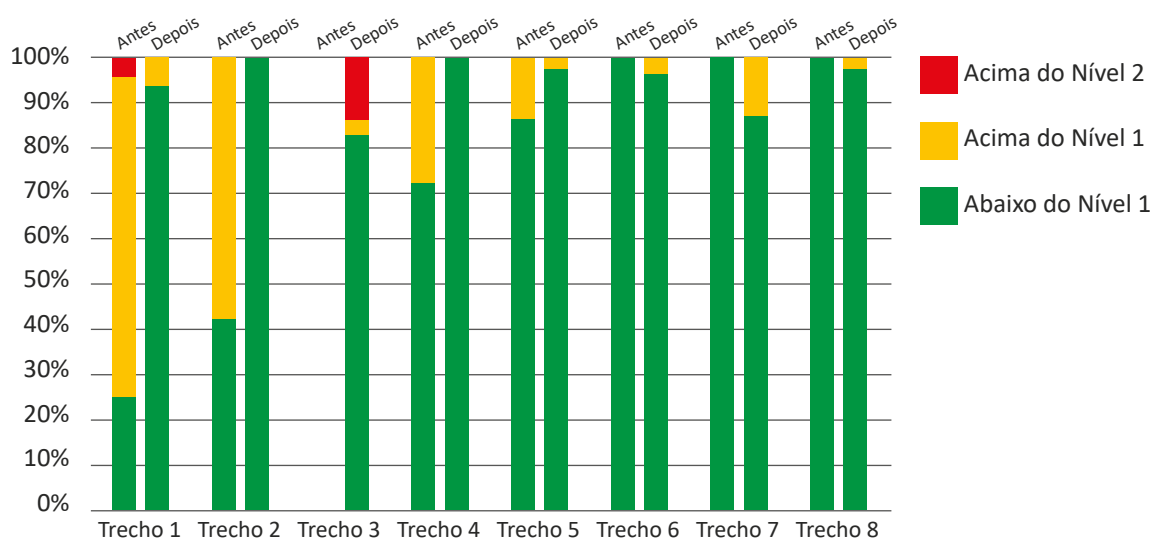


2.4.5.6 Mercúrio

A Figura 159 apresenta o comparativo das concentrações do elemento mercúrio. Pode se observar que as concentrações obtidas dos dados após o rompimento da barragem de Fundão foram menores em quase todos os trechos analisados, com exceção do trecho 3, onde não haviam dados anteriores e nos trechos 6 e 7, onde as concentrações observadas foram levemente maiores.

Figura 159 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento mercúrio.

Mercúrio

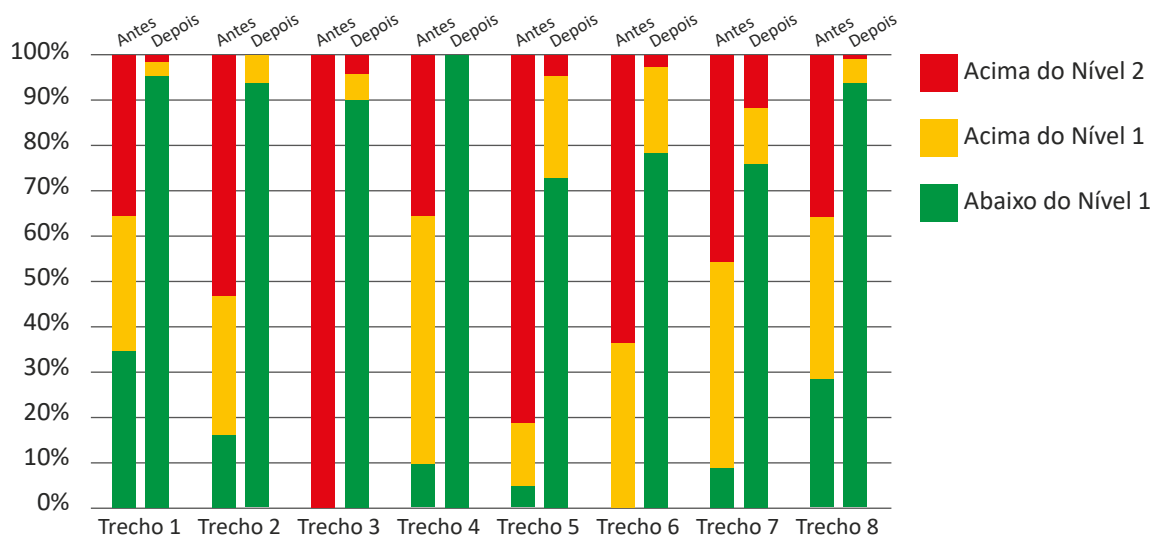


2.4.5.7 Níquel

Observando a Figura 160, pode se perceber que as concentrações obtidas para o elemento níquel foram menores após o rompimento da barragem de Fundão em todos os trechos analisados.

Figura 160 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento níquel.

Níquel

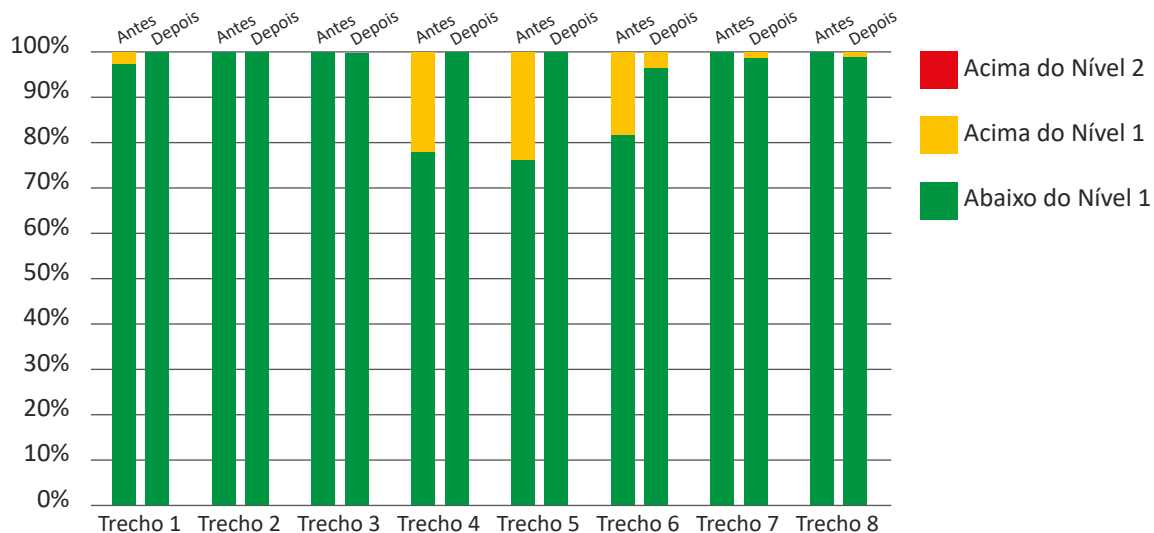


2.4.5.8 Zinco

As concentrações de zinco foram mais baixas no período após o rompimento da barragem de Fundão na maioria dos trechos analisados, com exceção dos trechos 7 e 8, onde as concentrações foram levemente superiores no mesmo período (Figura 161).

Figura 161 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento zinco.

Zinco

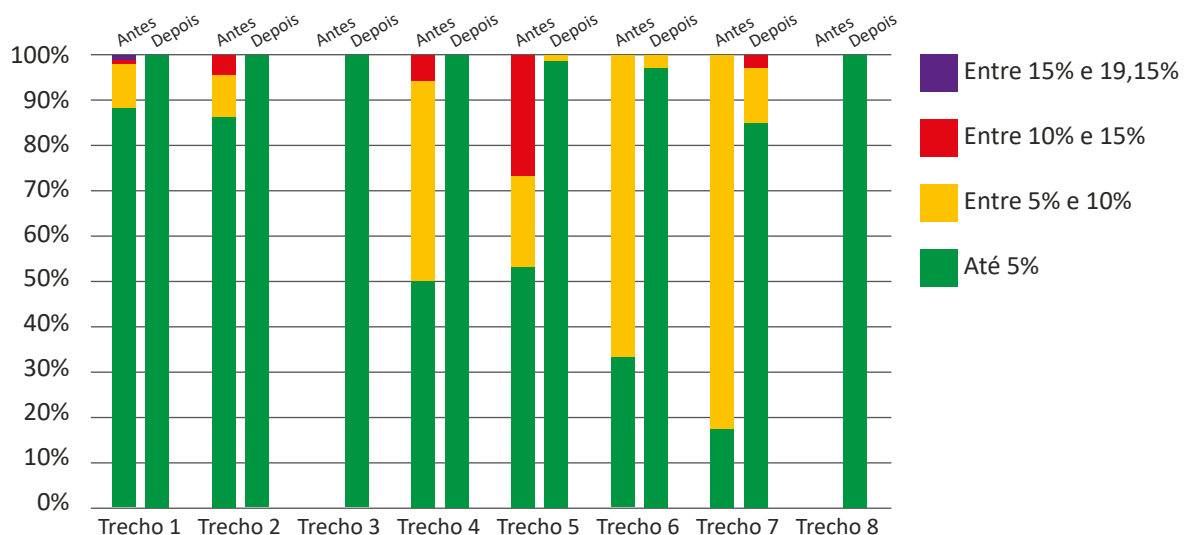


2.4.5.9 Alumínio

A concentração de alumínio, de acordo com o observado na Figura 162, foi mais baixa no período após o rompimento da barragem de Fundão na maioria dos trechos analisados, com exceção dos trechos 3 e 8, onde não havia dados anteriores ao rompimento.

Figura 162 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento alumínio.

Alumínio

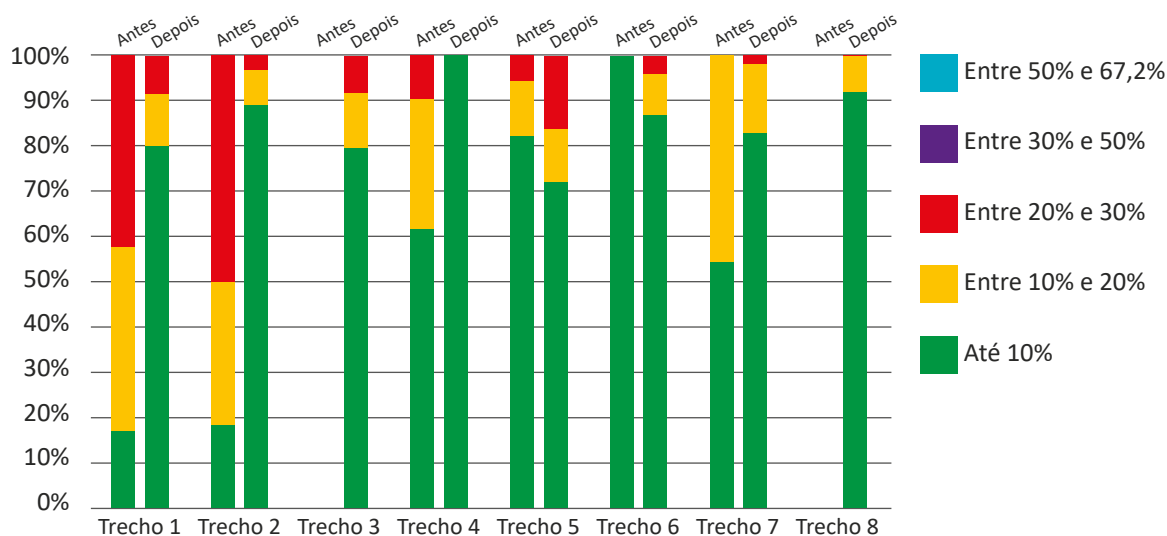


2.4.5.10 Ferro

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 163, a concentração de ferro foi inferior no período após o rompimento da barragem de Fundão na maioria dos trechos analisados, com exceção dos trechos 3 e 8, onde não havia dados anteriores ao rompimento.

Figura 163 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento ferro.

Ferro

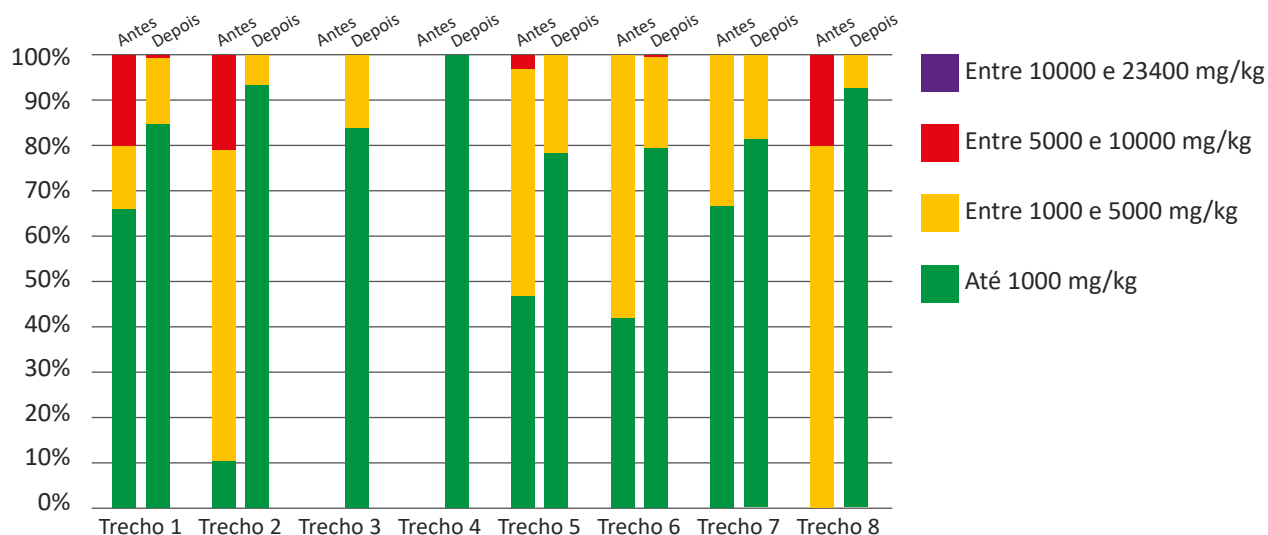


2.4.5.11 Manganês

De forma análoga ao ferro, a concentração de manganês foi inferior no período após o rompimento da barragem de Fundão na maioria dos trechos analisados, com exceção dos trechos 3 e 4, onde não havia dados anteriores ao rompimento.

Figura 164 – Comparativo dos resultados obtidos para o elemento manganês.

Manganês

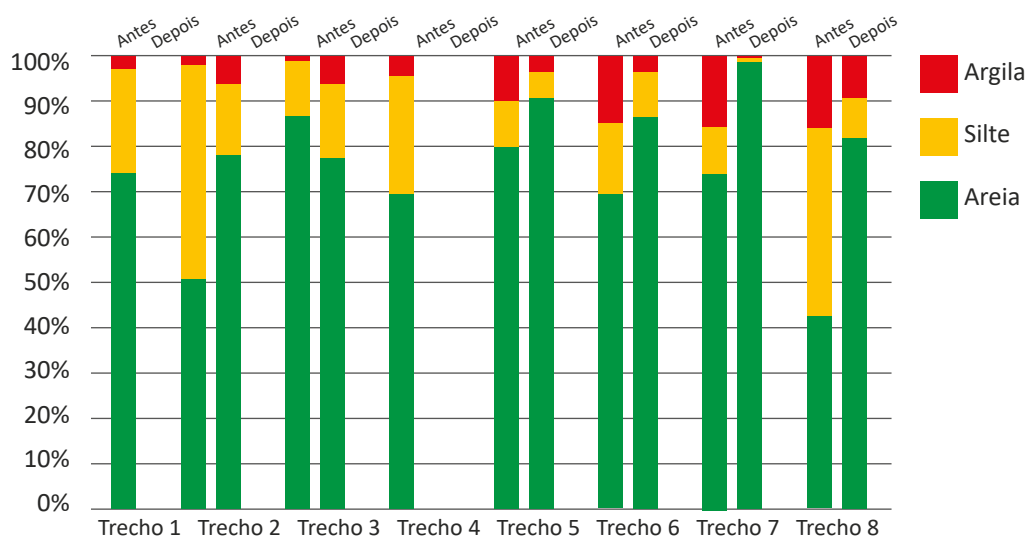


2.4.5.12 Granulometria

Comparando-se os resultados de granulometria dos períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem de Fundão, pode-se observar que a fração de areia apresentou valores maiores no período posterior ao rompimento da barragem nos trechos 2, 5, 6, 7 e 8. No trecho 3 foi observada diminuição dessa fração granulométrica. Nos trechos 1 e 4 não se pode fazer comparações dos períodos por falta de dados.

Figura 165 – Comparativo dos resultados obtidos para a granulometria.

Granulometria



2.4.5.13 Macroinvertebrados Límnicos

2.4.5.13.1 Monitoramento emergencial Fundação Renova

Após o desastre, no monitoramento emergencial (de novembro/2015 a julho/2017) foram realizadas coletas de macroinvertebrados bentônicos em 13 estações de amostragem na bacia do rio Doce, cada estação contou com 1 a 10 pontos de realização de coleta (Tabela 46). Nem todas as estações e pontos de coleta tiveram a mesma periodicidade de coleta. As coletas foram realizadas em triplicata com pegador de fundo tipo Pertersen ou Van Veen. Em laboratório, as amostras foram triadas em peneiras com abertura de malha de 0,25 e 0,50 mm, foi realizada pré-triagem em bandejas iluminadas com solução saturada de sal e o processo de elutrição, posteriormente os organismos foram triados em estereomicroscópio, sendo identificados até o menor nível taxonômico possível (ECONSERVATION, 2016). Também foram realizadas coletas pontuais em alguns outros pontos, especialmente no mês de dezembro/2015 em Governador Valadares, que apresentou pontos com coletas diárias.

Os dados obtidos no banco de dados da Fundação Renova não apresentavam informações referentes aos taxa encontrados e densidade destes. Os laudos com as informações detalhadas de cada amostra foram disponibilizados pela Fundação Renova após solicitação. Entretanto, esses dados ainda estão em análise, a análise do Monitoramento Emergencial da Fundação Renova será apresentada na íntegra futuramente.

Tabela 46 – Localização das estações de amostragem e pontos de coleta do monitoramento emergencial realizado pela Fundação Renova.

Estação de amostragem	Pontos de coleta	Coordenadas
Barra Longa/MG	Jusante	705477 7755986 UTM-23S
	Montante	701975 7755676 UTM-23S
	Ponte Rio Carmo	703132 7755131 UTM-23S
	Rio Carmo - Margem Direita	Não informada
	Rio Carmo - Margem Esquerda	Não informada
Rio Doce/MG	Jusante	720925 7759673 UTM-23S
	Montante	718093 7758867 UTM-23S
Ipatinga/MG	Jusante	765118 7845528 UTM-23S
Gov. Valadares/MG	Jusante	184855 7905859 UTM-24S
	Montante	802656 7894322 UTM-23S
Aimorés/MG	Jusante	285711 7843590 UTM-24S
	Montante	279618 7850136 UTM-24S
Baixo Guandu/ES	Montante	288403 7841863 UTM-24S
	Ponte	288639 7841912 UTM-24S
Itapina/ES	Ponte	309626 7839453 UTM-24S
Colatina/ES	Montante	320578 7839551 UTM-24S
	Ponte	331786 7841376 UTM-24S
Linhares/ES	Montante	387912 7853840 UTM-24S
	Ponte	388048 7853216 UTM-24S
	Lagoa Areal - ES - A1	Não informada
	Lagoa do Monsarás - ES - M1	Não informada
	Lagoa do Monsarás - ES - M2	Não informada
	Lagoa do Pandolfi 1	Não informada
	Lagoa do Pandolfi 2	Não informada
	Lagoa Nova - ES - N1	Não informada
	Lagoa Nova - ES - N2	Não informada
	Lagoa Nova - ES - N3	Não informada
Regência/ES	Montante	414361 7826485 UTM-24S
	Boca Barra	413660 7827868 UTM-24S
Galiléia	Galiléia	Não informada
Mariana	Dique S3 - Centro	Não informada
	Mariana - MG - Dique S3 - Jusante	Não informada
	Mariana - MG - Dique S3 - Lado Direito	Não informada
	Mariana - MG - Dique S3 - Lado Esquerdo	Não informada
Tumiritinga	Tumiritinga	Não informada

2.4.5.13.2 PMQQS Fundação Renova

No Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS), a Fundação Renova previu o monitoramento mensal dos macroinvertebrados bentônicos em 17 estações de amostragens, apresentadas na Tabela 47, sendo uma no rio Piranga, uma no rio Suaçuí Grande, uma no rio Manhuaçu e 13 no rio Doce (GOLDER ASSOCIATES, 2016a).

As coletas tiveram início em agosto/2017 e, segundo Golder Associates (2016a), estão seguindo recomendações de AQEM (2002), seguindo metodologia de coleta *multihabitat*, com total de 20 réplicas em trecho de até 20 m em áreas de correnteza. Nas estações de amostragem com características estacionárias ou lênticas é utilizada rede manual (amostrador tipo Surber com malha de 0,3 mm de abertura e área de 0,09 m²) e em áreas profundas draga Petersen, coletando três réplicas. Em laboratório, as amostras são lavadas com água corrente em redes de abertura de malha de malha 0,25 mm (GOLDER ASSOCIATES, 2016a).

Até a elaboração do presente relatório estavam disponíveis apenas dados de agosto e setembro/2017, no banco de dados compartilhado pela Fundação Renova, em alguns pontos também estavam disponíveis os dados de outubro/2017. Contendo os resultados do índice BMWP, diversidade de Shannon, dominância de Simpson, equitabilidade, número total de táxons e número total de indivíduos. Os dados brutos com os grupos encontrados em cada ponto de coleta por campanha foram disponibilizados pela Fundação Renova após solicitação, entretanto ainda estão em processo de análise.

Tabela 47 – Localização dos pontos de coleta do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimento realizado pela Fundação Renova.

Ponto	Município	Rio	Coordenadas
RPG 01	Ponte Nova	Rio Piranga	718899,86 7744668,22 UTM 23S
RSG 01	Gov. Valadares	Rio Suaçuí Grande	206382,68 7913011,84 UTM 24S
RMH 01	Aimorés	Rio Manhuaçu	280204,71 7844306,26 UTM 24S
RSA 01	Naque	Rio Santo Antônio	781009,87 7871293,03 UTM 23S
RDO 03	São Domingos da Prata	Rio Doce	735947,96 7785335,22 UTM 23S
RDO 04	Bom Jesus do Galho	Rio Doce	760057,88 7835967,30 UTM 23S
RDO 05	Belo Oriente	Rio Doce	776918,75 7861579,02 UTM 23S
RDO 06	Periquito	Rio Doce	799361,95 7886166,12 UTM 23S
RDO 07	Gov. Valadares	Rio Doce	806612,20 7899868,14 UTM 23S
RDO 09	Tumiritinga	Rio Doce	221845,75 7900244,83 UTM 24S
RDO 10	Resplendor	Rio Doce	263318,88 7861251,39 UTM 24S
RDO 11	Baixo Guandu	Rio Doce	288650,080 7841937,06 UTM 24S
RDO 12	Colatina	Rio Doce	315429,22 7842979,94 UTM 24S
RDO 13	Colatina	Rio Doce	328395,12 7839121,87 UTM 24S
RDO 14	Colatina	Rio Doce	336836,94 7841931,34 UTM 24S
RDO 15	Linhares	Rio Doce	388224,85 7853704,30 UTM 24S
RDO 16	Linhares	Rio Doce	413701,23 7827444,40 UTM 24S

2.4.5.13.3 GIAIA

O GIAIA disponibilizou relatórios com análise de comunidade zoobentônica referentes a três expedições realizadas no rio Doce após o rompimento da barragem. O primeiro deles é referente a coletas realizadas em dezembro/2015 em 11 pontos, sendo um ponto controle no rio Gualaxo do Norte (a montante da barragem de fundão) e os outros 10 na calha principal do rio Doce. As amostragens ocorreram sempre nas margens dos rios. Não foi possível a coleta com draga do tipo Petersen, conforme planejado pelos autores, devido à alta compactação do sedimento. Foi utilizada uma pá para a realização da coleta. As amostras foram lavadas em rede de malha de 250 µm e triadas em bandejas iluminadas (MORAES, 2016).

O relatório referente à segunda expedição teve coletas realizadas entre o final de março e início de abril/2016 (MENEZES, 2016), e a terceira expedição foi realizada um ano após o desastre, com coletas entre 28 de outubro e 3 de novembro de 2016. Foram amostrados 18 pontos (sendo 12 pontos ao longo do rio Doce e 6 pontos controle em afluentes) com amostrador *corer* de 5 cm de diâmetro, sendo coletadas 10 réplicas por ponto. As amostras foram lavadas em campo com rede de 250 µm. Em laboratório, as amostras foram triadas em microscópio estereoscópico e os organismos identificados, amostras com muita areia foram flutuadas com NaCl (MENEZES; ARRUDA; GARGIULO, 2016).

2.4.5.13.4 Monitoramento UHE Baguari

No programa de monitoramento limnológico da UHE Baguari é realizado o monitoramento de zoobentos trimestralmente em oito pontos de coleta, sendo um no rio Corrente Grande e sete no rio Doce (Tabela 48). Um total de cinco pontos se encontram a montante da UHE Baguari e dois a jusante. Foram disponibilizados os dados entre julho/2012 e julho/2017, contemplando, portanto, o período antes e após o rompimento da barragem de Fundão.

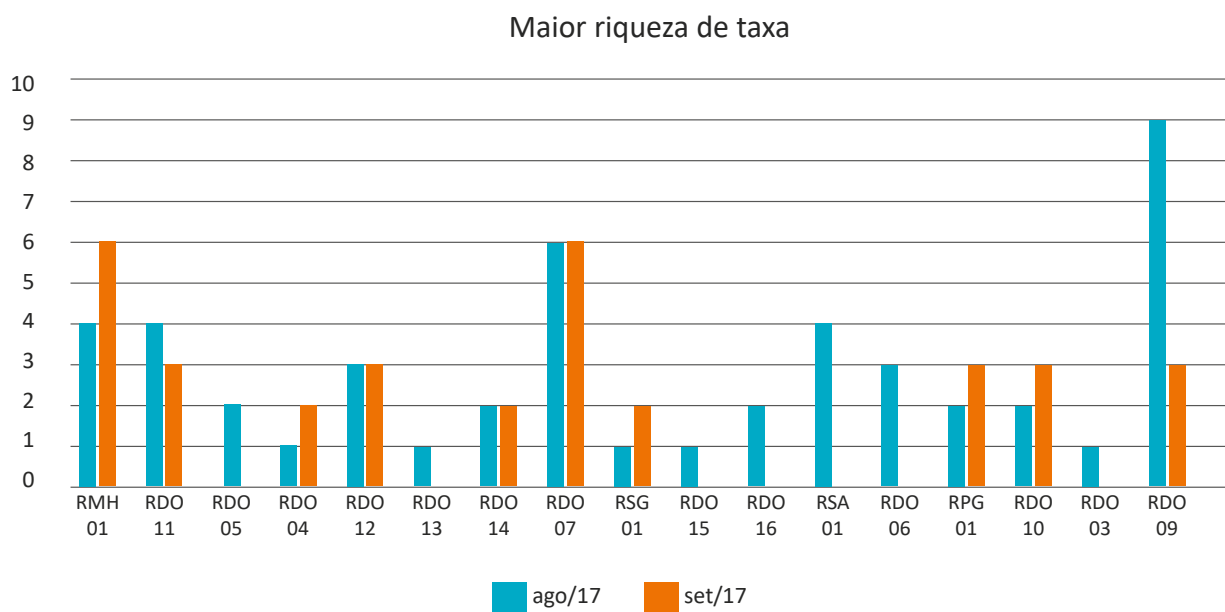
Tabela 48 – Localização dos pontos de coleta do programa de monitoramento limnológico da UHE Baguari.

Ponto	Rio	Localização	Coordenadas (UTM – 23K)
P01	Rio Corrente Grande	Montante – próximo à confluência do rio Doce com o rio Corrente Grande.	801079 – 7892396
P02	Rio Doce	Montante – imediatamente acima do eixo de barramento do reservatório.	801826 – 7893237
P03	Rio Doce	Montante – na área central do reservatório, a jusante do Distrito de Pedra Corrida.	798952 – 7887859
P04	Rio Doce	Montante – a 20 km do barramento imediatamente a jusante de Periquito.	790849 – 7879647
P05	Rio Doce	Montante – a jusante da confluência do córrego do Otto com o rio Doce.	791637 – 7880498
P06	Rio Doce	Montante – entre confluência do rio Santo Antônio e município de Periquito.	783005 – 7870771
P07	Rio Doce	Jusante – jusante do distrito de Baguari, a montante da ilha dos Pimentas.	0811259 – 7903474
P08	Rio Doce	Jusante – jusante do barramento, logo após o canal de fuga.	0802990 – 7894627

2.4.5.13.5 PMQQS Fundação Renova

Segundo os dados do PMQQS entre agosto e setembro/2017, a maior riqueza encontrada foi de 9 taxa diferentes em uma das amostras do ponto RDO 09 em agosto/2017, seguida de 6 no ponto RDO 07 em agosto e setembro/2017 e em setembro no ponto RMH 01 (Figura 166). Grande parte das amostras nos diferentes pontos apresentaram ausência de organismos ou com riqueza igual a 1. As médias da riqueza entre as diferentes amostras de um mesmo ponto ficaram abaixo de 2 na maioria dos pontos, exceto em quatro casos. Os laudos contendo os taxa encontrados em casa coleta por ponto estão em análise, essa informação permitirá o calcular a riqueza por ponto de coleta.

Figura 166 – Maior riqueza de taxa de macroinvertebrados bentônicos segundo dados do PMQQS nos meses de agosto e setembro/2017.



O número de indivíduos também foi bastante variável nas diferentes amostras de um mesmo ponto na mesma data de coleta, na maioria dos pontos nas diferentes datas de coleta, pelo menos, uma das amostras coletadas apresentou ausência de indivíduos. A soma dos indivíduos de todas as amostras de um mesmo ponto variou de 2.794 em setembro/2017 no ponto RMH 01 a 03 em agosto/2017 no ponto RSG 01 (Tabela 49). A média do número total de indivíduos variou de 139,7 a 0,15, nos mesmos pontos citados anteriormente. A amostra com maior quantidade de indivíduos tinha 464 indivíduos no ponto RDO 09 em agosto/2017, entretanto vários pontos apresentaram as amostras com maior número de indivíduos com menos de 10 indivíduos.

Tabela 49 – Indivíduos coletados por ponto de coleta entre agosto e outubro/2017 segundo dados do PMQQS.

Ponto	Data	Soma	Média	Maior quantidade	Menor quantidade
RMH 01	ago/17	360	18	96	3
	set/17	2794	139,7	428	0
RDO 11	ago/17	447	22,35	56	5
	set/17	342	17,1	69	1
RDO 05	ago/17	172	8,6	36	0
	set/17	704	35,2	368	0
RDO 04	ago/17	129	6,45	46	0
	set/17	296	14,8	53	0
RDO 12	ago/17	253	12,65	56	0
	set/17	39	1,95	7	0
RDO 13	ago/17	8	0,4	4	0
	set/17	13	0,65	8	0
RDO 14	ago/17	279	13,95	24	1
	set/17	456	22,8	88	0
RDO 07	ago/17	560	28	66	1
	set/17	1316	65,8	156	4
	out/17	2096	104,8	224	0
RSG 01	ago/17	3	0,15	1	0
	set/17	65	3,25	16	0
	out/17	148	7,4	24	0
RDO 15	ago/17	76	4	16	0
	set/17	64	3,047619048	24	0
RDO 16	ago/17	290	14,5	90	0
	set/17	336	16,8	104	0
RSA 01	ago/17	80	4	32	0
	set/17	661	33,05	144	0
RDO 06	ago/17	41	2,05	8	0
	set/17	62	3,1	8	0
RPG 01	ago/17	493	24,65	220	0
	set/17	1785	89,25	204	0
RDO 10	ago/17	79	3,95	46	0
	set/17	85	4,25	16	0
	out/17	65	3,25	8	0
RDO 03	ago/17	36	1,8	12	0
	set/17	120	6	40	0
RDO 09	ago/17	755	37,75	464	0
	set/17	232	11,6	32	0
	out/17	996	49,8	284	0

Nota: Soma: soma de todos os indivíduos das diferentes amostras por ponto e data de coleta.

Média: média de todos os indivíduos das diferentes amostras por ponto e data de coleta.

Maior: maior número de indivíduos entre as diferentes amostras de um mesmo ponto de coleta.

Menor: menor número de indivíduos entre as diferentes amostras de um mesmo ponto de coleta.

O índice de diversidade de Shannon pode ser de maneira geral considerado baixo, a grande maioria das amostras tiveram diversidade menor do que 1, devido à ausência de indivíduos, e várias amostras apresentam zero de diversidade. O maior valor de diversidade entre todas as amostras foi de 1,81 em uma das amostras do ponto RDO 09 em agosto/2017, apenas cerca de 20 amostras apresentaram diversidade maior que 1 no total de, aproximadamente, 750 amostras. A baixa diversidade está relacionada ao número baixo de taxa e indivíduos encontrados em várias amostras. Índice de diversidade de Shannon baixo é relacionado a áreas impactadas, como o caso da área de estudo. A dominância de Simpson e a equitabilidade também refletiram o baixo número de taxa e de indivíduos encontrados em grande parte das amostras, corroborando os dados de riqueza e diversidade, indicando um ambiente impactado.

O Biological Monitoring Work Party (BMWP) é um índice biológico desenvolvido para riachos que utiliza a comunidade macroinvertebrados aquáticos como indicadores de qualidade ambiental, pontua os taxa em gradiente com relação à tolerância à poluição orgânica (JUNQUEIRA et al., 2000). Taxa mais sensíveis recebem pontuações maiores, enquanto os mais tolerantes recebem menores pontuações. No banco de dados da Fundação Renova foi disponibilizado o BMWP de cada amostra isoladamente, não sendo possível o cálculo por ponto de coleta. Na forma como foram disponibilizados os dados, o maior BMWP foi 29 em uma das amostras do ponto RDO 09 no mês de agosto/2017, seguido de 24 no ponto RDO 07 tanto em agosto quanto em setembro/2017. Entretanto, mais de 95% das amostras apresentaram BMWP correspondente à qualidade de água péssima e ambiente fortemente poluído (JUNQUEIRA et al., 2000).

2.4.5.13.5 GIAIA

Na primeira expedição (realizada em dezembro/2015), poucos macroinvertebrados bentônicos foram encontrados, em 7 dos 11 pontos amostrados não foram encontrados indivíduos vivos (MORAES, 2016). Nos demais pontos foram encontrados apenas larvas de Coleoptera (Diptera), Oligochaetas (Annelida) e camarões da família Palaemonidae (Crustacea) com baixa abundância. Os autores relacionam a baixa riqueza e abundância dos indivíduos à enxurrada de lama de rejeitos, mas ponderam que outras alterações antrópicas que o rio Doce sofre podem ter influência, assim como a dificuldade de amostragem. Os organismos encontrados nessa primeira expedição foram considerados pelos autores como os primeiros colonizadores, sendo considerados fatores limitantes para a colonização naquele momento a alta quantidade de partículas em suspensão na água e a compactação do sedimento. Os autores citaram características morfológicas e fisiológicas presentes nos três taxa encontrados que estariam relacionadas à colonização, como a realização de trocas gasosas através da superfície do corpo e presença de hemoglobina nos Oligochaetas, o local de vida das larvas de coleóptera e a proteção e autoventilação das brânquias e maior mobilidade dos Palaemonidae (MORAES, 2016). Os resultados estão apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Macroinvertebrados aquáticos encontrados vivos na primeira expedição realizada pelo GIAIA, segundo Moraes (2016).

Local	Data	Taxa
Rio Gualaxo do Norte - Controle	05/12/2015	-
Barra Longa – Rio do Carmo	06/12/2015	-
Cidade de rio Doce	06/12/2015	-
Entre Rio Doce e Ipatinga	07/12/2015	-
Ipatinga	07/12/2015	-
Naque	07/12/2015	Coleoptera (1)
Gov. Valadares	08/12/2015	Nematoda (1)
Baixo Guandu	08/12/2015	Palaemonidae (7)
Colatina	09/12/2015	-
Linhares	09/12/2015	Oligochaeta (2)
		Coleoptera (8)
Regência	09/12/2015	-

Na segunda expedição realizada entre o final de março e início de abril/2016, o número de macroinvertebrados bentônicos encontrado também foi considerado baixo pelos autores (MENEZES, 2016). Foi aumentado o número de pontos de controle (em tributários) com relação à primeira expedição, em alguns desses pontos foram encontrados poucos indivíduos ou mesmo constatada a ausência de indivíduos (Tabela 51). A baixa riqueza e abundância de macroinvertebrados bentônicos foi relacionada pelos autores ao impacto de diversas atividades antrópicas na qualidade da água da bacia do rio Doce (MENEZES, 2016). Nessa expedição, os taxa mais representativos foram Chironomini (Diptera), Hydropsychidae (Trichoptera) e o molusco exótico *Corbicula* sp. A turbidez da água e compactação do substrato foram novamente indicados como fatores limitantes para a colonização dos macroinvertebrados bentônicos (MENEZES, 2016).

Na terceira expedição foi relatado pelos autores redução na turbidez da água, fato relacionado ao aumento de abundancia dos taxa em alguns pontos, entretanto a riqueza de espécies foi considerada baixa pelos autores (Tabela 51), podendo ser relacionada à baixa qualidade ambiental (MENEZES; ARRUDA; GARGIULO, 2016). Os taxa mais representativos nessa expedição foram Oligochaeta (Annelida), Chironomini (Diptera) e Hirudinea (Annelida), os três considerados resistentes a alterações ambientais.

Tabela 51 – Macroinvertebrados aquáticos encontrados na segunda e terceira expedições realizadas pelo GIAIA, segundo Menezes (2016) e Menezes, Arruda, Gargiulo (2016).

Local	Segunda expedição	Terceira expedição
Rio Gualaxo do Norte - Controle	Oligochaeta (2) Chironomini (3) Tanytarsini (1) Tanypodinae (1) Pupa diptera (2) Hydropsychidae (3) Elmidae (2) Naucoridae (3)	Chironomini (1) Tanypodinae (1)
Rio do Carmo - Controle	Chironomini (16)	Oligochaeta (31) Hirudinea (7) <i>Helodbella</i> sp. (8) Chironomini (26) <i>Chironomus</i> sp. (1)
Rio Gualacho do Norte – Piracatu de Baixo	-	Chironomini (1)
Rio do Carmo – Barra Longa	-	-
Rio Doce – cidade de Rio Doce	<i>Corbicula</i> sp. (2)	Oligochaeta (1) Hirudinea (2) Chironomini (7) Gomphidae (1) <i>Corbicula</i> sp. (2)
Rio Piranga - Controle	-	Oligochaeta (2)
Rio Doce – entre Rio Doce e Ipatinga	-	<i>Corbicula</i> sp. (2)
Rio Piracicaba - controle	-	<i>Corbicula</i> sp. (2)
Rio Doce - Ipatinga	Oligochaeta (1) Chironomini (4) Tanypodinae (2) Caratopogonidae (1) Pupa diptera (1) Hydropsychidae (11) <i>Corbicula</i> sp. (2)	
Rio Doce - Naque	-	-
Rio Doce – Gov. Valadares	<i>Pomacea</i> sp (2) <i>Littoradina</i> sp (3)	Oligochaeta (5) Chironomini (2) Tabanidae (1)
Rio Doce - Galiléia	Oligochaeta (2) <i>Corbicula</i> sp. (1)	<i>Corbicula</i> sp. (14) <i>Pomacea</i> sp. (1)

Local	Segunda expedição	Terceira expedição
Rio Manhançú	Não coletado	-
Rio Doce – Baixo Guandu	<i>Corbicula</i> sp. (11)	Oligochaeta (1)
Rio Guandu - Controle	-	Chironomini (2)
Rio Doce - Itapina	-	Chironomini (1) <i>Corbicula</i> sp. (4) <i>Uttoridina</i> sp. (4)
Rio Doce – Colatina	<i>Corbicula</i> sp. (12)	Tanypodidae (4) <i>Corbicula</i> sp. (9)
Rio Doce - Linhares	Tanytarsini (1) <i>Corbicula</i> sp. (2)	Tanypodidae (2) Chironomini (2)
Rio Doce - Regência	-	Tanypodidae (2) Chironomini (10)

2.4.5.13.7 Monitoramento UHE Baguari

Nos dados da comunidade de macroinvertebrados aquáticos disponibilizados pela UHE Baguari, foi possível observar queda na riqueza de taxa (Figura 167) e densidade de indivíduos (Figura 168) nas campanhas realizadas após o rompimento da barragem de Fundão, indicando o impacto do desastre no grupo, que reflete a baixa na qualidade de água e sedimento. Em cinco dos oito pontos, o menor valor de riqueza e densidade de todo o histórico de dados disponibilizado foi encontrado após o desastre, em quatro destes foi constatada a ausência total de macroinvertebrados, fato que não ocorreu antes do desastre. Os maiores valores de riqueza e densidade em todos os casos ocorreram antes do desastre, mostrando que a comunidade de macroinvertebrados aquáticos ainda não encontra composição similar à de antes do desastre. As duas campanhas realizadas após o desastre (em janeiro e abril/2016) se destacaram por apresentarem valores bastante reduzidos de riqueza e densidade, em vários casos com ausência de taxa.

A pontuação do índice BMWP também apresentou redução expressiva após o desastre. Segundo a classificação adotada por Junqueira et al. (2000), 45% do total dos resultados da pontuação do BMWP (considerando os diferentes pontos de coleta e diferentes campanhas) classificam a qualidade de água como péssima antes do desastre, enquanto 96% classificam como péssima após o desastre. Os outros 4% após do desastre se dividem em 2% classificados com qualidade de água ruim e 2% como regular. Antes do desastre 30% dos resultados do BMWP tinham classificado a qualidade da água como ruim, 15% como regular, 6% como boa e 4% como excelente. Os resultados estão apresentados na Tabela 52.

Figura 167 – Riqueza de taxa de macroinvertebrados aquáticos segundo dados disponibilizados pela UHE Baguari entre julho/2012 e julho/2017.

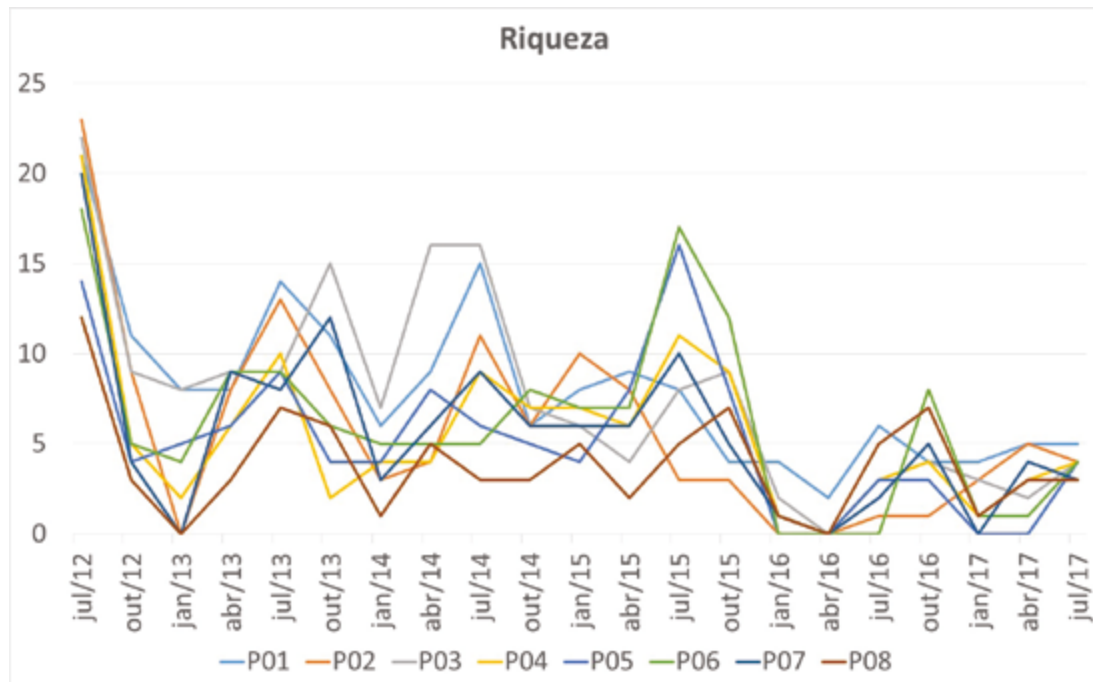


Figura 168 – Densidade total de aquáticos segundo dados disponibilizados pela UHE Baguari entre julho/2012 e julho/2017.

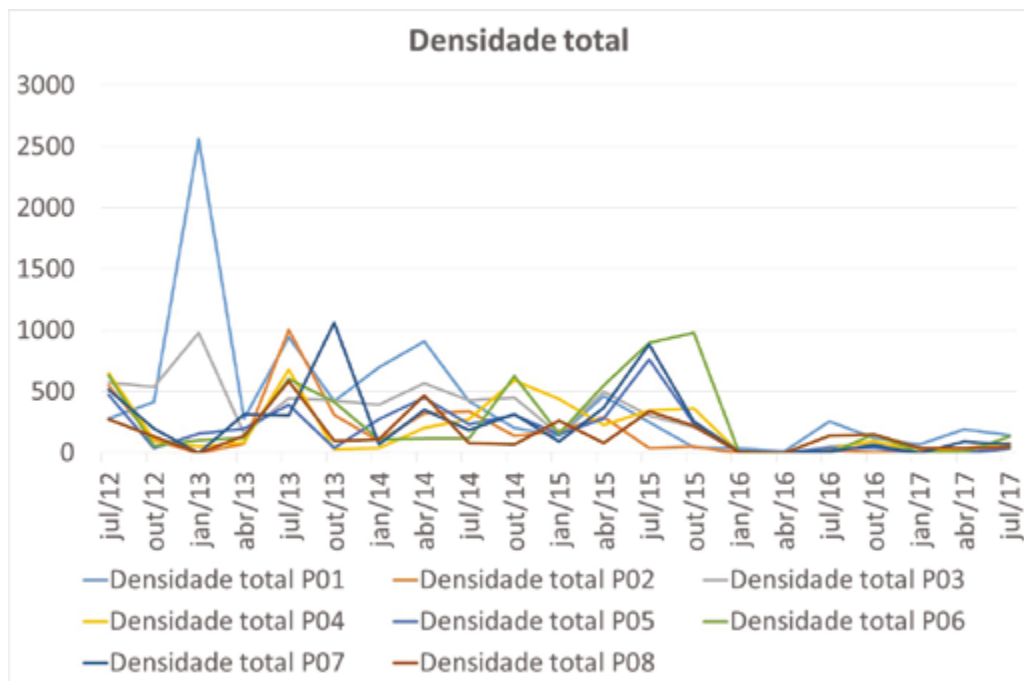


Tabela 52 – Classificação da qualidade de água segundo Junqueira et al. (2000) utilizando a pontuação do BMWP adaptado por Junqueira et al. (2000) nos oito pontos amostrados próximos à UHE Baguari no período em que os dados foram disponibilizados.

	BMWP							
	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08
jul/12	Excelente	Excelente	Excelente	Boa	Regular	Boa	Excelente	Regular
out/12	Regular	Ruim	Ruim	Péssima	Péssima	Ruim	Péssima	Péssima
jan/13	Ruim	Péssima	Ruim	Péssima	Péssima	Ruim	Péssima	Péssima
abr/13	Ruim	Ruim	Regular	Ruim	Regular	Regular	Regular	Péssima
jul/13	Boa	Regular	Regular	Ruim	Regular	Ruim	Ruim	Péssima
out/13	Regular	Ruim	Boa	Ruim	Péssima	Ruim	Regular	Péssima
jan/14	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima
abr/14	Ruim	Péssima	Boa	Ruim	Ruim	Ruim	Péssima	Péssima
jul/14	Boa	Regular	Regular	Ruim	Péssima	Péssima	Ruim	Péssima
out/14	Péssima	Péssima	Ruim	Ruim	Péssima	Ruim	Ruim	Péssima
jan/15	Péssima	Ruim	Péssima	Péssima	Péssima	Ruim	Péssima	Péssima
abr/15	Ruim	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Ruim	Ruim	Péssima
jul/15	Ruim	Péssima	Ruim	Regular	Regular	Boa	Ruim	Péssima
out/15	Péssima	Péssima	Ruim	Ruim	Péssima	Regular	Péssima	Péssima
jan/16	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima
abr/16	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima
jul/16	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima
out/16	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Regular	Péssima	Ruim
jan/17	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima
abr/17	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima
jul/17	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima	Péssima

2.4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através da análise dos dados posteriores indicaram que, em geral, a concentração de metais no sedimento foi inferior no período após o rompimento da barragem de Fundão. Uma hipótese importante para a redução da concentração de metais no sedimento é a interação dos sedimentos com a água, pois a passagem da onda de rejeitos pode ter remobilizado os metais, solubilizando-os e deixando-os disponíveis no meio aquático. Os resultados da amostragem que será realizada pelo Lactec poderão fornecer mais subsídios para compreender os fenômenos ocorridos. Também serão realizados outros testes estatísticos, que serão apresentados no próximo relatório.

Quanto aos dados dos macroinvertebrados bentônicos pós-desastre analisados, estes são, até o momento, compatíveis com ambiente fortemente poluído com baixa qualidade de água. A riqueza de taxa e diversidade podem ser consideradas baixas, refletindo no resultado dos outros índices analisados. No caso onde foi possível comparação com dados pretéritos ao desastre, foi evidenciada significativa piora nos indicadores de qualidade de água analisados.

3 MEIO BIÓTICO

3.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO

3.1.1 INTRODUÇÃO

Ao longo das margens do rio Doce, desde a sua cabeceira no trecho considerado como Alto Rio Doce (região do rompimento da barragem de Fundão em Mariana) até a sua foz no oceano Atlântico, bem como na região costeira, são inúmeras as Unidades de Conservação (UC's) e outras Áreas Protegidas existentes, estas a exemplo de “Áreas de Proteção Especial” e “Terras Indígenas”.

Na região em apreço são encontradas UC's federais, estaduais, municipais, de propriedade privada e públicas, englobando as categorias de manejo de uso sustentável e de proteção integral, que de forma direta ou indireta foram afetadas pelo desastre ambiental ora estudado.

De forma descritiva, buscou-se compilar e resumir as informações técnicas publicadas a respeito desta área temática, e abaixo apresenta-se sinteticamente o conteúdo dos documentos oficiais publicados por órgãos ambientais, bem como em artigos científicos e relatórios técnicos.

3.1.2 DOCUMENTOS OFICIAIS

Neste tópico, as informações abaixo relatadas foram obtidas em consulta ao site do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), bem como das demais entidades governamentais envolvidas. O objetivo de apresentar as informações descritas nos documentos oficiais emitidos pelos órgãos públicos envolvidos no processo em questão busca, além de apresentar uma linha do tempo com as discussões e tomadas de decisão que envolveram unidades de conservação, demonstrar a evolução das tratativas relacionadas ao tema.

A Nota Técnica (NT) nº 5 emitida em 22/08/2016 pelos órgãos ambientais do estado do Espírito Santo, SEMA/IEMA, trata sobre o “levantamento das Unidades de Conservação que estão nas áreas de interferência direta e indireta da lama de rejeitos, no estado do Espírito Santo”, relata-se que as UCs afetadas após a chegada da pluma de rejeitos no mar são:

- Âmbito estadual: Área de Proteção Ambiental (APA) de Conceição da Barra, Parque Estadual de Itaúnas, APA de Praia Mole, PE Cesar Vinha, Reserva de Desenvolvimento Sustentável Concha D'Ostra, APA de Guanandy; municipais: ARIE do Degredo, APA de Lagoa Grande, APA Municipal Tartarugas, APA Monte Urubu, Parque Natural Municipal David Victor Farina, Parque Natural Municipal de Jacarenema, Monumento Natural Municipal Falésias de Marataízes;
- Âmbito federal: Floresta Nacional (Flona) de Goytacazes, Reserva Biológica (Rebio) de Comboios, APA Costa das Algas, Refúgio de Vida Silvestre (Revis) de Santa Cruz.

A nota também destaca outras “áreas de interesse conservacionista” que também podem ser alcançadas por estarem inseridas na bacia do rio Doce, sendo:

- Âmbito estadual: Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Morro da Vargem; municipal: Parque Natural Municipal do Aricanga Waldemar Devens, Reserva de Desenvolvimento

Sustentável Municipal Piraquê-Açú e Piraquê-Mirim, Parque Natural Municipal David Victor Farina;

- Âmbito federal: Parque Nacional (Parna) dos Pontões Capixabas, Rebio de Sooretama, Rebio Augusto Ruschi, APA Costa das Algas;
- Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPNs): Recanto das Antas, Mutum Preto, Restinga Aracruz, Linda Sofia, Linda Lais, Dom Pedro, Córrego Cascata, Pedra da Lajinha, Debora, Simone, Três Pontões, Boa Fé, Córrego Floresta, Vovó Dindinha.

Os órgãos ambientais, na referida nota técnica, realizam ainda considerações que: (1) UCs são de extrema importância para a manutenção da biodiversidade; (2) a lama dos rejeitos dispersa na área marinha teve maior abrangência; (3) a dispersão da lama e contaminantes para as diversas áreas de proteção da bacia pode ser considerada indireta vista a dificuldade de dispersão; o maior foco dos estudos em relação à contaminação causada pela lama de rejeitos vem sendo realizada na área marinha.

Nesta Nota Técnica conclui-se que há maior número de UCs na bacia do rio Doce ($n = 26$) do que no litoral ($n = 17$), sendo provável que as mais interioranas foram menos atingidas do que as do meio marinho no Espírito Santo, onde é sugerido o direcionamento das pesquisas de biodiversidade nas áreas próximas à foz, onde o dano foi presumivelmente maior. Além disto sugere-se que as UCs da bacia, afetadas direta ou indiretamente pelos efluentes subterrâneos, também sejam objetos de pesquisa, para levantamento de informações sobre a contaminação e modificação na dinâmica das comunidades nelas presentes; que as áreas próximas ao rio Doce, ainda que não afetadas pela lama ou seus contaminantes, sejam avaliadas e utilizadas como área de compensação ambiental.

A Nota Técnica nº 2 emitida em 03/10/2016 pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), identificou cinco UC's federais que podem ter sofrido danos ambientais decorrentes do desastre. Esta análise seguiu como critérios de inclusão as condições de incidência de ventos do quadrante nordeste, e ventos do quadrante sul. Com base nos mapas elaborados a partir dos dados provenientes de sistemas informações geográficas gerados pela empresa Econservation, sendo elas: Flona de Goytacazes, Rebio de Comboios, Revis de Santa Cruz, Reserva Extrativista de Cassurubá e Parna Marinho dos Abrolhos.

O Parecer Técnico nº 10 de 2016 emitido pelo órgão ambiental mineiro Instituto Estadual de Florestas (IEF) relata que foi identificado dano socioambiental de fragmentação de *habitat* e destruição de áreas de preservação permanente (APP). Este parecer teve por objetivo identificar as UCs nas esferas federal, estadual e municipal potencialmente atingidas pelos danos do rompimento da barragem de Fundão. Visou também apresentar informações relacionadas às zonas de amortecimento (ZA) e à necessidade de reparação dos danos ambientais causados sobre as Ucs. Em relação às UCs estaduais, destaca-se o Parque Estadual do Rio Doce (PERD), que teve sua ZA estabelecida em plano de manejo, além do Monumento Natural Pico do Ibituruna, que por sua vez teve sua ZA estabelecida durante o processo de sua criação; e, por fim, o Parque Estadual Sete Salões, que não possui ZA, sendo indicada uma ZA em uma faixa de 3 km a partir dos seus limites, conforme sugerido pela Resolução CONAMA nº 428/2010.

Este parecer ressaltou a importância das ZAs em: (i) prevenir possíveis danos provocados por atividades poluidoras, (ii) contribuir na preservação dos mananciais, (iii) garantir a promoção e

manutenção da paisagem e desenvolver o turismo ecológico, (iv) contribuir e ampliar o lazer e recreação da população do entorno e (v) conter a urbanização contínua e descontrolada. Estabelece-se “clara a importância das zonas de amortecimento no que diz respeito à redução ou mitigação dos possíveis impactos causados às Unidades de Conservação advindas de atividades antrópicas em operação no seu entorno”. A nota destaca, ainda, o impacto ambiental advindo da atividade de mineração, como a alteração severa da paisagem, degradação de áreas cársticas e de ecossistemas, poluição dos solos, ar e das águas, além dos impactos causados pela necessidade de utilização de áreas para a disposição de rejeitos. Também reforça a poluição advinda do escoamento superficial das águas em áreas de mineração, comentando que os danos do rompimento de uma barragem atingem diretamente os cursos d’água localizados à jusante da barragem, e direta e indiretamente, a biodiversidade associada aos recursos hídricos. Por fim, recomenda o estabelecimento de graus de prioridade para a implementação das ações de reparação dos danos causados às UCs potencialmente afetadas; recomenda a priorização de ações nas Unidades de Conservação de Proteção Integral pelo fato destas possuírem como “objetivo principal a conservação da biodiversidade e permitem apenas o uso indireto de seus recursos naturais”.

A Nota Técnica nº 4 da Câmara Técnica de Conservação e Biodiversidade (CTBio) realizou uma revisão do agrupamento das Unidades de Conservação propostos na NT nº 3/2017/APA Costa das Algas/ICMBio. A nova composição dividiu as UCs em Grupo 1 (Unidades de Conservação diretamente impactadas) e Grupo 2 (Unidades de Conservação com potencial impacto sobre sua área e/ou Zona de Amortecimento), os quais são subdivididos entre UCs federais, estaduais (capixabas ou mineiros) e municipais. O Grupo 1 foram incluídas UCs como Rebio de Comboios, PE Paulo César Vinha, PE do Rio Doce, enquanto o Grupo 2 incluiu Flona de Goytacazes, APA de Conceição da Barra e PE Sete Salões. Além disso, retifica a APA Belo Oriente e o Monumento Natural do Ibituruna como UCs potencialmente atingidas.

O relatório do grupo de trabalho do órgão ambiental de Minas Gerais (Secretaria Estado Meio Ambiente e Desenv Sustentável - SEMAD) (SEMAD, 2016) citou os seguintes danos sobre UCs: acúmulo de rejeitos de minério de ferro e danificação na vegetação de preservação permanente do Parque Estadual Sete Salões, além da invasão de lama no leito do rio no interior do Parque Estadual do Rio Doce (PERD) e o transbordamento para o Ribeirão Belém, um dos afluentes que transpassa o PERD. Em outro relatório emitido pela SEMAD (2016) cita-se a existência de danos em no mínimo 292 km de Áreas de Preservação Permanentes (APPs), localizadas nas margens dos cursos d’água afetados e em duas Unidades de Conservação de Proteção Integral (Parque Estadual do Rio Doce e Parque Estadual Sete Salões) e na Terra Indígena Krenak.

A Ação Civil Pública (ACP) do Ministério Público Federal – Força Tarefa Rio Doce, no âmbito das UCs, cita os danos sofridos pelo Parque Estadual do Rio Doce, onde aponta:

- Invasão da lama de rejeitos de minério de ferro em 42,39 km no Rio Doce no interior do Parque Estadual do Rio Doce e em 16,78 km na sua zona de amortecimento;
- Transbordamento da lama para o interior do Ribeirão do Belém, afluente do rio Doce que passa pelo interior da UC, em cerca de 30 metros, contaminando este importante curso d’água e prejudicando a fauna do Parque Estadual do Rio Doce;

- Acentuação do processo de assoreamento do Rio Doce e de degradação de sua margem de divisa com a UC, o que compromete o substrato do rio e seu ambiente bentônico, que pela presença desta camada inerte pode impedir o uso e reprodução da ictiofauna, anteriormente existente;

Além disto, cita também:

- Existência de importantes Unidades de Conservação Federais que podem sofrer impactos negativos com os rejeitos de mineração em virtude de sua proximidade com a foz: Reserva Biológica de Comboios, Área de Proteção Ambiental Costa das Algas, Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz e Parque Nacional Marinho dos Abrolhos.

3.1.3 DEMAIS PUBLICAÇÕES

Poemas (2015) relatou que o material lamoso e viscoso deixou um rastro de destruição ambiental ao longo dos rios Gualaxo do Norte e Carmo até chegar ao rio Doce, principal rio da região e de importância nacional. Foram pelo menos 1.469 ha de terras destruídas, incluindo áreas de preservação permanente, UCs (Parque Estadual do Rio Doce; Parque Estadual Sete Salões; Flona Goytacazes; e o Corredor da Biodiversidade Sete Salões-Aymoré), assentamentos rurais e a terra indígena Krenak.

Barbosa et al. (2015) ressaltam que, pelo fato do Parque Estadual Rio Doce deter mais de 60% da biodiversidade da Mata Atlântica, essa UC terá importância destacada para a recuperação dessa bacia hidrográfica, incluindo os processos básicos de sua manutenção.

Felippe et al. (2016) realizaram uma expedição ao longo do rio Doce entre os dias 17 e 20 de novembro de 2015, a fim de documentar e comparar situações de antes e depois da tragédia do rompimento da barragem do Fundão. Relataram que, na Rebio de Comboios, o ICMBio exigiu da Samarco que fosse feita a contenção da lama para que não ocorresse a contaminação da vegetação ripária, nem das praias de desova. Em reação, a Samarco contratou a Ocean Impact, a qual, em conjunto, tentou reter o avanço da lama para dentro da UC a fim de minimizar esses impactos. No entanto usaram uma tecnologia de retenção de óleo, que não era ideal para a contenção desse tipo de rejeito e por essa razão não obtiveram sucesso.

ICMBio (2016b) avaliou as UCs potencialmente atingidas pela pluma de rejeitos, sendo que foram identificadas UCs federais atingidas pela lama com base em análises efetuadas pelo ICMBio a partir dos critérios estabelecidos pela CTBio. Esses critérios levaram em conta as áreas percorridas pelo rio Doce, desde sua nascente até a foz, bem como a região marinha atingida pela pluma de rejeitos da Samarco lançada ao mar pela descarga do rio, e teve por base que os rejeitos da Samarco tenham passado na UC ou em sua ZA. Através de mapas e técnicas de sensoriamento remoto foram identificadas seis UCs federais, das quais quatro estão localizados no Espírito Santo: Flona de Goytacazes, Rebio de Comboios, Revis de Santa Cruz e APA Costa das Algas. No Espírito Santo, segundo uma listagem realizada pelo IEMA, foram identificadas seis UCs estaduais e sete municipais danificadas pelos rejeitos da Samarco. Quando foi publicada essa NT (Nota Técnica nº 2/2016/APA Costa das Algas/ICMBio) realizada pelo MMA, o IEF estava em fase de elaboração do seu parecer técnico sobre as UCs de Minas Gerais afetadas pelo desastre de Mariana. Entretanto, por meio de uma mensagem, indicou que as UCs atingidas

pela lama eram o Parque Estadual Rio Doce e Parque Estadual Sete Salões até o presente momento. Assim, recomendou-se aguardar a conclusão do documento para uma avaliação mais completa das UCs estaduais e municipais em Minas Gerais.

Bianchini (2016) avaliou o impacto da pluma/lama despejada pelo desastre de Mariana sobre os ambientes costeiros com foco nas UCs afetadas. Foi realizada uma amostragem de quatro áreas que compreendeu 13 pontos de coleta ao longo do litoral do norte do Espírito Santo até o sul da Bahia, incluindo ambientes recifais coralíneos e algais. Esses pontos amostrados estavam localizados dentro das seguintes UCs: Rebio de Comboios, APA Costa das Algas, Revis de Santa Cruz e Parna Marinho de Abrolhos. Após análise das amostras nos diferentes pontos, o relatório concluiu que existe contaminação por metais (An, Cd, Cu, Cr, Pb, Mn e Fe) na água coletada nas diferentes áreas de estudo, sendo que em muitos casos os níveis observados representam concentrações acima dos limites permitidos. Também se detectou um gradiente decrescente bem definido das concentrações totais dos metais analisados, a partir da foz do rio Doce em direção à zona costeira tanto ao sul quanto ao norte da foz desse rio. Na maioria das amostras de músculo dos pescados analisados (crustáceos e peixes), os níveis de contaminação estão acima dos limites permitidos pela legislação vigente. Os resultados obtidos sugeriram uma possível existência de outra fonte de aporte de metais nessa região, além daquela bem caracterizada pela contribuição da foz do rio Doce.

Fernandes et al. (2016) revisaram os efeitos ecológicos e socioeconômicos causado pela ruptura da barragem do Fundão no município de Mariana. Por meio de Sensoriamento Remoto, identificaram uma perda significativa de vegetação e uma deposição de rejeitos com altas concentrações de substâncias tóxicas ao longo da Bacia do Rio Doce. A devastação causada pela lama impactou aproximadamente 1469 hectares de vegetação nativa e 90% dos habitats ribeirinhos os rios Fundão, Norte Gualaxo e Carmelo. A onda de lama enterrou habitats ribeirinhos e aquáticos, eliminando boa parte da capacidade de regeneração destes. Corroborando com o estudo realizado por Bianchini (2016), realçaram esses danos toxicológicos também para as unidades de conservação. Devido à permanência desses metais uma vez despejados no meio ambiente em larga escala, a recuperação biofísica, funções ecológicas e biodiversidade afetada na bacia podem demorar décadas para serem normalizadas.

O Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2016) verificou os danos diretos e indiretos causado ao Parque Estadual Rio Doce pelo rompimento da barragem de Fundão e pelo lançamento de rejeitos das atividades de mineração da empresa Samarco. Na abordagem sobre a flora, destacou que os efeitos do impacto superaram a capacidade de resiliência do local, sendo necessário reflorestamento e recuperação das áreas profundamente impactadas pelos rejeitos de lama. A perícia realizada e descrita no Relatório nº 4 (MINAS GERAIS, 2015) alerta ainda sobre o acúmulo de minério de ferro ao longo das margens do rio dentro do Parque Estadual do Rio Doce, que pode impactar a floração de espécies florestais e, consequentemente, as interações ecossistêmicas da biota local. O Relatório Técnico nº 1/2016, emitido pelo IEF, traz uma avaliação feita no Parque Estadual do Rio Doce entre os meses de janeiro e novembro de 2016 ao longo dos 42,39 km do rio que estão dentro da UC, e alerta para os riscos de incêndios florestais devido ao aumento na intensidade de atividades humanas no parque gerado por consequência do evento, podendo colocar em perigo toda a biodiversidade protegida no local.

Ribeiro e Vieira (2017) chamam a atenção para as grandes alterações causadas ao meio ambiente pela atividade da mineração, bem como para a degradação dos recursos ambientais, prejuízos estes muitas vezes irreversíveis. Os autores mencionam a destruição da fauna e flora e o impacto causado ao Parque Estadual do Rio Doce e destacam a atuação do Ministério Público no sentido de defender os interesses sociais e ambientais.

Carmo et al. (2017) caracterizaram a barragem Fundão e suas falhas estruturais, melhorando o entendimento da escala do desastre e avaliando o maior desastre tecnológico envolvendo minas num contexto global. Os rejeitos diretamente afetaram 145 fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, com uma supressão de 298 ha de vegetação localizadas nas margens dos rios Gualaxo do Norte e Carmo e seus afluentes. Os rejeitos afetaram quatro APAs: APA Barra Longa, APE Ouro Preto/Mariana e Reserva do Espinhaço. Houve danos também em áreas prioritárias de conservação da biodiversidade, como o Quadrilátero Ferrífero (QF) e as Florestas da Borda Leste do Quadrilátero, que detêm seis plantas raras do Brasil. A mancha de lama se espalhou por mais de 770 km², tendo um efeito drástico em zonas de proteção costeiras, como a Rebio dos Comboios, Revis de Santa Cruz e APA Costa das Algas.

3.1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi percebido, obtiveram-se poucas informações técnicas sobre a avaliação dos danos ambientais oriundos do desastre relacionadas as UC's e áreas protegidas. Em linhas gerais, as informações existentes foram divulgadas pelo Ministério Público Federal e Estaduais (MG e ES), bem como pelos órgãos ambientais envolvidos através das Notas Oficiais (Notas Técnicas e Deliberações) como do Comitê Interfederativo (CIF) e alguns relatórios, conforme produzido pelo SEMAD. As demais publicações mostraram, de modo geral, realizaram enfoque qualitativo e quantitativo sobre a extensão e abrangência do desastre.

3.2 FLORA

3.2.1 INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão, entre inúmeros outros danos, acarretou a supressão de mata nativa ciliar e APPs ao longo do leito dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (Figura 169). A partir de então, diversas entidades, como Ibama, Secretarias de Meio Ambiente, Ministérios Públicos (estaduais e federal) e a própria Samarco, desenvolveram avaliações no intuito de estimar a perda dessa vegetação.

Este relatório tem por finalidade compilar laudos, relatórios técnicos, artigos científicos e demais documentos produzidos após o desastre e que tragam informações referentes à vegetação afetada ao longo do leito dos rios.

Figura 169 – Aspecto da vegetação ciliar atingida pela onda de lama.



Fonte: Institutos Lactec (2017).

3.2.2 RELATÓRIOS TÉCNICOS E DOCUMENTOS

O Ibama (2015b) destaca a importância socioeconômica das APPs, bem como para a biodiversidade e para o ciclo da bacia hidrográfica de uma forma geral, considerando infração, à luz das Leis nº 12.651/2012, 9.605/1998 e 11.428/2006, a danificação da vegetação nessas áreas. Um laudo técnico emitido logo após o desastre aponta que o rompimento da barragem causou a destruição de 1.469 hectares ao longo de 77 km de cursos d'água, incluindo APPs. Os danos abrangem supressão de indivíduos arbóreos, soterramento de indivíduos do sub-bosque, desestruturação química do solo e alteração no pH, soterramento de serrapilheira e banco de sementes, causando perda na capacidade de resiliência da vegetação e posterior estabelecimento de ecossistemas diferentes dos originais. O estudo também cita a ocorrência de espécies ameaçadas de extinção na região, como *Dalbergia nigra*, *Melanoxylon brauna* e *Euterpe edulis*, e ressalta a importância da implantação de Planos de Recuperação de Áreas Degradadas, monitoramento ambiental e definição de soluções para o restabelecimento da resiliência dos locais atingidos.

O Ibama emitiu também, em 2016, a NT nº 02001.000606/2016-36, em que calcula a APP atingida pelos rejeitos nas bacias dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo. A análise foi feita com base em imagens de satélite SPOT 6, SPOT 7, RapidEye e Landsat 8, com excelentes resoluções espaciais. As

classes de APP foram definidas conforme disposto na Lei nº 12.651/2012. Como resultado, obteve-se um total de 835,38 hectares de APPs afetadas pelo rompimento da barragem.

Figura 170 – Vegetação ciliar suprimida pela onda de lama.



Fonte: Ibama (2015b).

Ministério Público do Estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2016) verificou os danos diretos e indiretos causado ao Parque Estadual Rio Doce pelo rompimento da barragem de Fundão e pelo lançamento de rejeitos das atividades de mineração da empresa Samarco. Na abordagem sobre a flora, destacou que os efeitos do dano superaram a capacidade de resiliência do local, sendo necessário reflorestamento e recuperação das áreas profundamente impactadas pelos rejeitos de lama. A perícia realizada e descrita no Relatório nº 4 (MINAS GERAIS, 2015) alerta ainda sobre o acúmulo de minério de ferro ao longo das margens do rio dentro do Parque Estadual do Rio Doce, que pode impactar a floração de espécies florestais e, consequentemente, as interações ecossistêmicas da biota local.

O Relatório Técnico nº 1/2016, emitido pelo IEF, traz uma avaliação feita no Parque Estadual do Rio Doce entre os meses de janeiro e novembro de 2016 ao longo dos 42,39 km do rio que estão dentro da UC, e alerta para os riscos de incêndios florestais devido ao aumento na intensidade de atividades humanas no parque gerado por consequência do evento, podendo colocar em perigo toda a biodiversidade protegida no local.

O governo do estado de Minas Gerais, através das Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD, 2016), emitiu a NT nº 1 com o objetivo de demonstrar uma avaliação feita do comportamento da lama na área afetada. O documento destaca o ressecamento

do rejeito dentro e fora da calha dos rios, incluindo as APPs, e afirma que nas áreas onde o leito do rio é mais encaixado houve supressão de vegetação nativa de Mata Atlântica em estágio avançado de regeneração natural. Esse estágio é caracterizado por indivíduos com 30 a 40 metros de altura, diâmetro à altura do peito (DAP) até 110 centímetros, área basal encorpada e dossel retilíneo. A Semad recomenda ainda que sejam aplicadas técnicas de revegetação nas áreas afetadas e monitoramento da flora a fim de garantir o fluxo gênico das espécies nativas da mata atlântica.

Um estudo feito por Coffey, citado por Golder Associates (2016c), aponta que, de acordo com mapeamento feito com auxílio de imagens aéreas, foram impactados 565 hectares de floresta, 45 hectares de campos rupestres, 52 hectares de lagos e 20 hectares de florestas em regeneração, degradadas ou pasto sujo, conforme classificação estabelecida pelo autor (Figura 170).

Tabela 53 - Estimativa das áreas afetadas pela deposição de rejeitos.

Categoria de uso do solo	Área afetada (ha)
Área alagada/brejo	115
Área antropizada	37
Área urbana	66
Banco de areia	35
Campo Rupestre	45
Cultura de eucalipto	55
Cultura de eucalipto recém-colhida	3
Floresta	565
Floresta misturada com eucalipto	12
Lago	52
Mosaico de florestas degradadas/em regeneração/pasto sujo	20
Pastagem/cultivo	456
Reservatório	78
Rio	105
TOTAL	1.644

Fonte: Golder Associates (2016c).

Valle et al. (2017) realizaram uma análise com o auxílio de ferramentas de informação espacial (imagens Landsat, World View, outras fontes e Modelo de Elevação Digital). O estudo foi dividido em duas classes: a classe Floresta corresponde às áreas de remanescentes de vegetação natural, mas sem discriminação de estágios sucessionais. Já a classe Não Floresta são todas aquelas que não se enquadram na definição anterior. Para diferenciar as áreas de Floresta e Não Floresta foi utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A análise possibilitou a constatação da perda de 457,6 hectares de vegetação nativa ao longo de 74 km do leito dos rios, majoritariamente no município de Mariana. Os autores também concluem que o dano da lama na vegetação ciliar diminui conforme o rio aproxima-se da UHE Risoleta Neves. O estudo finaliza recomendando o replantio baseado em conceitos

científicos consolidados, devendo este ser feito com espécies nativas do bioma Mata Atlântica e que possuam rápido crescimento.

Em março de 2016 foi assinado entre a Samarco e as demais partes interessadas o TTAC (de cuja celebração posteriormente criou-se a Fundação Renova). Na seção II, sobre restauração florestal e produção de água, define-se que é de responsabilidade da Fundação Renova realizar o plantio emergencial com gramíneas e leguminosas, bem como recuperar 2.000 hectares dentro da Área Ambiental 1 (área abrangida pela deposição de rejeitos na calha dos rios). O termo coloca, também, como obrigação da fundação a recuperação de APPs na bacia do rio Doce, totalizando uma área de 40.000 hectares distribuídos entre reflorestamentos e condução de regeneração natural em um prazo de 10 anos. Nesse período, a instituição deverá também recuperar um total de 5.000 nascentes.

Ainda em 2016, a Fundação Renova elaborou o Plano de Recuperação Ambiental Integrado (PRAI), que visa nortear as ações de recuperação desenvolvidas pela Fundação em alinhamento com o TTAC, envolvendo a execução de projetos e atividades tocantes à restauração da mata nativa e conservação da biodiversidade. O documento apresenta restrições, metodologias, desenvolvimento e ações prioritárias a serem realizadas pela Fundação Renova. O plano prevê a cobertura inicial, revegetação das margens e planícies e plantio de mudas na mata ciliar, incluindo a recuperação de 5.000 nascentes. A última atualização do PRAI, disponibilizada em março de 2017, esclarece que entre as alternativas consideradas para o programa emergencial de recuperação foi selecionada a sementeira do *mix* de gramíneas e leguminosas, tendo esta atendido a diversos critérios estabelecidos, como tempo de cobertura do solo, efetividade do controle de erosão, biodiversidade, aceitação por parte dos proprietários e órgãos reguladores e compatibilidade com a legislação e boas práticas. Até o dia 21/07/2016 havia sido revegetada uma área de 808,48 hectares, e os principais resultados dessas atividades incluem a suficiência na quantidade de sementes utilizada, bem como significativa taxa de germinação, crescimento, cobertura do solo pelas folhas e desenvolvimento de estruturas radiculares. Posteriormente, foi executado um programa de manutenção para reposição de vegetação nas áreas com baixo grau de desenvolvimento. Dentro do tópico de compensação ambiental, o PRAI cita os testes piloto de revegetação, que visam experimentar a *performance* de determinadas espécies em diferentes situações com o objetivo de recuperar o solo, enriquecer a vegetação e resgatar a sucessão ecológica e a dinâmica da floresta.

3.2.3 ARTIGOS CIENTÍFICOS

Ribeiro e Vieira (2017) chamam a atenção para as grandes alterações causadas ao meio ambiente pela atividade da mineração, bem como a degradação dos recursos ambientais, prejuízos estes muitas vezes irreversíveis. Os autores mencionam a destruição da fauna e flora e o dano causado ao Parque Estadual do Rio Doce e destacam a atuação do Ministério Público no sentido de defender os interesses sociais e ambientais.

Em uma avaliação feita por Cruz e Domingues (2017), foram utilizadas imagens de satélite da plataforma Google Earth e cartas topográficas do banco de dados do Exército Brasileiro para fazer uma análise das áreas diretamente impactadas pela onda de lama no leito do rio Gualaxo do Norte. O resultado obtido foram 749 hectares de área afetada pelo rejeito na bacia desse rio, sendo que, destes,

243 hectares correspondem a florestas nativas. O estudo destaca a perda de APPs e a desestruturação química do solo, dificultando o desenvolvimento de espécies que antes povoavam a região.

Siqueira e Maciel (2016) ressaltam os danos aos ecossistemas terrestres e aquáticos listados pelo relatório técnico do Ibama e ocasionados em APPs dos biomas Mata Atlântica e Cerrado, ambos considerados extremamente ameaçados e altamente ricos em biodiversidade. O estudo faz alusão a diversas legislações, entre elas a Política Nacional do Meio Ambiente, que, entre outras disposições, obriga o poluidor a recuperar ou indenizar os danos causados, reestabelecendo ao meio ambiente condições mais próximas possíveis àquela que se encontrava antes da intervenção.

Silva et al. (2015) compilaram uma série de dados a partir de visitas de campo e relatórios técnicos e concluíram que houve um total de 1.587 hectares de vegetação devastada, divididas entre os trechos a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves e entre esta e a foz do rio Doce. Os autores afirmam que a recuperação da mata nativa ciliar é possível caso sejam aplicadas técnicas de contenção da erosão do solo e utilizadas espécies adequadas para esse processo, e listam ainda as ações tomadas pela Samarco, colocando que muitas destas são ineficientes ou mesmo prejudiciais, entre elas o plantio de espécies agronômicas, remoção mecânica de sedimentos, transporte de sedimentos, deposição de material transportado, desmatamento de áreas preservadas e aterramento, preparo do solo e drenagem.

Carmo et al. (2017) caracterizaram a barragem Fundão e suas falhas estruturais, melhorando o entendimento da escala do desastre e avaliando o maior desastre tecnológico envolvendo minas num contexto global. Os rejeitos diretamente afetaram 135 fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, com uma supressão de 298 hectares de vegetação localizadas nas margens dos rios Gualaxo do Norte e Carmo e seus afluentes. Os rejeitos também afetaram diretamente 863,7 hectares de APP's associadas a cursos de água. O estudo revelou um maior dano a vegetações arbóreas (829,5 hectares), seguido de gramíneas naturais e cultivadas (416,1 hectares) e cursos d'água (344,4 hectares). As planícies de inundação favoreceram a acumulação de rejeitos, chegando em média a 50 cm de altura e, em alguns lugares, é estimado que a lama alcançou 3 metros de altura. A massa deslocada foi tão intensa que escavou o solo e alterou os fundos dos rios.. Houve danos também em áreas protegidas e prioritárias de conservação da biodiversidade, que detêm uma série de plantas raras do Brasil. A mancha de lama se espalhou por mais de 770 km², tendo um efeito drástico em zonas de proteções costeiras, como a Rebio dos Comboios, Revis de Santa Cruz e APA Costa das Algas.

Fernandes et al. (2016) revisaram os efeitos ecológicos e socioeconômicos causados pela ruptura da barragem do Fundão no município de Mariana. Por meio de Sensoriamento Remoto, identificaram uma perda significativa de vegetação e uma deposição de rejeitos com alta concentrações de substâncias tóxicas ao longo da bacia do rio Doce. A devastação causada pela lama danificou, aproximadamente, 1.469 hectares de vegetação nativa e 90% dos *habitats* ribeirinhos dos rios Fundão, Gualaxo do Norte e Carmo. A onda de lama enterrou *habitats* ribeirinhos e aquáticos, eliminando boa parte da capacidade de regeneração desses ambientes. Segundo os autores, devido à permanência desses metais, uma vez despejados no meio ambiente em larga escala, a recuperação biofísica, funções ecológicas e biodiversidade afetada na bacia podem demorar décadas para serem normalizadas.

Freitas, Silva e Menezes (2016) afirmam que, mesmo não sendo tóxicos, os rejeitos prejudicam a infiltração de água no solo e causam alteração na disponibilidade de matéria orgânica, comprometendo a germinação de sementes e o desenvolvimento radicular das plantas e danificando a variabilidade genética nas áreas ciliares. Os autores ainda reiteram as intensas alterações nas áreas de mata ciliar causadas pelo assoreamento do leito dos rios atingidos.

Marinho, Balieiro e Tavares (2017) realizaram um experimento avaliando a *performance* da grama Vetiver em diferentes tipos de insumo; rejeitos de advindos da região de Mariana, corretivos, fertilizantes, biochar e topsoil e combinações entre estes. A grama Vetiver possui fácil adaptação a diversos ambientes e raízes profundas, sendo interessante para estruturação do solo. Foi verificado que as partes aéreas das plantas não apresentaram resultados significantes aos tratamentos, enquanto as raízes foram prejudicadas pela acomodação da camada de rejeitos (que possui baixa aeração) nos tubos de PVC utilizados para os testes, indicando sensibilidade da espécie à falta de oxigênio e apontando que, talvez, esta não seja uma boa espécie para ser utilizada na recuperação.

Lopes e Zdanowicz (2017) realizaram um estudo de projeção da recuperação dos danos ocasionados nos âmbitos social, econômico e ambiental levando em consideração o relatório elaborado pela força tarefa (Agência Minas), o laudo preliminar publicado pelo Ibama e as ações corretivas enunciadas pela Samarco. Os autores colocam que os danos ambientais são incertos, mas que a mineradora tem realizado ações a fim de mitigar os prejuízos ambientais e reitera que os planos de recuperação devem ser monitorados. Nos cenários prospectados pelos autores na esfera socioambiental, em uma visão otimista a Samarco revegetaria toda a área devastada no rio Doce. Em um cenário realista, os planos de revegetação e recuperação se mostram em andamento, mas estáveis, enquanto na prospecção pessimista as ações ocorreriam de forma lenta, com apenas 10% de sucesso.

Em um estudo relacionado à modificação da paisagem no local, Vervloet (2016) afirma que dificilmente a vegetação nativa conseguirá recuperar suas fitofisionomias devido à cimentação causada pela sobreposição de lama no leito do rio e na mata ciliar.

3.2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o tempo decorrido desde o desastre, considera-se importante a continuidade do desenvolvimento de estudos que possam auxiliar no diagnóstico dos danos causados pelo rompimento da barragem, bem como na mitigação e compensação dos danos. O restabelecimento das funções ecológicas envolve processos complexos de interação tanto entre as espécies quanto destas em relação às variáveis físicas do ambiente. É imprescindível a compreensão desses processos para que as corretas decisões sejam tomadas visando à restauração dos ecossistemas ripários.

3.3 FAUNA

3.3.1 INTRODUÇÃO

Este relatório técnico possui como objetivo principal compilar informações técnicas e acadêmicas produzidas por diferentes instituições dos setores público e privado, no período compreendido entre novembro de 2015 e janeiro de 2018, referentes à área temática de fauna silvestre, incluindo tópicos separados para os grupos dos quelônios e cetáceos. Para melhor apresentação dos resultados da fauna silvestre terrestre, os resultados desse grupo foram divididos de acordo com o seu grupo taxonômico (entomofauna, herpetofauna, avifauna e mastofauna).

3.3.2 DOCUMENTOS OFICIAIS

Neste tópico descreve-se sucintamente o volume de informações que aludem à fauna silvestre, no âmbito dos órgãos envolvidos na emissão de vários tipos de documentos (deliberação, relatório, nota, ata etc.). Esta breve compilação tem o objetivo de produzir um relato quantitativo integrado dos documentos que mencionam a fauna silvestre, dados dispersos em meio à documentação do desastre. Detalhamento específico para alguns grupos faunísticos, inclusive com dados inéditos divulgados nesses documentos, são apresentados nos respectivos grupos faunísticos, em tópicos próprios.

3.3.2.1 Notas técnicas – Câmara Técnica de Conservação e Biodiversidade (CTBio)

Ao todo, foram consideradas nove documentos emitidos pelo CTBio em alusão à fauna silvestre afetada. A maior parte desses documentos discutem aspectos burocráticos e técnicos do Plano de Trabalho apresentado pela Fundação Renova, o qual foi avaliado por diversos órgãos e sofreu modificações em virtude dessas análises. Algumas Notas Técnicas avaliaram aspectos específicos das propostas de estudos por parte da Fundação Renova, especialmente quanto ao ambiente aquático e à construção de CETAS.

3.3.2.2 Deliberações Comitê Interfederativo (CIF)

O Comitê Interfederativo é órgão que emite deliberações a serem consideradas pelas várias Câmaras Técnicas em tópicos mais abrangentes. No que se refere aos dados de fauna silvestre, oito deliberações apresentam dados mais específicos sobre a biodiversidade, incluindo documentos que instituem as Câmaras Técnicas e suas competências, definem cronogramas preliminares para exigir as ações de recuperação e diagnóstico. Uma vez que estes documentos aludem a ações de maior abrangência, não há informações específicas sobre a identificação ou ocorrência de danos ou eventos específicos à fauna silvestre. Nesse sentido, estes documentos prestam-se como balizadores burocráticos das ações sob tutela do CIF.

3.3.2.3 Grupo Independente para Avaliação do Dano Ambiental (GIAIA)

O GIAIA foi instituído pouco após a ocorrência do rompimento da barragem, e é descrito como “cientistas reunidos para fazer uma análise independente dos danos ambientais do desastre em Mariana/MG”. Compõem o quadro de responsáveis técnicos diversos técnicos e pesquisadores

associados a diversas instituições de pesquisa no Brasil, e se propõem a realizar diagnósticos técnicos independentes sobre os danos do desastre. O grupo é organizado em diversos grupos de trabalho, cada qual com foco sobre componentes bióticos específicos, e realizam ações independentes e em diversas frentes. O maior volume de esforços de amostragem e análise foram realizados sobre os grupos de fitoplâncton, zooplâncton, macroinvertebrados bentônicos e ictiofauna, componentes bióticos tratados em outros documentos. Dois grupos de trabalho já consolidados coincidem – quanto à área temática de interesse – com os grupos ora considerados: invertebrados terrestres e ornitologia. Informações geradas por esses grupos são tratados, quando disponíveis e se pertinentes, dentro dos tópicos específicos neste relatório.

3.3.2.4 Outros documentos

Dois outros documentos oficiais são de especial relevância quanto ao recorte pós-desastre na fauna silvestre. Tratam-se do Ofício ICMBio nº 225/2016, que apresenta “Resultados preliminares da avaliação do dano do acidente da Samarco no ambiente marinho”; e o Relatório Grupo de Trabalho SEMAD do Governo do Estado de Minas Gerais, o qual apresenta a “Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana”. Os dados constantes nestes documentos são, quando pertinentes, também apresentados nos tópicos específicos dos grupos da fauna aqui considerados.

3.3.3 ENTOMOFAUNA

3.3.3.1 Introdução

Invertebrados terrestres são excelentes indicadores ambientais, em virtude de sua alta diversidade taxonômica e de modos de vida, ocupação de virtualmente todos os estratos ambientais (serapiheira, solo, sub-bosque, arborícolas) e elevada sensibilidade de muitos táxons a alterações ambientais. Os curtos ciclos de vida desses organismos permitem rápidas inferências em níveis populacionais, o que é dificultado para espécies de ciclos mais longos, como mamíferos ou aves. A íntima associação de algumas espécies com características ambientais peculiares é também um aspecto importante na avaliação de danos em populações selvagens.

3.3.3.2 Objetivo

O intuito do presente documento é apresentar informações atuais, referentes ao período pós-desastre, disponíveis em publicações técnicas ou acadêmicas que aludem ao grupo faunístico de interesse. Pretende-se comparar informações técnicas com os dados obtidos na linha-base, ou pré-desastre, e também avaliar conjuntamente as informações com os dados a serem obtidos no monitoramento da fauna.

3.3.3.3 Metodologia

No intuito de analisar o conteúdo científico referente à entomofauna terrestre associada à Mata Atlântica, cujos dados de campo tenham sido obtidos entre novembro 2015 e 2018, realizou-se uma busca sistemática utilizando o banco de dados do portal CAPES (www.periodicos.capes.gov).

br). Consideraram-se apenas artigos publicados em revistas indexadas, sendo utilizadas para a busca as seguintes palavras-chave: ‘Dung-Beetles*Atlantic Forest*Rio Doce*Fundão’, ‘Culicidae*Atlantic Forest*Rio Doce*Fundão’, ‘Butterfly*Atlantic Forest*Rio Doce*Fundão’, ‘Bees*Atlantic Forest*Rio Doce*Fundão’, e ‘Ants *Atlantic Forest*Rio Doce*Fundão’. Selecionaram-se apenas estudos cujo tema referia-se à distribuição geográfica das espécies, diversidade ou descrição de novas espécies.

Desses artigos, realizou-se uma avaliação cienciométrica, contendo as seguintes informações: i) ano da publicação e o ano em que as amostras foram realizadas; e ii) indicadores ecológicos utilizados em cada trabalho.

3.3.4 HERPETOFAUNA

3.3.4.1 Introdução

Para melhor entendimento das questões referentes aos objetivos deste documento, que é estabelecer um panorama do conhecimento técnico da herpetofauna após o desastre do rompimento da barragem do Fundão em Mariana, Minas Gerais; tornam-se necessárias algumas conceituações acerca do tema e das principais questões que determinam o estudo desse grupo em campo. Essas questões abordam a herpetologia sob diversos pontos de interesse, auxiliando, até mesmo, pessoas que não estejam familiarizadas com esse ramo de estudo da zoologia.

Herpetologia é a ciência que estuda os anfíbios (anuros, cecílias, salamandras e tritões) e “répteis” (serpentes, lagartos, tuataras, anfisbêneas, quelônios e crocodilianos) e seu nome deriva do radical grego *herpien* (= rastejar), em analogia ao estudo de animais rastejantes. Contudo, o fato de anfíbios e répteis estarem agrupados dentro de uma mesma especialidade de estudo, provavelmente, não tem ligação direta com o significado do nome herpetologia, mas sim em uma origem histórica, criada pelo pesquisador Carl Linnaeus, quando no ano de 1735 em seu “*Systema Naturae*”, agrupou esses organismos dentro da classe Amphibia. Desde então, anfíbios e répteis são agrupados na mesma especialidade de estudo, a herpetologia, mesmo sendo grupos tão diversos e distintos, principalmente no que tange a estudos de levantamento de fauna que, habitualmente, apresentam os resultados para esses grupos de animais dentro dessa temática. Com a finalidade de exemplificar as diferenças entre esses dois grandes grupos, e como essas diferenças influenciam estudos da herpetofauna, serão apresentadas algumas peculiaridades de Amphibia e Reptilia determinantes nos estudos de campo.

A classe **Amphibia** engloba animais bastante peculiares, apresentando a maior diversidade de modos reprodutivos e de história de vida entre os vertebrados. A necessidade desses animais de habitar ambientes aquáticos ou úmidos para a manutenção da vida e reprodução os tornam bastante suscetíveis a modificações ambientais, como, por exemplo, a destruição, alteração e fragmentação de *habitats*. Associado à baixa mobilidade, fácil detecção, captura e manuseio, e com taxonomia relativamente bem conhecida, esse grupo de animais se destaca como bom indicador ambiental para estudos de levantamento e monitoramento de fauna (Weygoldt, 1989; ROSSA-FERES et al., 2008).

A classe **Reptilia** é constituída de animais inconspícuos e de difícil amostragem, sendo muitas vezes difícil de avaliar os reais efeitos de danos ambientais por meio desse grupo. Muitas espécies de répteis apresentam alta especificidade de *habitat* e, em geral, pouca capacidade de deslocamento

o que, associado a ninhadas reduzidas (principalmente na ordem Squamata), tornam esse grupo bastante suscetível a alterações ambientais (ROSSA-FERES et al., 2008). Segundo Dufrêne e Legendre (1997), uma boa espécie bioindicadora necessita apresentar alta abundância e frequência de ocorrência em determinada área para constituir um bom modelo de bioindicador. Nesse sentido, espécies de encontro ocasional (e.g. serpentes), ou que ocorram em baixa abundância nas áreas amostradas, não se encaixariam nesse conceito. Contudo, algumas espécies de répteis podem ser consideradas bons indicadores do estado de conservação de regiões naturais, considerando apenas sua presença ou ausência nesses locais, pois ocupam posição ápice em cadeias alimentares (exigindo, assim, ampla gama de recursos para sustentar suas populações), funcionando como bioindicadores do estado de conservação desses ambientes (espécies estenoicas) ou, por outro lado, de diferentes níveis de alterações ambientais (espécies eurióticas (MOURA-LEITE et al., 1993, Strüssmann, 2000). A exemplo disso, um raro estudo aponta espécies de serpentes como possíveis bioindicadoras de conservação de um determinado ambiente (WINCK et al., 2007) distinguem *Philodryas agassizii* como uma espécie negativamente afetada por alterações ambientais em áreas de pastagem nativa no Sul do Brasil, enquanto a espécie *Erythrolamprus poecilogyrus* se aproveitaria dessas modificações, prosperando. Contudo, se os objetivos pretendidos pelo estudo necessitarem da replicação de captura de espécimes para validar uma determinada espécie como bioindicadora, aquelas de encontro ocasional não atenderiam a essa necessidade, estando fora do conceito de espécie bioindicadora sugerido por Dufrêne e Legendre (1997).

Ainda quanto à composição taxonômica dos grupos de animais que compõem a herpetofauna, vale destacar que as distinções aqui referidas não estão encerradas somente quando são comparadas às classes Amphibia e Reptilia, mas podem ser ainda mais restritivas, dentro de categorias taxonômicas inferiores à de classe. Por exemplo, a classe Reptilia tradicionalmente agrupa animais que possuem em comum a pele recoberta por escamas e dependem de fontes externas de calor para regular sua temperatura corporal (POUGH; JANIS; HEISER, 2004), estando subdividida em quatro ordens: Squamata (lagartos, anfisbênias e serpentes), Rhynchocephalia (tuataras), Crocodylia (jacarés, aligátors e gaviais) e Testudinata (tartarugas, cágados e jabutis). Atualmente, estudos baseados em estruturas morfológicas e de relações filogenéticas demonstraram que a classe Reptilia representa um grupo parafilético (artificial) e que algumas de suas ordens podem estar mais proximamente relacionados com grupos externos do que com as demais ordens que, tradicionalmente, a compõem. Por exemplo, Crocodylia está mais proximamente relacionada com Aves (Crocodylia + Aves = Archosauria) do que, propriamente, com as demais ordens de Reptilia (Squamata, Rhynchocephalia e Testudinata). De forma ainda mais sintética, a ordem Squamata compreende três grupos taxonômicos: as serpentes, os “lagartos” e as anfisbenas. Serpentes e Amphisbaenians, por um lado, formam grupos reconhecidamente naturais do ponto de vista evolutivo; por outro, o grupo dos lagartos, ou “Lacertilia”, é – assim como Reptilia – atualmente considerado um grupo taxonômico parafilético, pois não compreende as serpentes e as anfisbenas e não corresponde, assim, a uma unidade historicamente relevante. Entretanto, o reconhecimento de um grupo chamado de “lagartos” é cômodo para os propósitos do presente estudo, e não constituiria um problema ao tipo de análise pretendido.

3.3.4.2 Objetivo

O intuito do presente documento é apresentar informações atuais, referentes ao período pós-desastre, disponíveis em publicações técnicas ou acadêmicas que aludem ao grupo faunístico de interesse. Pretende-se comparar informações técnicas com os dados obtidos na linha-base, ou pré-desastre, e também avaliar conjuntamente as informações com os dados a serem obtidos no monitoramento da fauna.

3.3.4.3 Metodologia herpetofauna terrestre

A utilização de dados de base (ou “dados secundários”) para elaboração de listas herpetológicas e/ou para comparações da composição de espécies entre áreas de uma determinada região deve ser utilizada com prudência, mesmo quando entre áreas muito próximas e/ou com composição faunística semelhante. Dessa forma, alguns critérios são necessários para o correto entendimento das questões que envolvem a utilização de dados de base em análises faunísticas.

3.3.4.3.1 Padrões de distribuição geográfica disjunta ou restrita

É de consenso entre os pesquisadores que boa parte dos anfíbios e répteis tem distribuição geográfica restrita, muitas vezes limitada a nichos ecológicos específicos (GARCIA et al., 2007). Por exemplo, Di-Bernardo et al. (2007) descreveram padrões de distribuição em mosaico para algumas espécies de serpentes no Sul do Brasil, para as quais fatores ecológicos diversos podem ser responsáveis pela restrição dessas ocorrências, mesmo dentro de amplas áreas de distribuição, gerando diferenças na riqueza e composição observada mesmo entre áreas muito próximas. Mesmo após 30 meses de estudo e 1.525 horas/homem de esforço de captura (além de esforços adicionais de outros métodos como armadilhas de interceptação e queda, abrigos artificiais e encontros ocasionais), Di-Bernardo et al. (2007) destacam a ausência de quatro espécies de serpentes (*Xenodon merremii*, *Crotalus durissus*, *Erythrolamprus poecilogyrus* e *Lygophis flavifrenatus*) em suas amostragens, as quais eram habitualmente registradas em ambientes semelhantes, na mesma fitofisionomia e município em distâncias, muitas vezes, inferiores a 20 km.

3.3.4.3.2 Estudos com amplos padrões biogeográficos

Os padrões biogeográficos normalmente utilizados em estudos herpetofaunísticos são amplos, registrando a herpetofauna de biomas ou fitofisionomias e, invariavelmente, mascarando distribuições restritas ou disjuntas quando utilizados para caracterizar áreas proporcionalmente menores (DI-BERNARDO et al., 2007, GARCIA et al., 2007). Dessa forma, por mais que se tente estimar a riqueza de espécies de uma determinada área com base em registros disponíveis na literatura, incursões a campo tornam-se necessárias para avaliar efeitos de distribuição em mosaico e apontar particularidades que não podem ser previstas por meio de informações de pouca precisão.

3.3.4.3.2 Esforço de captura insuficiente

Outra característica importante na utilização de dados de base é o esforço empregado para a realização desses estudos. Principalmente para o levantamento de serpentes, sabe-se da necessidade de estudos de longo prazo para caracterizar de forma adequada a riqueza e composição desse

grupo em um determinado local (DI-BERNARDO et al., 2007; BALESTRIN, 2008). Por serem animais inconspícuos e de difícil amostragem em campo, além de não serem amostrados adequadamente por métodos de amostragem passiva (*pitfalls*, covos, abrigos artificiais), há a necessidade de grande esforço amostral em busca ativa para contemplar de forma representativa esse grupo de animais. Quando realizados, estudos de longo prazo usualmente ampliam a distribuição geográfica conhecida de algumas espécies, cuja ocorrência inicialmente não era prevista, indicando padrões de distribuição disjunta, ou mesmo revelando espécies novas ainda não descritas para a ciência (DI-BERNARDO et al., 2007; BALESTRIN, 2008).

3.3.4.4 Resultados herpetofauna terrestre

3.3.4.4.1 Complementações ao Pré-desastre

Na região da bacia hidrográfica do rio Doce existem poucos estudos, formalmente publicados, que descrevam a herpetofauna. Não obstante essa escassez, as dimensões da área atingida pela lama, que percorreu mais de 600 km ao longo da bacia, constitui outro empecilho na tentativa de estimar a herpetofauna regional, dada a heterogeneidade de ambientes e diferentes danos antrópicos promovidos por diversas outras atividades. Para tentar estimar a riqueza e composição da herpetofauna da região afetada antes do desastre de Mariana, serão utilizados os estudos de Rievers (2010), que investigou os anfíbios anuros de serapilheira do Parque Estadual do Rio Doce. Esse estudo fornece subsídios interessantes para uma primeira avaliação da herpetofauna local, embora insuficiente em função da complexidade estrutural do ambiente. Dessa forma, de acordo com princípio da precaução, também serão utilizados estudos realizados em áreas próximas àquelas de interesse deste estudo, com o objetivo de elencar o maior número de espécies com ocorrência possível na região afetada. Serão ainda utilizados os estudos de Moura et al. (2012), que descreveu a herpetofauna da Serra do Brigadeiro; e Santos (2013), que descreveu a herpetofauna do corredor ecológico Sossego-Caratinga, que abrange os municípios de Simonésia, Santa Barbara do Leste, Manhuaçu e Caratinga, MG (Figura 183).

Figura 171 – Localização aproximada dos estudos de Rievers (2010), Moura et al. (2012), Santos (2013), em relação ao complexo de barragens da empresa Samarco e a foz do rio Doce.



Além dos estudos formalmente publicados, também foram utilizados estudos técnicos realizados em diversos empreendimentos da Mineradora Samarco, localizados na área de origem do desastre. Esses estudos, apesar de não estarem formalmente publicados, o que implica um processo de revisão menos criterioso, são fundamentais na composição dos dados de base, pois foram realizados em áreas próximas àquelas que sofreram ação direta da lama proveniente da barragem do Fundão. Dessa forma, os estudos técnicos utilizados para confecção da lista da herpetofauna são: EIA da Instalação e Operação da Linha 2 de Mineradouro (BRANDT, 2004); EIA da Barragem de Rejeito do Fundão (BRANDT, 2005); EIA da Mina de Alegria A, B, C – Ampliação da Pilha de Estéril João Manoel (BRANDT, 2006); EIA da LT 345 kV e Subestação 345/138 kV (ERG ENGENHARIA, 2007); e EIA do Terceira Concentrador de Germano, Adutora e Linha de Transmissão (BRANDT, 2009). Além destes, também foi utilizado o estudo de dano ambiental do Complexo Germano (AMPLO ENGENHARIA, 2017), realizado nos municípios de Mariana e Ouro Preto. Vale destacar que o estudo da Amplo Engenharia (2017) foi realizado apenas por meio de uma revisão bibliográfica em que foram compilados os dados obtidos na literatura, por meio de consulta a outros relatórios, estudos acadêmicos, bem como em consulta ao banco de dados das coleções científicas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e da Fundação Ezequiel Dias (FUNED), além de registros não publicados do banco de dados pessoal de Adriano L. Silveira.

A título de registro, os estudos científicos compilados em Amplo Engenharia (2017) foram: Costa et al. (2008), Costa et al. (2015), Curcio et al. (2012), Dixon (1983), Friol (2014), Hamdan e Fernandes (2015), Jackson (1978), Pinto e Fernandes (2012), Mott e Vieites (2009), Rodrigues (1987), Rodrigues, Freitas e Silva (2009), Silveira, Pires e Cotta (2010), Vanzolini (1948), Araújo-Vieira et al. (2015), Baêta e Silva (2009), Baêta et al. (2005), Baêta et al. (2009), Canelas e Bertolucci (2007), Canedo et al. (2010), Caramaschi et al. (2003), Cassini, Cruz e Caramaschi (2010), Fonseca, Gonçalves e Nascimento (2011), Fouquet et al. (2012), Fouquet et al. (2014), Heyer (1984), Leite et al. (2008), Lourenço, Nascimento e Pires (2009), Magalhães et al. (2004), Nascimento et al. (2005), Pansonato et al. (2014), Pedralli, Guimarães Neto e Teixeira (2001), Pirani, Nascimento e Feio (2013), Pugliese, Baêta e Pombal (2009) e Agroflor (2013b).

Também a título de registro, a Amplo Engenharia (2017) utilizou uma série de estudos técnicos para caracterizar sua base de dados utilizadas no estudo os quais são: EIA Terceiro concentrador de Germano, adutora e linha de transmissão (BRANDT, 2009); EIA Implantação da pilha de estéril Natividade, v. II., (SETE, 2011); EIA Projeto aumento de reserva mineral da Samarco. Complexo Minerador de Germano-Alegria (SETE, 2012); EIA Sondagem geotécnica Mirandinha (AGROFLOR, 2013b); EIA Unificação e alteamento das barragens de rejeito de Germano e Fundão – complexo Minerador Germano-Alegria (SETE, 2013); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano. Terceiro Concentrador e estruturas de apoio do Projeto Quarta Pelotização (MANEJO, 2013a); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano. Ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E (MANEJO, 2013b); EIA Implantação da pilha de estéril Natividade (AGROFLOR, 2014); EIA Sistema de disposição de rejeitos Mirandinha (AGROFLOR, 2014); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna

na Unidade do Germano. Terceiro Concentrador e estruturas de apoio do Projeto Quarta Pelotização (MANEJO, 2014a); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano. Ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E (MANEJO, 2014b); EIA Ampliação das minas de Alegria Norte e Sul (AGROFLOR, 2015); Terceiro Concentrador e estruturas de apoio do Projeto Quarta Pelotização (MANEJO, 2015a); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano. Ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E (MANEJO, 2015b); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano. Monitoramento e resgate de fauna na unidade Germano da Samarco (MANEJO, 2015c). Consolidação de dados 2013 a 2015; Informações complementares ao Estudo de Dano Ambiental do projeto pilha de estéril de Natividade (AGROFLOR, 2015); EIA Sistema de disposição de rejeito – Alegria Sul (ARCADIS, 2016); Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano. Ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E (MANEJO, 2016).

Além dos estudos utilizados para tentar estimar a herpetofauna na fase do pré-desastre, também foram compilados dados técnicos referentes aos possíveis danos promovidos pelo desastre. Para isso foram utilizados o Laudo Técnico Preliminar de danos ambientais decorrentes do desastre (IBAMA, 2015b), a dissertação de mestrado de Oliveira (2016), *Contribuições para o diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do rio Doce, estudo de caso: sub-bacia do rio Piranga* e o relatório da Secretária do Estado e Desenvolvimento Regional, Políticas Urbanas e Gestão Política – Grupo da Força Tarefa, produzido em 2016, que avaliou os efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem do Fundão (Minas Gerais, 2016). Este último relatório apresenta a compilação de dados de uma série de documentos produzidos acerca do desastre, os quais são: Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa); Coordenadoria Estadual de Defesa Civil (CEDEC-MG) – Gabinete Militar do Governador; Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais (Emater); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); Fundação Centro Internacional de Educação, Capacitação e Pesquisa Aplicada em Águas (Hidroex); Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae); Secretaria de Estado de Trabalho e Desenvolvimento Social (Sedese); Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad); Instituto Estadual de Florestas (IEF): efeitos e desdobramentos; Secretaria de Estado de Direitos Humanos, Participação Social e Cidadania (SEDPAC); Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (SEDE); Fundação Nacional do Índio (Funai); Instituto de Geoinformação e Tecnologia (IGTEC), além de diversos formulários municipais.

Para a avaliação do *status* de conservação das espécies em âmbito estadual, nacional e internacional foram utilizados os estudos de Biodiversitas (2007), Passamani e Mendes (2007), Barbosa et al. (2008), Minas Gerais (2010), ICMBio (2016b) e IUCN (2018). No entanto, só serão apontadas aquelas espécies que estejam citadas em alguma categoria de ameaça ou quase ameaça de extinção, quais sejam, Quase Ameaçada, Vulnerável, Em Perigo e Criticamente Ameaçada; não são apontadas espécies que apresentem dados insuficientes, não avaliadas ou de baixa preocupação.

Para classificar as espécies como endêmicas ao domínio da Mata Atlântica foram utilizados os estudos de Rodrigues (1987), Nascimento, Wachlevski e Leite (2005), Leite, Junca e Eterovick (2008), Baêta et al. (2009), Curcio et al. (2012), Pinto e Fernandes (2012), Taucce et al. (2012), Lourenço (2013),

Santos (2013), Sá et al. (2014), Araujo-Vieira et al. (2015), Pimenta, Caramasci e Cruz (2015) e Walker et al. (2015).

A nomenclatura e ordenamento taxonômico seguem as recomendações da Sociedade Brasileira de Herpetologia (SBH, 2018).

Com base nos dados de base, são previstas 232 espécies da herpetofauna, sendo 127 espécies de Amphibia (duas espécies de Gymnophiona e 125 espécies de Anura) e 105 espécies de Squamata (APÊNDICE G).

Ibama (2015b) apresenta algumas características importantes, e talvez as mais relevantes naquele momento, acerca dos possíveis danos à herpetofauna. Destas, destacam-se a “evolução” e a “essência” do desastre onde, quanto a evolução “o rompimento da barragem de Fundão classifica-se como súbito, ou seja, caracteriza-se pela subtaneidade, pela velocidade com que o processo evolui e pela violência dos eventos adversos causadores dos mesmos”. (IBAMA 2015b, p. 3)”. E quanto a essência, “o dano se define pela capacidade de locomoção [da herpetofauna] e sua capacidade de adaptação a ambientes adjacentes”. A evolução súbita do desastre de Mariana certamente promoveu um dano profundo sobre a herpetofauna que residia nos *habitats* suprimidos e soterrados pela lama. A maior parte das espécies possui baixa mobilidade, sendo incapazes de fugir das áreas afetadas em função da intensidade e subtaneidade do desastre, o que pode ter provocado a mortalidade direta desses indivíduos, e potencialmente ter afetado as populações das áreas atingidas.

Associado à baixa capacidade de locomoção dos anfíbios e répteis, está a capacidade de adaptação a ambientes adjacentes, nem sempre equivalentes em estrutura ao ambiente original. Como evidenciado pelos dados de base, muitas das espécies com ocorrência prevista para a área atingida apresentam baixa plasticidade ambiental, sendo mais suscetíveis a modificações ambientais. Por outro lado, ocorrem também espécies com grande plasticidade ambiental e que se adaptam facilmente a ambientes alterados, e mesmo a áreas peridomiciliares. A capacidade de adaptação de anfíbios e répteis a ambientes alterados por ação antrópica é verificada por estudos que avaliam o dano ambiental de grandes empreendimentos. Por exemplo, há diversos registros de espécies de lagartos do gênero *Tropidurus* que desapareceram ou declinaram após a implantação de usinas hidrelétricas. Pavan (2007) observou progressiva redução na abundância relativa de *Tropidurus oreadicus* durante o monitoramento da fauna das UHEs Luís Eduardo Magalhães e UHE Serra da Mesa, na bacia do rio Tocantins. A espécie praticamente desapareceu das florestas locais após o enchimento do reservatório. Durante monitoramento de fauna da UHE Barra Grande, 37 exemplares de *Tropidurus torquatus* foram realocados para uma área onde não conseguiram se estabelecer: a área destino consistia em ambiente muito diferente da originalmente ocupada pela espécie, afloramentos de rochas próximos ao leito original do rio Pelotas. Strüssmann (2000) cita que após o enchimento do reservatório da UHE Manso as florestas de galeria inundáveis, ocupados pelo anfíbio *Colostethus brunneus* antes da formação do reservatório, foram completamente submersos, levando a espécie à extinção local, não tendo sido registrado em remanescentes que se mantiveram acima da cota do reservatório. Por outro lado, espécies de anuros oportunistas como *Rhinella schneideri* e *Leptodactylus chaquensis* passaram a ser registradas com maior frequência após a formação do reservatório, em particular nos novos *habitats* abertos junto à sua margem. Dessa forma, as modificações promovidas pelo derramamento da lama

e, consequentemente, supressão e modificação de *habitats* podem alterar a estrutura das assembleias herpetofaunísticas desses locais, com a extinção ou redução de espécies estenoicas, e recolonização dos *habitats* alterados por espécies eurióticas.

O laudo do Ibama (2015b) serviu como alicerce para vários outros documentos, como, por exemplo, o relatório da Secretária do Estado e Desenvolvimento Regional, Políticas Urbanas e Gestão Política – Grupo da Força Tarefa, produzido em 2016, que avaliou os efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem do Fundão (Minas Gerais, 2016). Nesse documento também foram compilados dados referentes a diversos outros estudos. Nessa compilação são mencionadas diversas referências ao dano do desastre de Mariana sobre a fauna local, incluindo subitens específicos para ictiofauna, avifauna e mastofauna, mas não para a herpetofauna. Contudo, o documento endossa os danos promovidos à fauna, descritos em Ibama (2015b).

Oliveira (2016) avaliou, com base em critérios de órgãos gestores do meio ambiente no estado de Minas Gerais, a situação de conservação da flora e fauna na bacia do rio Piranga, importante afluente do rio Doce. Com base nos dados de ZEE/MG (2015), os autores classificam a herpetofauna como de prioridade “Muito Alta” para a conservação nos municípios de Ouro Preto, Itapavera e Catas Altas da Noruega, região de inserção da barragem do Fundão e onde ocorreu a maior supressão de *habitat* por extravasamento da lama. Amplo Engenharia (2017) descreve a região de interesse como de “Prioridade Extrema” ou “Extremamente Alta” para a conservação da fauna, com base, respectivamente, nos estudos de Biodiversitas (2007) e MMA (2004). Nesse EIA são listadas 24 espécies de Squamata, e 50 espécies de anfíbios, das quais uma gimnofiona e 49 anuros (sapos, rãs e pererecas), na região do Complexo Germano, especificamente na ADA e AID deste empreendimento. Também há menção do cágado *Hydromedusa maximiliani*, mas como os quelônios serão abordados em um estudo à parte, não serão discutidos neste item. Ao considerar conjuntamente a AI desse estudo, a riqueza de espécies aumenta consideravelmente, atingindo a estimativa de 76 espécies de répteis e 82 espécies de anfíbios, fruto da compilação dos estudos anteriormente citados e utilizados como dados de base. Esses dados servem de parâmetro para considerar a região como de alta diversidade herpetofaunística, de grande relevância para a conservação e manutenção das espécies de répteis e anfíbios em Minas Gerais. Não obstante, ao considerar esses dados à luz dos objetivos do monitoramento do desastre de Mariana, deve-se ponderar que a revisão de estudos de campo realizada em Amplo Engenharia (2017) compreende ambientes muito heterogêneos, representados por fitofisionomias florestais, campestres e savânicas em uma zona de transição entre a Mata Atlântica e o Cerrado, na porção alta do rio Doce. A riqueza e estruturação dessas assembleias não podem ser extrapoladas para toda a extensão da bacia do rio Doce, que transpassa diferentes ambientes em diferentes níveis de estado de conservação, sujeitas a ações antrópicas diversas promovidas ao longo de sua colonização. Agrega-se a isso o dano direto da passagem da lama, que ocorreu com intensidade diferente ao longo desse corpo de água. Assim, no alto rio Doce ocorreu a supressão e soterramento de porções florestais ciliares pela lama, danos que não ocorreram nos terços médio e baixo do rio Doce, onde a ação dos rejeitos é restrita à calha do rio e à contaminação da água.

3.3.4.4.2 Pós-desastre

3.3.4.4.2.1 Avaliações de relatórios e dados técnicos

Apesar do desastre de Mariana ter ocorrido há pouco mais de dois anos, são escassos os estudos abordando a herpetofauna da região, seja para levantamento, seja para avaliação dos danos sofridos por suas populações ao longo da bacia do rio Doce.

Juncá et al. (2017) estudaram girinos como indicadores de qualidade da água na área diretamente afetada pelo desastre. Os autores avaliaram girinos expostos às áreas de influência dos rejeitos para verificar se ocorre bioacumulação de metais pesados. As amostragens foram realizadas em 26 pontos, sendo 12 em Minas Gerais e 14 no Espírito Santo. As coletas ocorreram entre setembro e dezembro de 2016 e abrangeram desde locais em contato direto com o rejeito (18 pontos), quanto em distâncias variadas (7 pontos). No Espírito Santo, os pontos foram exclusivamente ao longo do rio Doce, enquanto que em Minas Gerais os pontos foram em áreas drenadas pelos rios Gualaxo e Piracicaba.

Ao todo, esse estudo constatou a presença de 24 gêneros de anuros com 19 espécies confirmadas. Quanto à bioacumulação, verificou-se contaminação em todos os pontos de amostragem, mesmo em pontos fora da área que os autores consideraram como sob influência. Segundo esses autores, a contaminação ainda pode estar associada ao vazamento, que afetaria áreas mais distantes através dos lençóis freáticos, mas também pode ser oriunda dos processos de mineração há muito tempo instalados na região. Independentemente da origem da contaminação, os anfíbios correspondem à base da cadeia alimentar de diversos organismos, e o dano da bioacumulação poderia se estender ao longo de toda a cadeia e potencialmente atingindo, inclusive, populações humanas.

Além da bioacumulação de metais, os autores constataram que todas as poças avaliadas que não tiveram contato com os rejeitos apresentavam girinos da espécie *Elachistocleis cesarii*, que tem hábitos fossoriais, permanecendo boa parte da vida sob o solo, emergindo para se alimentar e reproduzir. No entanto, nenhuma das poças que teve contato com a lama apresentou girinos desta espécie, resultado que sugere que os espécimes daqueles locais tiveram seu ciclo reprodutivo prejudicado pelo assoalhamento promovido pela deposição da lama. Destaca-se que esse estudo avaliou somente girinos, e constatou-se esse fenômeno apenas para a espécie supracitada; contudo, essa observação permite supor que espécies com hábitos semelhantes, mesmo em outros grupos herpetofaunísticos que utilizam estes locais para deposição de seus ovos (ex. quelônios e algumas espécies de lagartos), também tenham sofrido tal dano. A ocorrência da espécie *Elachistocleis cesarii* na área afetada é inferida pelos dados de base, sendo citada como de ocorrência provável na região no cenário pré-dano. As características da sua história natural são comuns à grande parte das espécies que compõem a família Microhylidae, da qual faz parte, e que apresenta outras quatro espécies na área afetada conforme os dados de base. Entre elas, *Myersiella microps*, espécie endêmica da Mata Atlântica, pode ter sofrido o mesmo dano. Projeta-se, ainda, a ocorrência de ampla variedade de espécies na área onde que podem ter sofrido com os danos provenientes do desastre de Mariana, principalmente aquelas de hábitos terrestres e associadas às margens de rios como, por exemplo, espécies da família Leptodactylidae.

3.3.4.4.2.2 Registros da herpetofauna realizados durante a visita técnica

Durante visita técnica na região do desastre de Mariana, que ocorreu entre os dias 12 e 22 de dezembro do ano de 2017 para avaliação das Unidades Amostrais dos esforços de diagnóstico e monitoramento da fauna, foram observadas algumas espécies da herpetofauna de forma oportuna. O registro dessas espécies ocorreu de forma não sistematizada, ocasional, mas pode contribuir para enriquecer a lista das espécies que ocorrem ao longo do trajeto avaliado. No total, foram registradas 23 espécies, das quais 13 espécies de anfíbios anuros e 11 espécies de répteis (APÊNDICE G). A maior parte dessas espécies foi confirmada por registros in loco durante a visita. Duas espécies foram acrescentadas à presente listagem por registros indiretos (conversas com moradores locais), mas confirmadas por fotografias fornecidas pelos mesmos. O lagarto *Tropidurus torquatus* (Figura 172) foi frequentemente observado ao longo de todo o traçado percorrido, tanto nas áreas próximas ao rio Doce quanto em locais mais afastados.

Figura 172 – Exemplar de *Tropidurus torquatus* observado próximo ao rio Doce no Parque Estadual do Rio Doce.



Fonte: Acervo LACTEC (autor: Rafael L. Balestrin, 2017).

No Parque Estadual do Rio Doce foi realizado o maior número de registros, dos quais se destacam as serpentes *Dipsas* cf. *albifrons* (Figura 173), e *Micrururs corallinus* (Figura 174), ambas observadas em uma estrada de acesso ao parque.

Figura 173 – Exemplar de *Dipsas* cf. *albifrons* encontrada atropelada em uma estrada de acesso ao Parque Estadual do Rio Doce.



Fonte: Acervo LACTEC
(autor: Rafael L. Balestrin, 2017).

Figura 174 – Exemplar de *Micrururus corallinus* encontrada em uma estrada de acesso ao Parque Estadual do Rio Doce.



Fonte: Acervo LACTEC (autor: Rafael L. Balestrin, 2017).

3.3.4.5 Metodologia quelônios

O método aplicado ao presente relatório consistiu no levantamento aprofundado da literatura disponível acerca do objeto de estudo, contemplando pesquisas publicadas em artigos científicos, livros, periódicos, teses, dissertações, resumos de congressos e trabalhos técnicos desenvolvidos na região de estudo. Foram elencados estudos posteriores ao rompimento da barragem de Fundão para o conhecimento da situação após o desastre ambiental, até o momento presente, com o intuito de elaborar um diagnóstico e o levantamento dos possíveis danos e danos ambientais causados pelo rejeito aos quelônios dulcícolas do rio Doce e marinhos na região da foz do mesmo rio e ao longo do alcance da pluma de lama.

Os resultados obtidos por meio do levantamento e análise da bibliografia neste relatório e no relatório de linha base devem subsidiar os trabalhos de campo, os quais devem seguir, de forma geral, o roteiro para estudos de quelônios do MMA (VOGT et al., 2015) e possibilitar o estabelecimento de um comparativo entre as situações pretérita e posterior do grupo temático na área afetada pelo rejeito proveniente do rompimento da barragem.

A nomenclatura e a classificação taxonômica adotadas para as espécies de quelônios no presente estudo é a mesma empregada por Costa e Bérnils (2015), disponível no *site* da Sociedade Brasileira de Herpetologia (www.sbherpetologia.org.br).

3.3.4.6 Resultados quelônios

3.3.4.6.1 Quelônios continentais

A partir do banco de dados do ICMBio (VOGT et al., 2015) e de estudos que apresentam a distribuição ampla de quelônios no continente sul-americano (e.g., ERNST; BARBOUR, 1989; IVERSON, 1992), um total de 13 espécies de quelônios continentais (sendo 11 aquáticas e duas terrestres) são registradas para os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Entretanto, parte dessas espécies, embora contemplem distribuições próximas à bacia do rio Doce, ocorre em ecossistemas bastante distintos, possivelmente não se fazendo representar na região ora em estudo. Existem registro da presença de quatro espécies dulcícolas e das duas espécies terrícolas de jabutis na bacia hidrográfica do rio Doce, a saber, o cágado-da-serra (*Hydromedusa maximiliani*), o cágado-amarelo (*Acanthochelys radiolata*), o cágado-de-barbicha (*Phrynops geoffroanus*), os jabutis (*Chelonoidis denticulatus* e *Chelonoidis carbonarius*) e uma espécie ainda não descrita do gênero *Rhinoclemmys*, registrada para a região de Linhares-ES (BÉRNILS et al., 2014). Entretanto, os estudos são ainda insuficientes para se ter uma ideia precisa dos ambientes ocupados pelas espécies.

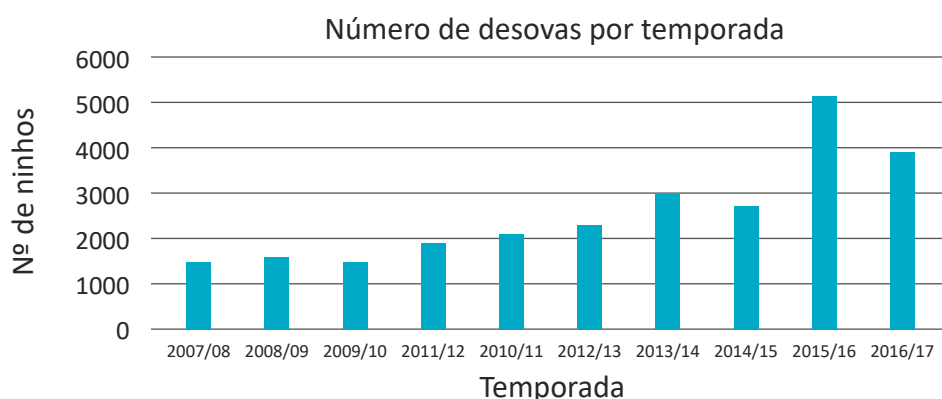
Apesar da grande magnitude, importância e abrangência dos danos causados pelo rejeito da barragem de Fundão, até o presente momento inexistem estudos sobre os quelônios continentais após o rompimento da barragem. É possível que o evento tenha inclusive levado ao desaparecimento de algumas espécies a nível local e regional.

3.3.4.6.2 Quelônios marinhos

Na avaliação dos danos ambientais decorrentes da pluma de lama de rejeitos da Barragem de Fundão sobre as espécies de quelônios marinhos foram considerados basicamente os estudos disponibilizados pelo Projeto TAMAR, os quais contemplam parâmetros reprodutivos na região da foz do rio Doce (BAPTISTOTTE, 2017 – não publicado), além de alguns resultados apresentados pelo Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo em seu sexto relatório anual (PMP-BC/ES, 2017). Esses estudos consideram as temporadas reprodutivas das espécies de quelônios marinhos, as quais ocorrem principalmente entre setembro e março, nas praias continentais. Portanto, são demonstrados em biênios para esses meses. Enquanto o estudo do Projeto TAMAR apresenta os resultados a partir do biênio 2007/2008, o PMP-BC/ES faz suas avaliações a partir do biênio 2010/2011.

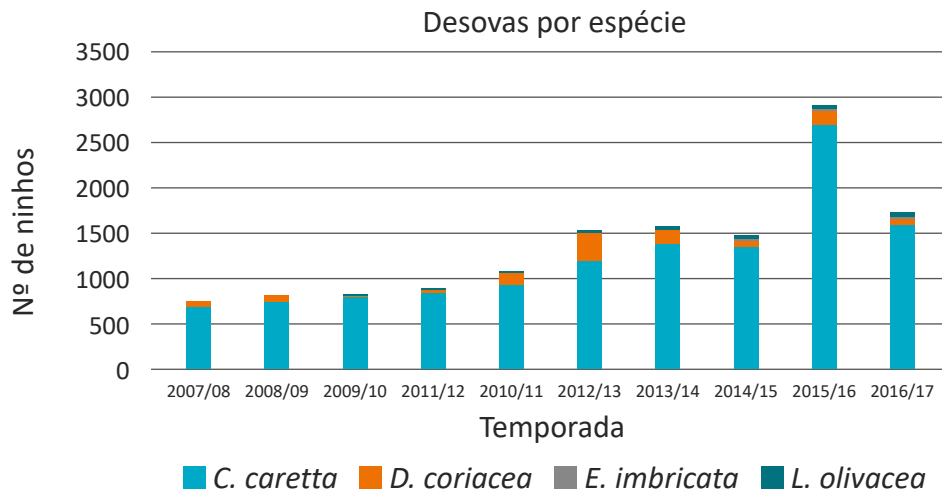
Segundo Baptistotte (2017), o desastre do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, ocorreu no pico da temporada reprodutiva dos quelônios de 2015/2016, quando já vinha sendo registrado um aumento repentino no número de desovas de tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*). Conclui-se, por meio das análises desse estudo, que não foram constatadas alterações significativas, até o momento, na taxa de desovas dos quelônios marinhos após o aporte de rejeitos na foz do rio Doce e região marinha adjacente (Figura 175, Figura 176).

Figura 175 – Número total de ninhos registrados nas últimas dez temporadas, considerando todas as espécies, incluindo as não identificadas.



Fonte: Baptistotte (2017).

Figura 176 – Número de desovas por espécie, considerando somente os ninhos abertos após eclosão, quando a espécie é identificada.



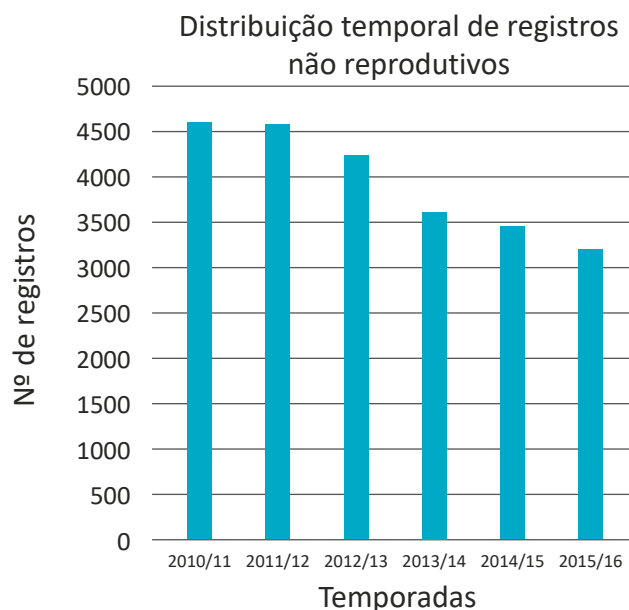
Fonte: Baptistotte (2017).

Pelo contrário, na temporada em que ocorreu o desastre, foi observado um incremento de 100% nos registros da tartaruga-cabeçuda (*C. Caretta*) em relação à temporada anterior. Ainda de acordo com Baptistotte (2017), o declínio no número de desovas na temporada seguinte ao desastre não é um parâmetro para caracterizar um possível dano sobre estas populações, pois é conhecido o fenômeno cíclico de retorno de fêmeas para desovar nessas praias, alternando em dois a três anos. Portanto, essas oscilações são esperadas, conforme Figura 175 e Figura 176.

Entre os dados disponibilizados no relatório do PMP-BC/ES, foram elencados para o presente estudo aqueles referentes às áreas de monitoramento codificadas como 1B, 2A e 2B, que correspondem, respectivamente, à região de São Mateus, com uma extensão de 53,1 quilômetros, Linhares (norte da foz do rio Doce), com 52,2 quilômetros e Linhares e Aracruz (sul da foz do rio Doce até a foz do rio Riacho-Comboios). Os resultados para registros reprodutivos apresentaram índices abaixo dos obtidos pelo Projeto TAMAR, entretanto, também demonstrou um incremento nos números nas áreas 1B e 2A, inclusive na temporada 2015/2016, quando do desastre de Mariana. Houve uma redução nos registros apenas na área 2B, diferentemente do apresentado pelo TAMAR. Nesse sentido, é possível considerar que os dados de parâmetros reprodutivos e demográficos apresentados pelo PMP-BC/ES, apesar de não serem idênticos, corroboram, em maior parte, aqueles apresentados pelo TAMAR.

Por outro lado, segundo o PMP-BC/ES (2017), houve uma redução gradual de registros não reprodutivo, considerando toda a área de abrangência do projeto, de espécies de quelônios marinhos nas últimas temporadas, demonstrando uma tendência anterior ao aporte da pluma de lama na região, conforme Figura 177.

Figura 177 – Distribuição temporal dos registros não reprodutivos de quelônios marinhos na área de monitoramento do PMP-BC/ES durante o período de outubro de 2010 a setembro de 2016.



Fonte: PMP-BC/ES (2017).

Em relação à espécie *Carretta caretta*, houve um aumento considerável de encalhes no último ano (2015/2016). Porém, é fundamental a determinação das áreas onde esses registros ocorreram, para a avaliação de existe alguma relação com a lama de rejeitos. Segundo os gráficos apresentados, esse aumento súbito de casos de encalhes dessa espécie ocorreram nas áreas do estado do Rio de Janeiro, não demonstrando relação direta com o evento ora analisado.

Um aumento excepcional de encalhes na região da foz do rio Doce poderia ser um indicador de comprometimento da saúde dos indivíduos das espécies de tartarugas marinhas.

Outro indicador a ser avaliado é uma possível redução abrupta de encalhes em relação a outros anos, fato que pode indicar uma rejeição por parte dos quelônios em frequentar as áreas afetadas pela pluma.

Tanto nas suspeitas clínicas das causas da debilidade de espécimes resgatados vivos e encaminhados para tratamento veterinário quanto nos casos de necropsia dos indivíduos que vieram a óbito ou foram encontrados mortos não há evidência conclusiva de que a interação com o rejeito mineral proveniente da barragem de Fundão tenha uma relação direta ou indireta. Considerando os casos observados na temporada 2015/16 pelo PMP-BC/ES para toda a área amostral, neste período 10 casos foram encaminhados para tratamento por causa indeterminada, 46 por processo infeccioso, 35 por caquexia/inanição, 1 por processo obstrutivo e 3 casos por outras causas.

Durante o período de outubro de 2010 a setembro de 2016 foram realizados 4.780 exames necroscópicos em quelônios marinhos, com média de 797 procedimentos por ano. Deste total, 4.127 necropsias foram em exemplares de *Chelonia mydas*, 343 em *Caretta caretta*, 141 em *Eretmochelys imbricata*, 142 em *Lepidochelys olivacea* e 26 em *Dermochelys coriacea*. Na temporada 2015/15 foi realizado um total de 494 necropsias. Dessas necropsias, 71 (14,37%) apontaram causas naturais, 151 (30,56%) apontaram causas antrópicas, 152 (30,76%) apontam causas indeterminadas, 118 (23,88%) e 2 (0,4%) foram por eutanásia.

Portanto, nenhuma necropsia atestou, até então, como *causa mortis* a interação com o rejeito mineral proveniente da barragem de Fundão.

3.3.4.7 Considerações finais

Assim como verificado no relatório de linha-base, com base nos dados obtidos a partir da análise da literatura especializada elencada no presente relatório, é possível afirmar que o conhecimento acerca do grupo temático ainda é incipiente na área de estudo, principalmente em relação aos quelônios continentais na bacia hidrográfica do rio Doce. Apesar da existência de alguns estudos já desenvolvidos na região, ainda existem diversas lacunas a serem preenchidas, tais como a confirmação da ocorrência de algumas espécies e as respectivas distribuições geográficas no âmbito da bacia, tamanho das populações, hábitos correlacionados ao ecossistema em questão, as ameaças a que estão expostas essas espécies, entre outras questões que podem ser elucidadas ao longo do monitoramento de quelônios a ser desenvolvido.

Diferentemente dos quelônios continentais, existem estudos sistemáticos sobre as tartarugas marinhas, compreendendo monitoramentos antes e após o desastre. O maior foco desses estudos, entretanto, é na desova ao nascimento dos filhotes, sobretudo com as espécies tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*) e à tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*), espécies que utiliza regularmente a região litorânea de estudo como sítio de desova.

É importante ressaltar que, assim como no caso do relatório de linha-base, no presente relatório pós-desastre não foram encontradas pesquisas na literatura abordando especificamente a toxicidade e bioacumulação de metais pesados presentes nos organismos dos quelônios. Essa ausência de dados pretéritos pode dificultar o estabelecimento de parâmetros de contaminação entre as situações anterior e posterior ao desastre ambiental.

Tampouco os resultados das necropsias apresentadas pelo PMP-BC/ES estabeleceram relação conclusiva de óbitos de quelônios registrados nas praias próximas à foz do rio Doce após o desastre com a lama de rejeitos.

Está-se em busca dos dados obtidos durante estudo desenvolvido na bacia do rio Doce com populações do cágado-de-barbicha (*Phrynops geoffroanus*), no qual, além das relevantes informações censitárias, talvez seja possível obter amostras coletadas preteritamente ao desastre, o que pode possibilitar o estabelecimento de um importante parâmetro de situações prévias e posteriores ao evento quanto à contaminação e acúmulo de metais pesados nos seus organismos.

Em relação às tartarugas marinhas, solicitar-se-á dados obtidos pela Fundação Marcos Daniel acerca das análises de amostras retiradas das espécies marinhas nas praias adjacentes à região da foz

do rio Doce, além de estabelecer uma parceria com essa fundação no intuito de aumentar o espectro dessas análises, possibilitando também a avaliação das tartarugas em fase de desova nas praias da região e dos espécimes que se encontram em cativeiro.

3.3.5 AVIFAUNA

3.3.5.1 Introdução

A avifauna é bastante utilizada como indicadora de qualidade ambiental devido à estreita relação entre os ambientes naturais e as variadas espécies cujas exigências ecológicas associam-nas a eles. Dessa forma, a geração de informações sobre aves silvestres é de extrema importância para auxiliar em programas de conservação e manejo de ecossistemas (ZEE/MG, 2015). Devido a seu valor como bioindicador, alguns estudos direcionados à avifauna estão sendo realizados após o rompimento da barragem do Fundão, antes localizada no município de Mariana, Minas Gerais, com o objetivo de mensurar parte dos danos ambientais possivelmente desencadeados após o desastre. O rompimento da barragem despejou cerca de 34 milhões de m³ de rejeitos não inertes de ferro e manganês, sendo que 16 milhões de m³ restantes continuam sendo carreados, aos poucos, para jusante e em direção ao mar, no vizinho estado do Espírito Santo, afetando diretamente cerca de 680 km de corpos hídricos da bacia do rio Doce, ao longo de 40 municípios entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo (IBAMA, 2015b).

3.3.5.2 Objetivo

O intuito do presente documento é apresentar informações atuais, referentes ao período pós-desastre, disponíveis em publicações técnicas ou acadêmicas que aludem ao grupo faunístico de interesse. Pretende-se comparar informações técnicas com os dados obtidos na linha-base, ou pré-desastre, e também avaliar conjuntamente as informações com os dados a serem obtidos no monitoramento da fauna.

3.3.5.3 Metodologia

Após a finalização do relatório de linha-base, diversas fontes de informação indicam resultados de estudos que vem sendo conduzidos no rio Doce após o desastre, ou seja, abrangendo o período de novembro de 2015 a novembro de 2017. A compilação dessas informações tem como base relatórios técnicos produzidos por instituições públicas e privadas, e grupos de pesquisas independentes. A seguir, são apresentados os estudos que foram identificados e em execução.

3.3.5.4 Resultados

3.3.5.4.1 Grupo Independente para Avaliação do Dano Ambiental (GIAIA)

O grupo de trabalho de ornitologia, que tem como coordenador geral o Prof. Dr. Renato Gaban Lima, tem por objetivo analisar o acúmulo de metais pesados e/ou tóxicos nas aves que estão associadas aos ambientes atingidos pela lama de rejeito. Para isso, pretendem recolher amostras de aves associadas aos resíduos da mineração nas áreas afetadas.

Sabe-se que a bioacumulação dessas substâncias pode levar à mortalidade de animais silvestres, seja ela direta devido à toxicidade; ou indiretamente, como consequência de alterações de comportamento, de reprodução, diminuição de imunidade e anomalias morfofisiológicas. Portanto, estudos para quantificar o potencial de bioacumulação desses elementos nas aves, amostrados entre a foz do rio Doce e áreas próximas à barragem destruída, é um dos objetivos dessa primeira abordagem. Para conduzir as amostragens, o grupo de trabalho optou por priorizar espécies de aves limícolas, aquáticas e necrófagas, tais como batuíras, maçaricos, garças e urubus.

A segunda abordagem tem o objetivo de levantar, documentar e avaliar os possíveis danos dessa tragédia sobre a diversidade de aves do rio Doce. Uma equipe pertencente ao grupo de trabalho é responsável pela compilação da lista das aves já registradas nessa drenagem, agrupando informações referentes à preferência de *habitats* de cada espécie, *status* de conservação, padrões de distribuição geográfica, níveis de endemismos, e localidades de registro ao longo da bacia. Assim que possível, a lista das aves do rio Doce será tornada pública, elencando informações de extrema importância, como a presença e distribuição de espécies ameaçadas, endêmicas, migratórias e aquelas que possivelmente estejam sendo afetadas pelas diversas alterações resultantes da tragédia.

Até então, apenas um documento tornou-se disponível, e relata as observações do grupo de trabalho da avifauna durante quatro dias de expedição na região do rio Doce.

De acordo com o relatório, as aves aquáticas estariam restringindo o uso de *habitat* aos afluentes do rio Doce, os quais atuariam como refúgio para a fauna aquática. Dessa forma, a movimentação das aves e a riqueza de espécies em brejos do rio Corrente foram consideravelmente maiores quando comparados a localidades próximas ao rio Doce.

Uma grande variedade de espécies foi encontrada em um trecho de floresta ciliar às margens do rio Corrente. Esse tipo de ambiente foi virtualmente dizimado no alto rio Doce devido ao soterramento pela lama. A constatação dessa diversidade de espécies típicas desse ambiente reforça a concepção de que várzeas e matas ciliares remanescentes ao longo do rio são de grande importância para a conservação dos elementos presumivelmente mais afetados pela tragédia.

Percorreram-se também áreas do rio Suaçuí Grande, onde foi possível documentar espécies não registradas na calha do rio Doce, ou que ocorreram em números reduzidos. Algumas espécies ocupam preferencialmente praias arenosas ou com sedimentos mais finos, como *Calidris fuscicollis* e *Charadrius collaris*, e foram registradas nesse afluente. Espécies piscívoras que utilizam a visão para capturar suas presas foram também encontradas, como *Nannopterum brasilianum* e *Rynchops niger*, que não foram encontradas na calha do rio Doce. Esses fatos levam os autores do relatório a acreditar que essas espécies podem ter deixado de ocupar o rio Doce em decorrência do aumento da turbidez da água após o desastre.

3.3.5.4.2 Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama)

No Laudo Técnico Preliminar (IBAMA, 2015b) foram apontados possíveis danos sobre a avifauna em virtude do desastre. De acordo com o Ibama, a reprodução de aves da UC e seu entorno, bem como o forrageamento e a dinâmica de uso dos *habitats* foram impactados, em especial para as espécies aquáticas, ocasionando o abandono das áreas afetadas, devido à baixa disponibilidade de recursos.

A ingestão de peixes mortos e supostamente contaminados por aves aquáticas da UC e seu entorno é também abordada no documento. A preocupação gira em torno da potencial bioacumulação de substâncias tóxicas, podendo ser prejudicial às aves ao interferir em sua reprodução, eventualmente levando à má formação de ovos e/ou o comprometimento de órgãos vitais.

Ainda, a movimentação de aves migratórias para a UC e seu entorno possivelmente foi prejudicada. Nesse caso, as aves tenderiam a buscar novas áreas para forrageio e invernada, potencialmente tornando-as mais vulneráveis. Em virtude da alta vagilidade das aves, esse grupo pode ter sido menos impactado, de acordo com a avaliação do Ibama. No entanto, devido à ausência de dados para analisar a ocorrência de endemismos, esses danos podem ser subdimensionados.

3.3.5.4.3 Fundação Renova

A Fundação Renova tem por objetivo, em um de seus programas, desenvolver estudos para avaliar os danos oriundos do rompimento da barragem do Fundão sobre as espécies terrestres ameaçadas de extinção. Nesse programa será realizado o monitoramento ecotoxicológico das aves para avaliar os danos causados pela lama em regiões dulcícolas, estuarinas e marinhas, e fazer o monitoramento das aves marinhas associadas ao rio Doce, na plataforma continental e áreas protegidas adjacentes. Para a execução deste estudo, a avifauna será amostrada através de diferentes métodos, sendo eles: censos por ponto de escuta, levantamentos por meio de listas de Mackinnon, captura com redes de neblina, amostragens de aves noturnas e amostragens de aves associadas a ambientes úmidos.

3.3.5.5 Considerações finais

Este documento tem por objetivo apresentar de forma prévia os possíveis danos ambientais que incorreram sobre a avifauna, por meio de relatos de pesquisadores, e estudos que estão sendo realizados para identificar e dimensionar os danos nesse grupo após o rompimento da barragem do Fundão. É inquestionável que esse desastre trouxe consequências ambientais de extrema gravidade. No entanto, somente pelo desenvolvimento dos programas de monitoramento ambiental é que informações mais precisas acerca dos danos sobre a avifauna serão geradas, sendo, assim, passíveis de análises e interpretações.

3.3.6 Mastofauna

3.3.6.1 Introdução

Dentre os vertebrados, as características peculiares dos mamíferos os permitem ocupar uma ampla gama de ambientes (Hickman Jr et al. (2004). A homeotermia, capacidade de manutenção da temperatura corporal por exemplo, facilita a exploração ambiental no período noturno, assim como a utilizarem habitats de baixas temperaturas durante todo o ano.

A rica diversidade biológica brasileira é ainda pouco conhecida, embora seja considerada a maior do planeta (MMA, 2005). O estado de conhecimento da diversidade de mamíferos segue a mesma tendência geral, podendo aumentar conforme os inventários sejam intensificados e análises citogenéticas e moleculares sejam implementadas (REIS et al., 2006).

A rica assembleia de mamíferos ocupa todos os estratos de ambientes terrestres, incluindo táxons com hábitos terrícolas, arborícolas, semi-fossoriais, semi-aquáticos e voadores. Em virtude dessa ampla gama de ocupação ambiental, são um dos grupos faunísticos mais importantes quanto ao funcionamento ecossistêmicos, e seus diferentes componentes perfazem diversas funções ambientais. Para fins de estudos faunísticos, os mamíferos terrestres são segregados em “pequenos mamíferos não voadores”, “pequenos mamíferos voadores, ou quirópteros” e “mamíferos de médio e grande porte”, cada qual com técnicas específicas de estudo em campo e análise de dados. Além desses, os cetáceos constituem um quarto grupo, constituído de espécies aquáticas que, na área de interesse, ocupam exclusivamente o ambiente marinho e estuarino, sendo também tratados separadamente no presente diagnóstico.

O conjunto dos pequenos mamíferos não voadores constitui-se de marsupiais da família Didelphidae e roedores das famílias Cricetidae e Echimyidae. Inclui espécies com ampla distribuição, assim como diversos táxons de distribuição restrita, e podem ter hábitos terrícolas e arborícolas (WILSON; REEDER, 2005; BONVICINO et al., 2008; GARDNER; CREIGTON, 2008). Formam o grupo ecológico mais diversificado de mamíferos das florestas Neotropicais, sendo também os vertebrados com maior dificuldade em se estabelecer uma boa taxonomia, devido à alta diversidade de espécies, aliada à inadequada representatividade em coleções zoológicas (VIVO, 1996).

A exemplo dos pequenos mamíferos não voadores, os quirópteros são um grupo muito especioso, contando com uma grande diversidade de espécies que ocorrem em todo o Brasil e nas mais diversas formações vegetacionais. A grande capacidade de dispersão destes animais aloca-os como um dos grupos mais relevantes na polinização e dispersão de algumas espécies de plantas, além de serem importantes no controle populacional de invertebrados.

Mamíferos de médio e grande porte, classicamente considerados aqueles cujo peso corporal exceda 1 kg, são igualmente de enorme relevância no funcionamento dos ecossistemas, atuando como grandes dispersores de sementes e no controle de populações de espécies maiores, além de seu papel na arquitetura ambiental, ao alterar características macroestruturais dos habitats (p.ex. pela abertura de túneis de tatus).

Os cetáceos são um grupo de mamíferos exclusivamente aquáticos que habitam praticamente todos os *habitats* dos oceanos do mundo. Além de ser um grupo extremamente importante ecologicamente, os cetáceos são sensíveis a danos antropogênicos de diversas naturezas (LODI; BOROBIA, 2013). Frequentemente, esse grupo tem sido utilizado como sentinela dos ecossistemas, com seu estado de saúde e outros parâmetros demográficos e comportamentais refletindo a saúde do ecossistema em que habitam (WELLS et al., 2004). Assim, naturalmente esses mamíferos de vida longa e reprodução relativamente lenta são um grupo importante de ser monitorado no contexto da presença de danos ambientais gerados pelo homem.

3.3.6.1 Objetivo

O intuito do presente documento é apresentar informações atuais, referentes ao período pós-desastre, disponíveis em publicações técnicas ou acadêmicas que aludem ao grupo faunístico de interesse. Pretende-se comparar informações técnicas com os dados obtidos na linha-base, ou

pré-desastre, e também avaliar conjuntamente as informações com os dados a serem obtidos no monitoramento da fauna.

3.3.6.3 Metodologia

Para todos os grupos de mamíferos foram feitas buscas extensivas por publicações técnicas, acadêmicas ou notas de órgãos oficiais que mencionam a ocorrência de mamíferos na região.

3.3.6.4 Resultados

3.3.6.4.1 Pequenos mamíferos não voadores

No âmbito da bacia do rio Doce, poucos são os estudos orientados ao levantamento da fauna de pequenos mamíferos não voadores, principalmente após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais. Nem mesmo novas solicitações de pesquisas em Unidades de Conservação Estaduais, relacionadas à mamíferos não voadores de pequeno porte foram feitas no período pós desastre, ou seja, depois de novembro de 2015 (IEF, 2018).

Um relatório publicado em janeiro de 2016, intitulado “A tragédia do rio Doce: a lama, o povo e a água” (Felippe *et al.* 2016), menciona apenas brevemente os mamíferos selvagens, em uma seção referente ao município de Resplendor, Minas Gerais. Os autores mencionam relatos de moradores “que era comum ver mamíferos”, possivelmente capivaras, “bebendo água do rio antes do desastre”, sobretudo nas porções de vegetação preservada, e que a presença desses animais não foi mais observada. É de grande importância estudos que monitorem o percurso do rio Doce atingido, considerando que o desastre ocorreu em uma das regiões mais importantes para a conservação da biodiversidade. De acordo com Fernandes e colaboradores (2016), estima-se que a perda foi significativa para diferentes espécies que morreram em elevado número. Não há relatos para a fauna de pequenos mamíferos não voadores, e poucos relatos isolados para mamíferos grandes, como para a morte de uma anta sul-americana (*Tapirus terrestris*), bem como para outros táxons, tartarugas, aves, anfíbios e invertebrados.

No ano de 2015 um laudo técnico preliminar expedido pelo IBAMA visou diagnosticar os danos ambientais decorrentes do desastre (IBAMA, 2015b). Neste documento, destaca-se o potencial dano a toda a cadeia trófica, envolvendo desde a comunidade planctônica, invertebrados aquáticos, peixes, anfíbios, répteis e mamíferos que dependem direta e indiretamente das águas do rio Doce e tributários afetados. Dentre os mamíferos, foram registradas 35 espécies, sendo seis de pequeno porte não voadores (dois roedores e quatro marsupiais), sendo elas: *Akodon cursor*, *Rhipidomys mastacalis*, *Didelphis aurita*, *D. albiventris*, *Gracilinanus agilis* e *G. microtarsus*. Vale ressaltar que estes dados sobre as espécies registradas são provenientes de literatura, com base em estudos de dano ambiental anteriores. O laudo ainda destaca que provavelmente o dano dizimou populações de pequenos mamíferos fossoriais nas margens dos rios soterrados pela lama.

Mais de dois anos já se passaram após o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, onde mais de 43 milhões m³ de rejeitos de minério de ferro (Samarco, 2016) devastaram uma área de aproximadamente 298 ha, com supressão total da vegetação, poluindo 668 km de cursos d'água da Bacia do Rio Doce até o Oceano Atlântico. Aproximadamente 130 fragmentos, ou 863,7 ha de floresta estacional semidecidual em Áreas de Preservação Permanente foram atingidos diretamente pelos rejeitos

de minério de ferro (Carmo et al. 2017). Estas áreas atingidas estão sob domínio da Mata Atlântica, um dos *hotspots* de maior biodiversidade em todo o planeta (Mittermeier et al. 2005).

Mesmo após tanto tempo e com danos desta magnitude até agora não foram realizados nem um monitoramento de fauna, ou seja, nenhum estudo foi publicado pela comunidade científica para explicar os efeitos a médio e longo prazo. Trata-se de um dos maiores casos de desastre já ocorridos em Minas Gerais a sua magnitude (Felippe et al. 2016). Há uma inegável necessidade de rever os padrões ambientais, para um controle mais rigoroso do diagnóstico do dano ambiental, para nortear medidas que contribuam para minimizar os danos ambientais, e por fim, permitir a recuperação/conversão de novas áreas naturais.

3.3.6.4.2 *Pequenos mamíferos voadores*

Os mamíferos voadores, em específico, não foram contemplados nos levantamentos realizados após o desastre. No entanto, algumas das informações disponíveis oferecem indícios de danos causados aos morcegos. Segundo o relatório do Grupo de Trabalho SEMAD (MINAS GERAIS, 2016) e o estudo do IEF, a contaminação da fauna por metais pesados e outros poluentes, e a impossibilidade de dessedentação são riscos prováveis de dano para esse grupo taxonômico. Quando o relatório cita: “Provavelmente as populações de animais fossoriais e de porte reduzido foram dizimadas naqueles locais onde as margens foram tomadas pela onda de lama”, possibilita inferir dano direto sobre abrigos de morcegos próximos às margens, assim como sob pontes do rio Doce e afluentes afetados pela onda de lama.

A mortalidade de animais de pequeno porte, como os morcegos, passou praticamente despercebida frente ao foco dos observadores nos estudos do pós-desastre imediato, o que é compreensível diante da magnitude do desastre e das poucas evidências do dano sobre esse grupo da fauna, quando comparadas com a mortalidade de animais aquáticos, ou terrestres de médio e grande porte. Dessa forma, sem que tenha havido, no pós-desastre imediato, uma amostragem específica para avaliar o dano direto ou a mortalidade de morcegos na bacia do rio Doce, era esperado que essa informação não estivesse disponível. Esse cenário enfatiza a relevância do presente esforço, uma vez que serão geradas informações especificamente associadas à compreensão dos danos.

3.3.6.4.3 *Mamíferos de médio e grande porte*

Considerando que a bacia do rio Doce está inserida em sua quase totalidade nos domínios da Mata Atlântica (98%), tendo no extremo oeste uma pequena porção inserido no Cerrado (2%), e que o desastre afetou duas Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade, (DRUMMOND; MARTINS; MACHADO, 2005; BRASIL, 2007) denominadas Quadrilátero Ferrífero e Florestas da Borda Leste do Quadrilátero, além de ter atingido importantes UCs, que sabidamente abrigam populações de várias espécies de mamíferos ameaçados de extinção; o dano do desastre ambiental decorrente do rompimento da barragem de Fundão precisa ser adequadamente mensurado, de forma sistemática, ao longo da bacia.

De acordo com os levantamentos até então realizados, houve danos diretos e indiretos sobre os mamíferos terrestres de médio e grande porte. Mamíferos que ocupam ambientes aquáticos, ou mais associados aos recursos hídricos devido à sua biologia e comportamento, são presumivelmente os mais

afetados. Óbitos de indivíduos de espécies semiaquáticas, tais como *Lontra longicaudis* e *Hydrochoerus hydrochaeris*, foram frequentemente relatados, nos levantamentos realizados pelos órgãos ambientais, tanto em áreas próximas às UCs quanto em fragmentos florestais particulares. Relatórios isolados identificaram a morte de mamíferos, como *Tapirus terrestris*, espécie ameaçada na Mata Atlântica, considerada Criticamente Ameaçada em Minas Gerais (MACHADO et al., 2008) e Em Perigo no Espírito Santo (PASSAMANI; MENDES, 2007). Dados mais específicos são descritos a seguir, juntamente com os resultados apresentados por diferentes estudos pós-desastre.

No relatório do Grupo de Trabalho SEMAD/MG (MINAS GERAIS, 2016), consta-se que foi registrada, pelo Ibama, a mortalidade de espécimes de *Lontra longicaudis* e *Hydrochoerus hydrochaeris* no ápice da passagem dos rejeitos de minério de ferro, no dia 6 de novembro de 2015. Nesse relatório, cita-se ainda a possível interferência na dinâmica de metapopulações e o isolamento da fauna silvestre, além da contaminação de animais por metais pesados e outros poluentes oriundos dos rejeitos sem, contudo, citar a possível magnitude desses danos, ou mesmo as localidades ou regiões onde podem ser relevantes para as populações de mamíferos.

As UCs inseridas na paisagem afetada, notadamente os Parques Estaduais do Rio Doce (PERD) e Sete Salões, em Minas Gerais, e a Flona de Goytacazes e a Rebio de Comboios, no Espírito Santo, além de fragmentos florestais em propriedades particulares, têm sofrido diferentes danos decorrentes de atividades econômicas e do desenvolvimento urbano e rural ao longo do tempo, tais como a introdução de espécies exóticas, invasão de animais domésticos, poluição, sedimentação, incêndios florestais, caça, entre outros. Assim, dado o cenário de degradação da paisagem, o desastre tem atuado em sinergia com esses danos na bacia do rio Doce, potencializando os riscos que os mamíferos de médio e grande porte sofrem. Em Minas Gerais (2016), discute-se que houve interferência na dinâmica dos recursos hídricos, nos limites do Parque Estadual do Rio Doce e uma acentuação no processo de assoreamento na margem que faz divisa com o parque, comprometendo o substrato do rio e seu ambiente bentônico. Além disso, também foi registrada uma elevada mortandade de espécies da ictiofauna, da mastofauna (p.ex., capivaras) e, ainda, uma possível contaminação por metais pesados. Além disso, cabe ressaltar que o IEF elencou outros potenciais danos à mastofauna, nas regiões do PERD e do Parque Estadual Sete Salões, como a impossibilidade de dessedentação e travessia de animais silvestres entre a UC e os remanescentes florestais no seu entorno e o comprometimento da dinâmica de metapopulação de espécies, especialmente da fauna, que efetivamente cruza o rio Doce para garantir a viabilidade de suas populações, comprometendo processos estruturantes de colonização e extinção.

Além desses óbitos, deve-se considerar o dano direto sobre a biodiversidade dos rios e de suas áreas aluviais, principal fonte de recursos alimentares de vários mamíferos de médio e grande portes. A abrupta deterioração na qualidade da água interfere em todo o ambiente, acarretando problemas drásticos para a biota ao promover efeitos populacionais negativos que, no caso de médios e grandes mamíferos, podem ser de curto, médio ou longo prazos. A potencial bioacumulação de metais tóxicos, constatados nos laudos da qualidade da água no pós-desastre, comprometem as cadeias alimentares e os processos reprodutivos de várias espécies (ESPINDOLA et al., 2016). Segura et al. (2016) também relatam que bioensaios toxicológicos em amostras de solo e lama dos rejeitos indicam riscos potenciais de citotoxicidade. Além disso, apontam a potencial extinção de espécies tipicamente associadas ou

dependentes dos ambientes fluviais, além de alterações na cadeia trófica, o que inclui animais e plantas aquáticas, e terrestres. Tais processos podem gerar distúrbios desde a comunidade planctônica, invertebrados aquáticos, peixes, anfíbios, répteis e mamíferos, que dependem direta e indiretamente da qualidade das águas do mesmo.

No período de 2015 a 2017, não foram publicados artigos técnico-científicos que abordam o dano do desastre sobre a mastofauna de médio e grande portes. Os estudos disponibilizados nesse período focam no dano sobre a biodiversidade de uma maneira geral, com especial ênfase sobre organismos aquáticos (GOMES et al., 2017), mas tampouco abrangem monitoramentos sistemáticos de populações ou dos efeitos do desastre. Carmo et al. (2017) relatam a ausência de publicações, por parte da comunidade científica, que busquem quantificar efeitos em longo prazo nos principais componentes ecológicos e nas populações de espécies endêmicas da flora e fauna. Há alguns projetos de pesquisa sobre a mastofauna de médio e grande portes, especialmente, na região do Parque Estadual do Rio Doce, que estão sendo desenvolvidos desde 2015 (IEF, 2015, 2016, 2017). Os principais objetivos dos estudos são descrever o padrão de ocupação e o padrão de atividades das espécies, além do perfil sanitário de algumas espécies silvestres. No entanto, vale ressaltar que os objetivos das pesquisas são bem diferentes do monitoramento atual proposto. Além disso, a maioria dos projetos está em áreas distantes da região do desastre ou ainda não apresentam resultados disponíveis, portanto, não podem ser utilizados como citação ou comparação com dados gerados, até o momento.

Os estudos que foram publicados não abordam temas relacionados ao desastre, e tampouco se referem à região afetada, a bacia do rio Doce. Por exemplo, ao norte do rio Doce, onde está localizada a RPPN Recanto das Antas, a RPPN Mutum-Preto, a Reserva Natural Vale a Rebio de Sooretama, foram realizados levantamentos da mastofauna de médio e grande portes, que indicam que essa região abriga elevada riqueza. Essa região é considerada uma área não defaunada, onde ainda persistem grandes predadores de topo da cadeia alimentar, como *Panthera onca* e *Puma concolor*, e grandes herbívoros como *Tapirus terrestris* (SRBEK-ARAUJO; KIERULFF, 2016; GATTI et al., 2017); espécies com grande capacidade de deslocamento na paisagem. Exemplo desses deslocamentos é o caso de *T. terrestris*, na Rebio de Comboios, táxon que não contava com registros recentes até ser encontrada em 2012/2013 (GATTI, A., dados não publicados).

Embora anterior ao desastre, essa informação indica como essas espécies podem se deslocar por grandes distâncias, evidenciando a alta potencialidade de o dano atingir populações mesmo distantes dos ambientes diretamente afetados pelo desastre. Sem dúvidas, para mastofauna de médio e grande portes, a impossibilidade de deslocamento entre as áreas naturais protegidas e outras regiões – se efetivamente verificado esse efeito barreira – tem o potencial de alterar a dinâmica de metapopulações, especialmente das espécies que têm capacidade de cruzar o rio Doce para garantir a viabilidade de suas populações.

Vale ressaltar que, independentemente do grau de endemismo ou ameaça, todas as espécies são consideradas cruciais nas interações ecológicas da região, as quais podem ter sido alteradas pelo dano das atividades econômicas e do desenvolvimento urbano, mesmo que silenciosamente. Segundo Neves et al. (2016), o valor total das multas até então estipulado não equivale ao valor dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade perdidos. Valorar a perda de uma anta, por exemplo, uma espécie

ameaçada de extinção que presta diversos serviços ecossistêmicos, como a resiliência florestal por meio da dispersão de sementes, não é uma tarefa fácil, mas é um caminho fundamental para o entendimento da magnitude dos efeitos desse desastre. Os fatos apresentados anteriormente tornam o monitoramento atual ainda mais relevante, considerando, especialmente, a ausência de dados que demonstrem o dano sobre esse grupo faunístico, que é afetado de diferentes formas.

3.3.7 CETÁCEOS

Apesar de trazer importantes informações dos períodos pré e pós-desastre, a escassez de informações em ambos os períodos dificultaram uma análise mais aprofundada dos dados. Grande parte das questões ainda permanece em aberto por este motivo principal. Além disso, dados existentes que podem lançar luz sobre as questões ainda não estão disponíveis ou estão disponíveis, mas ainda se encontram em fase de triagem, processamento e análise. Nesses casos, procurou-se descrever o *status* e potencial do uso dos dados existentes e também as lacunas de informação.

3.3.7.1 Pós-desastre em comparação à linha-base

As informações apresentadas aqui foram organizadas a partir dos danos identificados e descritos na matriz de danos, sob a forma de cinco questões que se busca responder com dados primários e secundários no âmbito do diagnóstico.

Aumentou a concentração de metais pesados nos tecidos de cetáceos da região marinho-costeira adjacente à foz do rio Doce após o desastre?

As informações sobre dosagens de elementos traço nos tecidos de cetáceos do Brasil são escassas. Na costa do Estado do Espírito Santo também não existem informações sobre os níveis de contaminação em cetáceos disponíveis, que poderiam servir de linha-base ou para caracterizar o período pós-desastre. Dessa maneira, ainda é impossível responder a essa pergunta.

Entretanto, existem diferentes instituições que coletaram cetáceos mortos encalhados na costa do Espírito Santo no período anterior e posterior ao desastre. Entre essas instituições, está o Instituto Baleia Jubarte/BA e o Instituto Orca/ES, além de outras instituições executoras ou parceiras no Programa de Monitoramento de Praias (PMP) da Petrobras (ver próximo item).

Atualmente, encontra-se em andamento um projeto na qual um dos objetivos é comparar os níveis de contaminantes em toninhas (*Pontoporia blainvillei*) antes e depois do desastre de Mariana. Esse projeto é desenvolvido pelo Laboratório de Mamíferos Aquáticos e Bioindicadores (MAQUA) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e financiado pelo Fundo Brasileiro para a Biodiversidade (Funbio).

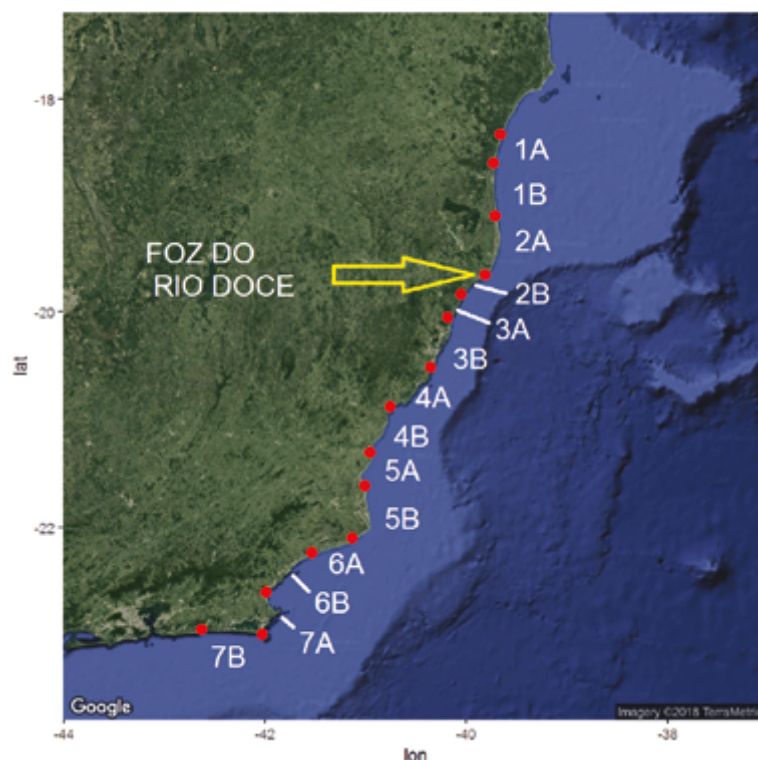
Também se encontra em avaliação pela equipe dos Institutos Lactec se existe viabilidade da dosagem de contaminantes nas camadas de crescimento de dentes de cetáceos encalhados na região da foz do rio Doce. A análise das camadas de deposição dos dentes pode ser usada para descrever uma série cronológica dos níveis de contaminação por diferentes elementos-traço. Para isso, usa-se a combinação de duas técnicas: ablação por laser e espectrometria de massa e plasma (BOTTA, 2011). A utilização da técnica de ablação por laser é ainda incipiente em cetáceos, mas pode fornecer importantes

informações sobre o histórico dos níveis de contaminação em cetáceos e na comparação dos períodos antes e depois do desastre.

Houve aumento de mortalidade ou diminuição da fertilidade de cetáceos após o desastre?

Os dados disponíveis para responder se houve aumento da mortalidade, que reflete um dos potenciais efeitos a nível populacional dos cetáceos do desastre de Mariana, são provenientes do PMP (Bacia de Campos e Espírito Santo) realizado por diferentes empresas a serviço da Petrobras. Esse programa é uma das condicionantes impostas pelo Ibama para realização de atividades de exploração e produção de petróleo e gás nos estados do ES e RJ. Esse monitoramento periódico visa registrar as carcaças de cetáceos (e outros animais como aves e quelônios) encalhadas na costa. Os dados utilizados aqui foram coletados de outubro de 2010 a setembro de 2016 na região costeira monitorada, que foi dividida em regiões conforme a Figura 178 (SCITECH, 2017).

Figura 178 – Região de abrangência do Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo (PMP-BC/ES), com 14 divisões geográficas estabelecidas pelo referido programa.



Fonte: Modificado de Scitech (2017).

Foram selecionados dados sobre as duas espécies mais frequentes registradas no monitoramento de praias, o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e a toninha (*Pontoporia blainvillei*), com um total de 499 e 153 carcaças registradas, respectivamente. Foi feita uma análise exploratória e modelagem estatística com todos os dados do PMP-BC/ES, abrangendo a costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro. Essa análise visou descrever alguns padrões gerais espaço-temporais na frequência de encalhes de cetáceos. A região monitorada pelo PMP é coerente com os objetivos desse diagnóstico, abrangendo a extensão marinha afetada pela pluma de sedimentos do rio Doce. A pluma de sedimentos espalhou-se

por uma área grande, atingindo regiões ao norte da foz, mas se estendendo principalmente para o sul, para além do Cabo Frio/RJ (MARTA-ALMEIDA et al., no prelo).

Os dados do PMP-BC/ES mostram uma grande variabilidade espacial e temporal na ocorrência de encalhes para as duas espécies (Figura 179 e Figura 180). Para avaliação de potenciais efeitos do desastre de Marina, um aumento abrupto do número de encalhes de 2015 para 2016 pode indicar uma mortalidade elevada causada por este. De especial interesse são as regiões 2A e 2B, por estarem imediatamente ao sul e ao norte da foz do rio Doce, mas não se pode descartar que uma potencial mortalidade seja verificada em uma região mais ampla por conta de processos como a deriva das carcaças e a dispersão da pluma de sedimentos provenientes do rio Doce.

Na região 2A foi observado um aumento do número de toninhas encalhadas entre 2015 e 2016 de 2 para 8 animais, ou seja, um incremento de 300%. Entretanto, foi observada nessa região uma tendência de crescimento ao longo de todo o período analisado e oscilações dessa ordem de magnitude nos anos anteriores. A oscilação dos encalhes da toninha na região 2A foram similares às observadas na área 1B. Para os botos-cinza, não ficou evidente nenhum evento de mortalidade elevada nas regiões 2A e 2B, adjacentes à foz do rio Doce. Ressalta-se, porém, que houve um evento de mortalidade dessa espécie sem precedentes entre 2015 e 2016 na região 1B, com incremento de 13 para 35 animais encalhados (aumento de quase 170%). A cronologia dessa mortalidade é coerente com o evento sendo um efeito do desastre de Mariana, mas não é possível chegar a alguma conclusão sem uma análise mais aprofundada deste e de outros dados (como exames de necropsia dessas carcaças e níveis de contaminantes nos cetáceos).

Figura 179 – Tendência anual no número de encalhes do boto-cinza (*Sotalia guianensis*) por região monitorada durante o PMP-BC/ES.

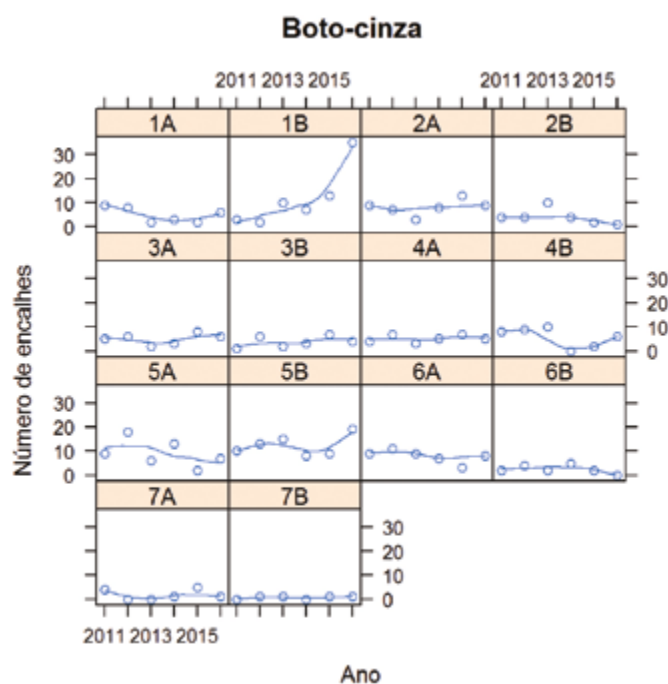
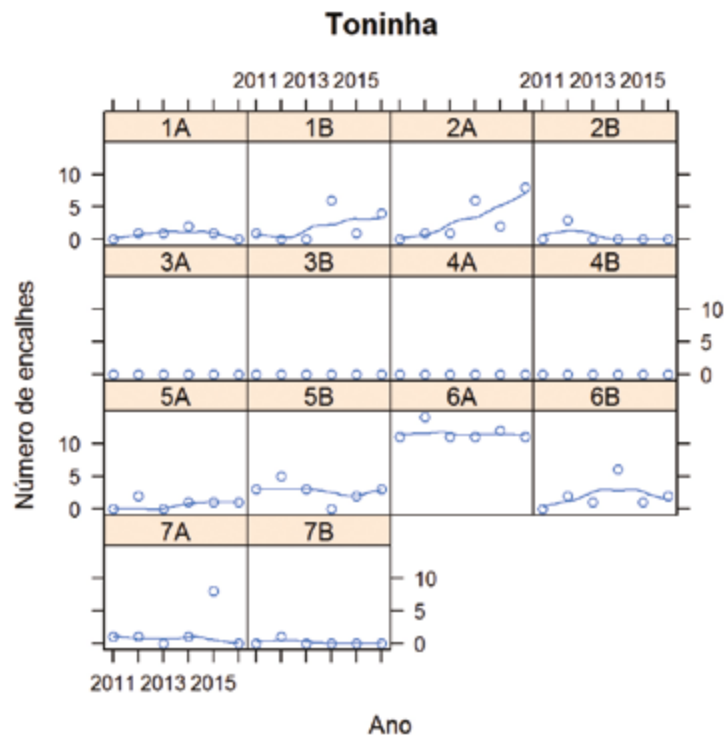


Figura 180 – Tendência anual no número de encalhes da toninha (*Pontoporia blainvillei*) por região monitorada durante o PMP-BC/ES.



Para a modelagem estatística foram usados modelos generalizados lineares – GLM (MCCULLAGH; NELDER, 1989), que permitem verificar quais variáveis explicativas interferem em uma determinada variável resposta, que, nesse caso, foi definida como o número de encalhes por ano em cada região geográfica do monitoramento. O número de encalhes foi corrigido pela extensão do trecho costeiro monitorado (em km e transformado pelo logaritmo natural) através da inclusão de um termo “offset” no modelo. A distribuição dos erros utilizada foi a Poisson e as análises foram realizadas usando o programa R (R CORE TEAM, 2016). Foram gerados dois conjuntos de modelos, um para cada espécie (boto-cinza e toninha).

Os modelos considerados foram construídos usando diferentes combinações de variáveis explanatórias. Esses modelos correspondem a diferentes hipóteses para os dados e uma das principais etapas da análise consiste em selecionar o melhor modelo, que melhor se ajustou aos dados e, portanto, corresponde à hipótese mais plausível para representar a realidade descrita pelos dados. Para selecionar o melhor modelo, foi usado o Critério de Informação de Akaike corrigido para pequenas amostras (AICc), que encapsula em um único valor a bondade de ajuste dos modelos aos dados, penalizada pelo número de parâmetros do modelo (BURNHAM; ANDERSON, 2002). Ou seja, busca-se o modelo que melhor explica os dados com o menor número de parâmetros (princípio da parcimônia). O melhor modelo é aquele que tem o menor valor de AICc. O delta AICc mede a diferença do AICc do modelo em relação ao AICc do melhor modelo (que tem delta AICc igual a zero). Convenciona-se que todos os modelos com delta AICc menor que dois são considerados modelos plausíveis e válidos.

Para o boto-cinza, apesar de ser o modelo com maior número de parâmetros entre os modelos considerados, o melhor modelo considerou o número de encalhes da espécie variando em função das

regiões geográficas e ao longo dos anos (Tabela 54). Esse modelo considera que cada região geográfica apresentou uma tendência própria de crescimento ou declínio de encalhes ao longo do período de seis anos monitorados. Os termos do modelo ressaltam a tendência distinta da área 1B, que apresentou um crescimento abrupto do número de encalhes da espécie após o desastre (de 2015 para 2016). Os gráficos diagnósticos apontam para um bom ajuste do modelo aos dados.

Tabela 54 – Modelos generalizados lineares (GLM) considerados para explicar a variação do número de encalhes do boto-cinza na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro entre 2010 e 2016.

Variáveis do modelo	Número de parâmetros	AICc	delta AICc
Ano (tendência) * Área	28	458.4	0.00
Área	14	475.1	16.67
Ano (tendência) + Área	15	476.7	18.34
Ano (fator)	19	476.9	18.50
Ano (fator)	6	743.7	285.36
Ano (tendência)	2	747.5	289.08
Nulo	0	6697.1	6238.67

Nota: * interação entre as variáveis; + efeito aditivo entre as variáveis.

Para a toninha, o melhor modelo entre o conjunto de modelos considerados teve uma tendência anual de crescimento do número de encalhes comuns, mas com magnitudes diferentes (Tabela 55). Os coeficientes estimados do modelo ressaltam o maior número de encalhes observado na região 6A. O modelo que considerou o número de encalhes em função somente da região geográfica também foi considerado plausível (delta AICc menor que 2). Vale ressaltar que os gráficos diagnósticos do melhor modelo mostram que o ajuste do modelo não foi bom, o que se deve, provavelmente, à menor quantidade de dados para essa espécie. Do total de amostras (cada região geográfica em cada ano), quase 54% não apresentaram registros da toninha. Essa inflação de zeros pode ser problemática para as estimativas de parâmetros do modelo (ZUUR; IENO; SMITH, 2007).

Tabela 55 – Modelos generalizados lineares (GLM) considerados para explicar a variação do número de encalhes da toninha na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro entre 2010 e 2016.

Variáveis do modelo	Número de parâmetros	AICc	delta AICc
Ano (tendência) + Área	15	240.7	0.00
Área	14	240.8	0.19
Ano (fator) + Área	19	245.9	5.21
Ano (tendência) * Área	28	268.5	27.83
Ano (tendência)	2	556.6	315.98
Ano (fator)	6	558.0	317.32
Nulo	0	8372.6	8131.99

Nota: * interação entre as variáveis; + efeito aditivo entre as variáveis.

Em resumo, foi possível detectar um aumento da mortalidade de botos-cinza e toninhas em regiões adjacentes (2A) ou próximas (1B) da foz do rio Doce. Essas duas espécies são provavelmente os cetáceos mais suscetíveis aos danos do desastre de Mariana, por dependerem de habitats costeiros

para a sua sobrevivência e por serem residentes desses habitats, muitas vezes permanecendo durante todo o ano na mesma região (ROSSI-SANTOS; WEDEKIN; SOUSA-LIMA, 2006; ROSSI-SANTOS; WEDEKIN; MONTEIRO-FILHO, 2007; DANILEWICZ et al., 2009). A avaliação dos dados disponíveis sobre a saúde desses animais (coletados durante exames pós-morte) e a dosagem dos níveis de contaminantes pode confirmar se o aumento da mortalidade observado foi decorrente do desastre de Mariana.

Com relação à fertilidade, não existem dados do período pré-desastre que possam identificar se houve diminuição da produção de filhotes pelas fêmeas de cetáceos na região afetada. Com o monitoramento das populações residentes de cetáceos, como o boto-cinza, existe o potencial de geração de informações sobre fertilidade ao longo do tempo e associação desses dados com os níveis de contaminação da população.

Houve diminuição da saúde e/ou condição corporal de cetáceos após o desastre?

No momento ainda não é possível responder a essa pergunta. Entretanto, espera-se obter dados do PMP-BC/ES (Petrobras) sobre os exames pós-morte dos cetáceos encalhados na região que possam fornecer dados biométricos, da provável causa de morte e outras informações sobre a saúde dos animais encontrados mortos nas praias da região.

Já se encontra disponível um grande volume de fotografias de cetáceos obtidas durante o monitoramento do Terminal Aquaviário de Barra do Riacho (TABR), da Petrobras. Os dados consistem em sua maioria de fotografias de botos-cinza observados entre Barra do Riacho e a foz do rio Doce em um período pré-desastre, totalizando 8,47 GB de arquivos. A triagem e análise desses dados, buscando informações sobre a saúde dos botos-cinza, será iniciada em março de 2018. Posteriormente, a prevalência de doenças e lesões de pele na espécie será comparada com dados pós-desastre. A ocorrência e prevalência de doenças e lesões na pele de cetáceos também pode ser monitorada ao longo do tempo em conjunto com o nível de contaminação nos tecidos dos cetáceos, fornecendo importantes informações sobre a associação da contaminação com problemas de saúde dos cetáceos.

Houve diminuição da oferta e/ou da qualidade das presas de cetáceos após o desastre?

As dietas do boto-cinza e da toninha já foram descritas para a costa do Espírito Santo, incluindo informações relevantes obtidas na região da foz do rio Doce (RODRIGUES, 2014; RUPIL, 2016). Está em fase de negociação junto ao Instituto Baleia Jubarte a obtenção de conteúdos estomacais de cetáceos coletados no período pós-desastre para comparação com as informações obtidas no período pré-desastre. Assim, será possível comparar se houve mudança na dieta da espécie depois do desastre, o que poderia indicar um dano sobre as suas presas. Os otólitos de peixes obtidos nos conteúdos estomacais também devem servir para a obtenção de históricos de contaminação pela análise das diferentes camadas de deposição, usando a mesma técnica dos dentes de cetáceos citada anteriormente (ablação a laser e espectrometria de massa e plasma).

Houve redução da qualidade/degradação dos habitats de cetáceos após o desastre?

Uma das possíveis respostas dos cetáceos às alterações em seus *habitats*, como o aumento da turbidez após o desastre de Mariana (IGAM, 2015), é o deslocamento para outras áreas não afetadas

ou com habitats de melhor qualidade. Ou seja, uma resposta esperada da redução da qualidade ou degradação do *habitat* seria a evasão dos cetáceos das regiões mais próximas da foz do rio Doce.

Estudos pretéritos demonstraram que os botos-cinza e as toninhas usavam as regiões adjacentes à foz do rio Doce regularmente no período pré-desastre, com destaque para a presença constante de grupos de botos-cinza (CEPILE, 2008; DANILEWICZ et al., 2012; PINHEIRO, 2014). Além disso, a região da foz do rio Doce é reconhecida como área de concentração de avistagens do boto-cinza, que aparentemente ocorrem no Banco dos Abrolhos em maiores densidades na proximidade da boca de rios e estuários (ROSSI-SANTOS; WEDEKIN; SOUSA-LIMA, 2006). Não existem informações do período mais crítico que sucedeu a chegada da pluma de sedimentos ao mar. Mais recentemente, levantamentos preliminares realizados pela equipe dos Institutos Lactec na região, em dezembro de 2017 e fevereiro de 2018, apontam para um padrão coerente com o período pré-desastre, com a observação da toninha e diversos grupos de botos-cinza, inclusive grupos contendo filhotes, na região próxima à foz do rio Doce.

Assim, não se sabe se houve abandono temporário da região por parte da população. Caso tenha havido, aparentemente os animais voltaram a usar a região da foz do rio Doce. Dessa maneira, é possível concluir que, mesmo com as alterações em diferentes parâmetros oceanográficos verificados após o desastre, dois anos depois os animais ainda continuam na região ou abandonaram temporariamente, retornando em um período mais recente. Isso se constitui em evidências robustas, junto com outros estudos pretéritos citados anteriormente, de que a região da foz do rio Doce e adjacências abrange *habitats* críticos para pelo menos duas espécies de cetáceos ameaçadas de extinção, incluindo uma criticamente ameaçada (toninha). Em qualquer hipótese, os animais foram expostos à pluma de rejeitos de mineração provenientes do desastre em Mariana/MG.

3.3.7.2 Considerações finais

Tal como verificado em outros grupos da fauna terrestre, os mamíferos ainda não foram contemplados por estudos locais e específicos após a ocorrência do desastre. Em virtude de trâmites burocráticos ainda em curso, ainda não foi possível iniciar os estudos de monitoramento em campo dos grupos que requerem métodos de captura em seu estudo. Tendo em vista a ausência de pesquisas sobre a fauna terrestre no pós-desastre, os dados a serem obtidos no esforço deste diagnóstico são de fundamental relevância para avaliar os reais efeitos e danos causados pelo desastre. Por outro lado, o estudo dos cetáceos já pôde ser iniciado pela presente equipe e, ademais, conta-se com dados contínuos de amostragens padronizadas de carcaças no âmbito de outro programa ambiental em curso. Estas informações são fundamentais para construir um diagnóstico atual e detalhado dos danos que acometeram esse grupo da fauna.

3.3.8 CONSIDERAÇÕES CONSOLIDADAS À FAUNA

Com base nos resultados obtidos nas pesquisas de todos os grupos, o padrão que se destaca é a virtual ausência de estudos técnicos e acadêmicos levados a efeito na bacia do rio Doce. Poucos estudos quali-quantitativos foram realizados na região, e apenas um documento de cunho técnico que alude especificamente aos danos do desastre (JUNCÁ et al., 2017) tornou-se disponível. Laudos e notas

de órgãos oficiais se utilizaram de informações obtidas anteriormente ao desastre na tentativa de elaborar previsões acerca dos potenciais danos causados pelo derramamento de rejeitos. No entanto, estudos técnicos específicos para diagnosticar, quantificar e especializar os danos ainda não foram realizados. Esse cenário enaltece a importância de iniciar-se, o quanto antes, os monitoramentos da fauna silvestre *in situ*, de modo a obterem-se dados recentes e diretos sobre as condições locais da fauna ao longo do rio Doce.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Nota Técnica n.º 323/SOC/2005**. Documento nº 13836, de 11 de agosto de 2005. “Reserva de disponibilidade hídrica para o aproveitamento hidrelétrico de Baguari”. 2005.
- _____. **Nota Técnica n.º 2006/2007/GEREG/SOF-ANA**. Documento nº 11582, de 31 de maio de 2007. “Reserva de disponibilidade hídrica para o aproveitamento hidrelétrico Mascarenhas”. 2007.
- AGROFLOR ENGENHARIA E MEIO AMBIENTE. **Estudo de Dano Ambiental**: sondagem geotécnica Mirandinha Samarco Mineração S.A., 2013.
- _____. **Relatório para atendimento ao auto de fiscalização prospecção espeleológica**: alteamento da barragem de Santarém Mina do Germano. 2013.
- _____. **Estudo de Dano Ambiental**: sistema de disposição de rejeitos Mirandinha. Samarco Mineração S.A., 2014. 1 v.
- _____. **Estudo de Dano Ambiental**: ampliação das minas de Alegria Norte e Sul. Volume I. Samarco Mineração S.A., 2015.
- ALKMIM F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Cráton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, n. 90, p. 29-58, 1998.
- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Orgs.). **Química e mineralogia do solo**. Parte II – Aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 69-129.
- ALMEIDA, S. B.; CARVALHO, N. O. Efeitos do assoreamento de reservatórios na geração de energia elétrica: análise da UHE Mascarenhas, ES. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993, Gramado. **Anais...** Gramado, 1993.
- AMORIM, L. Q., ALKMIM, F. F. New ore types from the Cauê banded iron-formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – Responses to the growing demand. In: IRON ORE CONFERENCE, 2011. Perth, WA. p. 1-14.
- AMPLO ENGENHARIA E GESTÃO DE PROJETOS LTDA. Engenharia e Gestão de Projetos Ltda. **Relatório de Dano Ambiental - RIMA - EIA Integrado do Complexo do Germano**. 2017.
- ANDRADE, L. C. R. de. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. 96 p.
- ANNANDALE, G. W.; MORRIS, G. L.; KARKI, P. **Extending the life of Reservoirs, Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hidropower**, 2016. P. 89-91.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ARAUJO-VIEIRA, K., LACERDA, J. V.; PEZZUTI, T. L.; LEITE, F. S.; DE ASSIS, C. L.; CRUZ, C. A. A new species of Hatchet-faced Treefrog *Sphaenorhynchus Tschudi* (Anura: Hylidae) from Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, southeastern Brazil. **Zootaxa**, v. 4059, n. 1, p. 96-114, 2015.
- ARIMORO, F. O. Colonization and invertebrate succession on mammalian carcasses in Ethiopie River, Niger Delta, Nigeria. **Applied Science Research Journal**, v. 1 (1). p. 7-21, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508**: grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 14.656**: cimento Portland e matérias-primas: análise química por espectrometria de raios X: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. **NBR 10.004**: classificação de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10.007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2014.

- _____. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7181**: Solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 9604**: abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas: procedimentos. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 9813**: solo: determinação da massa específica aparente in situ, com emprego do cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016.
- ASTM INTERNATIONAL. **D1889-00**: Standard test method for turbidity of water. ASTM International-Annual Book of ASTM Standards. [S.l.]: ASTM, 2003. (Water environmental technology, v. 11.01).
- BAÊTA, D.; ASSIS, B.; BERMARDO, P. H.; SÃO-PEDRO, V. A.; DRUMMOND, L. O.; PIRES, M. R. S. Geographic distribution: anura: *Physalaemus maximus*. **Herpetological Review**, v. 36, n. 2, p. 200, 2005.
- BAÊTA, D.; CARAMASCHI, U.; CRUZ, C. A. G.; POMBAL, J. P. *Phyllomedusa itacolomi* Caramaschi, Cruz & Feio, 2006, a junior synonym of *Phyllomedusa ayeaye* (B. Lutz, 1966) (Hylidae, Phyllomedusinae). **Zootaxa**, v. 2226, p. 58-65, 2009.
- BAÊTA, D.; SILVA, D. H. Amphibia, Anura, Leiuperidae, *Physalaemus erythros* Caramaschi, Feio and Guimarães-Neto, 2003: Distribution extension. **Check List**, v. 5, n. 4, p. 81-814, 2009.
- BALESTRIN, R. L. **História natural de uma taxocenose de Squamata e redescoberta de uma espécie de anuro no Escudo Sul-riograndense, Brasil**. 2008. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Zoologia, Faculdade de Biociências, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- BARBOSA, A. MACHADO, M., DRUMMOND, G. M., PAGLIA, A. P. Livro Vermelho Da Fauna Brasileira Ameaçada De Extinção. - 1ed. - Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: Fundação Biodiversitas, 2008. 2v. (1420 p.): il. - (Biodiversidade; 19).
- BARBOSA, F. et al. O desastre de Mariana e suas consequências sociais, econômicas, políticas e ambientais: Porque evoluir da abordagem de Gestão de dos recursos naturais para a Governança dos recursos naturais? **Arquivos de Museu de História Natural e Jardim Botânico – UFMG**. Belo Horizonte, v. 24, n. 1, p. 159-182, 2015.
- BARROS, L. C.; SANTOS, U.; ZANUNCIO, J. C.; DERGAM, J. A. *Plagioscion squamosissimus* (Sciaenidae) and *Parachromis managuensis* (Cichlidae): a threat to native fishes of the Doce River in Minas Gerais, Brazil. **PloS one**, 7(6), e39138, 2012.
- BASTOS, L. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como matéria prima para infraestrutura rodoviária**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- BATISTA, J. O.; COSTA, E. C. P.; DOS SANTOS, D. H.; DE SANT'ANA FILHO, J. N.; BASTOS, L. A. C.; FONTES, W. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. F. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na construção civil**. Relatório Técnico. Ouro Preto-MG, 2016.
- BENJAMIN, J. R.; CORNELL, C. A. Probability, statistics, and decision for civil engineers. McGraw-Hill, 1970.
- BÉRNILS, R. S.; ALMEIDA, A. P.; GASPARINI, J. L., SRBEK-ARAUJO, A. L.; ROCHA, C. F. D.; RODRIGUES, M. T. Répteis na Reserva Natural Vale, Linhares, Espírito Santo, Brasil. **Ciência e Ambiente**, v. 49, p. 193-210, 2014.
- BIANCHINI, A. **Avaliação do dano da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas unidades de conservação**: 1ª expedição do navio de pesquisa Soloncy Moura do CEPISUL/ICMBio. Brasília, DF: ICMBio, 2016.
- BIODIVERSITAS. (2007). Revisão das listas das espécies da flora e da fauna ameaçadas de extinção do estado de Minas Gerais. Vol. 2. Fundação Biodiversitas, Belo Horizonte. Pp. 37-104. Disponível em <<http://www.biodiversitas.org.br/listas-mg>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

- BONVICINO, C. R.; OLIVEIRA, J. A.; D'ANDREA, P. S. **Guia dos roedores do Brasil com chaves para gêneros baseadas em caracteres externos**. Rio de Janeiro: Centro Pan-Americano de Febre Aftosa-OPAS/OMS, 2008.
- BONVICINO, C.R.; OLIVEIRA, J.A.; D'ANDREA, P.S. Guia dos Roedores do Brasil com chaves para gêneros baseadas em caracteres externos. Rio de Janeiro: Centro Pan-Americano de Febre Aftosa-OPAS/OMS, 2008.
- 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. R.; RAWLINS, B.; MATSCHULLAT, J. Arsenic in water and sediment in the Iron Quadrangle, State of Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 558-561, 2000.
- BOTTA, S. **Uso de habitat e identificação de unidades populacionais de pequenos cetáceos do Atlântico Sul-Occidental através de isótopos estáveis e elementos traço**. 2011. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2011.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 647 p.
- BRAGA, C. A. C.; DRUMMOND, L. O.; PIRES, M. R. S. 2016. Inventário de pequenos mamíferos (Rodentia e Didelphimorphia) da Serra de Ouro Branco: porção sul da cadeia do espinhaço, Minas Gerais, Brasil. **Oecologia Australis**, v. 20, n. 1, p. 69-80, 2016.
- BRANDT MEIO AMBIENTE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS LTDA. **EIA Instalação e Operação da Linha 02 de Mineradouro**. 2004.
- _____. **EIA Barragem de Rejeito do Fundão**. 2005.
- _____. **Estudo de impacto ambiental barragem de rejeito de Fundão**. Belo Horizonte: Brandt, 2005.
- _____. **EIA mina de Alegria A,B,C: ampliação da pilha de estéril João Manoel**. 2006.
- _____. **EIA - terceiro concentrador de Germano, adutora e linha de transmissão**: Ouro Preto, Mariana, Catas Altas e Santa Bárbara. Samarco Mineração S.A., 2009.
- BRASIL. 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.
- _____. MINISTRY OF THE ENVIRONMENT (MMA). **Priority areas for the conservation, sustainable use and benefit sharing of Brazilian biological diversity**. Brasília, DF: MMA, 2007.
- _____. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez. 2009.
- _____. 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.
- _____. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Portaria nº 444, de 17 de dezembro de 2014. **Diário Oficial da União**, Seção 1, n. 245, p. 121-130, 18 dez. 2014.
- BRUNE, G. M. Trap efficiency of reservoirs. **American Geophysical Union**, v. 34, n. 3, p. 407-418, 1953.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. **Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach**. 2nd edition. New York: Springer-Verlag, 2002.
- CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT (CCME). **Sediment quality guidelines for the protection of aquatic life**. Summary Tables. Canadian Council of Ministers of the Environment, 2002.

- CANATTO, B. F. **Caracterização geoquímica dos sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- CANEDO, C.; PIMENTA, B. V. S.; LEITE, F. S. F.; CARAMASCHI, U. New Species of *Ischnocnema* (Anura: Brachycephalidae) from the State of Minas Gerais, Southeastern Brazil, with Comments on the *I. verrucosa* Species Series. **Copeia**, n. 4, p. 629-634, 2010.
- CANELAS, M. A. S.; BERTOLUCI, J. Anurans of the Serra do Caraça, southeastern Brazil: species composition and phenological patterns of calling activity. **Iheringia, Sér. Zool.**, Porto Alegre, v. 97, n. 1, p. 21-26, 2007.
- CARAMASCHI, U.; R. N. FEIO, R. N.; GUIMARÃES NETO, A. S. A new, brightly colored species of *Physalaemus* (Anura: Leptodactylidae) from Minas Gerais, Southeastern Brazil. **Herpetologica**, v. 59, n. 4, p. 521-526, 2003.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T. et al. Fundão tailings dam failures: The environment tragedy of the largest technological disaster of brazilian mining in global contest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 3, p. 145-151, 2017.
- CARSTE. **Topografia de cavidades e abrigos**: alteamento Barragem Santarém. 2013. Relatório Interno.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CASSINI, C. S.; CRUZ, C. A. G.; CARAMASCHI, U. Taxonomic review of *Physalaemus olfersii* (Lichtenstein & Martens, 1856) with revalidation of *Physalaemus lateristriga* (Steindachner, 1864) and description of two new related species (Anura: Leiuperidae). **Zootaxa**, n. 2491, p. 1-33, 2010.
- CENTRO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGIA PROFESSOR PARIGOT DE SOUZA (CEHPAR). **Projeto HG-161**: estudos e desenvolvimento de metodologia de avaliação de assoreamento e trincas em barragens de concreto, com instrumentação de leitura remota. Projeto P&D Aneel. Curitiba: Institutos Lactec, 2001.
- CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNA (CECAV). **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE)**. Disponível em: < <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- CEPILE, A. **Estimativa populacional por marcação-recaptura e padrões de atividade do boto cinza, Sotalia guianensis (Cetacea, Delphinidae) em Regência, ES**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.
- CH2M. **Anexo I**: relatório das atividades de campo para aplicação do plano de manejo no trecho 08. São Paulo: CH2M, 2017.
- _____. **Volume 1**: aplicação do plano de manejo de rejeito no trecho 8. São Paulo: CH2M, 2017.
- CHERUBIN, M. R. et al. Dimensão da malha amostra para caracterização espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisas Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.
- CLEARY GOTTLIEB STEEN & HAMILTON LLP (CGSH). **Relatório sobre as causas imediatas da ruptura da barragem de Fundão**. Comitê de Especialistas para Análise da Ruptura da Barragem de Rejeitos de Fundão, 2016.
- COELHO, A. L. N. **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-Baixo Rio Doce / ES**. Tese Apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal Fluminense: Niterói, 2007. 227 p.
- _____. Bacia Hidrográfica do Rio Doce (MG/ES): Geomorfologia Fluvial de Rios Impactados por Barragens. **Caminhos da Geografia**, v. 9 n. 26. Pág. 16-32, 16 p. Uberlândia, jun/2008.
- _____. Bacia Hidrográfica do Rio Doce (MG/ES): Uma Análise Socioambiental Integrada. **Geografares**, nº 7. Pág. 131-146, 16 p. Vitória: 2009.
- COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). **Main Brazilian Dams III**. Comitê Brasileiro de Barragens, 2009.

- COMITÊ INTERFEDERATIVO (CIF). **Relatórios mensais e anuais da Fundação Renova**. Processo nº 02001.000974/2017-65, mar./2016 a out./2017. Ibama: 2017. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cif/relatorios>>. Acesso em: 22 jan. 2018.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Mapeamento do supergrupo Rio das Velhas na região do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:25.000**. Belo Horizonte: 1994.
- CONSÓRCIO UHE BAGUARI. **RE-PCA-BAG-027**: aproveitamento hidrelétrico de Baguari, plano de controle ambiental, relatório de atendimento da condicionante 6.4, 2006.
- CORDEIRO, L. C. A. **Caracterização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro em faixas ultrafinas antes e após tratamento térmico**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.
- CORTEZ, J. R. **Desempenho de modelos numéricos em estudos de assoreamento de reservatórios: caso UHE Aimorés**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- 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. 2001. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.
- _____. **Registro histórico de contaminação de metais pesados associados à exploração aurífera na bacia do Ribeirão do Carmo**: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.
- COSTA, H. C.; BÉRNILS, R. S. Répteis brasileiros: lista de espécies 2015. *Herpetologia Brasileira*, v. 4, n. 3, 2015.
- COSTA, H. C.; FERNANDES, V. D.; VRCIBRADIC, D.; FEIO, R. N. Reptilia, Scincidae, Mabuya frenata: Distribution extension. **Check List**, v. 4, n. 1, p. 86-88, 2008.
- COSTA, H. C.; REZENDE, D. T.; MOLINA, F. B.; NASCIMENTO, L. B.; LEITE, F. S. F.; FERNANDES, A. P. B. New Distribution Records and Potentially Suitable Areas for the Threatened Snake-Necked Turtle *Hydromedusa maximiliani* (Testudines: Chelidae). **Chelonian Conservation and Biology**, v. 14, n. 1, p. 88-94, 2015.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Monitoramento especial da bacia do rio Doce**. Relatório 01: acompanhamento da onda de cheia. Belo Horizonte, 2015.
- _____. **Monitoramento especial da bacia do rio Doce**. Relatório 02: geoquímica. Segunda Campanha de Campanha de Campo: 12 a 23 de novembro de 2015. Belo Horizonte, 2015.
- _____. **Monitoramento especial da bacia do rio Doce**. Relatório 03: monitoramento simultâneo ao longo de 15 dias. Belo Horizonte, 2016a.
- _____. **Monitoramento especial da bacia do rio Doce**. Relatório 04: hidrometria, sedimentometria e qualidade da água nas estações fluviométricas da RHN após a ruptura da barragem de rejeito. Belo Horizonte, 2016b.
- CRUZ, G. S.; DOMINGUES, A. L.; Áreas impactadas na sub bacia do rio Gualaxo do Norte: Rompimento da barragem de Fundão, MG. **Disciplinarum Scientia**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 277-286, 2017.
- CURCIO, F. F.; NUNES, P. M. S.; ARGOLLO, A. J. S.; SKUK, G.; RODRIGUES, M. T. Taxonomy of the South American Dwarf Boas of the genus *Tropidophis* Bibron, 1840, with the description of two new species from the Atlantic Forest (Serpentes: Tropidophiidae). **Herpetological Monographs**, v. 26, n. 1, p. 80-121, 2012.
- DANILEWICZ, D.; SECCHI, E. R.; OTT, P. H.; MORENO, I. B.; BASSOI, M.; BORGES-MARTINS, M. Habitat use patterns of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvillei*) off southern Brazil in relation to water depth. **Journal of the Marine Biological Association of the U.K.**, v. 89, n. 5, p. 943-949, 2009.

- DANILEWICZ, D.; ZERBINI, A. N.; ANDRIOLO, A.; SECCHI, E. R.; SUCUNZA, F.; FERREIRA, E.; DENUNCIO, P.; FLORES, P. A. C. **Abundance and distribution of an isolated population of franciscana dolphins (*Pontoporia blainvillei*) in southeastern Brazil: red alert for FMA I?** In: Annual report of the International Whaling Commission, 2012.
- DARU, R. L.; SILVA, É. D. B.; KAN, A.; GIBERTONI, R. F. C. Simulação hidrodinâmica 3D de enchimento do reservatório da usina hidroelétrica de Mauá. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió, 2011.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Guia do minerador**. Disponível em: <http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Guia/Guia_2.htm>. Acesso em: 21 jan. 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Sistema de Informações Geográficas da Mineração**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assuntos/ao-minerador/sigmine>>. Acesso em: 21 jan. 2018.
- DI-BERNARDO, M. et al. Taxocenoses de serpentes de regiões temperadas do Brasil. In: NASCIMENTO L. B.; BERNARDES A. T.; COTTA G. A. (Eds). **Herpetologia no Brasil 2**. Belo Horizonte: PUCMG, 2007.
- DIXON, J. R. Taxonomic status of the South American snakes *Liophis miliaris*, *L. amazonicus*, *L. chrysostomus*, *L. mossoroensis* and *L. purpurans* (Colubridae: Serpentes). **Copeia**, v. 1983, n. 2, p. 791-802, 1983.
- DORR, J. V. N. The Cauê Itabirite. **SBG, Bol. Soc. Bras. Geoc.**, v. 7, p. 61-62, 1958.
- DORR, J. V. N. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. **Geological Survey Professional Paper**, 641-A. U.S. Geological Survey. p. 1-110, 1969.
- DRUMMOND, G. M.; MARTINS, C. S.; MACHADO, A. M. et al. **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2005.
- DUFRÊNE, M.; LEGENDRE, P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. **Ecological monographs**, v. 67, n. 3, p. 345-366, 1997.
- ECONSERVATION. Análise estatística dos dados do programa de monitoramento da comunidade do zoobentos do rio Doce. 2016.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006.
- _____. **Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: apoio ao plano de recuperação agropecuária**. Dezembro de 2015.
- EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (EMATER). **Perdas na área rural atingida pelo rompimento da barragem do Fundão em Mariana – MG**. Minas Gerais: EMATER, 2016.
- ENGENHARIA CF. **Batimetria e aerolevanteamento com VANT LAGO UHE Risoleta Neves**. Engenharia CF, Nov 2015.
- _____. **Batimetria e aerolevanteamento com VANT LAGO UHE Risoleta Neves**. Engenharia CF, Dez 2016a.
- _____. **Batimetria e aerolevanteamento com VANT LAGO UHE Risoleta Neves**. Engenharia CF, Mai 2016b.
- ENGEVIX. **UHE Mascarenhas: estudos de assoreamento do reservatório**. Engevix, 1997.
- ENVIRONMENTAL RESOURCES MANAGEMENT (ERM). **Relatório consolidado de informações técnicas sobre a investigação e resposta ao rompimento da barragem de Fundão**. São Paulo: ERM, 2017.
- ERG ENGENHARIA. **EIA /LT 345 Kv e Subestação 345/138 Kv**. 2007.
- _____. **Relatório dos serviços topográficos e batimétricos da barragem da UHE Baguari I, Governador Valadares – MG**. ERG, 2015.
- _____. **Relatório dos serviços topográficos e batimétricos da barragem da UHE Baguari I, Governador Valadares – MG**. ERG, 2017.

- ERNST, C. H.; BARBOUR, R. W. Turtles of the world. Washington D.C.: Smithsonian Institution Press, 1989.
- ESPINDOLA, H. S.; CAMPOS, R. B. F.; LAMOUNIER, K. C. C.; SILVA, R. S. Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, n. 5, v. 3, p. 72-100, 2016.
- EUCLYDES et al. Impacto ambiental relevante na bacia do rio Doce. Erosão, o inimigo silencioso do rio Doce. **Atlas Digital das Águas de Minas**, 2009.
- EYSINK, G. G. J.; CECARELLI, P. S. Curso: Investigação de Mortandade de Peixes (causas e medidas de prevenção e recuperação dos ecossistemas degradados). Apostila. 2006. Citado no Relatório Técnico DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016.
- FAGUNDES, H. O.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; PAIVA, R. C. D. Análise dos sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do rio Doce com imagens de satélite. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSSEDIMENTOLOGIA. 2., 2017, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2017.
- 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). Belo Horizonte/Juiz de Fora: UFMG/UFJF, 2016.
- FELLIPE, F. F.; COSTA, A.; FRANCO, R.; MATOS, R. **A tragédia do rio Doce a lama, povo e água**. Relatório da Expedição ao Rio Doce. Belo Horizonte/Juiz de Fora: UFMG/UFJF, 2016. Disponível em: <https://www.ufjf.br/noticias/files/2016/02/ufmg_ufjf_relatorioexpedicaoriodoce_v2.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2018.
- FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza e Conservação**, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.
- FERREIRA, S. C.; DI MARE, R. A.; SILVA, P. G. First record of *Scybalocanthos nigriceps* (harold, 1868) (Coleoptera: Scarabaeidae: Scarabaeinae) in Rio Grande do Sul state, Southern Brazil. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 89, n. 3, p. 1635-1640, 2017.
- FEST. **Serviço de levantamento topobatimétrico e monitoramento sedimentométrico e sedimentológico**: 2º cílio. UHE Mascarenhas. FEST, 2014.
- FILIZOLA, H. F. et al. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental**: solo, água e sedimentos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.
- FONSECA, R. A. M.; GONÇALVES, M. A. F.; NASCIMENTO, L. B. New state record and distribution map of *Dendropsophus giesleri* (Mertens, 1950) in Serra do Espinhaço mountain range, Brazil. **Herpetology Notes**, v. 4, p. 143-144, 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Resources Reports**, n. 106, 2015.
- FOUQUET, A.; CASSINI, C. S.; HADDAD, C. F. B.; PECH, N.; RODRIGUES, M. T. Species delimitation, patterns of diversification and historical biogeography of the neotropical frog genus *Adenomera* (Anura, Leptodactylidae). **Journal of Biogeography**, v. 41, p. 855-870, 2014.
- FOUQUET, A.; LOEBMANN, D.; CASTROVIEJO-FISHER, S.; PADIAL, J. M.; ORRICO, V. G. D.; LYRA, M. L.; ROBERTO, I. J.; KOK, P. J. R.; HADDAD, C. F. B.; RODRIGUES, M. T. From Amazonia to the Atlantic forest: Molecular phylogeny of *Phyzelaphryninae* frogs reveals unexpected diversity and a striking biogeographic pattern emphasizing conservation challenges. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 65, p. 547-561, 2012.
- FRANCO, L. C.; DOS SANTOS, D. H.; ROSA, P. P. G.; SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. F. Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. **Anais...** Natal, 2014.

- FREITAS, C. M., SILVA, M. A., MENEZES, F. C. O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de riscos de desastres. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 68, n. 3, p. 25-30, 2016.
- FRIOL, N. R. **Filogenia e evolução das espécies do gênero Phrynops (Testudines, Chelidae)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas – Zoologia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- FUNDAÇÃO COPPETEC. **Avaliação dos impactos da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana, nove meses após o desastre**. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2017. Disponível em: <http://www.lima.coppe.ufrj.br/images/documentos/projetos/relatorio-vale/1-_Cap_1_-_COPPE.20275.Cap1.Infraestrutura.Relat%C3%B3rio.Final.04.01.2017.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2018.
- _____. Avaliação dos impactos da ruptura da barragem de rejeitos de fundão em Mariana nove meses após o desastre. **Capítulo 8 – Amostragem e avaliação físico-química e mineralógica de rejeitos e sedimentos**. 115f. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2016. Disponível em: <http://www.lima.coppe.ufrj.br/images/documentos/projetos/relatorio-vale/8_-_Cap_8_-_Relat%C3%B3rio_Final_Cap_8_SEDIMENTOS__revis%C3%A3o_janeiro.pdf> Acesso em: 21 jan. 2018.
- FUNDAÇÃO RENOVA. Comitê Interfederativo (CIF) Relatório mensal - referência Março/2016 a Outubro/2017. Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- _____. Plano de Recuperação Ambiental Integrado. 2017a.
- _____. Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado. 2017b.
- GARCIA, P. C. A.; LAVILLA, E.; LANGONE, J.; SEGALLA, M. V. Anfíbios da região subtropical da América do Sul, Padrões de distribuição. **Ciência e Ambiente**, n. 35, p. 65-100, 2007.
- GARDNER, A. L.; CREIGHTON, G. K. Genus Marmosops. In: GARDNER, A. L. (Ed.). **Mammals of South America**. Volume 1: Marsupials, xenarthrans, shrews, and bats. Chicago: University of Chicago Press, 2008. p. 61-74.
- GATTI, A.; FERREIRA, P. M.; CUNHA, C. J.; SEIBERT, J. B.; MOREIRA, D. O. Medium and large-bodied mammals of the Private Reserve of Natural Heritage Recanto das Antas, in Espírito Santo, Brazil. **Oecologia Australis**, n. 21, p. 171-181, 2017.
- GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. **Relatório técnico RT-023_159-515-2282_00-J**. Avaliação dos impactos no meio físico resultantes do rompimento da barragem de Fundão. Belo Horizonte: Golder Associates, 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). Belo Horizonte: Golder Associates, 2016b.
- GOMES, L. E. O.; CORREA, L. B.; SÁ, F.; NETO, R. R.; BERNARDINO, A. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 120, n. 1-2, p. 28-36, 2017.
- GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- GROOT, R.; WILSON, M.; BOUMANS, R. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological Economics**, v. 41, n. 3, p. 393-408, 2002.
- GRUPO DA FORÇA-TAREFA. **Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG**. Fevereiro, 2016.
- GRUPO INDEPENDENTE PARA AVALIAÇÃO DO DANO AMBIENTAL (GIAIA). **Relatório parcial expedição rio Doce**. 2016.

- 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.
- HAMDAN, B.; FERNANDES, D. S. Taxonomic revision of *Chironius flavolineatus* (Jan, 1863) with description of a new species (Serpentes: Colubridae). **Zootaxa**, v. 4012, n. 1, p. 97-119, 2015.
- HDC. **Levantamento batimétrico do reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves**. Rio Doce-MG, mar. 2014.
- HENSLER, A.-S. **Chemical Evolution and hidrothermal processes during the genesis of itabirite-hosted, high grade iron ore in the Quadrilátero Ferrífero, Brazil**. 2013. Tese (Doutorado) – Centre for Exploration Targeting, School of Earth and Environment, University of Western Australia, 2013.
- HEYER, W. R. Variation, Systematics, and Zoogeography of *Eleutherodactylus guentheri* and Closely Related Species (Amphibia: Anura: Leptodactylidae). **Smithsonian Contributions to Zoology**, v. 402, p. 1-42, 1984.
- HICKMAN JR, C.P.; ROBERTS, L.S.; LARSON, A. **Princípios integrados de zoologia**. 11 edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 2004, 822 p.
- HICON. 2008. Disponível em: <<http://hicon.com.br/site/modelagem-do-transporte-de-sedimentos>>.
- _____. 2012. Disponível em: <<http://hicon.com.br/site/modelagem-do-transporte-de-sedimentos>>.
- HIDROTOPO. **Levantamento batimétrico no reservatório da Usina de Aimorés Hidrelétrica Eliezer Batista - Aimorés – MG**. HIDROTOPO, jul. 2015.
- _____. **Levantamento Batimétrico no Reservatório da Usina de Aimorés Hidrelétrica Eliezer Batista - Aimorés – MG**. HIDROTOPO, jan. 2016a.
- _____. **Levantamento Batimétrico no Reservatório da Usina de Aimorés Hidrelétrica Eliezer Batista - Aimorés – MG**. HIDROTOPO, set. 2016b.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Ibama: 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2018.
- _____. **Laudo Técnico Preliminar: danos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília, DF: IBAMA, 2015.
- _____. **Nota técnica 02001.000606/2016-36**. Mensuração do dano em APP dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e seus afluentes. Brasília, DF: IBAMA, 2016.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Lista de espécies quase ameaçadas e com dados insuficientes. **ICMBio**, 2016a. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/faunabrasileira/lista-de-especies-dados-insuficientes>>. Acessado em: 18 jan. 2018.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Nota técnica nº 2/2016/ APA Costa das Algas/ICMBio**. Identificação de unidades de conservação potencialmente afetadas pelo rompimento da barragem de rejeitos da empresa Samarco Mineração S.A. Cláusula 181 TTAC. Vitória: ICMBio, 2016.
- INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DE MINAS GERAIS. **Relatório técnico nº 01/2016**. Marliéria: IEF, 2015.
- _____. **Relatório técnico nº 04/2015**. Marliéria: IEF, 2015.

- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (IEMA). **Dados_posteriores**. Dados de qualidade de água e sedimento [Mensagem de trabalho]. Mensagem recebida: <emilia.brito@iema.es.gov.br>. 3 jul. 2017.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Acompanhamento da qualidade das águas do rio Doce após o rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**. Relatório Técnico do Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Belo Horizonte: IGAM, 2015.
- _____. **Acompanhamento da qualidade das águas do rio Doce após o rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**. Relatório Técnico: 19 out. 2016. Belo Horizonte, 2016.
- INSTITUTOS LACTEC. **Estudos Necessários às atividades de dragagem previstas para a instalação do novo terminal portuário da empresa Novo Porto**. Relatório técnico nº 02: análise das alterações hidrodinâmicas e morfológicas através de modelagem matemática. Curitiba: Institutos Lactec, 2016.
- _____. **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: Institutos Lactec, 2017.
- INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO), C. **Manual Of Hydrography**. 2005.
- INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE (IUCN). **The IUCN Red List of Threatened Species**. Version 2017.2. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- IVERSON, J. B. A revised checklist with distribution maps of the turtles of the world. Richmond: Privately Printed, 1992.
- JACKSON, J. F. Differentiation in the genera *Enyalius* and *Strobilurus* (Iguanidae): implications for Pleistocene climatic changes in eastern Brazil. **Arquivos de Zoologia**, v. 30, n. 1, p. 1-79, 1978.
- JUNCA F. A. et al. **Girinos como bioindicadores da qualidade da água do Rio Doce**. Relatório final. Universidade Estadual de Feira de Santana, 2017.
- JUNQUEIRA, M. V.; AMARANTE, M. C.; DIAS, C. F. S.; FRANÇA, E. S. Biomonitoramento de qualidade das águas da bacia do alto Rio das Velhas (MG/Brasil) através de macroinvertebrados. **Acta Limnológica Brasileira**, v. 12, p. 73-87, 2000.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- KAMINSKI, L. A.; ISERHARD, C. A.; FREITAS, A. V. L. *Thisbe silvestre* sp. nov. (Lepidoptera: Riodinidae): A new myrmecophilous butterfly from the Brazilian Atlantic Forest. **Austral Entomology**, n. 55, p. 138–146, 2016.
- KEESEN, F.; NUNES, A. V.; SCOSS, L. M. Updated list of mammals of Rio Doce State Park, Minas Gerais, Brazil. **Bol. Mus. Biol. Mello Leitão**, v. 38, n. 2, p. 139-162, 2016.
- KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.
- KOELZER, V. A.; LARA, J. M. Densities and compaction rates of deposited sediment. **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, 84, HY2, Proc. Paper 1603, 1958.
- LADEIRA, E. A. Metalogenia dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S. (Eds.). **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: DNPM/CVRD, 1988. v. 3, p. 301-375.
- LEAL, C. G.; JUNQUEIRA, N. T.; CASTRO, M. A.; CARVALHO, D. R.; FAGUNDES, D. C.; SOUZA, M. A.; ALVES, C. B. M.; POMPEU, P. S. Estrutura da ictiofauna de riachos do cerrado de Minas Gerais. In: CALLISTO, M.; ALVES, C. B. M.; LOPES, J. M.; CASTRO, M. A. (org.) 2014. Condições ecológicas em bacias hidrográficas de empreendimentos hidrelétricos. **Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais**, v.1, p. 69-96. (Série Peixe Vivo, 2), 2014.
- LEITE, F. S. F., JUNCA, F. A.; ETEROVICK, P. C. Status do conhecimento, endemismo e conservação de anfíbios anuros da Cadeia do Espinhaço, Brasil. **Megadiversidade**, v. 4, n. 1-2, p. 158-176, 2008.

- 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.
- LEPSCH, I. **Dezenove lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 440 p.
- LICHT, O. A. B. **Prospecção geoquímica: princípios, técnicas e métodos**. Rio de Janeiro: CPRM, 1998.
- LIMA, V. C., LIMA, M. R., MELO, V. de F. **O solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio**. Curitiba: UFPR, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007.
- LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance. **Geocarto International**, v. 13, n. 2, p. 11-15, 1998.
- LODI, L.; BOROBIA, M. **Baleias, botos e golfinhos do Brasil: guia de identificação**. Rio de Janeiro: Editora Technical Books, 2013.
- LOPES, M. G., ZDANOWICZ, J. E. Cenários prospectivos: o caso do rompimento da barragem em Mariana (MG). **Colóquio – Revista do Desenvolvimento Regional – Faccat**, Taquara, v. 14, n. 1, p. 193-213, 2017.
- LOURENÇO, A. C. C. **Sistemática das espécies do grupo *Scinax catharinae* (Anura, Hylidae)**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- LOURENÇO, A. C. C.; NASCIMENTO, L. B.; PIRES, M. R. S. A new species of the *Scinax catharinae* species group (Anura: Hylidae) from Minas Gerais, Southeastern Brazil. **Herpetologica**, v. 65, n. 4, p. 468-479, 2009.
- MACHADO, A. B. M.; DRUMMOND, G. M.; PAGLIA, A. P. (eds.) **Livro vermelho da fauna brasileira ameaçada de extinção**. Brasília, DF : MMA; Belo Horizonte, MG : Fundação Biodiversitas, 2v. (1420 p.). 2008.
- MAGALHÃES, O.; SILVEIRA, A. L.; SILVA, H. R.; PIRES, M. R. S. Ocorrência de *Lutkenotyphlus brasiliensis* (Lütken, 1851) (Amphibia, Gymnophiona, Caeciliidae) em Minas Gerais, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERPETOLOGIA, 1., 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba, Resumo digital, 2004.
- 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) – Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- MANEJO INSTITUTO DE PESQUISAS E CONSULTORIA AMBIENTAL LTDA. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na unidade do Germano: terceiro concentrador e estruturas de apoio do projeto quarta pelotização**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2013a.
- _____. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na unidade do Germano: ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2013b.
- _____. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na unidade do Germano: terceiro concentrador e estruturas de apoio do projeto quarta pelotização**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2014a.
- _____. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na Unidade do Germano: ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2014b.
- _____. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na unidade do Germano: terceiro concentrador e estruturas de apoio do projeto quarta pelotização**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2015a.
- _____. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na unidade do Germano: ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2015b.

- _____. **Monitoramento e resgate de fauna na unidade Germano da Samarco**. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2015c.
- _____. **Monitoramento da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna na unidade do Germano**: ampliação da lavra e pilha da mina de Alegria E. Relatório Técnico. Samarco Mineração S.A., 2016.
- MARINHO, B. S.; BALIEIRO, F. C.; TAVARES, L. S. Combinando insumos para revegetação eficiente do rejeito da barragem do Fundão, Mariana, MG. In: INACIO, C. T.; CAPECHE, C. L.; MARTINS, A. L. S.; MATTOS, J. S. R.; CARVALHO, L. Seminário PIBIC Embrapa Solos 2016/2017. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Documentos 192, 2017.
- MARTA-ALMEIDA, M.; MENDES, R.; AMORIM, F. N.; CIRANO, M.; DIAS, J. M. Fundão Dam collapse: oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Marine Pollution Bulletin**, no prelo.
- MARTINS, R. F. **Avaliação da presença de metais e de biomarcadores fecais em sedimentos do rio Barigui na região metropolitana de Curitiba – PR**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized linear models**. 2nd edition. Monographs on Statistics and Applied Probability 37. London: Chapman & Hall, 1989.
- MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. **Química e mineralogia do solo**: parte I - conceitos básicos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. 1.
- MENDES, L. A. **Avaliação da exposição da população de passagem de Mariana (MG) aos elementos-traço, com ênfase ao arsênio**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- MENDES, M. C. O.; LOBATO, L. M.; SUCKAU, V.; LANA, C. In situ LA-ICPMS U-Pb dating of detrital zircons from the Cercadinho Formation, Minas Supergroup. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 55-68, 2014.
- MENEZES, L. C. B. Análise de organismos bentônicos: rio Doce e afluentes: abril 2016. In: GIAIA. **Relatórios do GIAIA e material de suporte**. GIAIA, jul. 2016. Disponível em: <<http://giaia.eco.br/materialdesuporte/>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- MENEZES, M.; ARRUDA, E. P.; GARGIULO, J. R. B. C. Análises físico-químicas do rio Doce e afluentes: 3ª expedição (29/10 a 05/11/16). In: GIAIA. **Relatórios do GIAIA e material de suporte**. GIAIA, dez. 2016. Disponível em: <<http://giaia.eco.br/materialdesuporte/>>. Acesso em: 27 set. 2017.
- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 147, de 30 de abril de 2010. Aprova a lista de espécies ameaçadas de extinção da fauna do Estado de Minas Gerais. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, 4 maio 2010.
- 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. Belo Horizonte: SEDRU, 2016.
- MINAS GERAIS. SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, POLÍTICA URBANA E GESTÃO METROPOLITANA. SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Nota técnica nº 01/2016**. Belo Horizonte: Semad, 2016.
- MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Conselho Estadual de Política Ambiental. Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, 26 jul. 2011.
- MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (MPMG). Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico Patrimônio Histórico Cultural. **Patrimônio Histórico Cultural**, jun. 2017. Disponível em < http://patrimoniocultural.blog.br/wp-content/uploads/2017/03/Patrimonio-historico-cultural-e-arqueologico-atingidos-diretamente-pelo-rejeito-da-Barragem-Fundao_Comarca-de-Mariana.png >. Acesso em: 2 jun.2017.

- MIRANDA, R. B.; SCARPINELLA, G. A.; MAUAD, F. F. Influência do Assoreamento na Capacidade de Armazenamento do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Irmãos (SP/Brasil). **Revista Recursos Hídricos**, v. 34, n. 2, p. 69-79, 2013.
- MIRRA, Á. V. **Ação civil pública e reparação do dano ao meio ambiente**. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2002.
- MITTERMEIER, R.A., GIL, R.P., HOFFMAN, M., et al. **Hotspots Revisited: Earth's Biologically Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions**. Conservation International and Agrupacion Sierra Madre, Monterrey, Cemex. 2005.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Avaliação do estado do conhecimento da biodiversidade brasileira – volumes I e II**. Brasília, DF: MMA, 2005.
- MORAES, E. P. A. Análise de organismos bentônicos: rio Doce e afluentes. In: GIAIA. **Relatórios do GIAIA e material de suporte**. GIAIA, mar. 2016. Disponível em: <<http://giaia.eco.br/materialdesuporte/>>. Acesso em: 27 set. 2017.
- MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **The Fundão tailings dam review panel: report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam**. Agosto de 2016.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use**. New York: McGraw-Hill, 1998.
- MOTT, T.; D. R. VIEITES, D. R. Molecular phylogenetics reveals extreme morphological homoplasy in Brazilian worm lizards challenging current taxonomy. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 51, p. 190-200, 2009.
- MOTTA, A. C. V.; SERRAT, B. M.; REISSMANN, C. B.; DIONISIO, J. A. **Micronutrientes na rocha, no solo e na planta**. Curitiba: Edição do autor, 2007.
- MOURA, M. R.; MOTTA, A. P.; FERNANDES, V. D.; FEIO, R. N. Herpetofauna da Serra do Brigadeiro, um remanescente de Mata Atlântica em Minas Gerais, Brasil. **Biota Neotropica**, n. 12, p. 209-235, 2012.
- MOURA-LEITE, J. C.; BÉRNILS, R. S.; MORATO, S. A. A. Método para a caracterização da herpetofauna em estudos ambientais. **Maia**, n. 2, p. 1-5, 1993.
- MUNIZ, D. H. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. **Universitas: Ciências da Saúde**, v. 4, n. 1-2, p. 83-100, 2006.
- NANNI, R. M. et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Sci. Agriculture**, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011.
- NASCIMENTO, L. B., WACHLEVSKI, M.; LEITE, F. S. F. Anuros. In: SILVA, A. C.; PEDREIRA, L. C. V. S. F.; ABREU, P. A. A. (Eds.). **Serra do Espinhaço Meridional: paisagens e ambientes**. Belo Horizonte: O Lutador, 2005. p. 209-229.
- NEVES, A. C. O.; NUNES, F. P.; CARVALHO, F. A.; FERNANDES, G. W. Neglect of ecosystems services by mining, and the worst environmental disaster in Brazil. **Natureza & Conservação**, n. 14, p. 24-27, 2016.
- OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998.
- OLIVEIRA, E. G. **Contribuições para o diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do rio Doce: estudo de caso: sub-bacia do rio Piranga**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 2005.
- OLIVEIRA, R. B. et al. Avaliação do tamanho da malha de amostragem de solo em áreas de plantio de cana-de-açúcar no noroeste do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2015.

- 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, nov./dez. 2015.
- OTTONI, M.; OTTONI FILHO, T.; SCHAAP, M.; LOPES-ASSAD, M. L.; ROTUNNO FILHO, O. **Hydrophysical database for brazilian soils (HYBRAS) and its use in validating brazilian and temperate pedotransfer functions for water retention**. Vadose Zone Journal, 2017 (submetido).
- PACHECO, A. A. **Avaliação da contaminação em solos e sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce por metais pesados e sua relação com o fundo geoquímico natural**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.
- PANSONATO, A.; MUDREK, J. R.; SIMIONI, F.; MARTINS, I. A.; STRÜSSMANN, C. Geographical variation in morphological and bioacoustic traits of *Pseudopaludicola mystacalis* (Cope, 1887) and a reassessment of the taxonomic status of *Pseudopaludicola serrana* Toledo, 2010 (Anura: Leptodactylidae: Leiuperinae). **Advanced in Zoology**, v. 2014, p. 1-13, 2014.
- PASSAMANI, M.; MENDES, S. L. (Eds.). **Espécies da fauna ameaçadas de extinção no estado do Espírito Santo**. Vitória, Brazil: INMA, 2007.
- PAVAN, D. **Assembleias de répteis e anfíbios do cerrado ao longo da bacia do rio Tocantins e o dano do aproveitamento hidrelétrico da região na sua conservação**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- PEDRALLI, G.; GUIMARÃES NETO, A. S.; TEIXEIRA, M. C. B. Diversidade de anfíbios na região de Ouro Preto. **Ciência Hoje**, v. 30, n. 178, p. 70-73, 2001.
- PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- PEREIRA, G. C. N.; COELHO, M. S.; BEIRÃO, M. do. V.; BRAGA, R. F.; FERNANDES, G. W. Diversity of fruit-feeding butterflies in a mountaintop archipelago of rainforest. *PLoS One*, 12(6): e0180007, 2017.
- PIMENTA, B. V. S., CARAMASCI, U.; CRUZ, C. A. G. Synonymy of *Crossodactylus bokermanni* Caramaschi & Sazima, 1985 with *Crossodactylus trachystomus* (Reinhardt & Lütken, 1862) and description of a new species from Minas Gerais, Brazil (Anura: Hylodidae). **Zootaxa**, v. 3955, n. 1, p. 65-82, 2015.
- PINHEIRO, F. C. F. **Padrões de uso de habitat do boto-cinza (*Sotalia guianensis*) na região da foz do rio Doce, costa norte do Espírito Santo, Sudeste do Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- PINTO, R. R.; FERNANDES, R. A New blind snake species of the genus *Tricheilostoma* from Espinhaço Range, Brazil and taxonomic status of *Rena dimidiata* (Jan, 1861) (Serpentes: Epictinae: Leptotyphlopidae). **Copeia**, v. 2012, n. 1, p. 37-48, 2012.
- PIRANI, R. M.; NASCIMENTO, L. B.; FEIO, R. N. Anurans in a forest remnant in the transition zone between cerrado and atlantic rain forest domains in southeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 85, n. 3, p. 1093-1104, 2013.
- 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. **Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG)**. Relatório Final. Mimeo. 2015.
- POUGH, F. H.; JANIS, M. C.; HEISER, B. J. **A vida dos vertebrados**. São Paulo: Editora Atheneu, 2004.
- PREVEDELLO, C.L.; ARMINDO, R.A. **Física do solo: com problemas resolvidos**. 2 ed. Curitiba: 2015. 474p.
- PUGLIESE, A.; BAÊTA, D.; POMBAL, J. P. A new species of *Scinax* (Anura: Hylidae) from Rocky Montane Fields in Southeastern and Central Brazil. **Zootaxa**, v. 2269, p. 54-64, 2009.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>.

- REIS, R. R.; PERACCHI, A. L.; PEDRO, W. A.; LIMA, I. P. 2006. **Mamíferos do Brasil**. Londrina: EDUEL, 437 p.
- RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G; AVALREZ V., V.H. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 5ª aproximação, Viçosa, MG, 1999.
- RIBEIRO, L. G. G.; VIEIRA, G. C. O rompimento das barragens no município mineiro de Mariana; o desastre ambiental e a intervenção do Ministério Público. **RVMD**, Brasília, v. 11, n. 1, 2017.
- RIEVERS, C. R. **Anfíbios anuros de serrapilheira do Parque Estadual do rio Doce**: resposta a disponibilidade de recursos e aos fatores climáticos. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- RODRIGUES, M. T. Sistemática, ecologia e zoogeografia dos *Tropidurus* do grupo *torquatus* ao sul do rio Amazonas (Sauria, Iguanidae). **Arquivos de Zoologia**, v. 31, n. 3, p. 105-230, 1987.
- RODRIGUES, M. T.; FREITAS, M. A.; SILVA, T. F. S. New Species of Earless Lizard Genus *Heterodactylus* (Squamata: Gymnophthalmidae) from the Highlands of Chapada Diamantina, State of Bahia, Brazil. **Journal of Herpetology**, v. 43, n. 4, p. 605-611, 2009.
- RODRIGUES, V. L. **Dieta e ecologia alimentar do boto-cinza, *Sotalia guianensis* (Cetartiodactyla: Delphinidae) na região do Banco dos Abrolhos, costa central do Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- ROSA, A. H. B.; CAMPIS, M. C.; RIBEIRO, D. B.; FREITAS, A. V. L. New Record of the Threatened Butterfly *Drephalys mourei* (Hesperiidae) in a Heavily Disturbed Area in Southeastern Brazil. **Journal of the Lepidopterists' Society**, n. 71, p. 278-280, 2017.
- ROSSA-FERES, D.C.; MARTINS, M.; MARQUES, O. A. V.; MARTINS, I. A.; SAWAYA, R. J.; HADDAD, C. F. B. Herpetofauna. In: RODRIGUES, R. R. et al. (Orgs.). **Diretrizes para a conservação e restauração da biodiversidade no estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Botânica/Fapesp, 2008. p. 83-94.
- ROSSI, R. V.; BIACONI, G.V.; CARMIGNOTTO, A. P. MIRANDA, C.L. Ordem Didelphimorphia. In: REIS, N. R.; PERACCHI, A. L.; PEDRO, W. A. & LIMA, I. P. 2011. **Mamíferos do Brasil**. 2ª Edição. Londrina, PR: UEL. 439p., 2010.
- ROSSI-SANTOS, M. R.; WEDEKIN, L. L.; MONTEIRO-FILHO, E. L. A. Residence and site fidelity of *Sotalia guianensis* in the Caravelas River Estuary, eastern Brazil. **Journal of Marine Biological Association of the U.K.**, v. 87, p. 207-212, 2007.
- ROSSI-SANTOS, M. R.; WEDEKIN, L. L.; SOUSA-LIMA, R. S. Distribution and habitat use of small cetaceans in the Abrolhos Bank, Eastern Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Mammals**, v. 5, n. 1, p. 23-28, 2006.
- RUPIL, G. M. **Dieta de golfinhos e sobreposição trófica com a pesca de arrasto na costa central do Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.
- RURALTECH. UHE Mascarenhas: atualização das curvas cota x área x volume. Relatório técnico. MSC-CAV-03-RT-AC-R01. RuralTech, 2016.
- _____. **Anexo 2**: UHE Mascarenhas: atualização das curvas cota x área x volume: levantamentos batimétricos (mapeamento da área molhada). MSC-CAV-03-A02-LB-R01. RuralTech, 2017.
- RYON, M. G.; BEAUCHAMP, J. J.; ROY, W. K.; SCHILLING, E.; CARRICO, B. A.; HINZMAN, R. L. Stream Dispersal of Dead Fish and Survey Effectiveness in a Simulated Fish Kill. **Transactions of the American Fisheries Society**, 129:1, 89-100, 2000.
- SÁ, R. O.; GRANT, T.; CAMARGO, A.; HEYER, W. R.; PONSSA, M. L.; STANLEY, E. Systematics of the Neotropical Genus *Leptodactylus* Fitzinger, 1826 (Anura: Leptodactylidae): Phylogeny, the Relevance of Non-molecular Evidence, and Species Accounts. **South American Journal of Herpetology**, v. 9, n. 1, p. S1-S128, 2014.
- SAADA, A.; BREEZE, D.; CROUZET, C.; CORNU, S.; BARANGER, P. Adsorption of arsenic (V) on kaolinite and on kaolinite-humic acids complexes: role of humic acid nitrogen groups. **Chemosphere**, v. 51, p. 757-763, 2003.

SAMARCO MINERAÇÃO S.A. **EIA Construção do Dique 02 de contenção de sedimentação para a ampliação da pilha de estéril João Manoel.** 2009.

_____. **Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado.** 2016 Disponível em: <http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/10/prai-agosto.pdf>. Acesso em 24 de Abril de 2018.

_____. **Relatório descritivo do plano de ação para recuperação das estruturas remanescentes e construção de novas estruturas de contenção de sedimentos:** atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado – PRAI. Anexo 01 – Engenharia. Samarco, fev. 2017.

SANTOLIN, C. V. A. **Quantificação e avaliação ambiental da contaminação por metais pesados e arsênio em sedimentos da bacia do rio Doce - MG.** 2015. Tese (Doutorado em Ciências - Química) – Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria aplicada.** Curitiba: Institutos Lactec, 2001.

SANTOS, P. S. **Herpetofauna do corredor Sossego-Caratinga, Mata Atlântica do Sudeste do Brasil:** estrutura das comunidades e influência da paisagem. 2013. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida) – Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de.; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 5. ed. rev. amp. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E. dos; FILHO, E. I. F.; ASSIS, I. R. de. Paisagens de lama: os tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.** Boletim Informativo, v. 42, n. 1., jan./abr. 2016.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in soil environments.** Madison, WI: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SCITECH. **6º Relatório Anual do Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo.** Processo Administrativo Nº 02022.001407/2010 CGPEG/DILIC/IBAMA. Elaborado pela Scitech – Environmental Science and Technology para a Petrobras, Rio de Janeiro, 2017.

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.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMAD). **Parecer único SUPRAM Zona da Mata nº 0615618/2014.** Indexado ao processo de Licenciamento Ambiental (2ª Revalidação da Licença de Operação). Superintendência Regional de Regularização Ambiental da Zona da Mata. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2014.

SEGURA, F. R. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, n. 218, p. 813-825, 2016.

SETE SOLUÇÕES E TECNOLOGIA AMBIENTAL. **Estudo de dano ambiental:** EIA da unificação e alteamento das barragens de rejeito de Germano e Fundão, Complexo Minerador Germano-Alegria. Samarco Mineração S.A., 2013.

SETE SOLUÇÕES E TECNOLOGIA AMBIENTAL. **Estudo de dano ambiental:** implantação da pilha de estéril Natividade. Samarco Mineração S.A., 2011. 1 v.

_____. **Projeto aumento de reserva mineral da Samarco Complexo Minerador de Germano-Alegria.** Samarco Mineração S.A., 2012. 1 v.

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, C. de L.; COSTA, A. T.; LANDA, G. G.; FONSECA, H. F. C.; SILVERIA, A. Evaluation of sediment contamination by trace elements and the zooplankton community analysis in area affected by gold exploration in southeast (SE) of the Iron Quadrangle, Alto Rio Doce, (MG) Brazil. **Acta Limnológica Brasileira**, v. 25, n. 2, p. 150-157, 2013.
- SILVA, G. P.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M. da; BARROS, N. F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 45-52, 2006.
- SILVA, J.; PAULA, H.; BARONY, F. Classificação e percepção ambiental dos cursos d'água superficiais do parque natural municipal de Governador Valadares – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 8., 2017, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2017.
- SILVEIRA, A. L.; PIRES, M. R. S.; COTTA, G. A. Serpentes de uma área de transição entre o Cerrado e a Mata Atlântica no Sudeste do Brasil. **Arquivos do Museu Nacional**, v. 68, n. 1-2, p. 79-110, 2010.
- SIQUEIRA, M. R.; MACIEL, L. R. M. Políticas públicas frente à grandes desastres ambientais: o caso do rompimento da barragem de rejeito da Samarco. In: SIMPÓSIO DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS, 5., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2016.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE HERPETOLOGIA (SBH). Brazilian reptiles: list of species. Electronic Database. **SBH**, 2018. Disponível em: <<http://www.sbherpetologia.org.br>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
- SOUSA, D. V. M. **Estudo geoquímico-mineral das formações ferríferas bandadas do Sinclinal Gandarela, Quadrilátero Ferrífero (MG), Ouro Preto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- SOUTO, A. M.; ANGELI K. B.; SALLES F. F. *Tricorythodes tragoedia* sp. nov. (Ephemeroptera: Leptohyphidae), a new species from Rio Doce and surrounding areas, southeastern Brazil. **Zootaxa**, n. 4341, p. 4-7, 2017.
- SOUZA J. J. L. L.; ABRAHÃO W. A. P.; MELLO J. W. V.; SILVA J.; COSTA L. M.; OLIVEIRA T. S. **Geochemistry and spatial variability of metal (loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil**. *Sci Total Environ.* v. 505; 2015; p. 338-49. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.098>. Acessado em 15 de março de 2018.
- SOUZA, C. F. **Estudo da leishmaniose tegumentar americana na região urbana do município de Timóteo e no Parque Estadual do Rio Doce, Minas Gerais, Brasil**. 2015. Tese (Doutorado) – Instituto Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2015.
- SOUZA, E. S. **Rota de processo para aproveitamento de rochas itabiríticas estéreis da mina de conceição**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- SPEC PLANEJAMENTO ENGENHARIA CONSULTORIA LTDA. **UHE Candonga**: estudo de recuperação do reservatório - Barramentos intermediários A e B - Memorial Descritivo - Projeto Executivo. Belo Horizonte, 2016.
- SPIEGELBERG, G. **Um modelo morfodinâmico**: desenvolvimento e aplicação no reservatório da usina hidrelétrica de estreito no rio Tocantins. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- SPIER, C. A., OLIVEIRA, S. M. B., SIAL, A. N., RIOS, F. J. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Precambrian Research**, v. 152, p. 170- 206, 2006.
- SRBEK-ARAUJO, A. C.; KIERULFF, M. C. M. Mamíferos de médio e grande porte das florestas de Tabuleiro do norte do Espírito Santo: grupos funcionais e principais ameaças. In: S.G. ROLIM, L. F. T. de MENEZES, & A. C. SRBEK-ARAUJO (Eds.), **Floresta Atlântica de Tabuleiro: diversidade e endemismos na Reserva Natural Vale**. pp. 469-479. 2016.
- STEIGLEDER, A. **Responsabilidade civil ambiental**: as dimensões do dano ambiental na doutrina brasileira. Porto Alegre: Livraria do Advogado, 2011.

- STRÜSSMANN, C. Herpetofauna. In: ALHO, C. J. (Org.). **Fauna silvestre da região do rio Manso – MT**. Brasília, DF: Ibama, 2000. p. 153-189.
- TAUCCE, P. P. G.; LEITE, F. S. F.; FEIO, R. N.; GARCIA, P. C. A. The advertisement call, color patterns and distribution of *Ischnocnema izecksohni* (Caramaschi and Kisteumacher, 1989) (Anura, Brachycephalidae). **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 52, n. 9, p. 111-119, 2012.
- TTAC. Termo de Transação e Ajustamento de Conduta, de 02 de março de 2016. Brasília, 2016.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR (USBR). Bureau of Reclamation. **Design of Small Dams**. 3. ed. Washington D. C.: Department of the Interior, 1987.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). **EPA 8260C**: volatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). US EPA, 2006.
- _____. **EPA 5021A**: volatile organic compounds in various samples matrices using equilibrium headspace analysis. US EPA, 2014.
- _____. **EPA 8270D**: semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry. US EPA, 2014.
- VALLE, R. et al. Avaliação dos danos ambientais decorrentes do rompimento das barragens ao longo da bacia do rio Doce e zona costeira adjacente – biodiversidade. In: VALLE, R. (Org.). **Avaliação dos danos da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana nove meses após o desastre**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2017.
- VANONI, V. A. **Sedimentation engineering**. New York: ASCE, American Society of Civil Engineers, 1977.
- VANZOLINI, P. E. Sobre um novo *Pantodactylus* do estado de Minas Gerais (Sauria, Teiidae). **Papéis Avulsos Zoologia**, v. 8, n. 27, p. 337-340, 1948.
- VAREJÃO, E. V.; BELLATO, C. R.; FONTES, M. P.; MELLO, J. W. Arsenic and trace metals in river water and sediments from the southeast portion of the Iron Quadrangle, Brazil. **Environmental Monitoring Assessment**, n. 172, p. 631-642, 2011.
- VASCONCELOS, J. A.; BRANDÃO, P. R. G.; LEMOS, L. N. Estudos de caracterização e concentração de itabirito compacto do Complexo Serra Azul, MG. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 9, n. 2, p. 89-94, 2012.
- VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B. **Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product**. Remote Sensing of Environment, v. 185, p. 46-56, 2016.
- VERVLOET, R. J. H. M. A geomorfologia da região de rompimento da barragem da Samarco: da originalidade da paisagem à paisagem da mineração. In: MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. (Orgs.). **Desastre no vale do Rio Doce: antecedentes, danos e ações sobre a destruição**. Rio de Janeiro: Letra e Imagem, 2016.
- VIEIRA, F. Distribuição, danos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce. **MG Biota**, v. 2, p. 5-22, 2010.
- VIVO, M. How many species of mammals are there in Brazil? Taxonomic practice and diversity evaluation. In: BICUDO, C. E.; MENEZES, N. A. (Ed.). **Biodiversity in Brazil**. A first approach. Proceedings of the workshop “Methods for the assessment of the biodiversity in plants and animals”, Campos do Jordão, 1996.
- WALKER, M.; LOURENÇO, A. C. C.; PIMENTA, B. V. S.; NASCIMENTO, L. B. Morphological variation, advertisement call, and tadpoles of *Bokermannohyla nanuzae* (Bokermann, 1973), and taxonomic status of *B. feioi* (Napoli & Caramaschi, 2004) (Anura, Hylidae, Coplomantini). **Zootaxa**, v. 3937, n. 1, p. 161-178, 2015.

- WELLS, R.S., RHINEHART, H.L., HANSEM, L.J., SWEENEY, J.C., TOWNSEND, F.I. et al. 2004. Bottlenose dolphins as marine ecosystem sentinels: developing a health monitoring system. *EcoHealth*, 1: 246-254.
- WEYGOLDT, P. Changes in the composition of mountain stream frog communities in the Atlantic mountains of Brazil: frogs as indicators of environmental deteriorations? **Studies on Neotropical Fauna and Environment**, n. 243, v. 4, p. 249-255, 1989.
- WILSON, D. E.; REEDER, D. M. (Eds). **Mammal species of the world: a taxonomic and geographic reference**. 3rd ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2005.
- WINCK, G.R., SANTOS, T.G. & CECHIN, S.Z. 2007. Snake assemblage in a disturbed grassland environment in Rio Grande do Sul State, southern Brazil: population fluctuations of *Liophis poecilogyrus* and *Pseudablabes agassizii*. *Ann. Zool. Fennici*. 44:321-332.
- WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
- ZONEAMENTO ECOLÓGICO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (ZEE/MG). **ZEE/MG**, 2015. Disponível em: <<http://www.zee.mg.gov.br>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; SMITH, G. M. **Analysing ecological data**. New York: Springer, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A - ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Estações ANA

Figura 181 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Rio Casca (56415000).

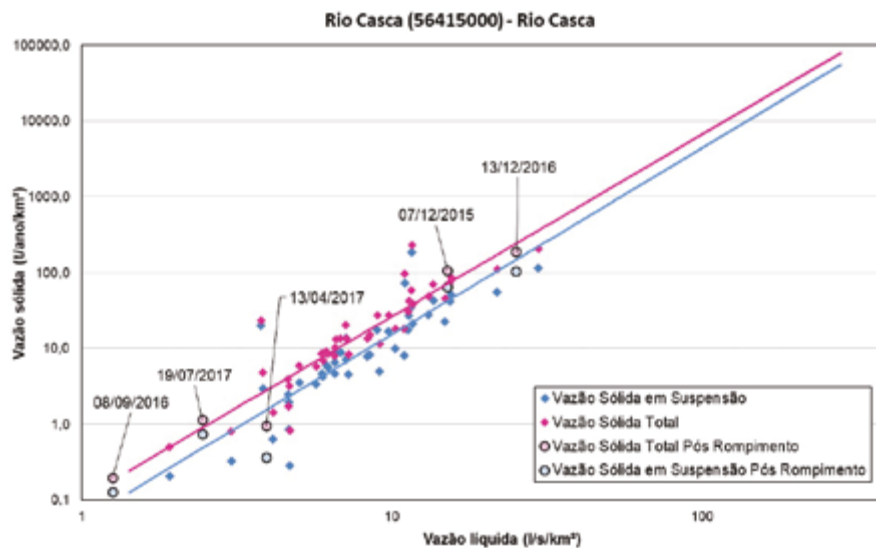


Figura 182 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Rio Matipó (56484998).

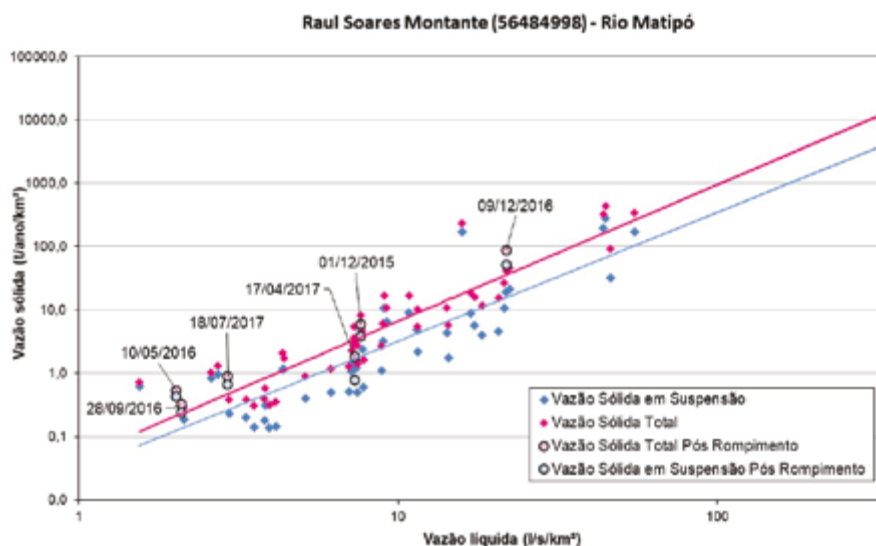


Figura 183 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Mario de Carvalho (56696000).

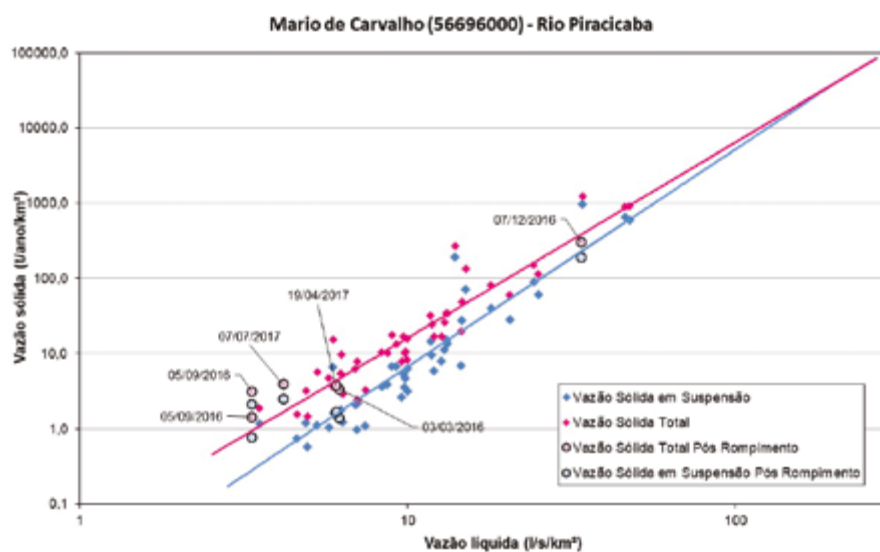


Figura 184 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Colatina (56994500).

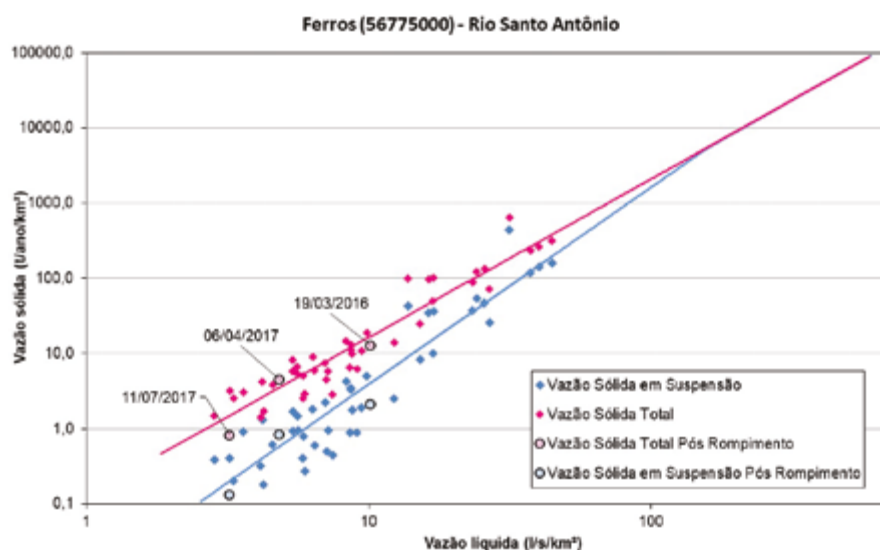


Figura 185 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Fazenda Barraca (56787000).

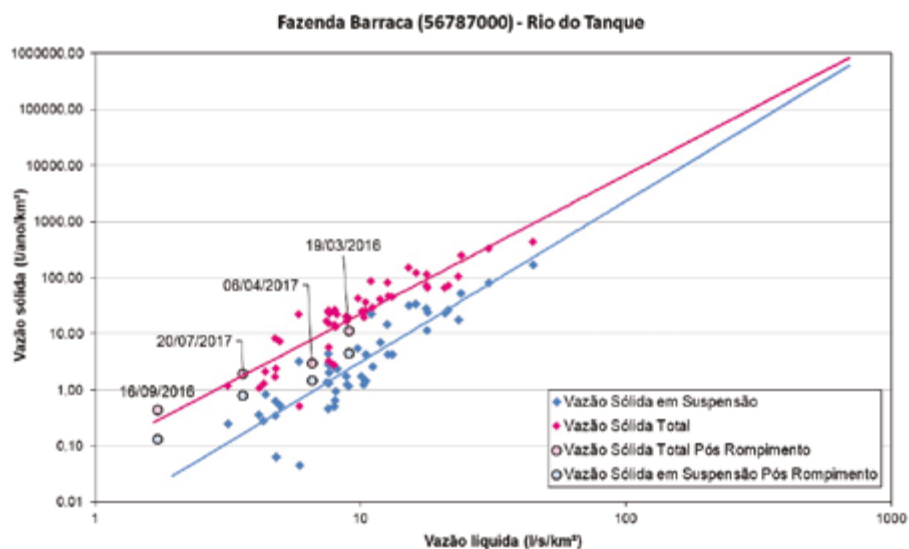


Figura 186 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Senhora do Porto (56800000).

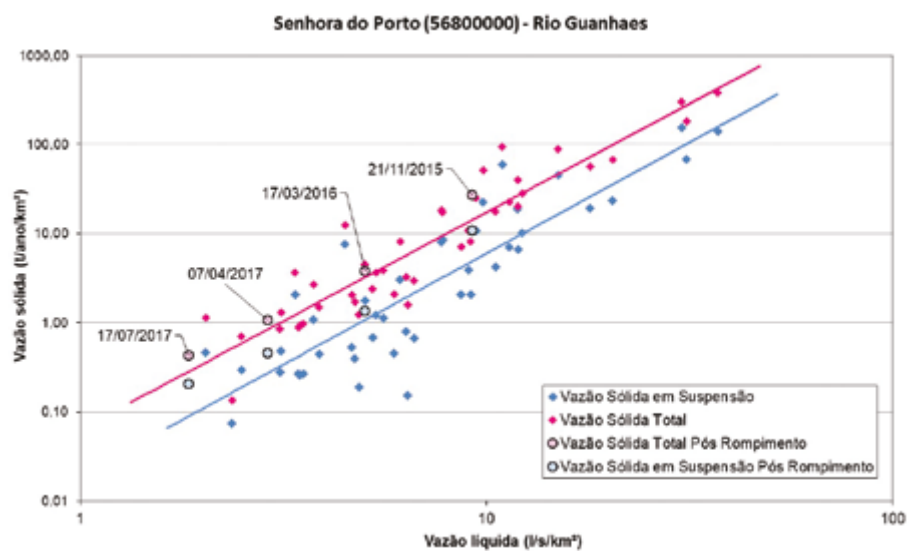


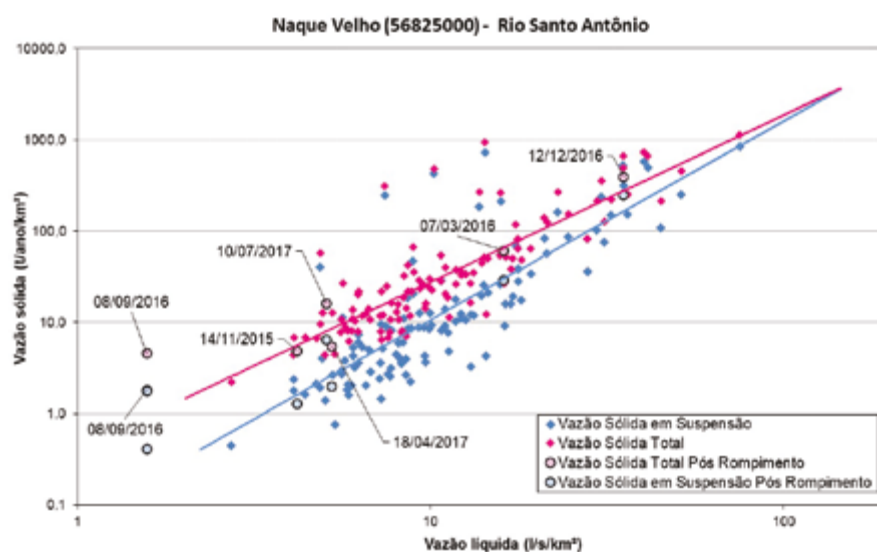
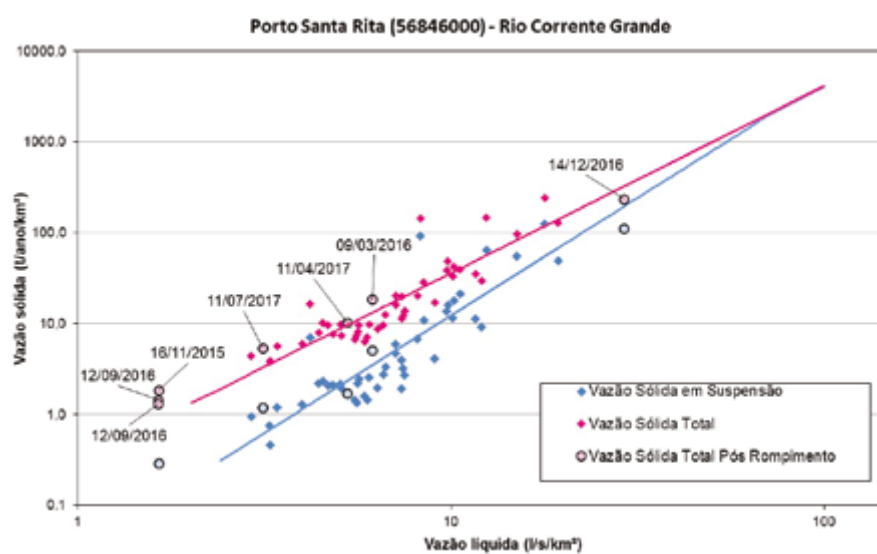
Figura 187 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Naque Velho (56825000).**Figura 188** – Alterações no transporte de sedimentos na estação Porto Santa Rita (56846000).

Figura 189 – Alterações no transporte de sedimentos na estação São Pedro do Suaçuí (56860000).

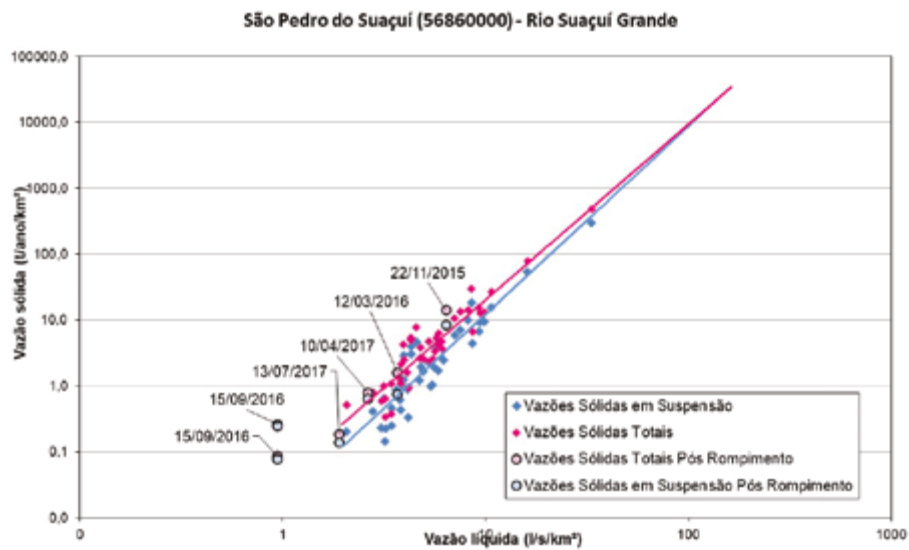


Figura 190 – V Alterações no transporte de sedimentos na estação Vila Matias Montante (56891900).

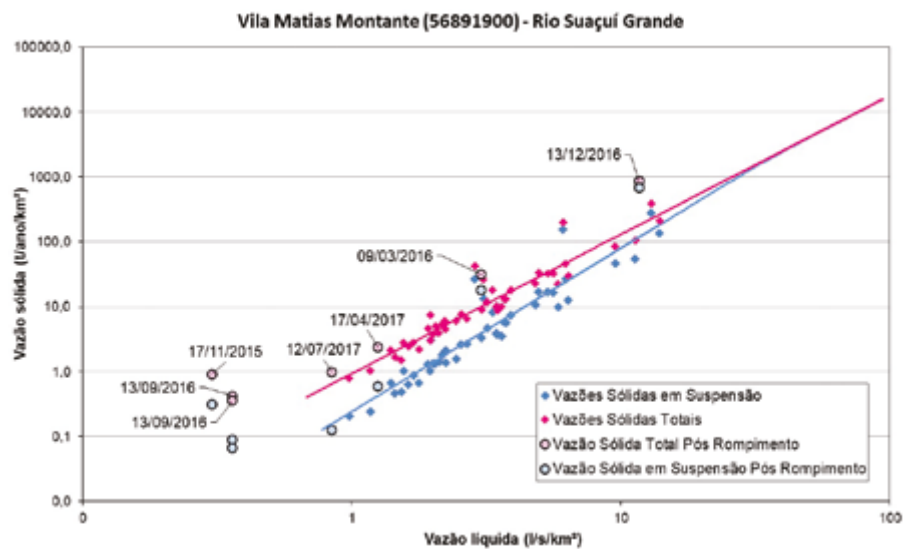


Figura 191 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Fazenda Bragança (56976000).

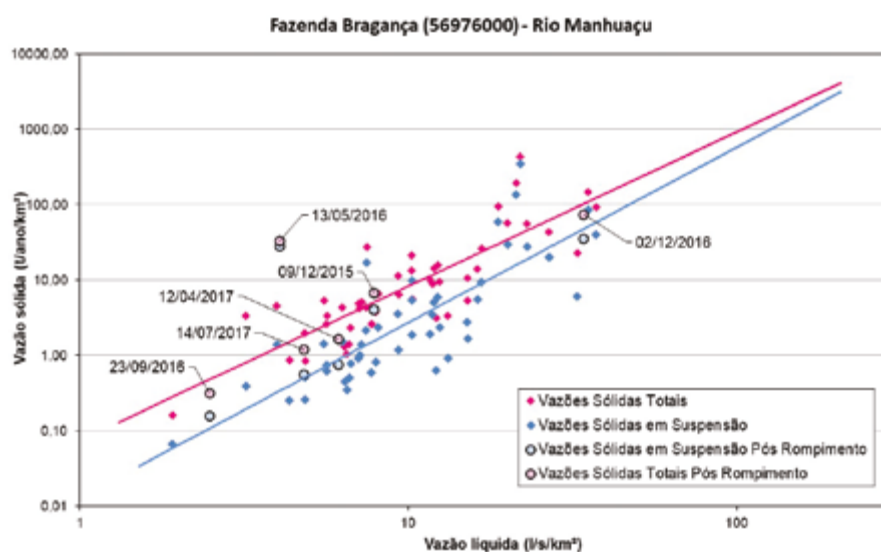


Figura 192 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Assaraí Montante (56989400).

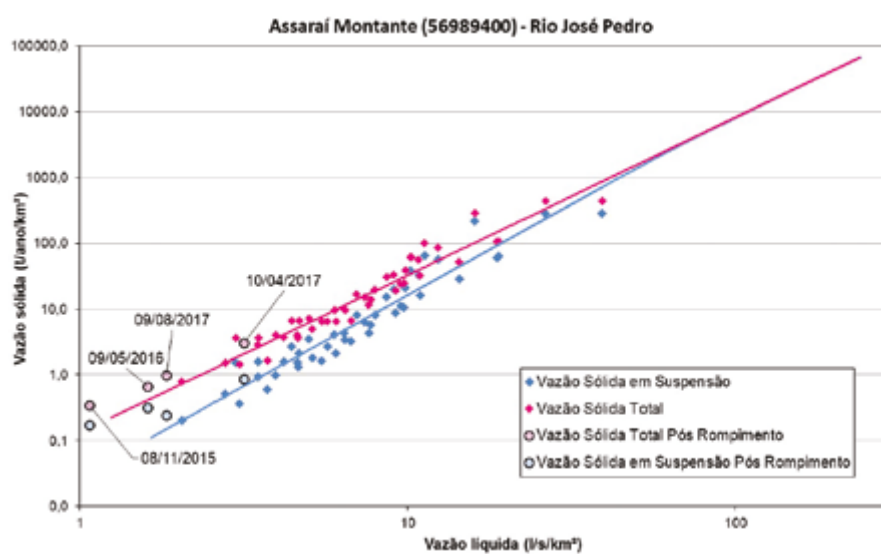


Figura 193 – Alterações no transporte de sedimentos na estação São Sebastião da Encruzilhada (56990000).

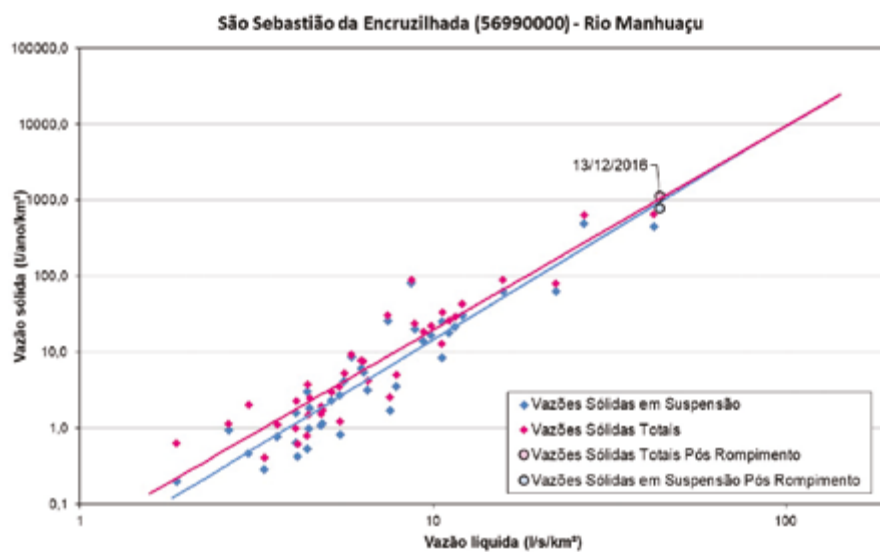


Figura 194 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Afonso Cláudio Montante (56990990).

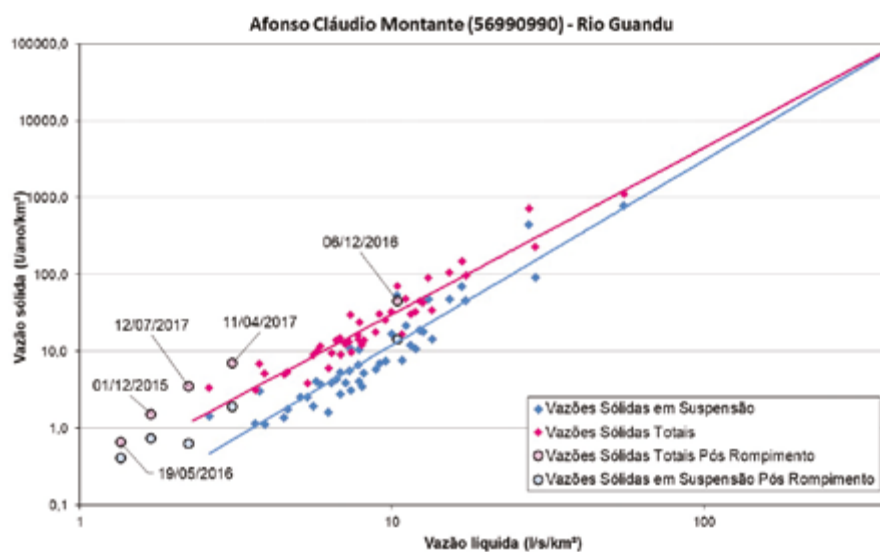


Figura 195 – Alterações no transporte de sedimento s na estação Laranja da Terra (56991500).

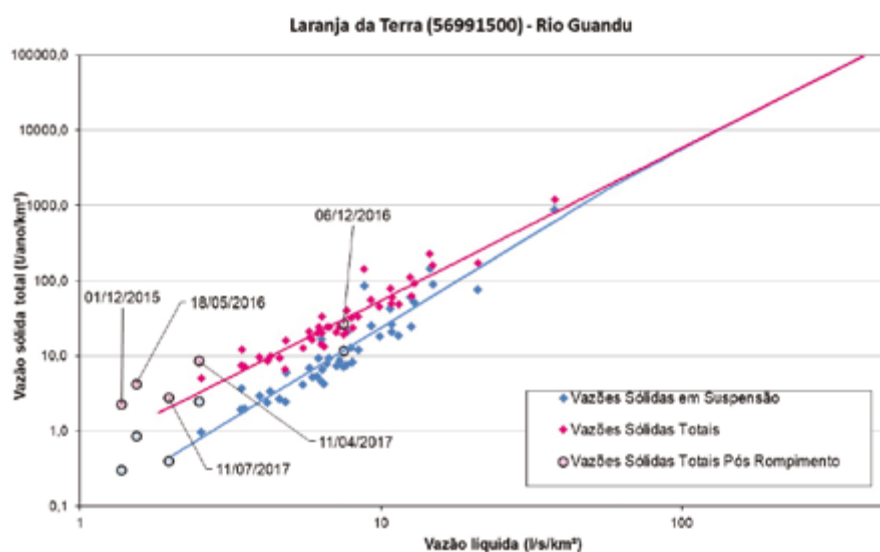


Figura 196 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Baixo Guandu (56992000).

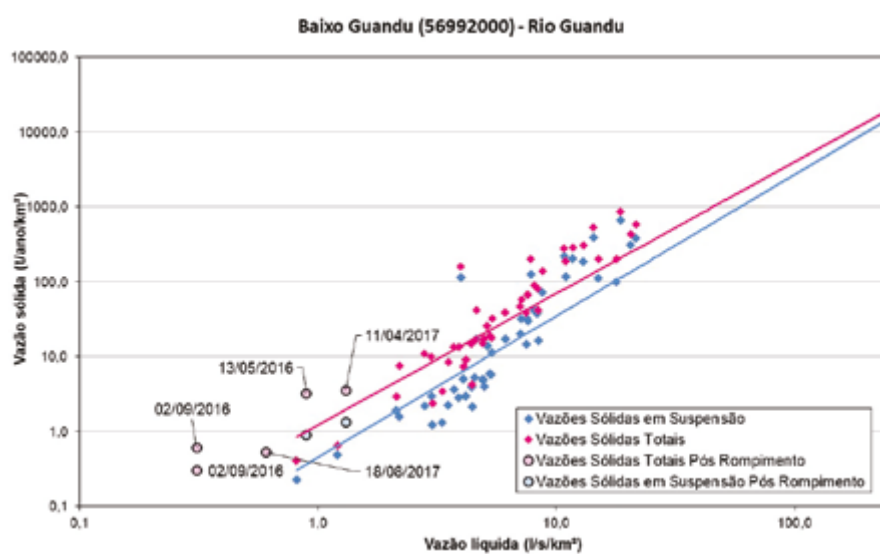


Figura 197 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Jusante Córrego Piaba (569933551).

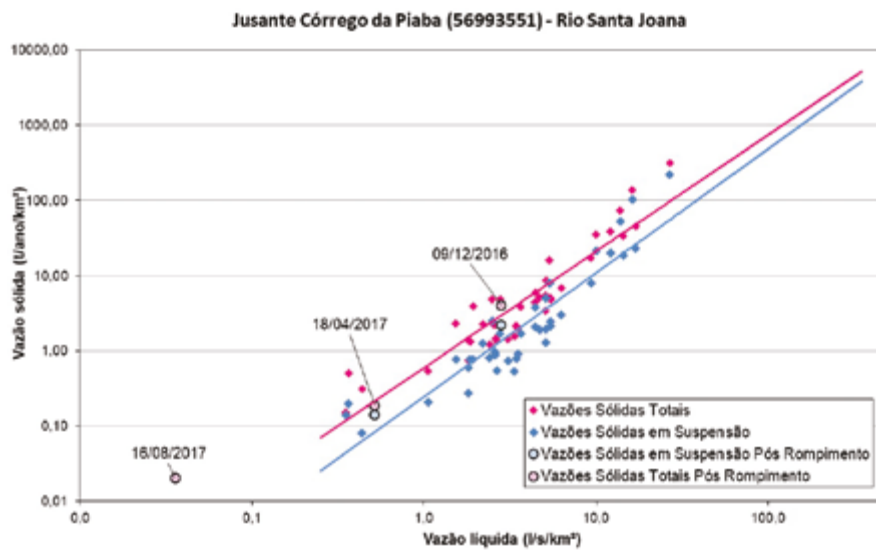
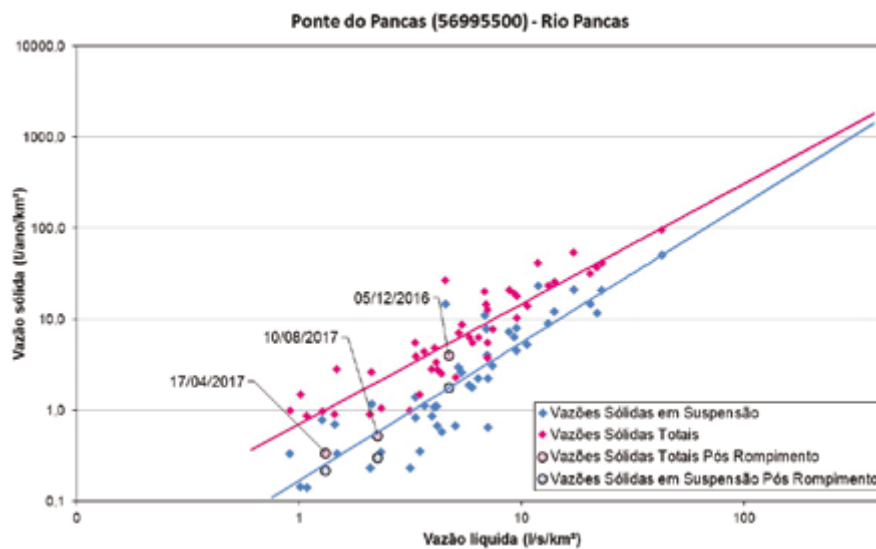


Figura 198 – Alterações no transporte de sedimentos na estação Ponte do Pancas (56995500)



Estações IGAM/IEMA

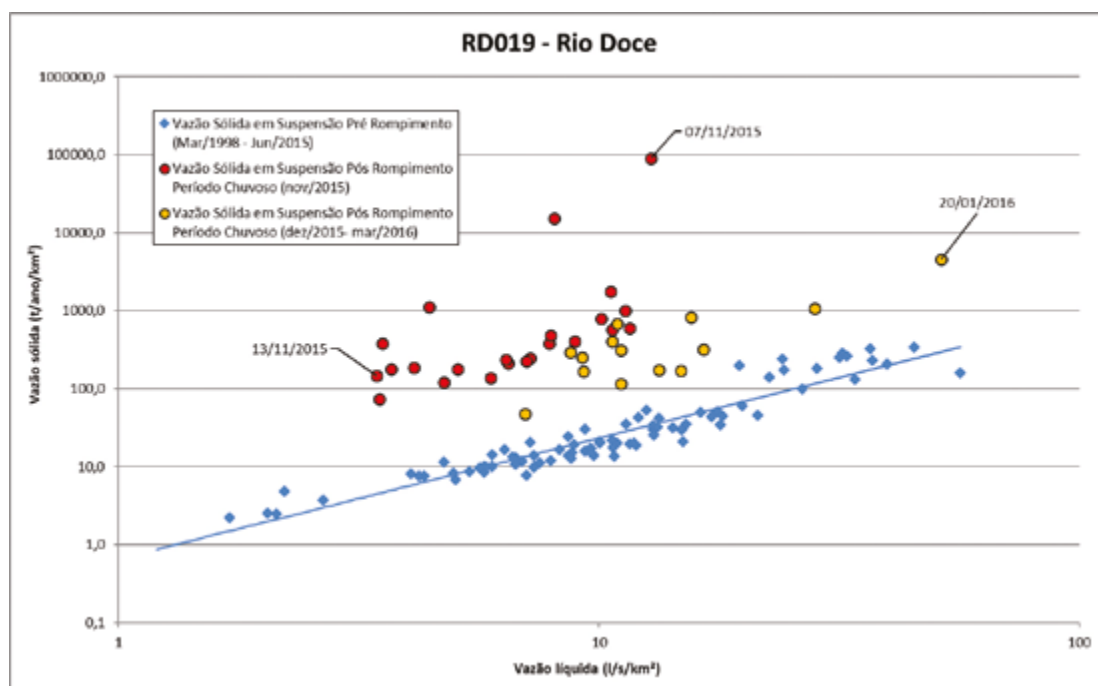
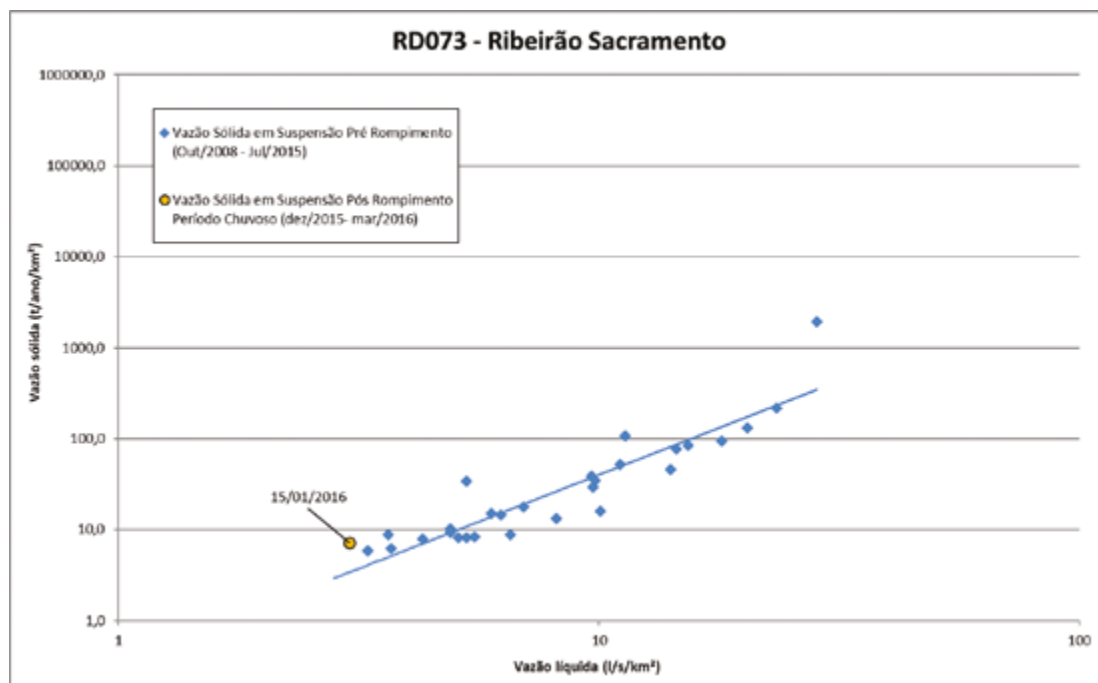
Figura 199 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD019.**Figura 200** – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD073.

Figura 201 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD034.

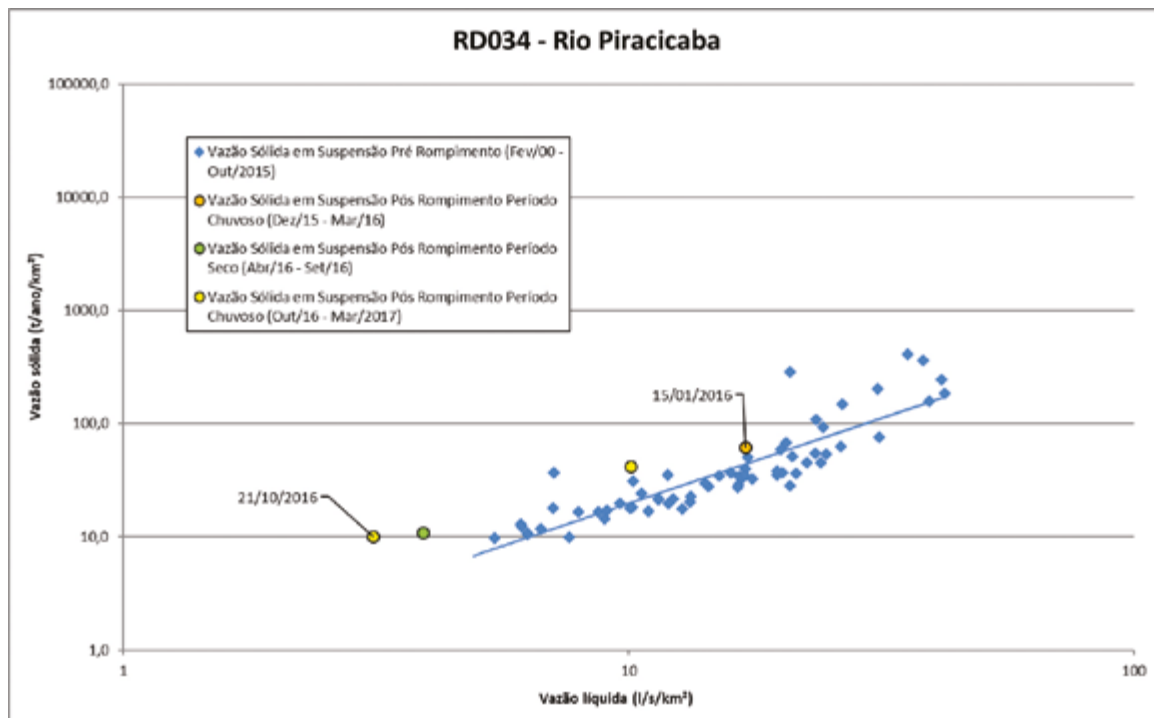


Figura 202 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD033.

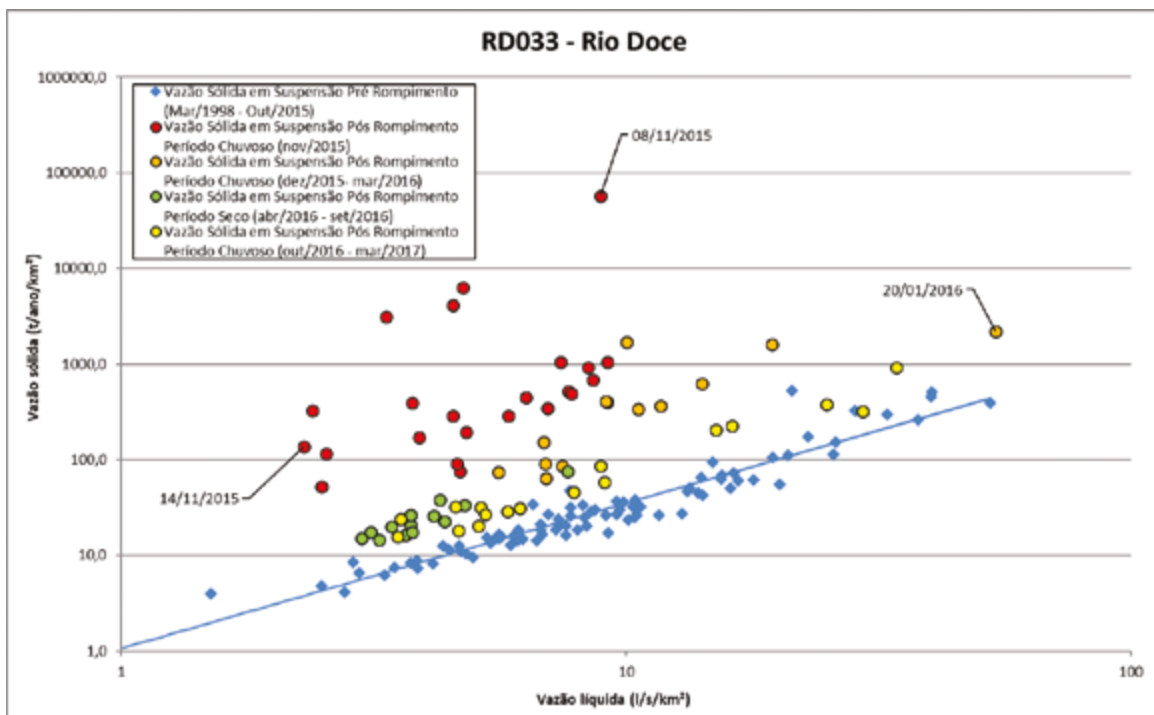
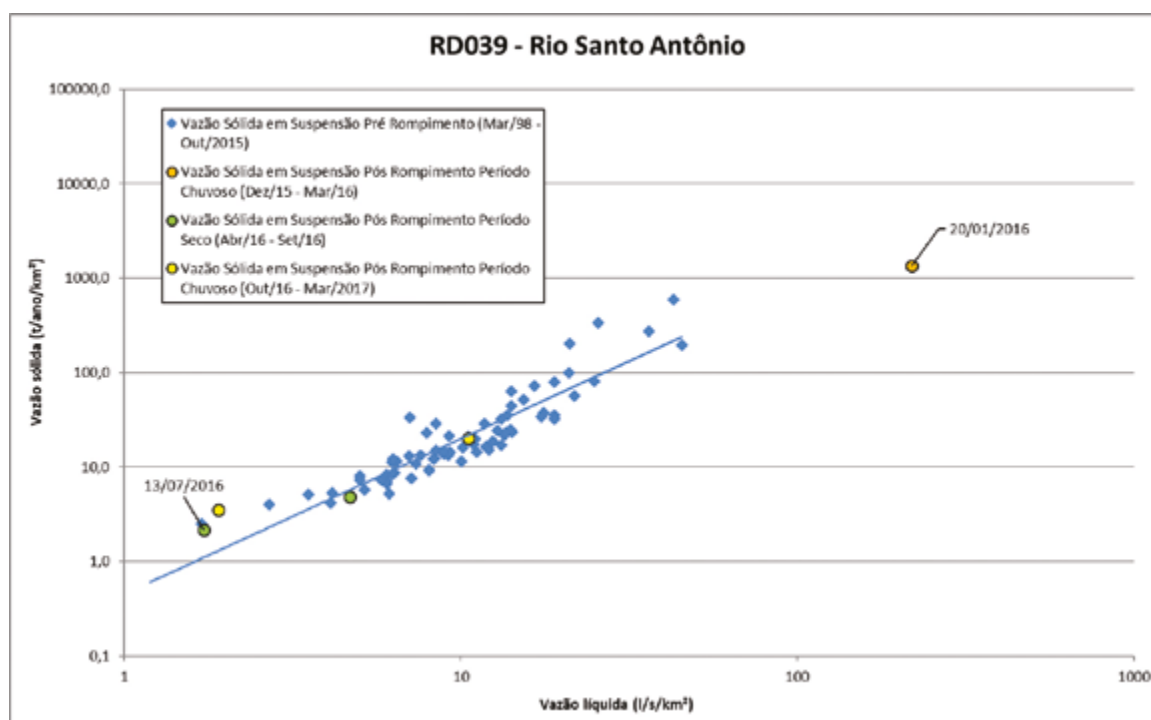
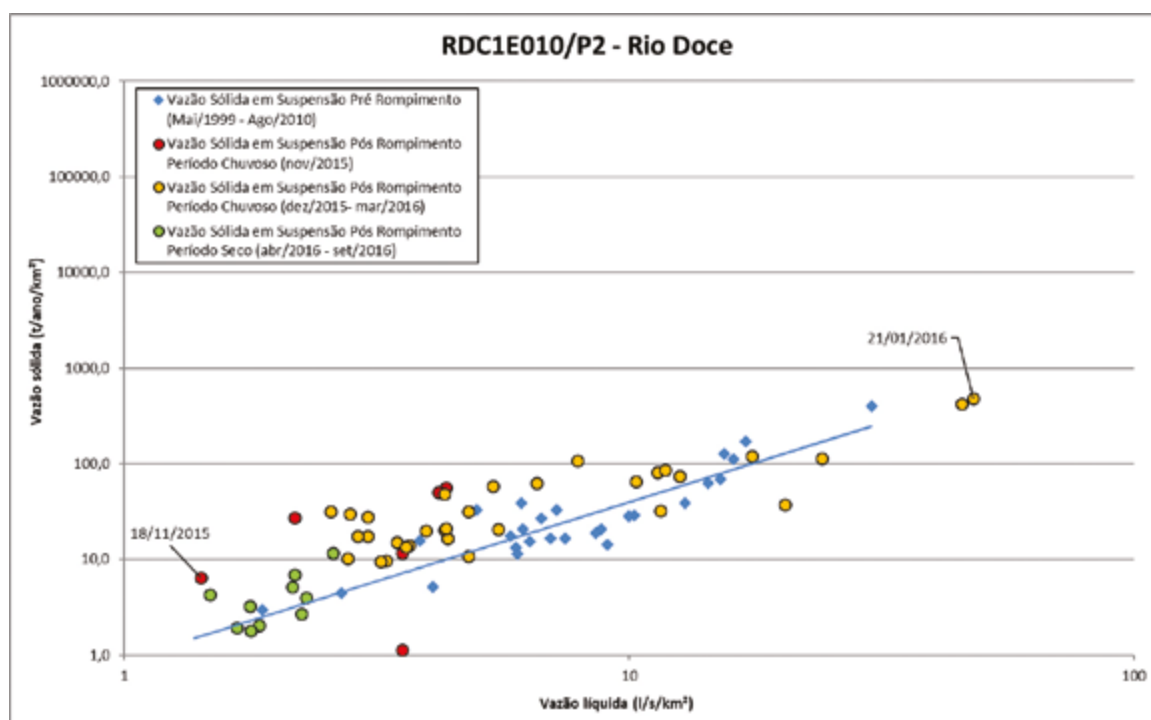


Figura 203 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD039.**Figura 204** – Alterações no transporte de sedimentos na estação RDC1E010/P2.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

Figura 205 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56075000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

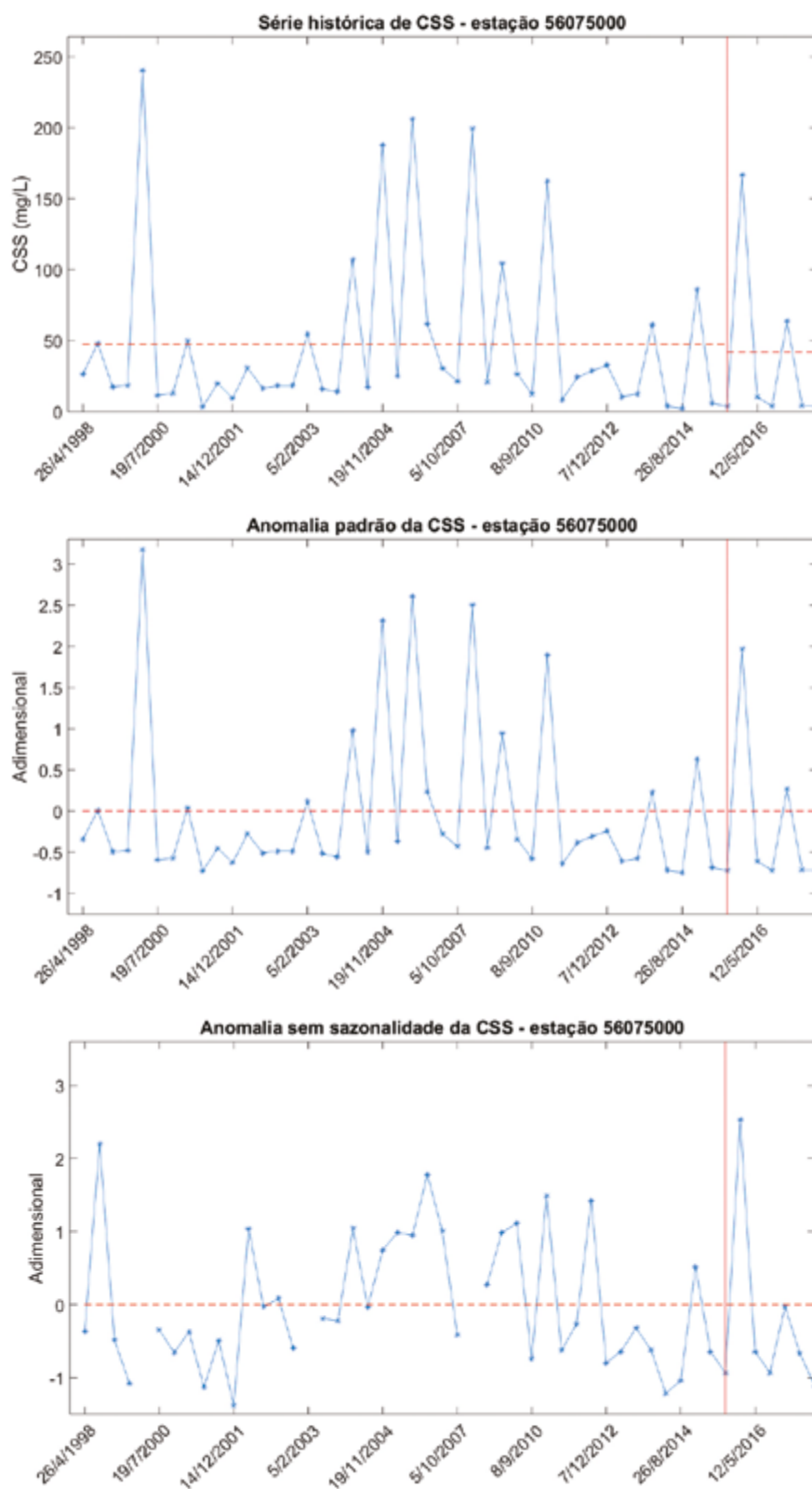


Figura 206 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56425000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

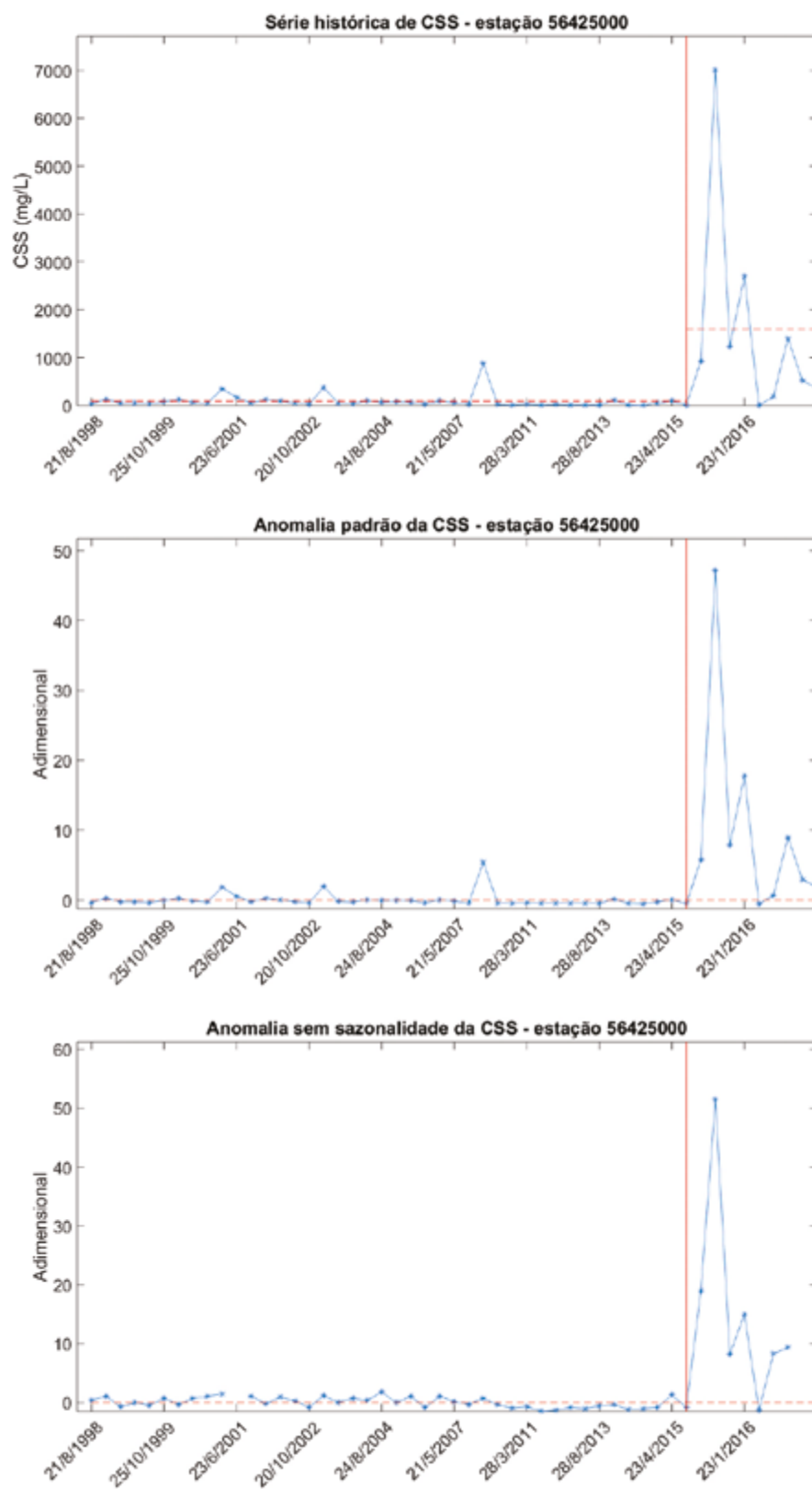


Figura 207 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56539000 Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

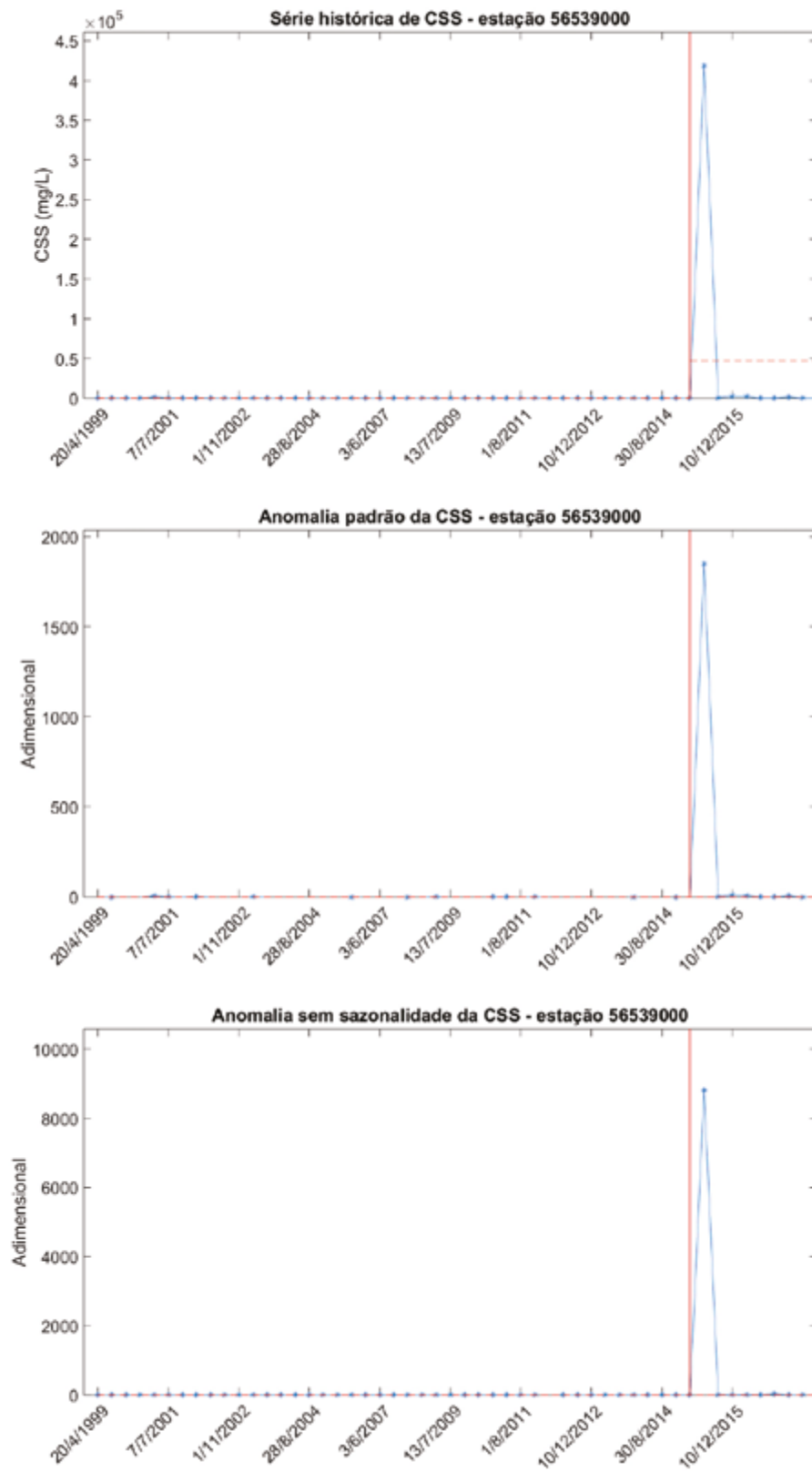


Figura 208 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56696000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

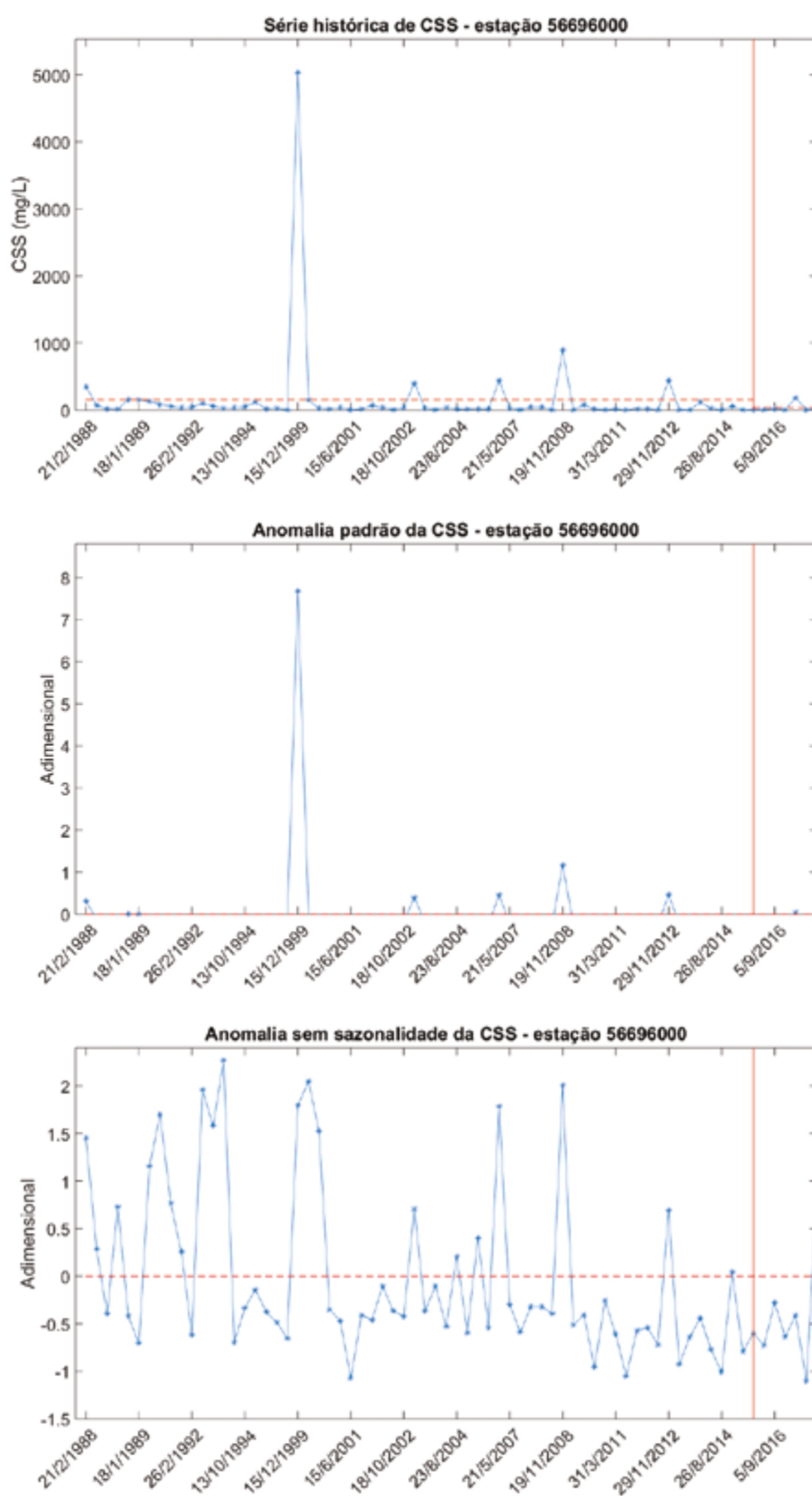


Figura 209 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56850000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

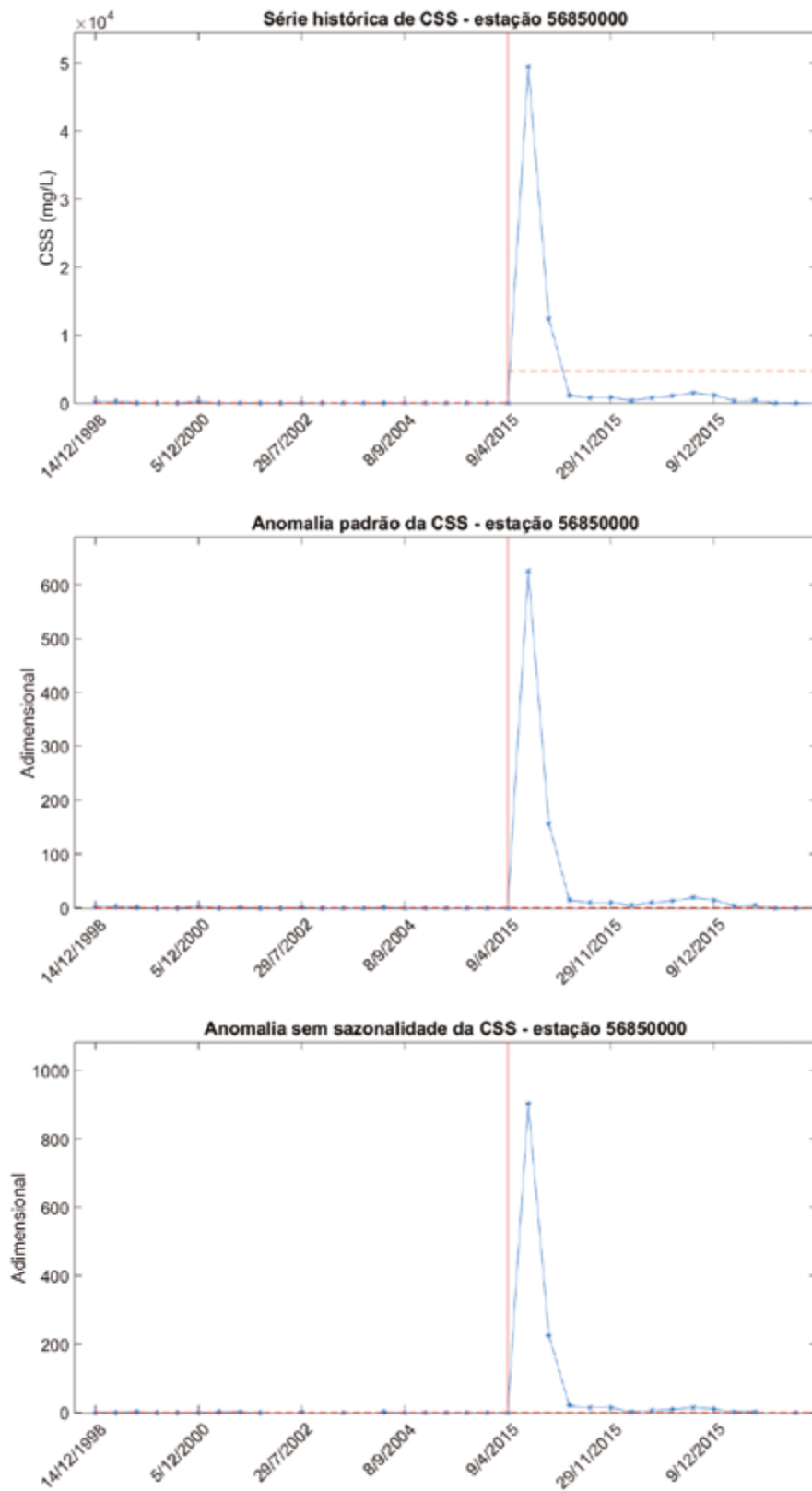


Figura 210 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56920000. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

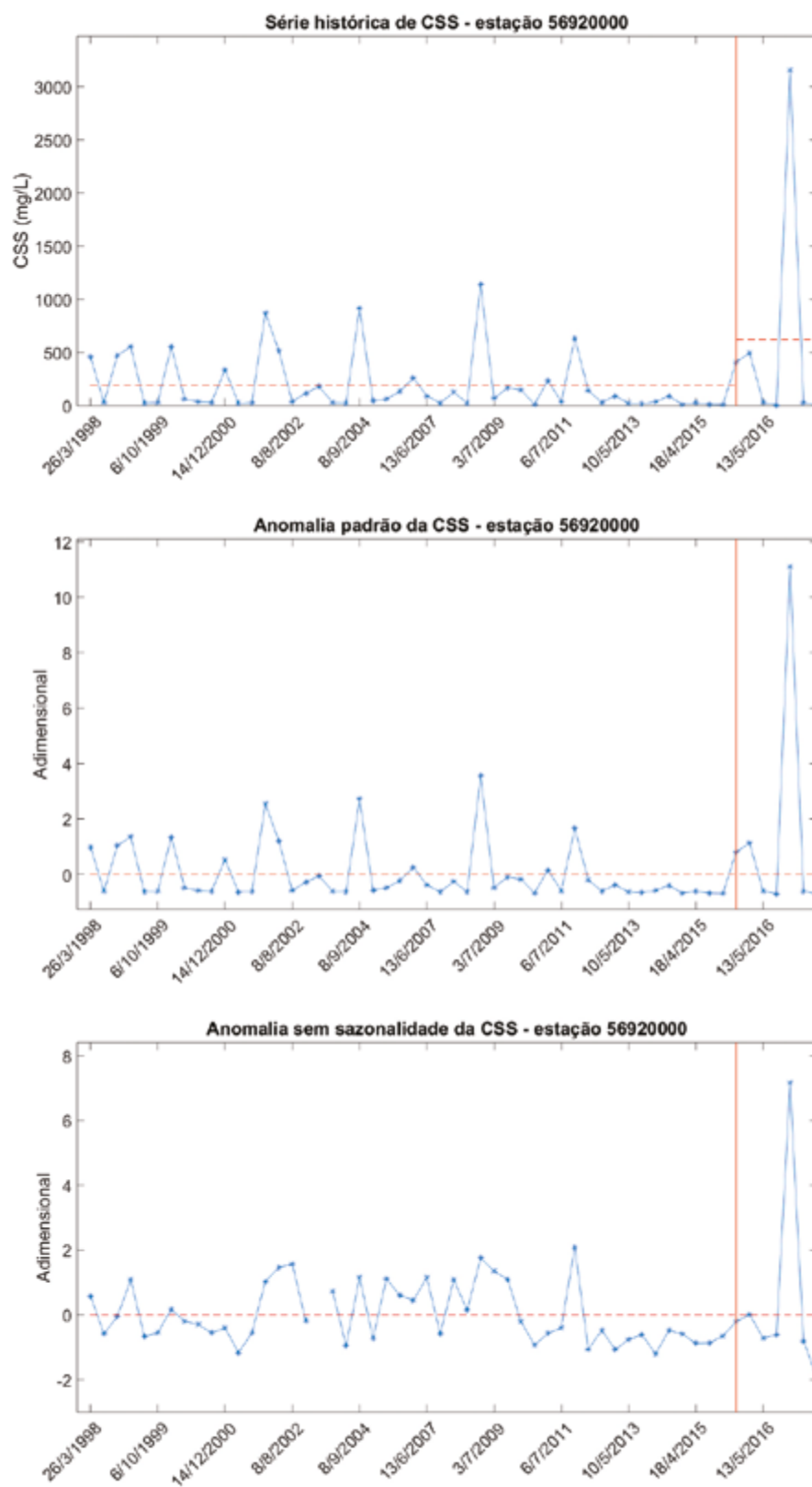
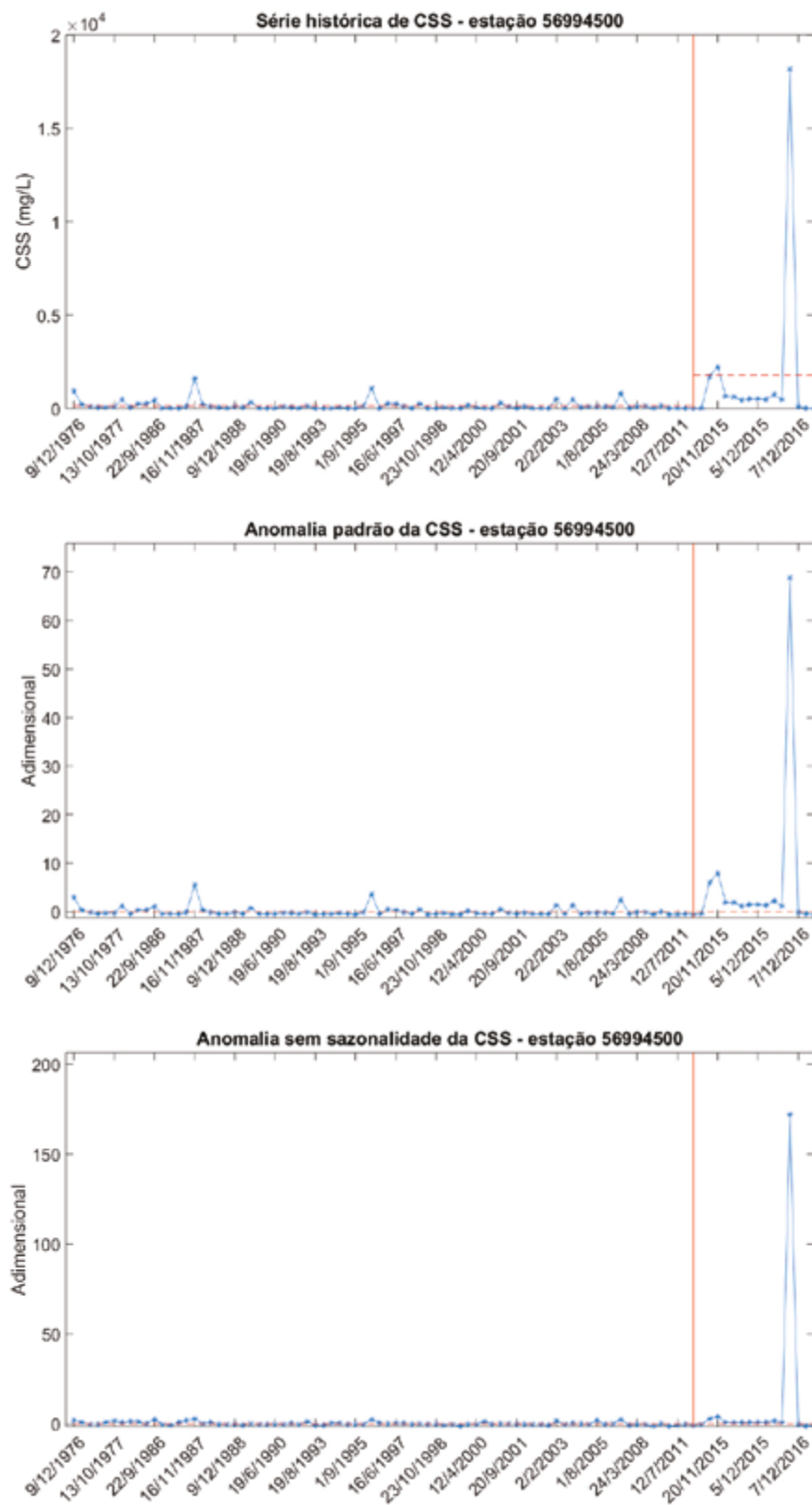


Figura 211 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação 56994500. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de CSS antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).



TURBIDEZ

Figura 212 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD001. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

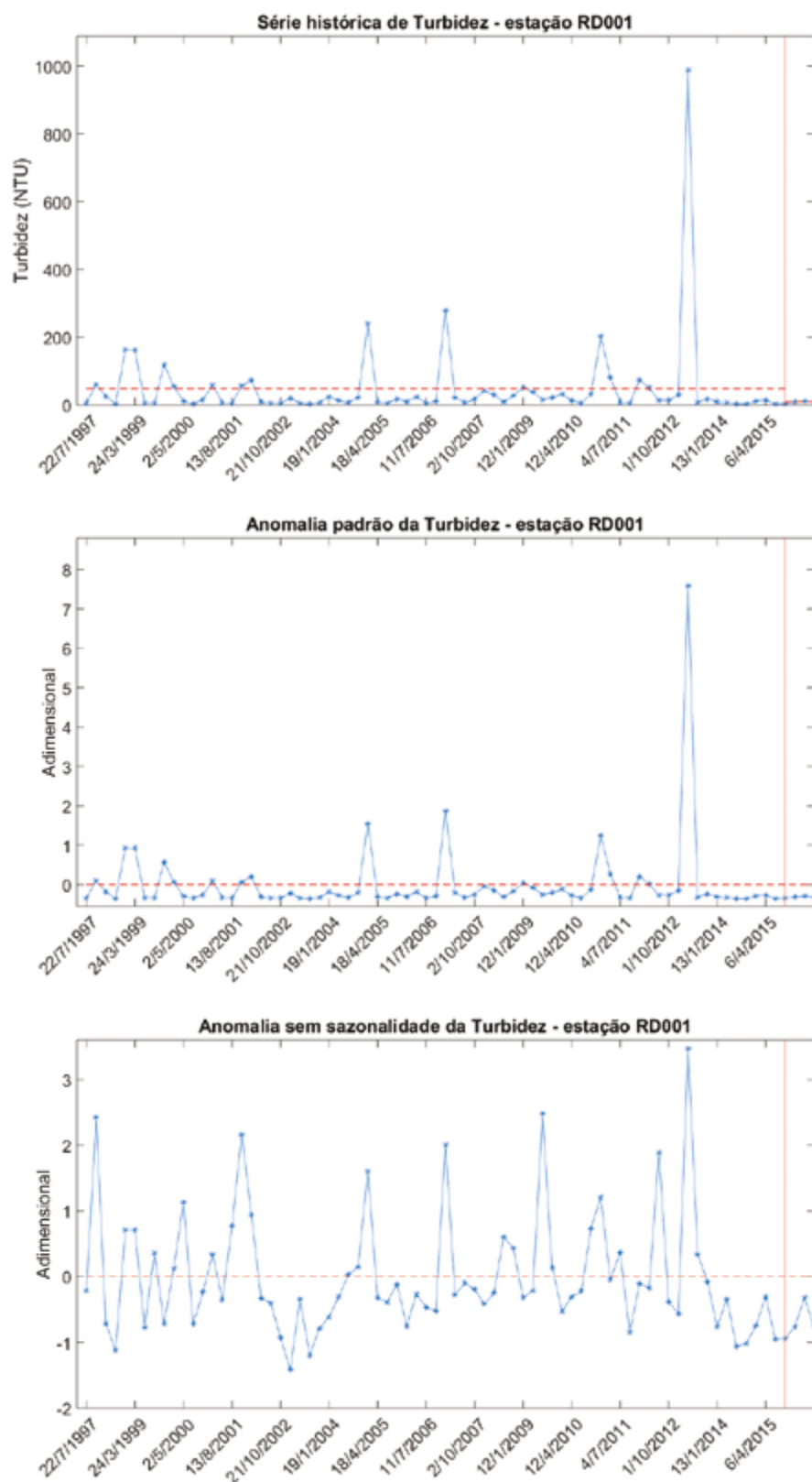


Figura 213 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD013. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

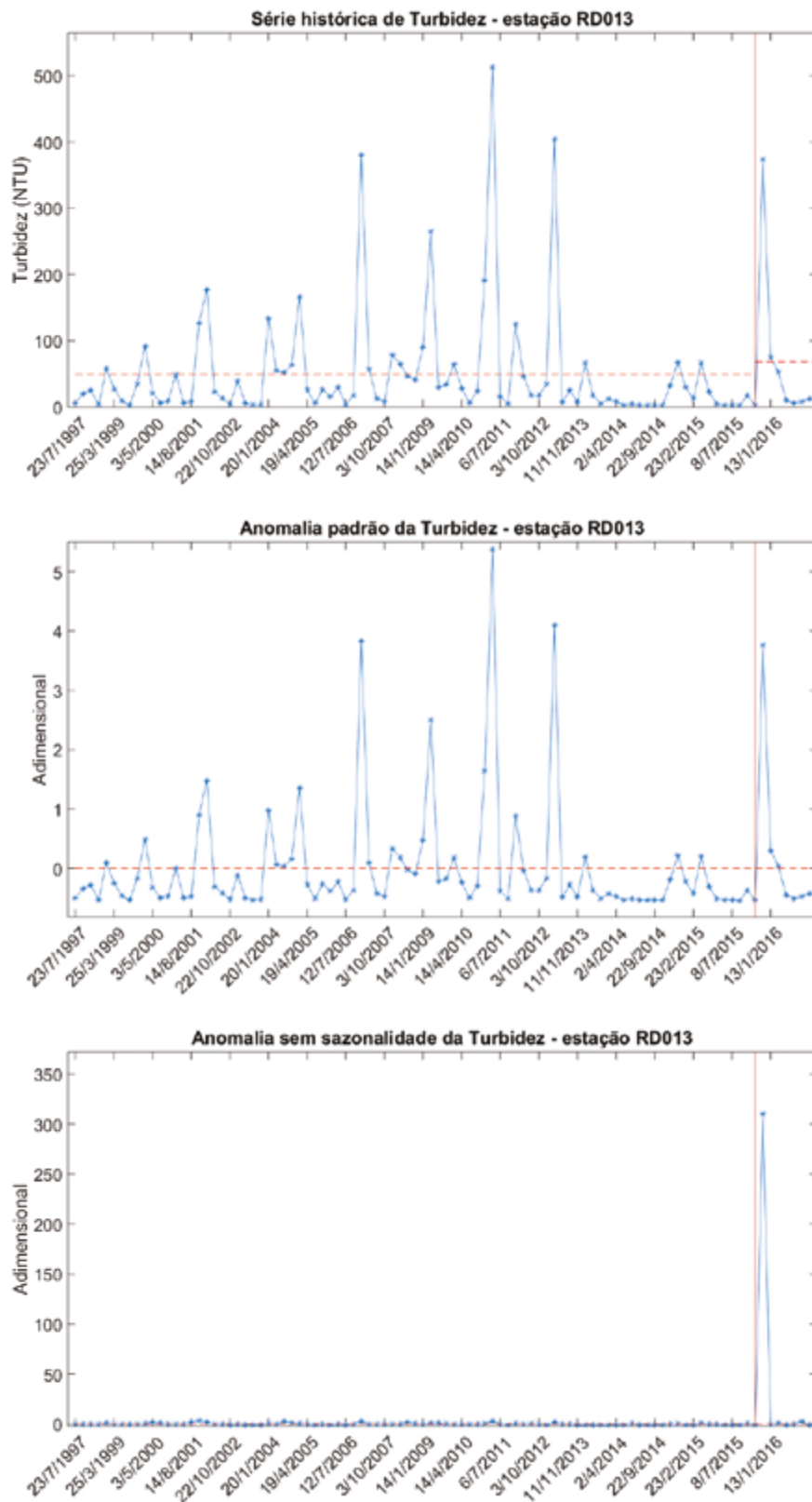


Figura 214– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD019. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

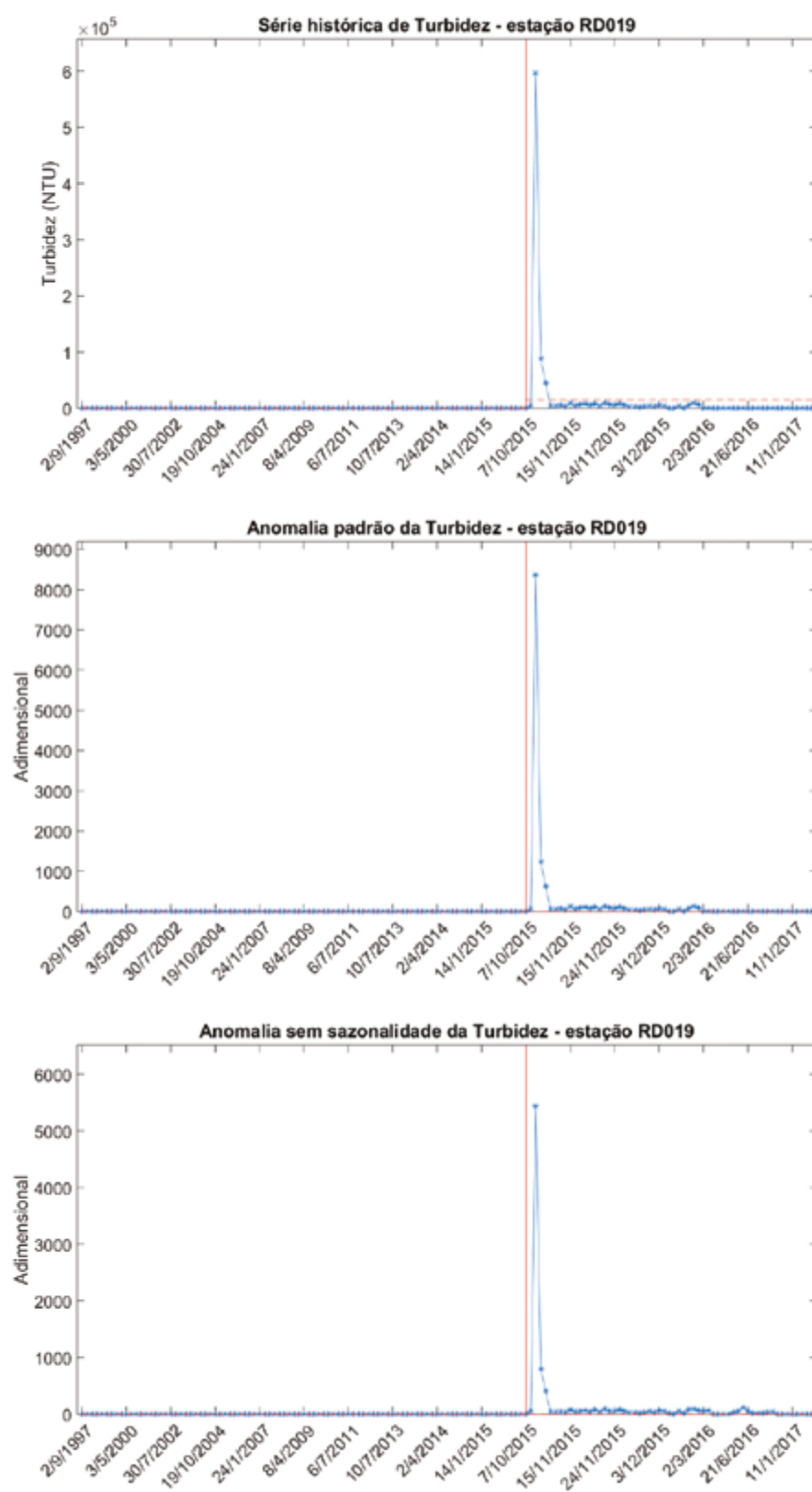


Figura 215 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD032. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

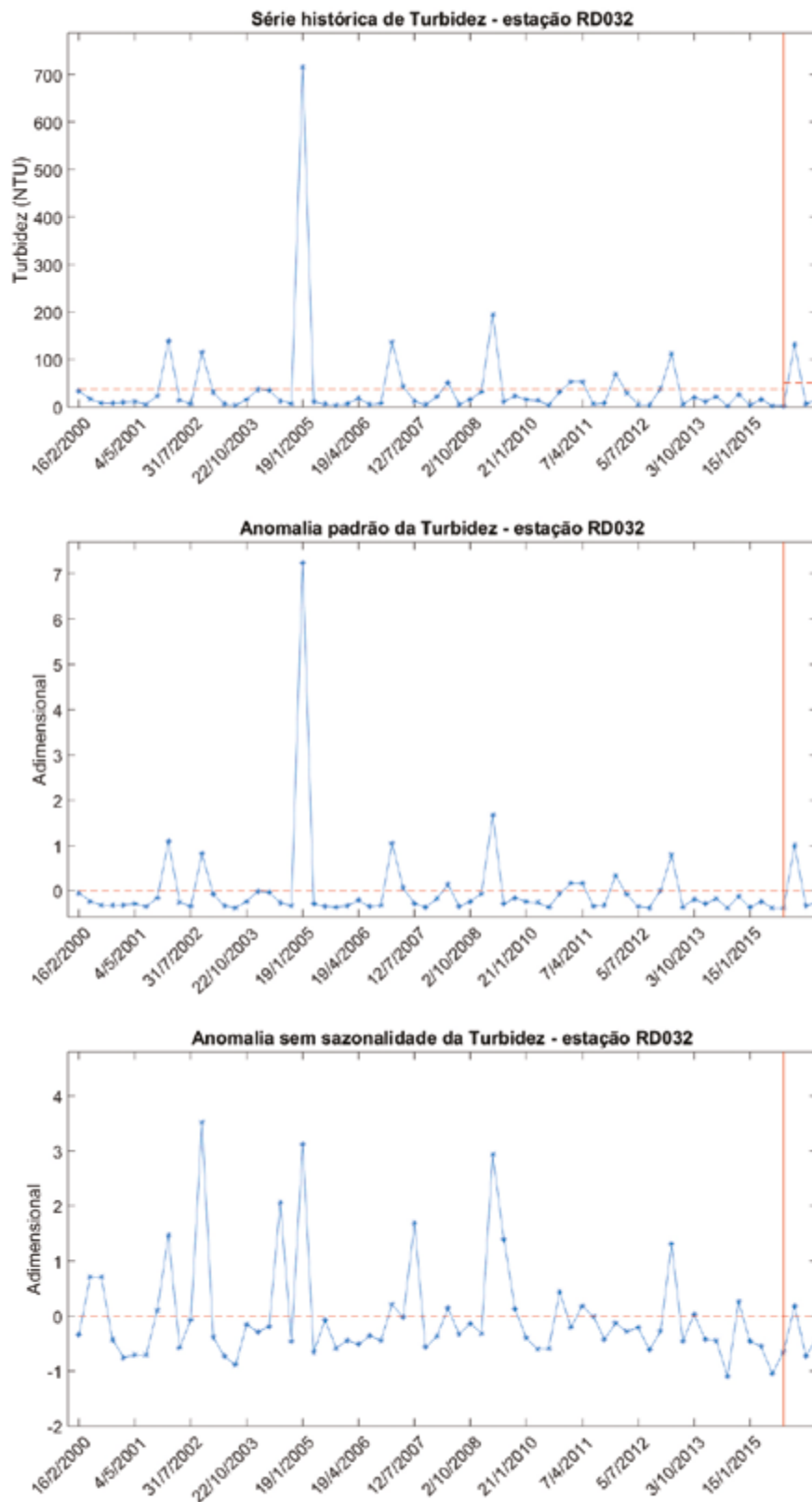


Figura 216 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD033. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

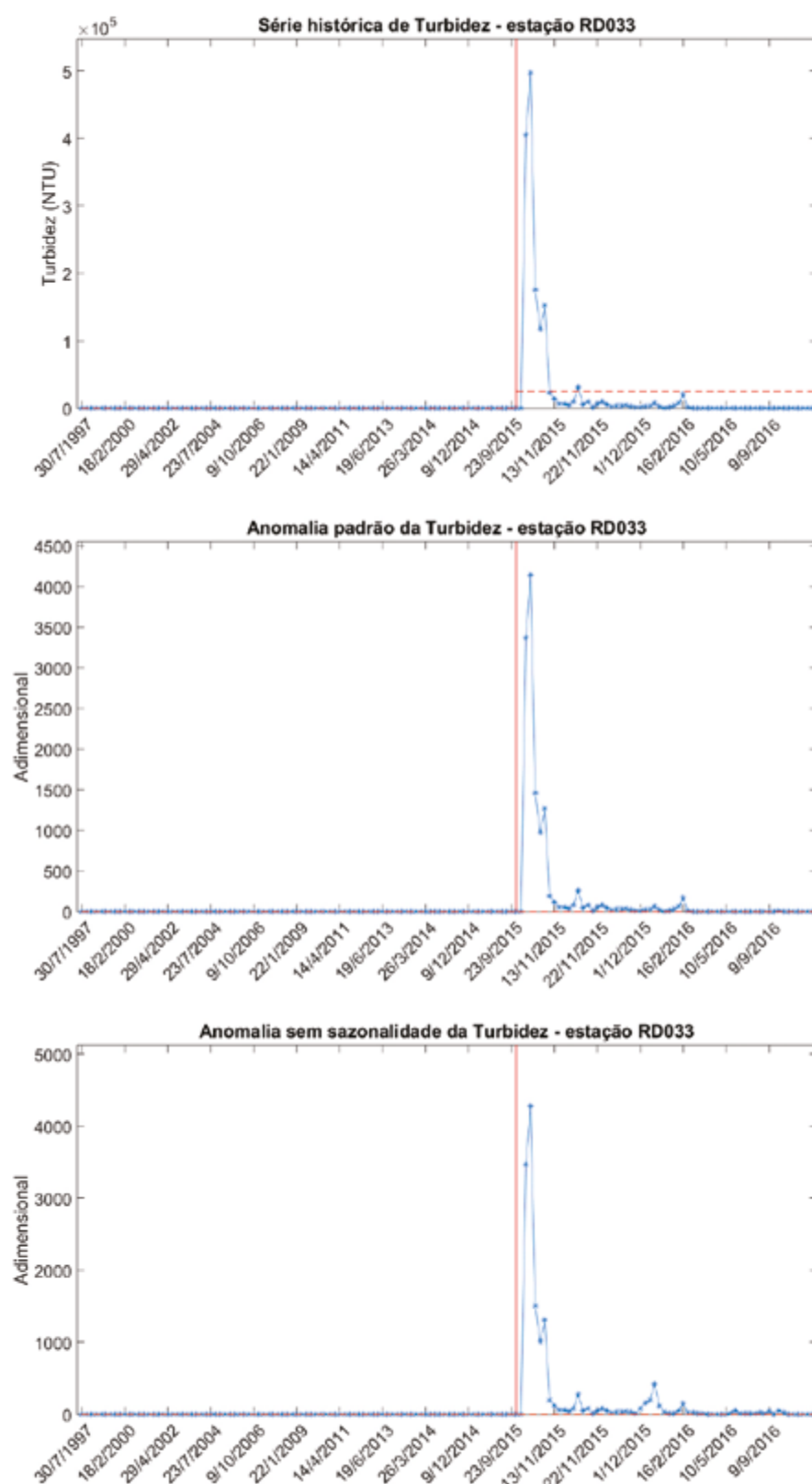


Figura 217 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RS035. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

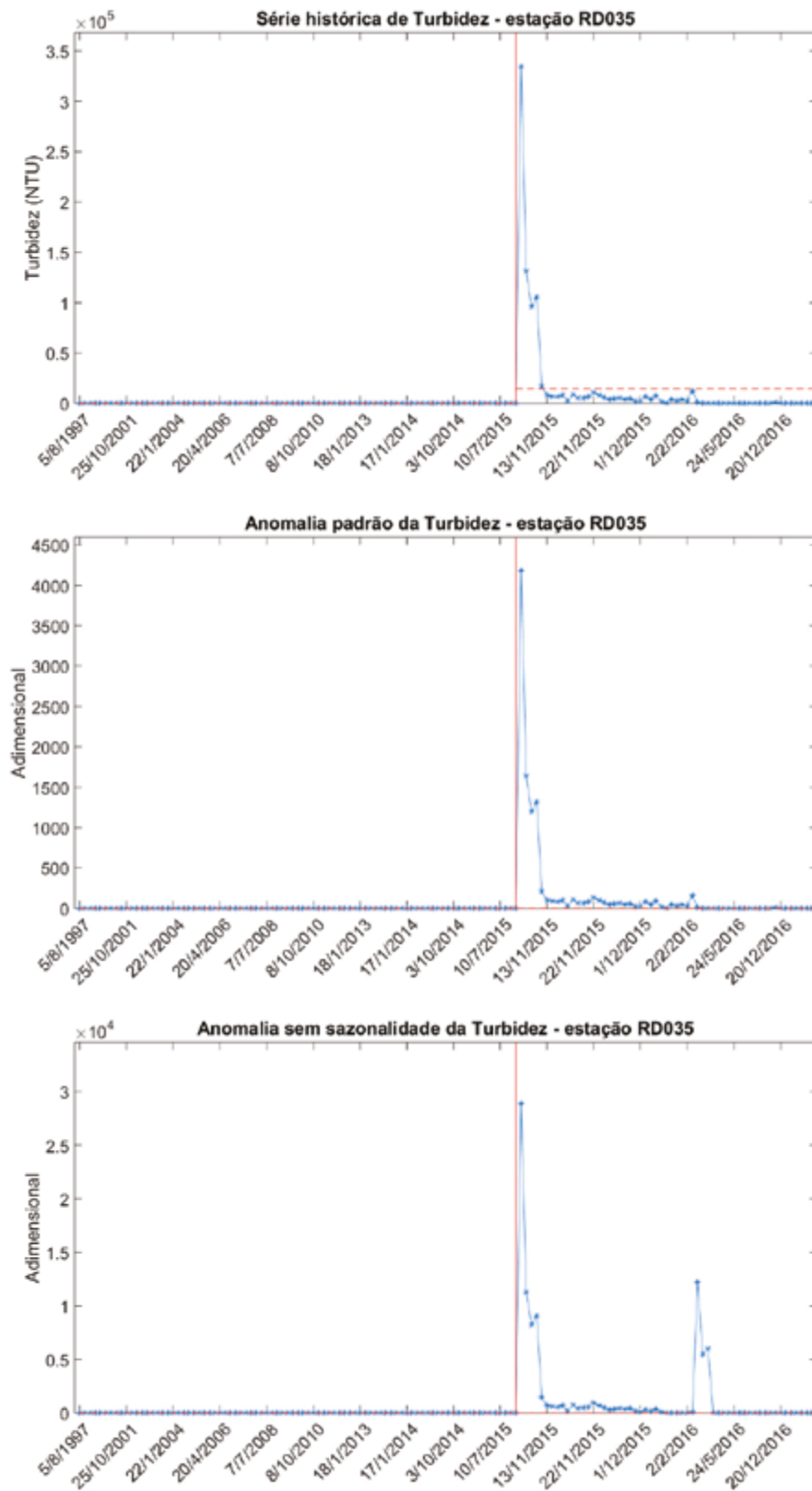


Figura 218 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD039. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

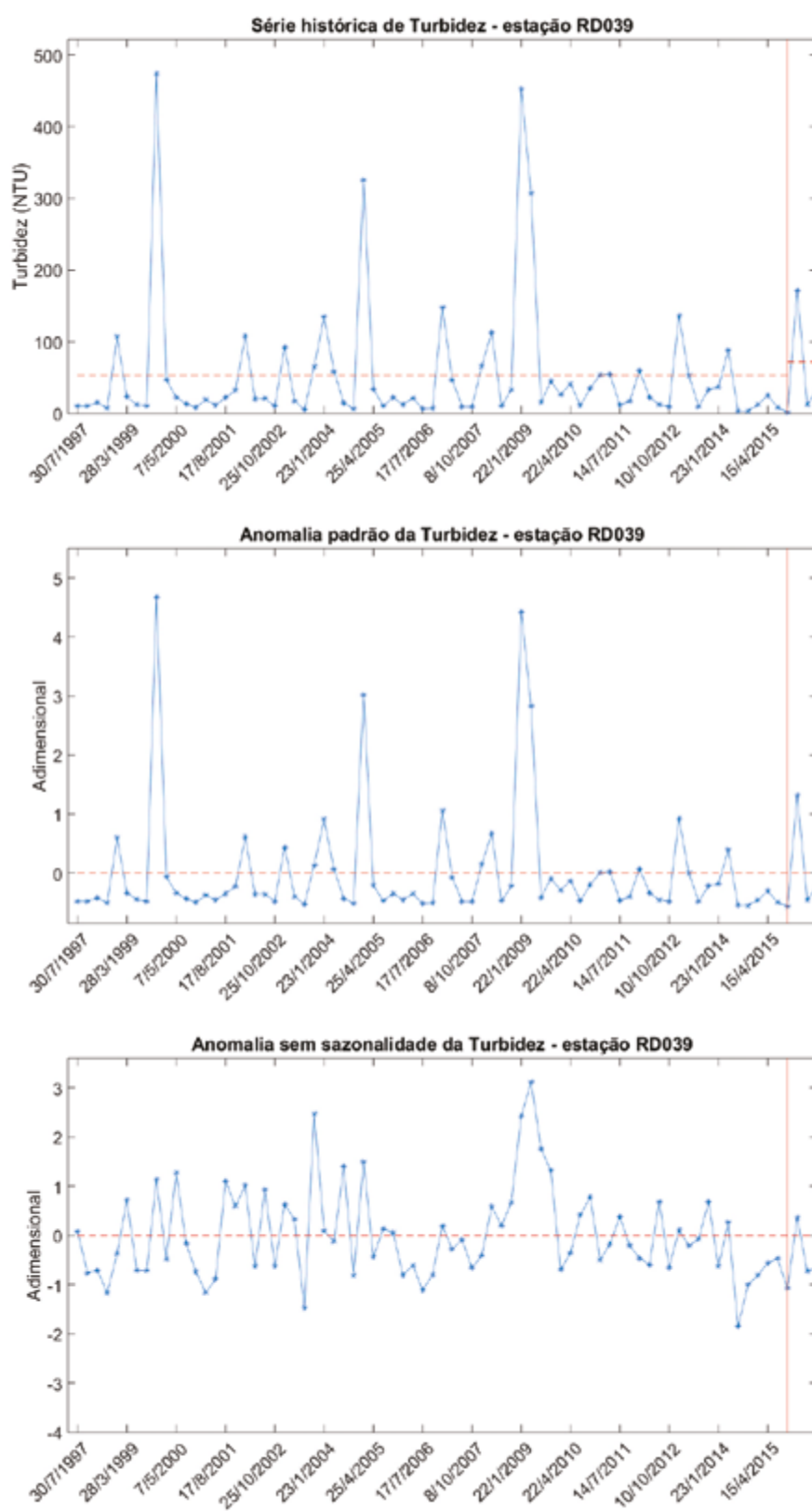


Figura 219— Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD044. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

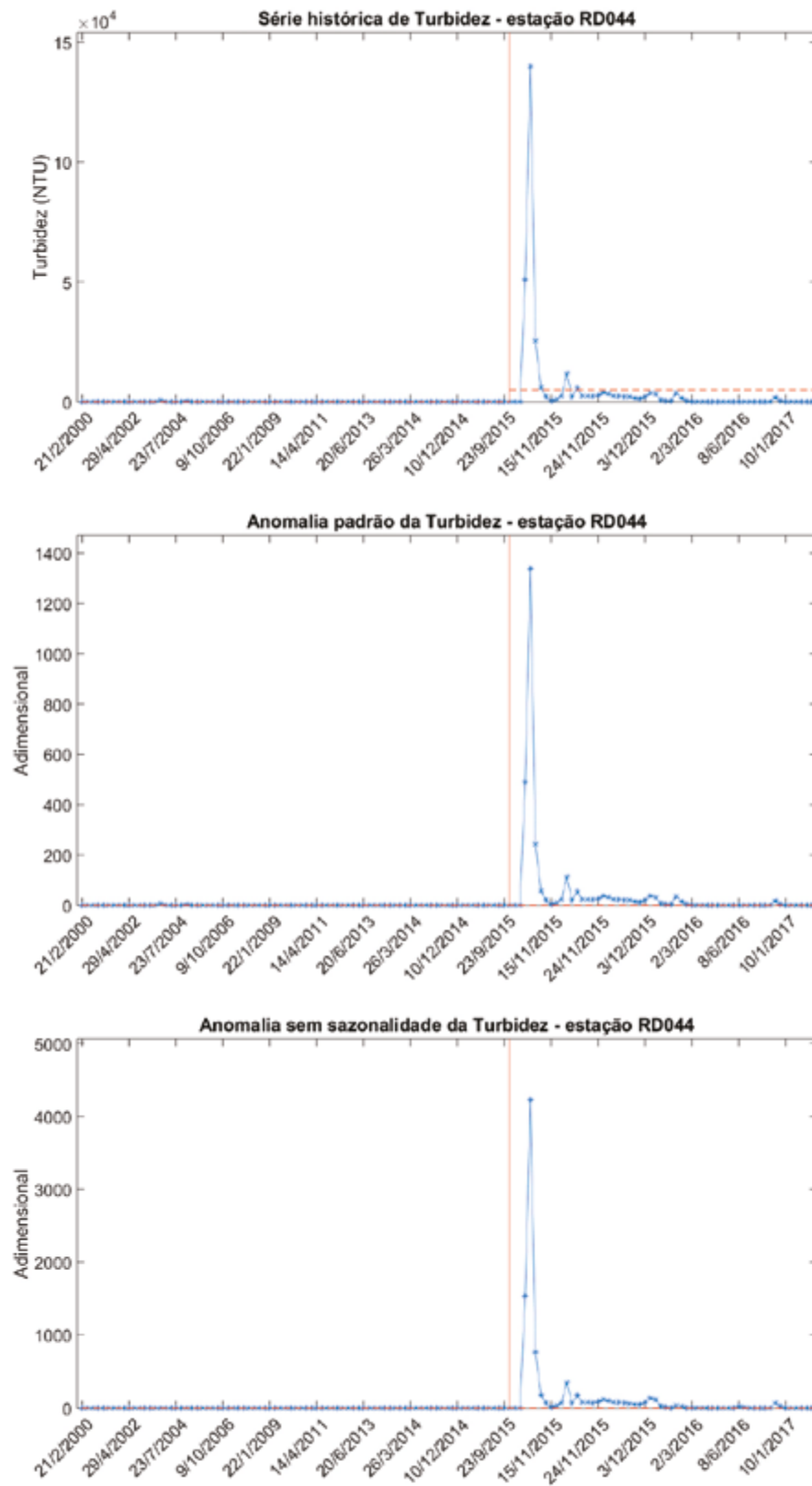


Figura 220 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD045. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

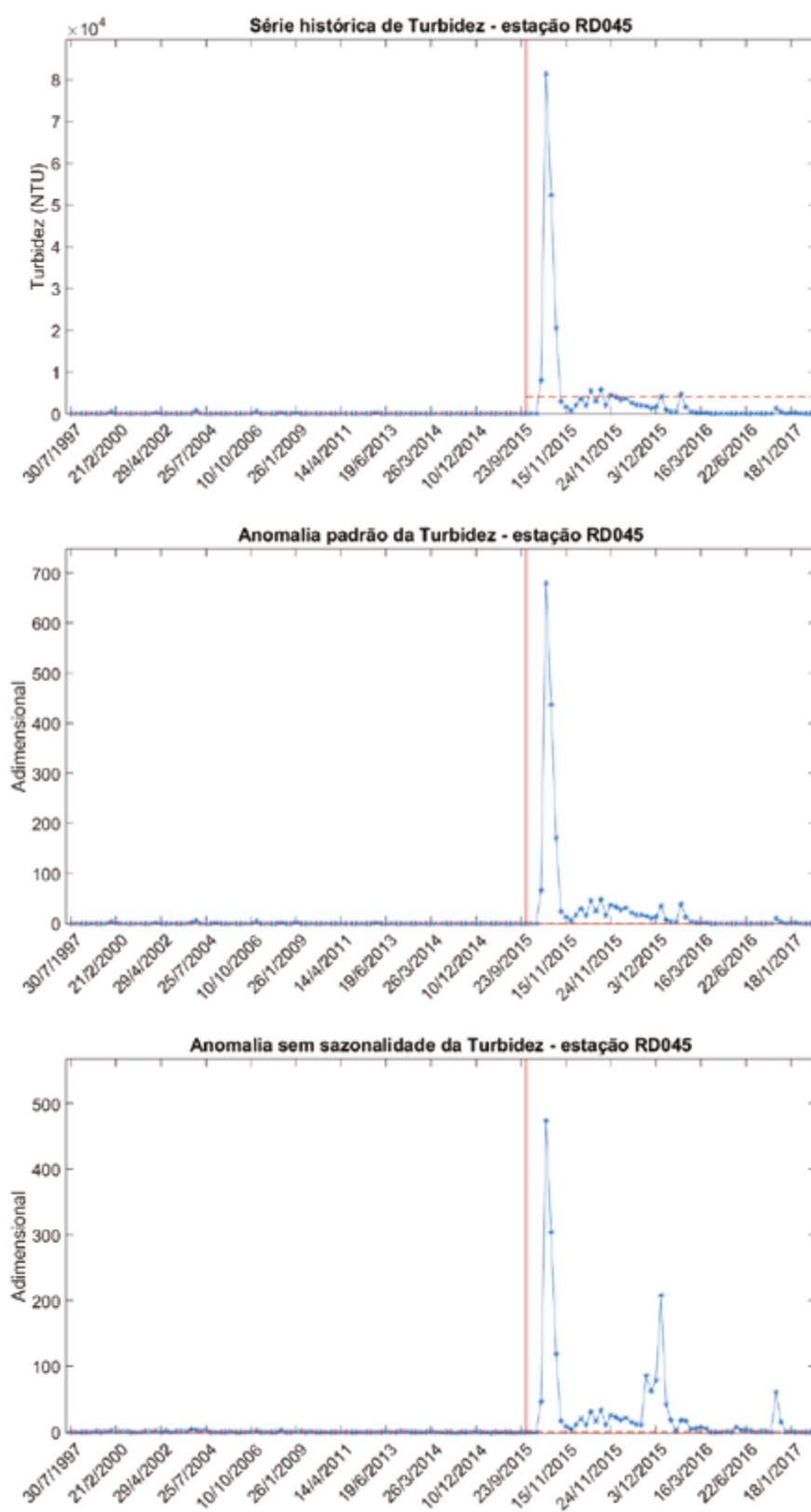


Figura 221 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD053. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

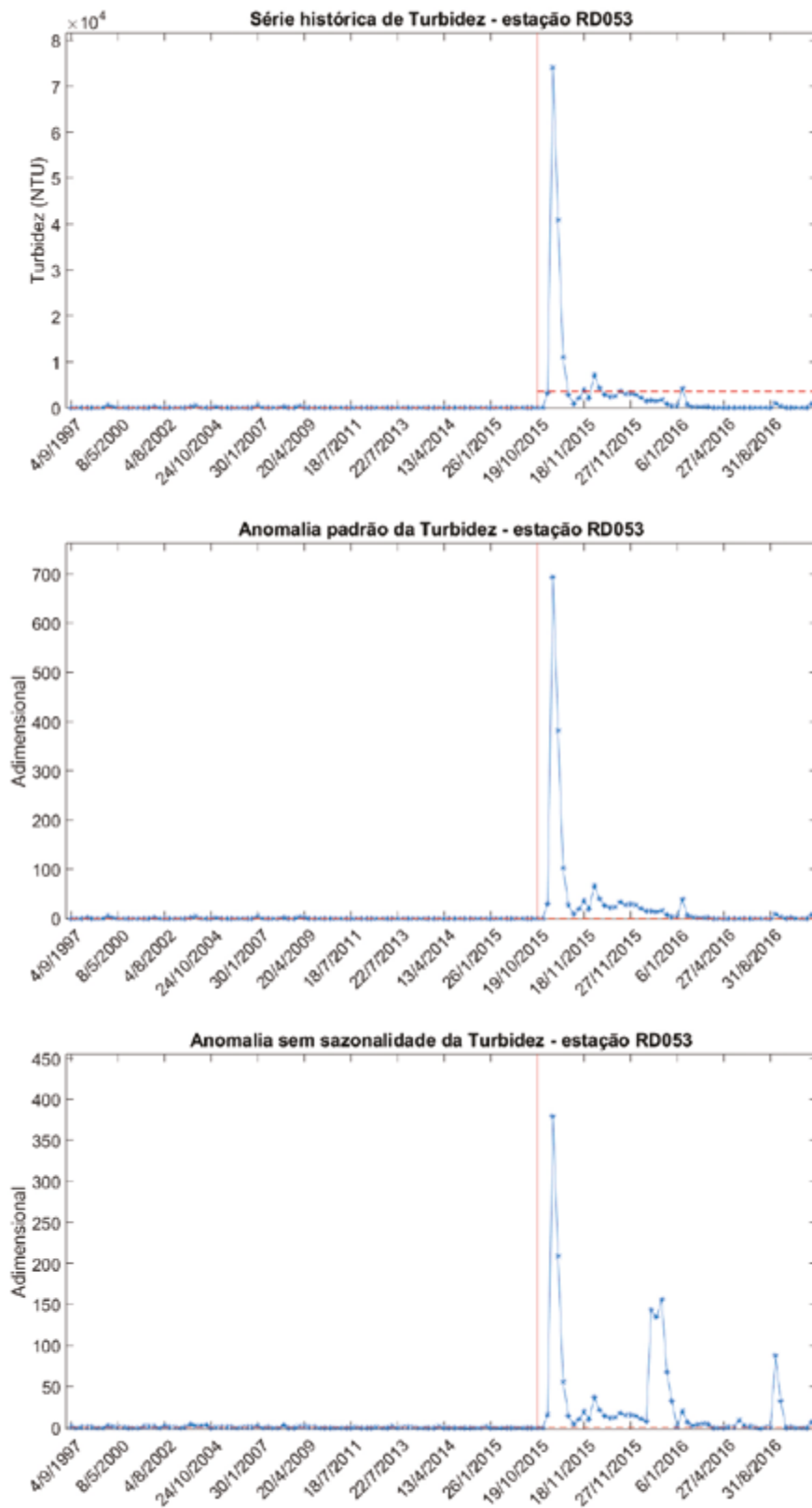


Figura 222– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD058. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

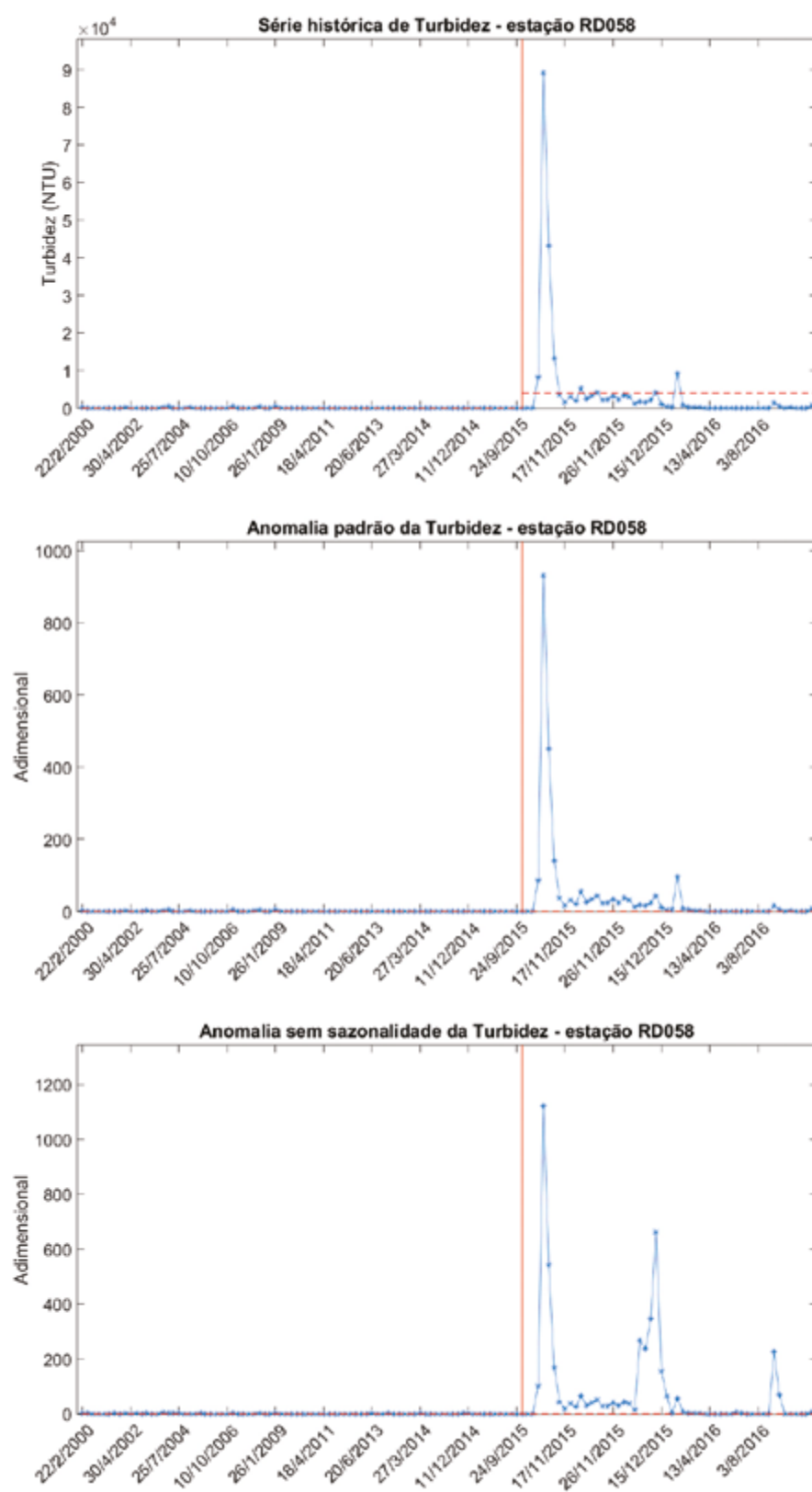


Figura 223 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD059. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

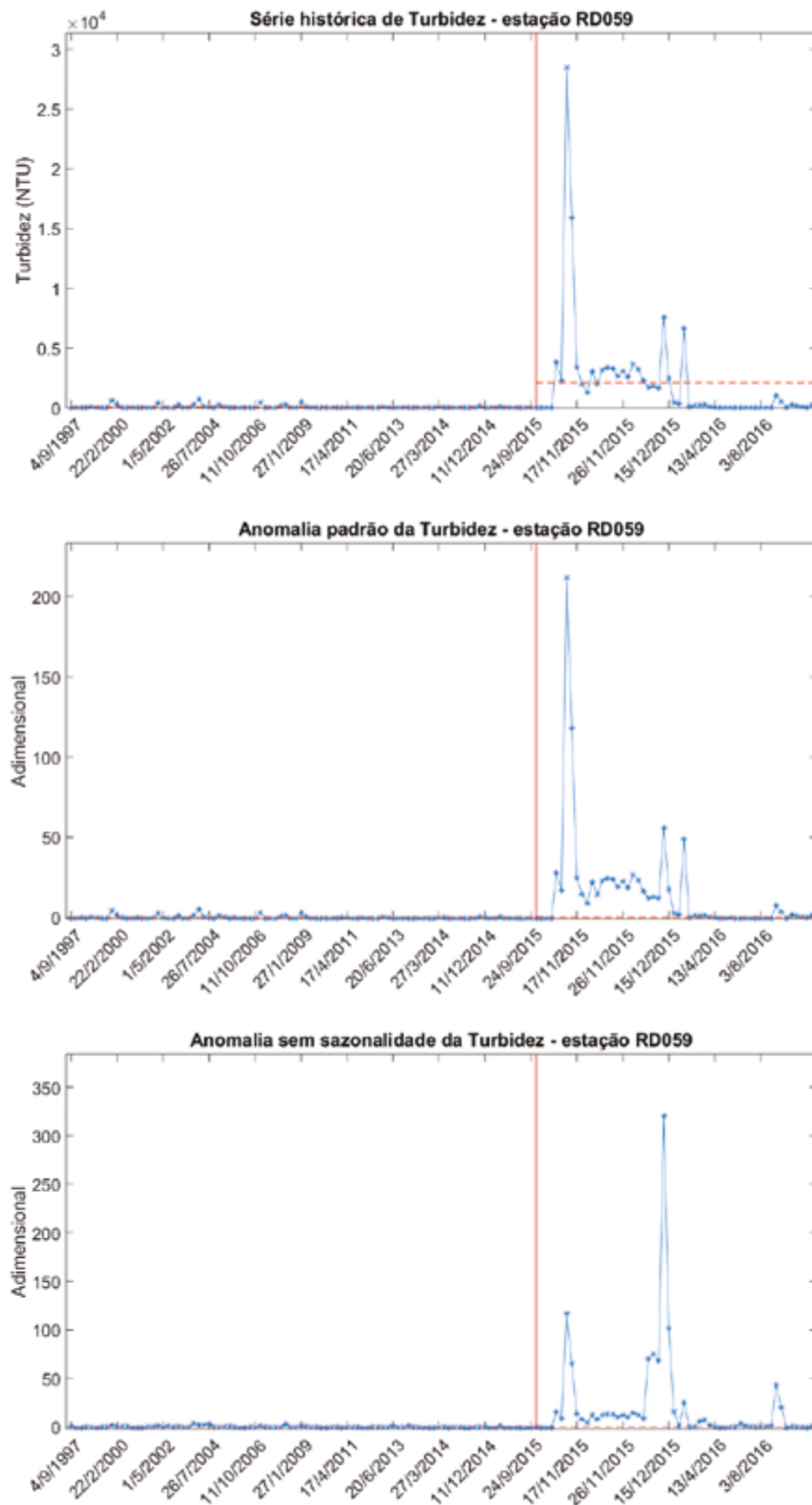


Figura 224 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD067. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

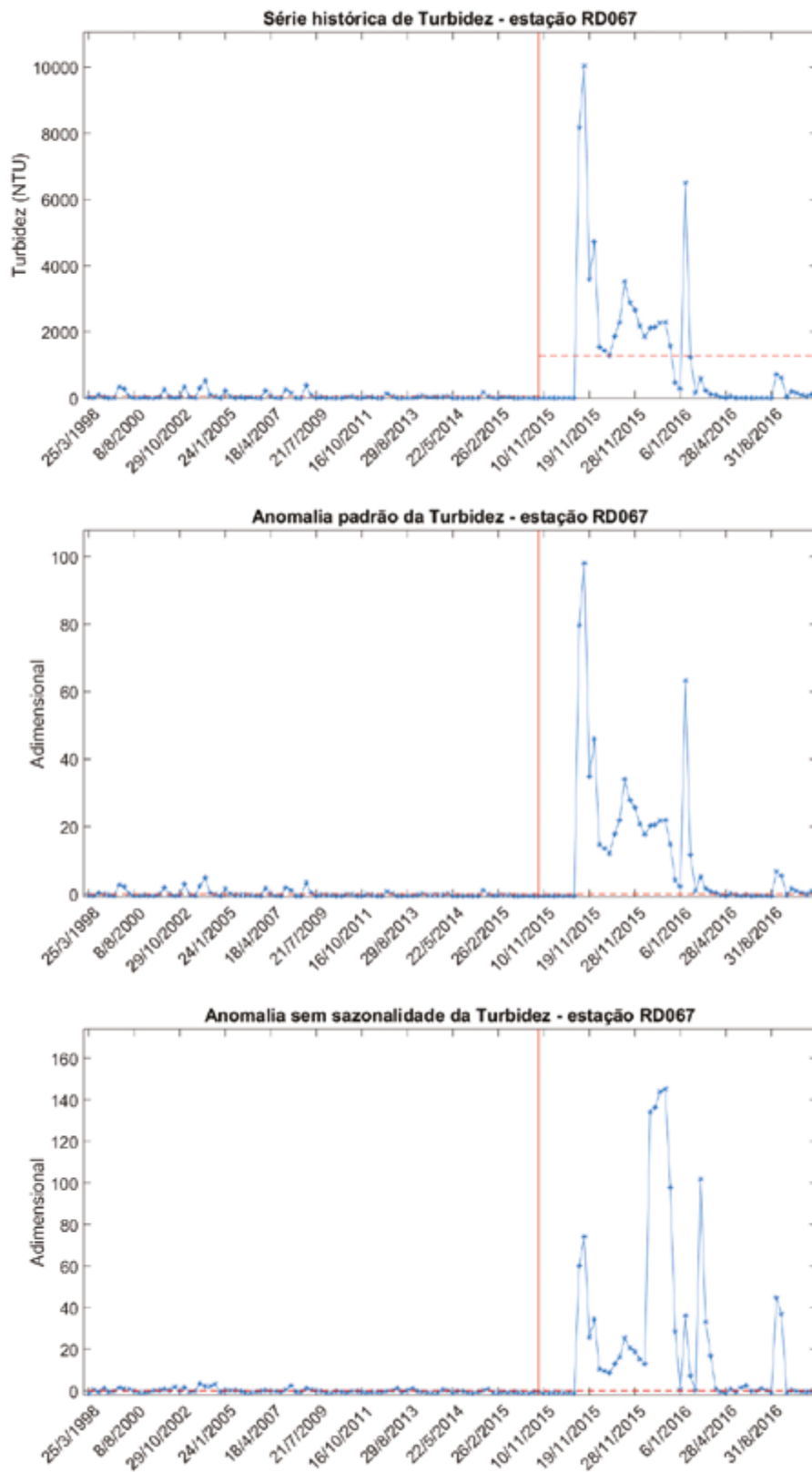


Figura 225 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD071. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

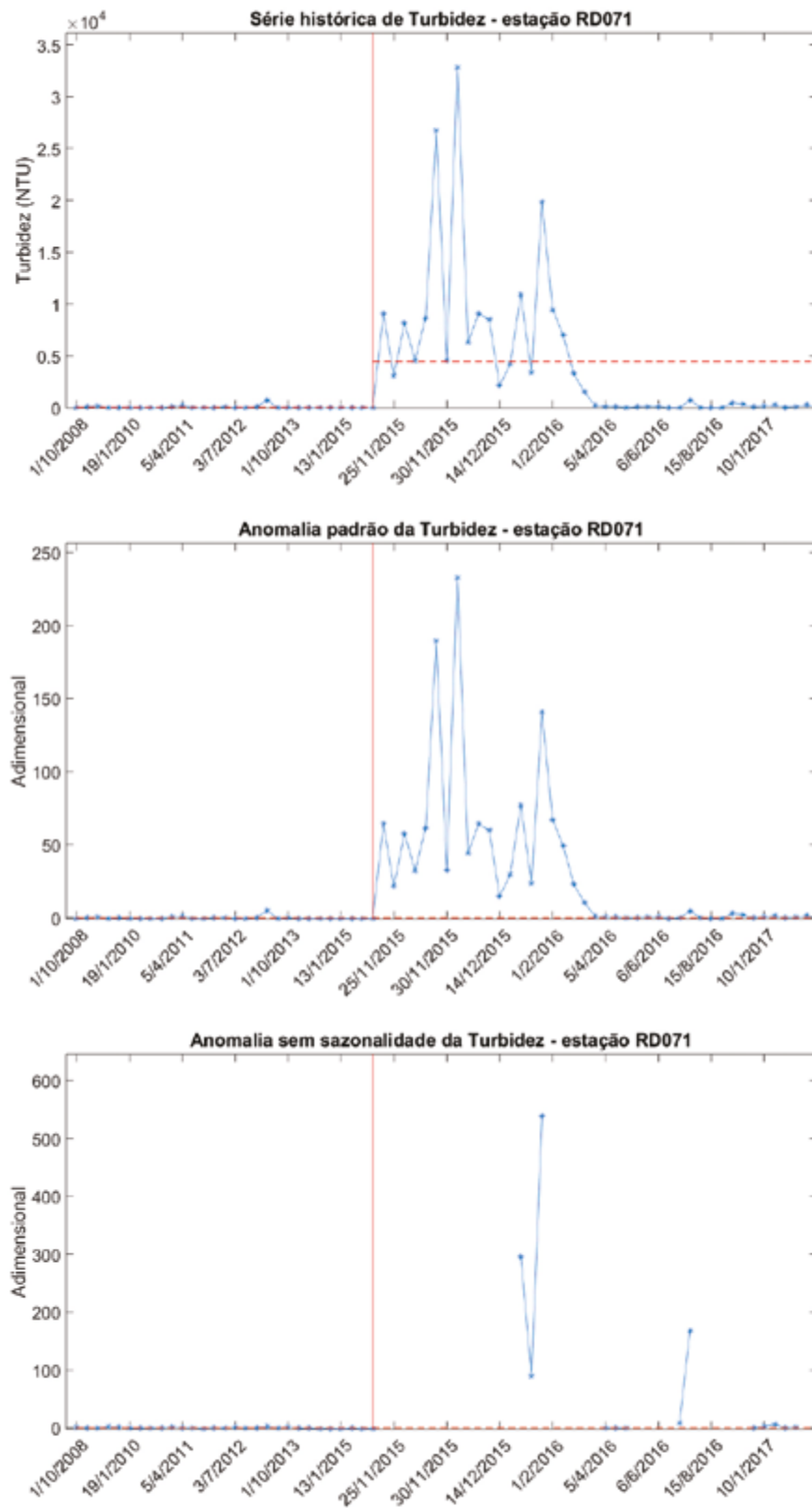


Figura 226 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD072. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

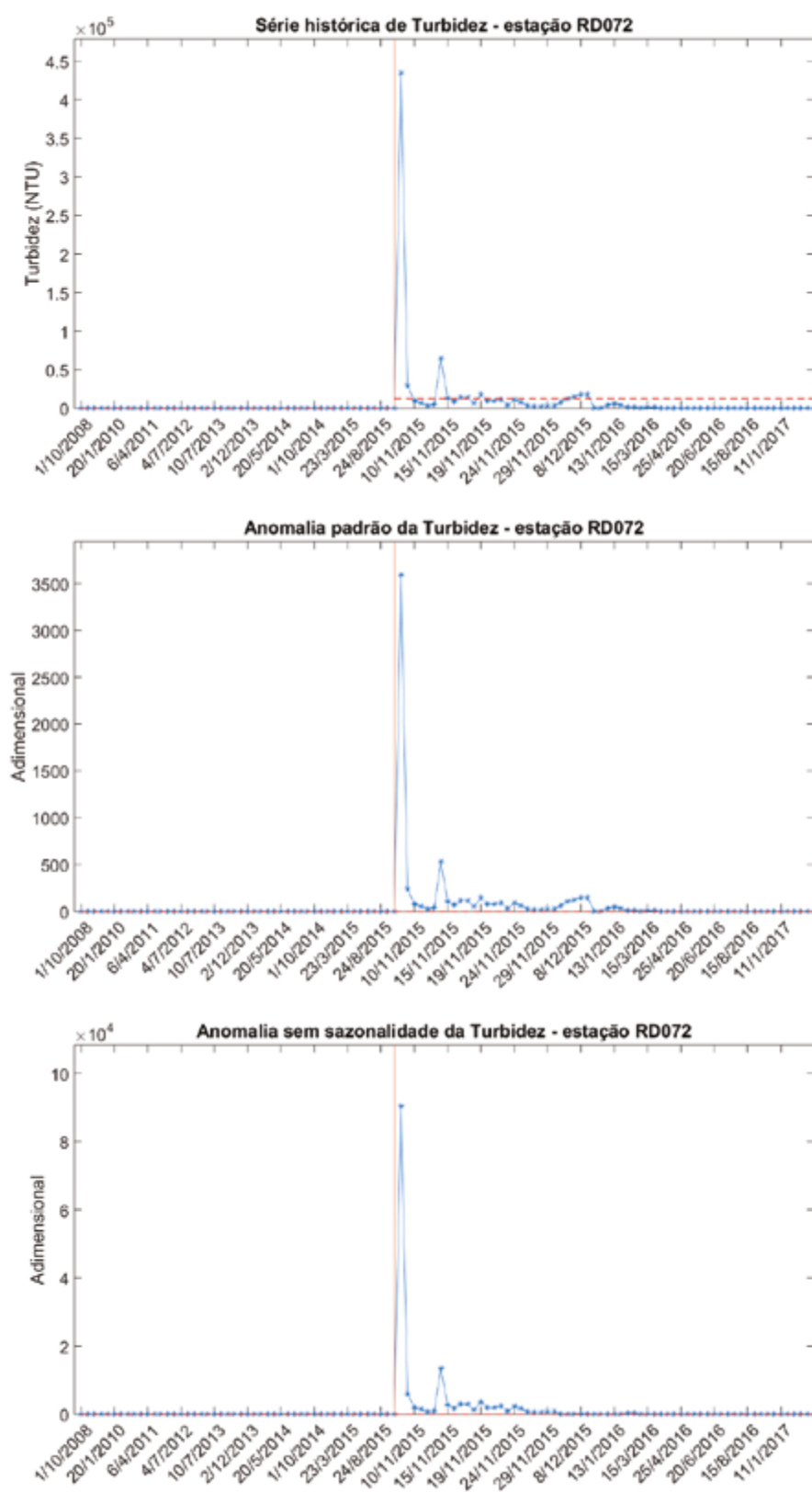


Figura 227 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD083. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

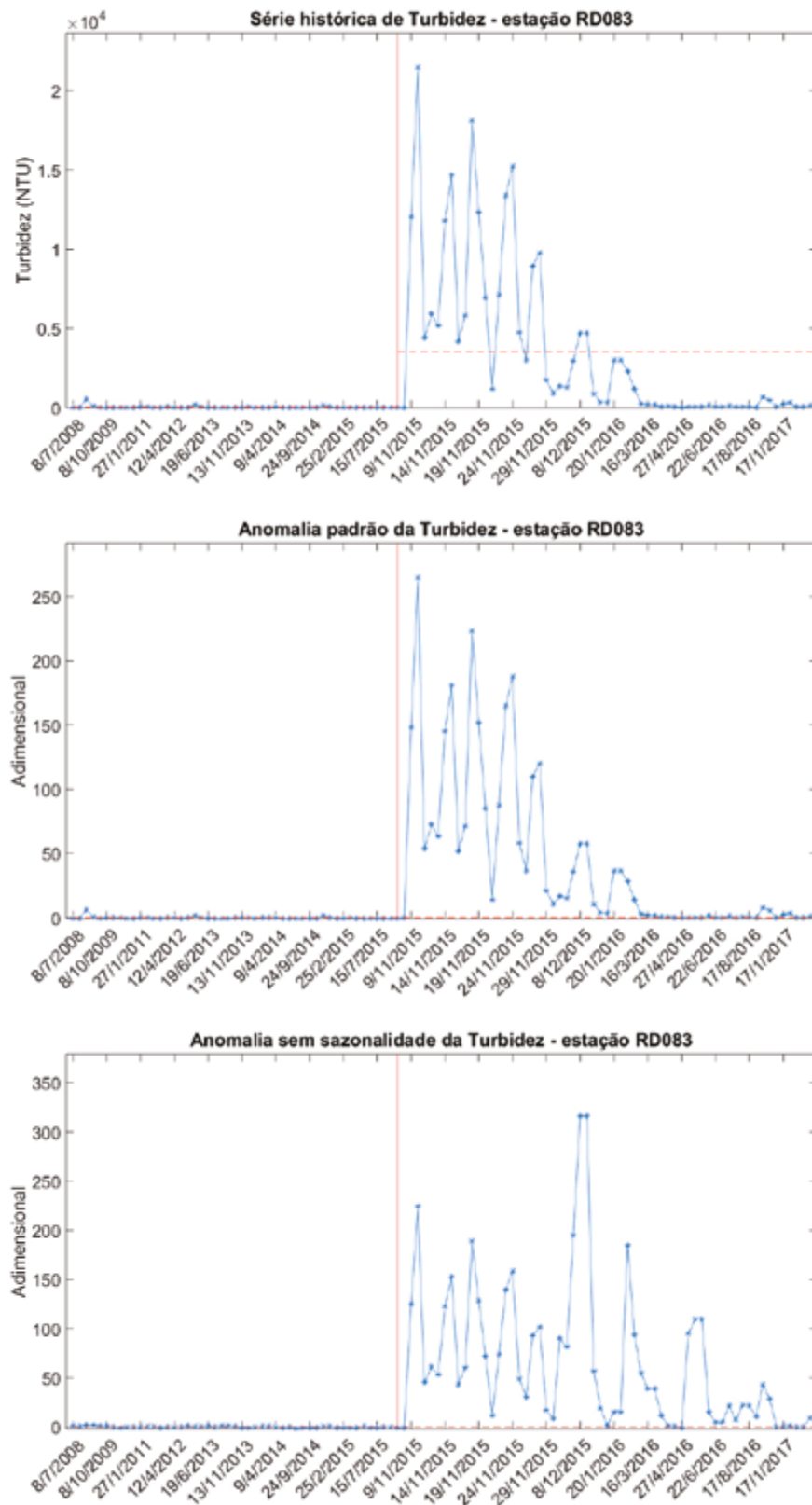


Figura 228 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD089. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

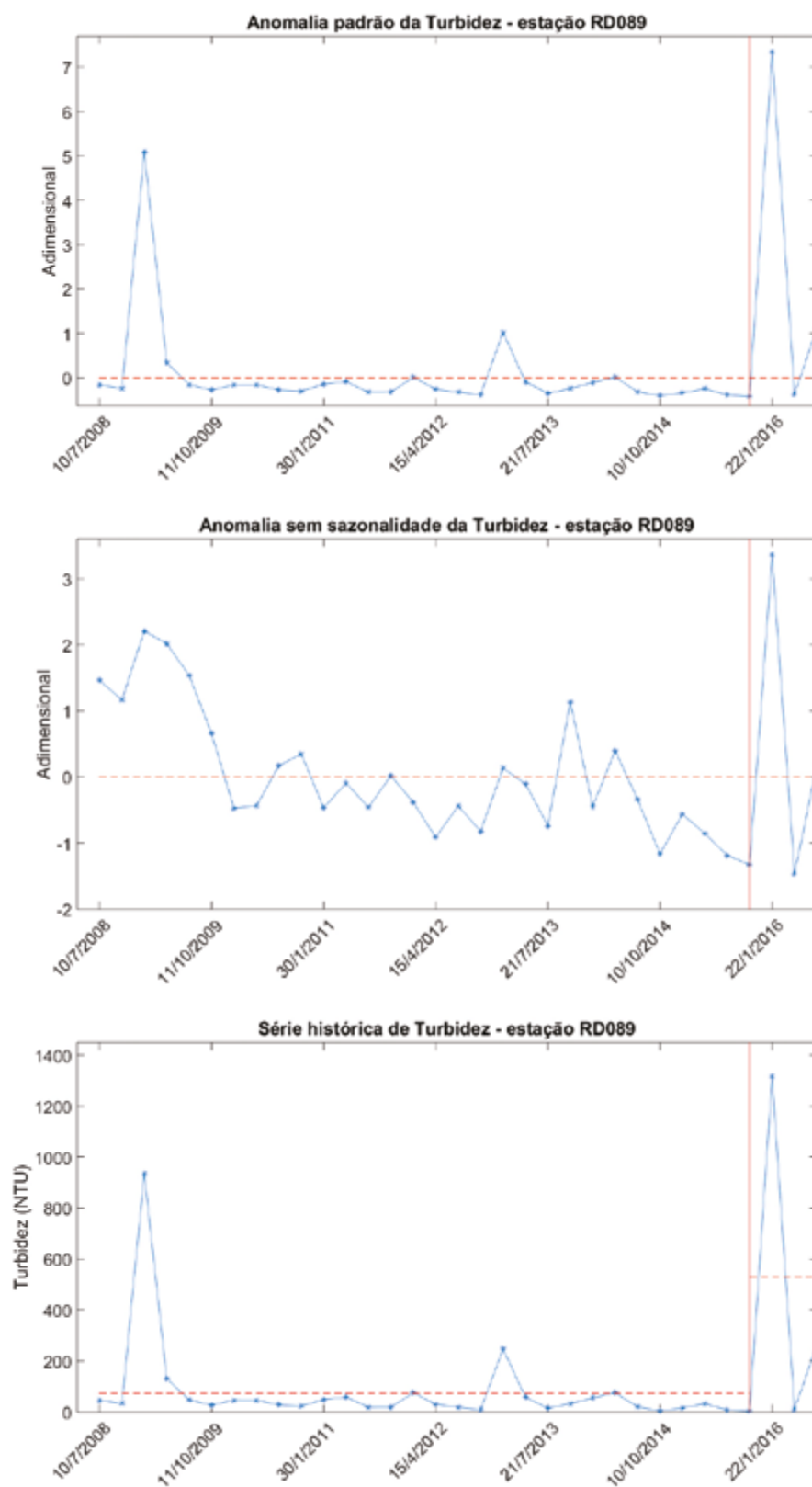


Figura 229 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD110. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

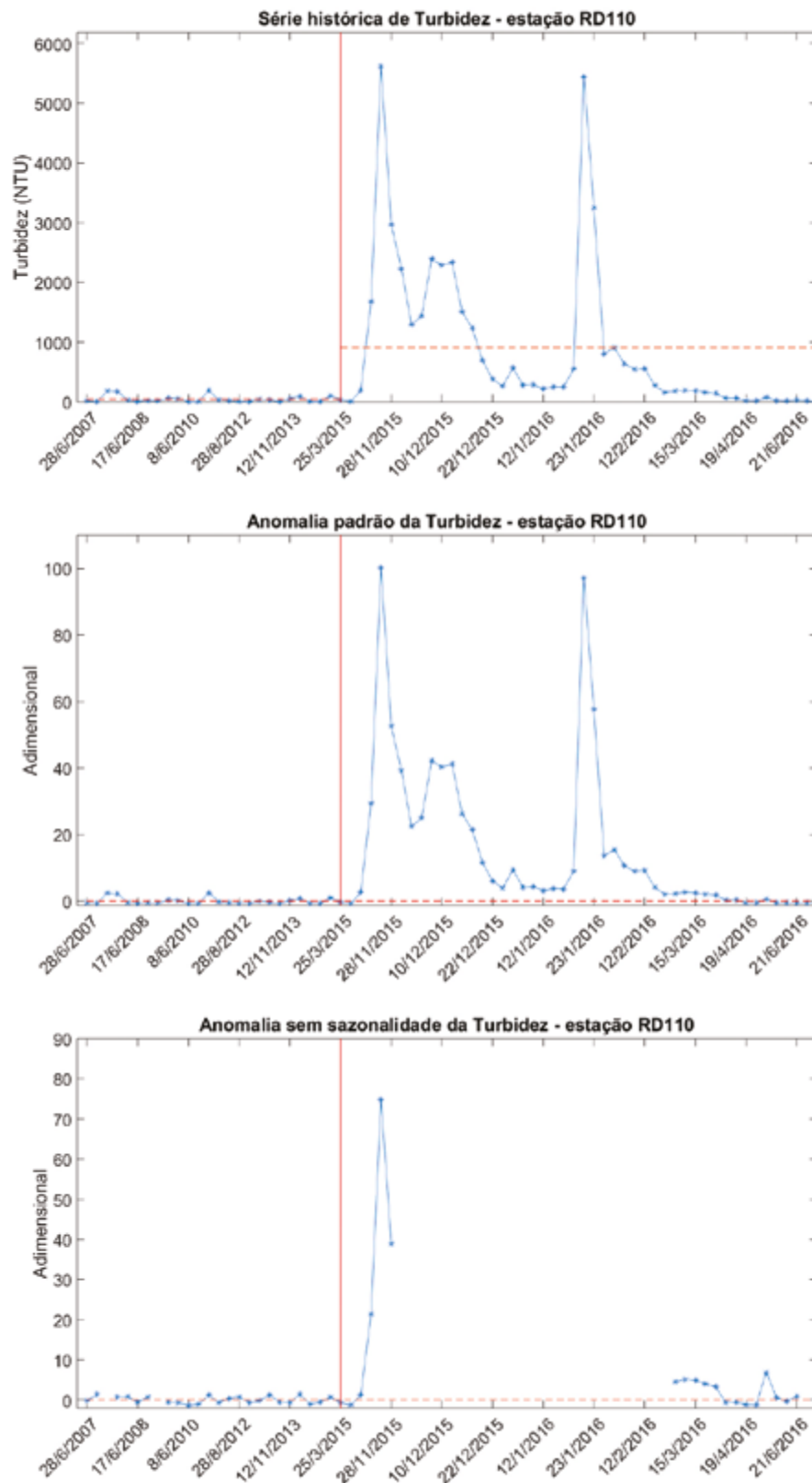


Figura 230 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD115. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

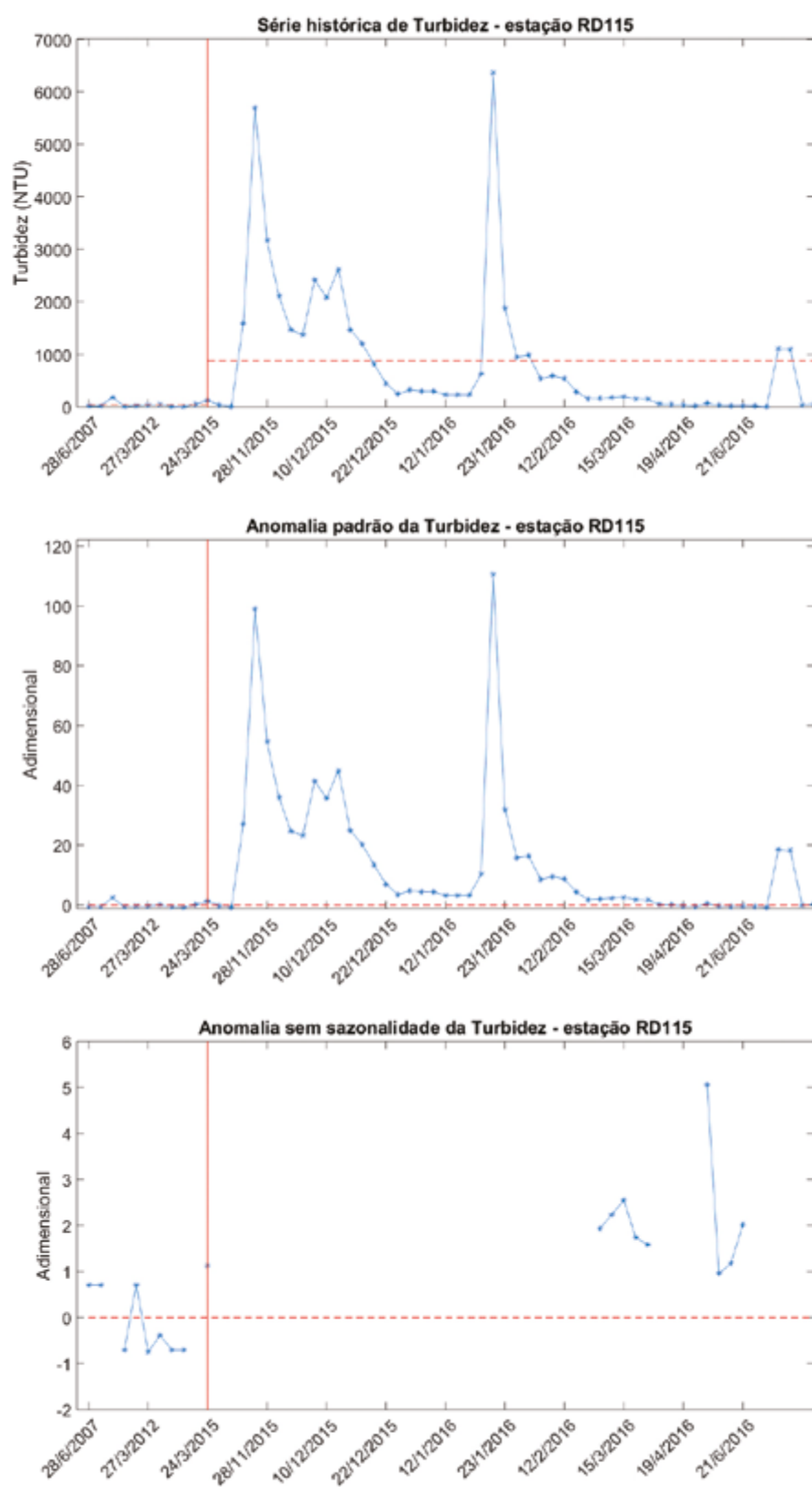
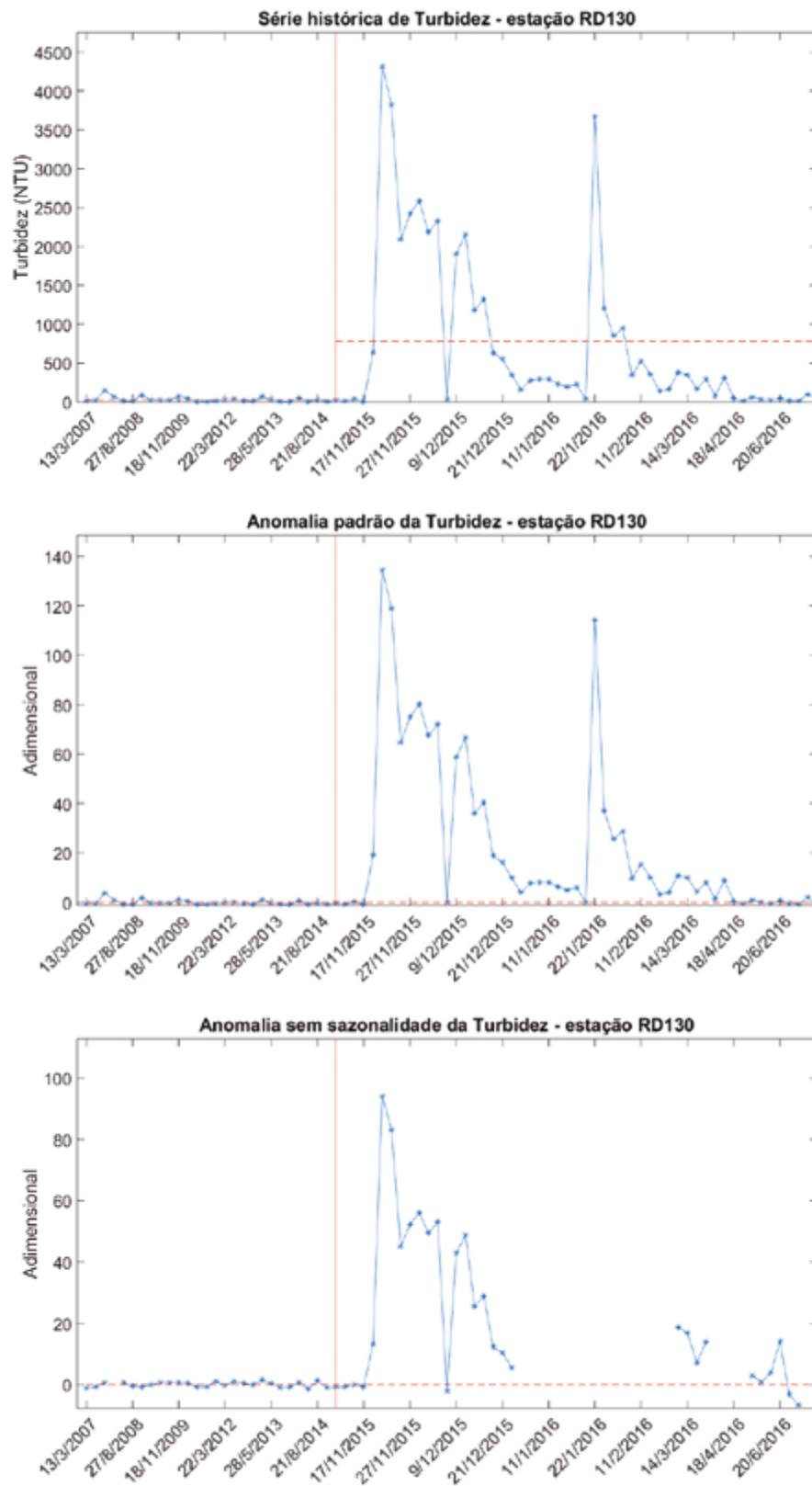


Figura 231 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD130. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de turbidez antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).



SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS

Figura 232 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD001. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

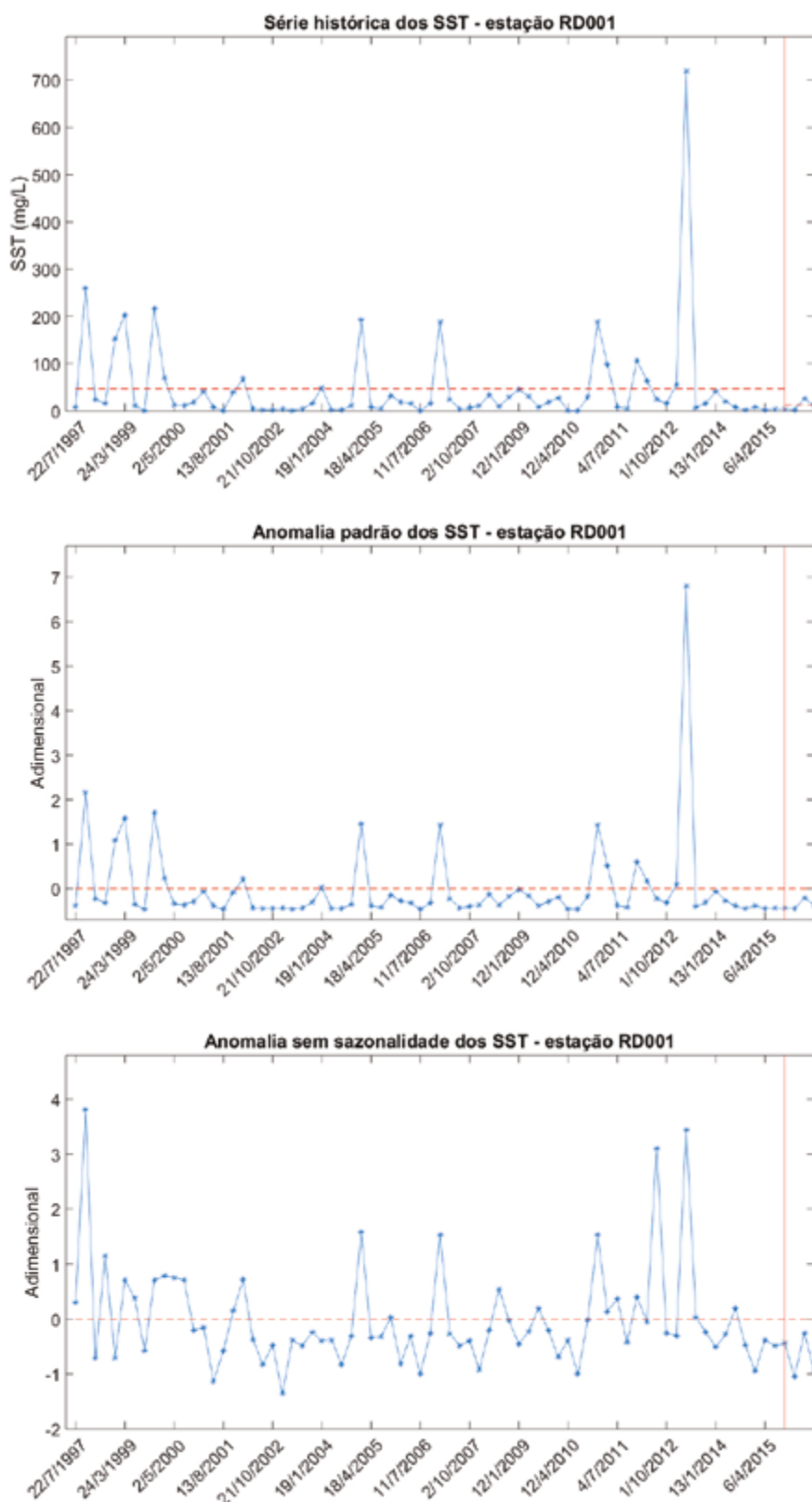


Figura 233 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD014. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

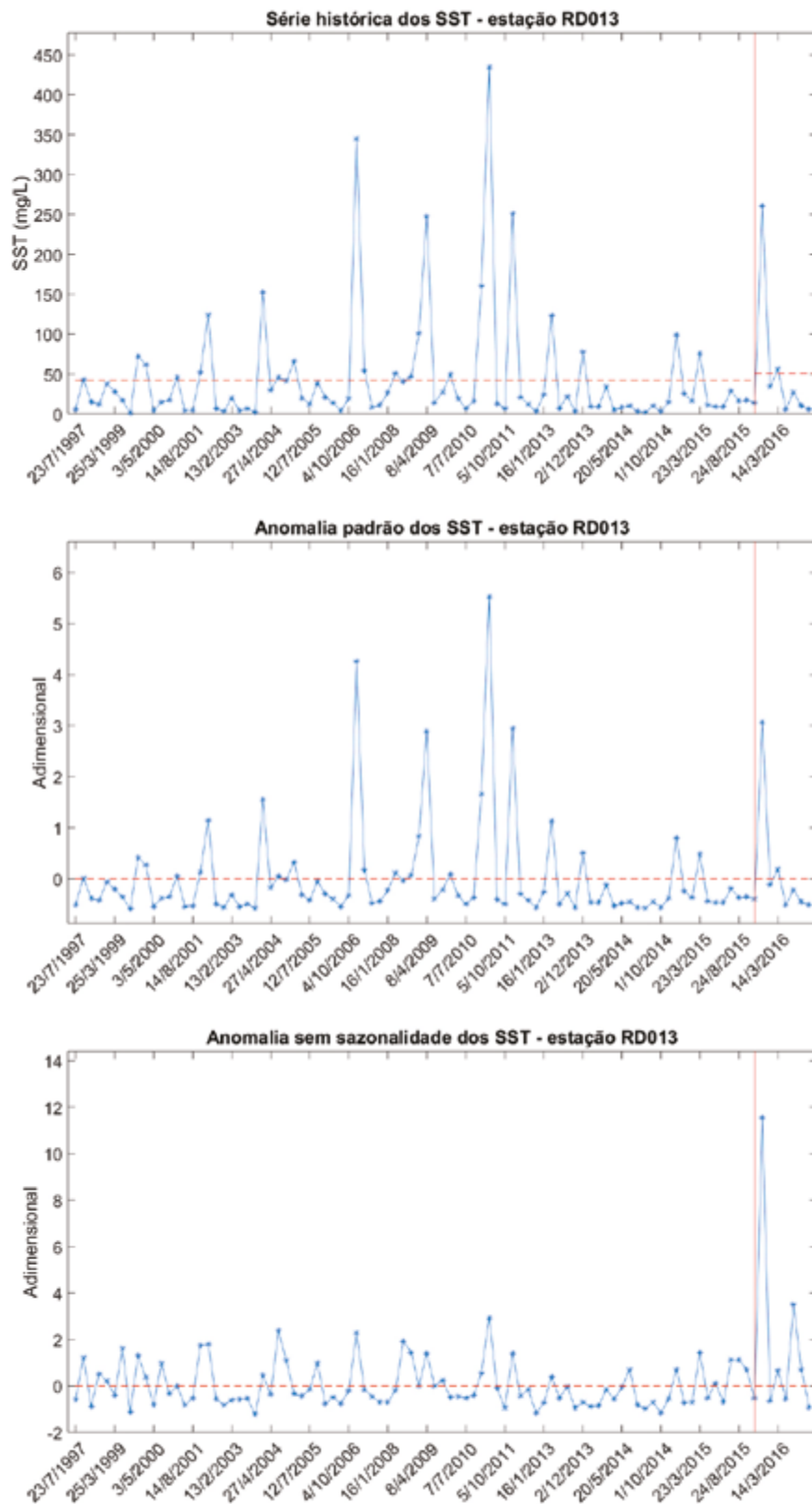


Figura 234 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD019. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

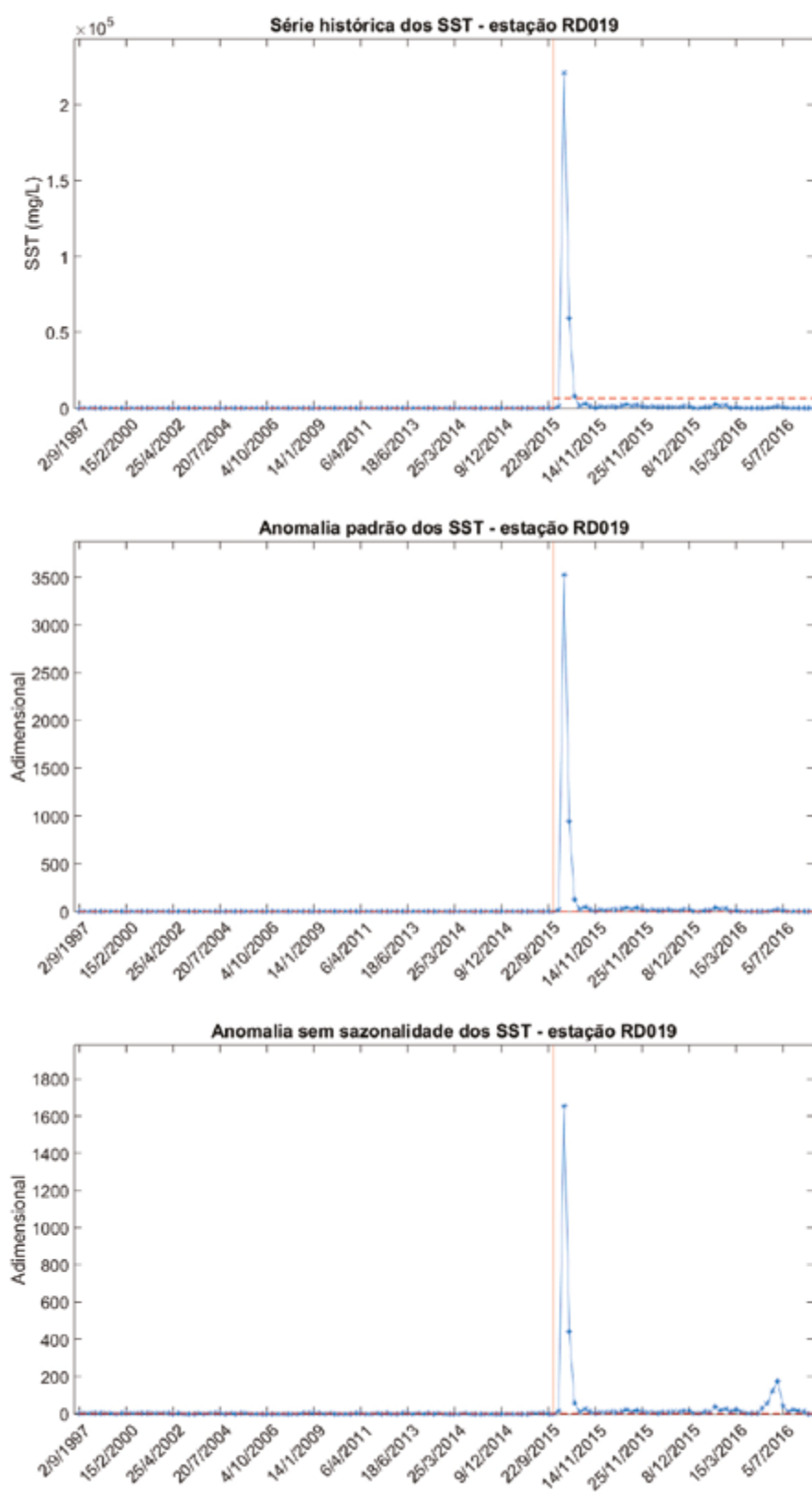


Figura 235– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD032. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

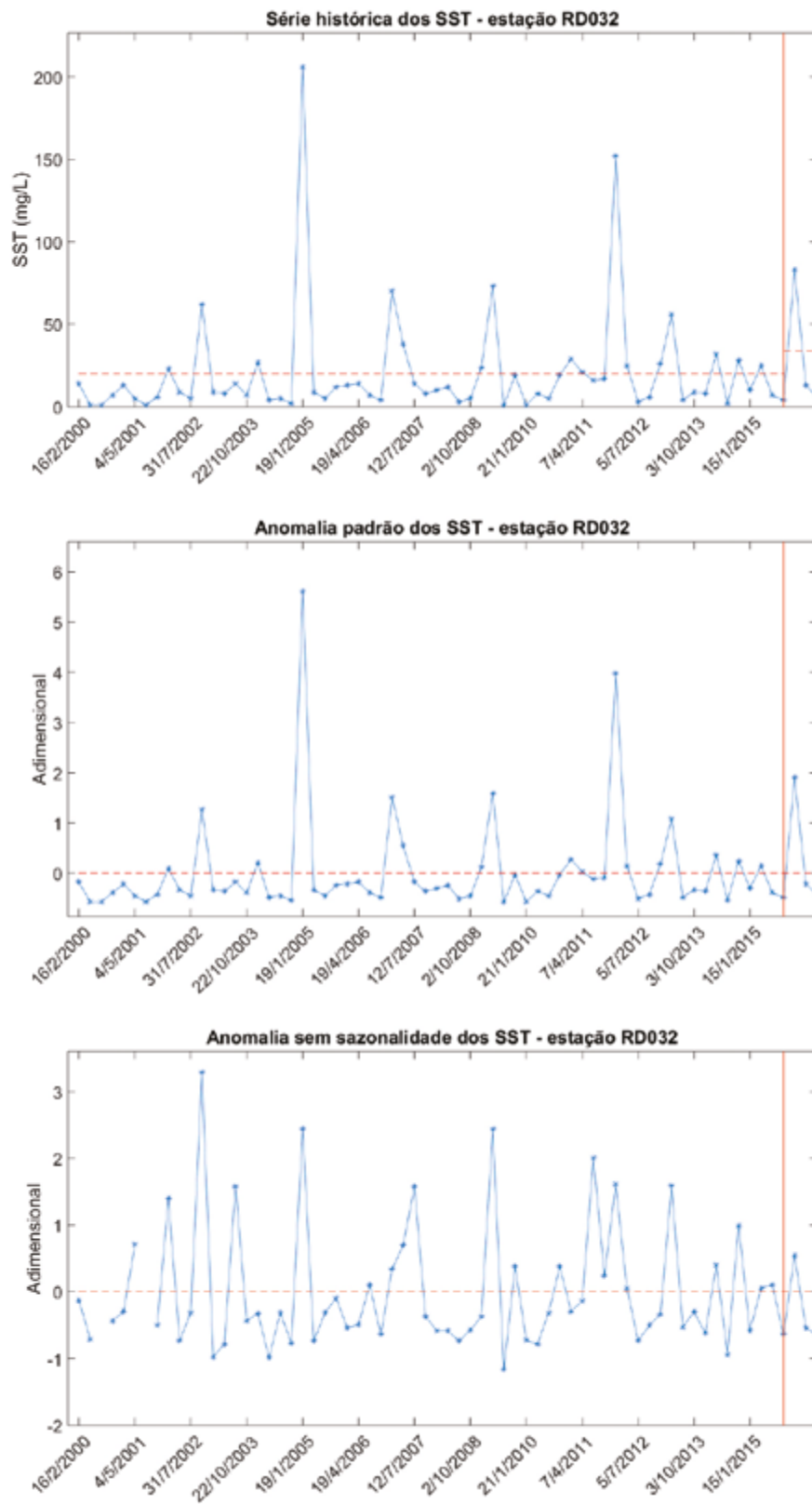


Figura 236 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD033. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

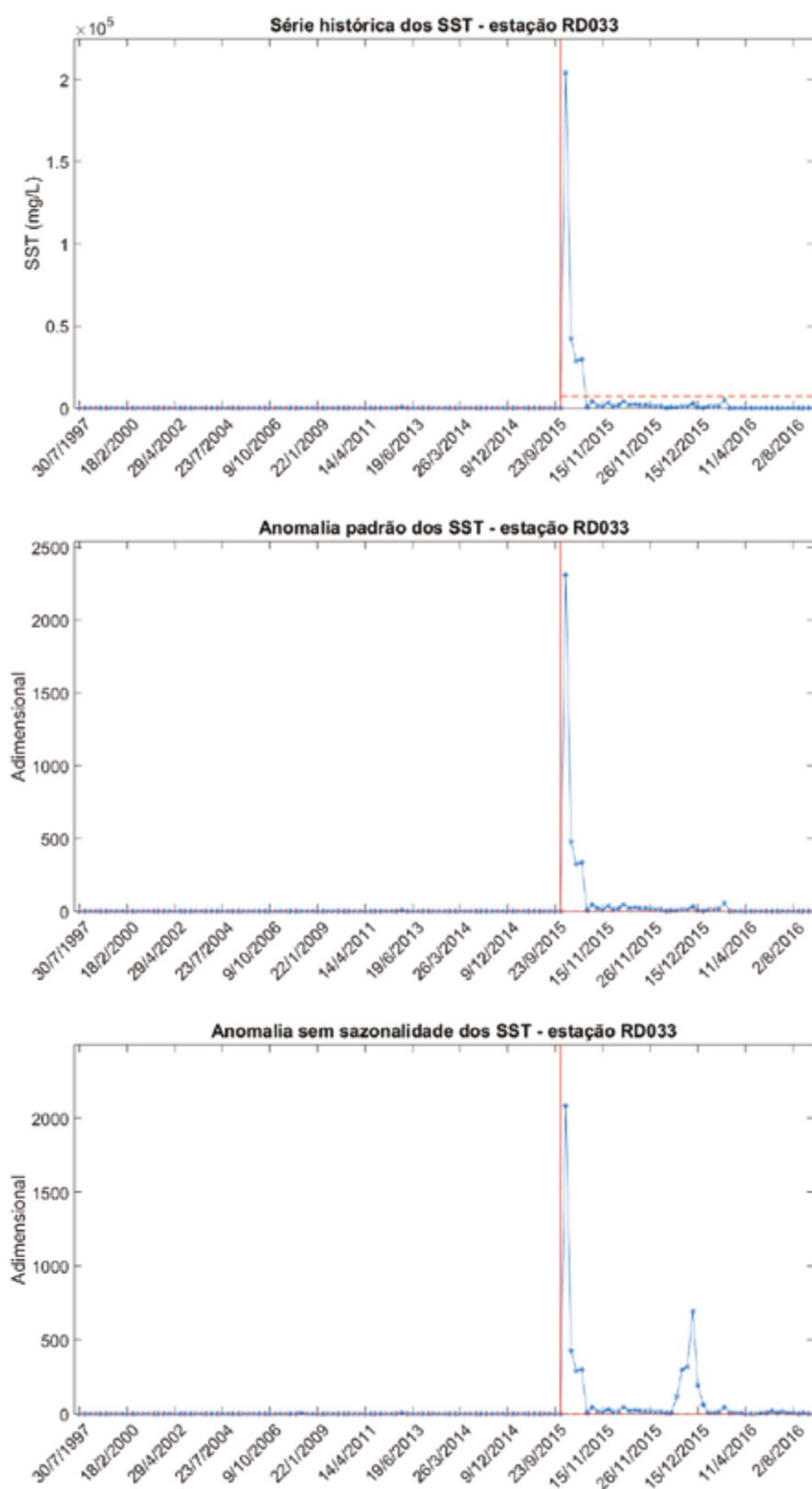


Figura 237– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD035. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

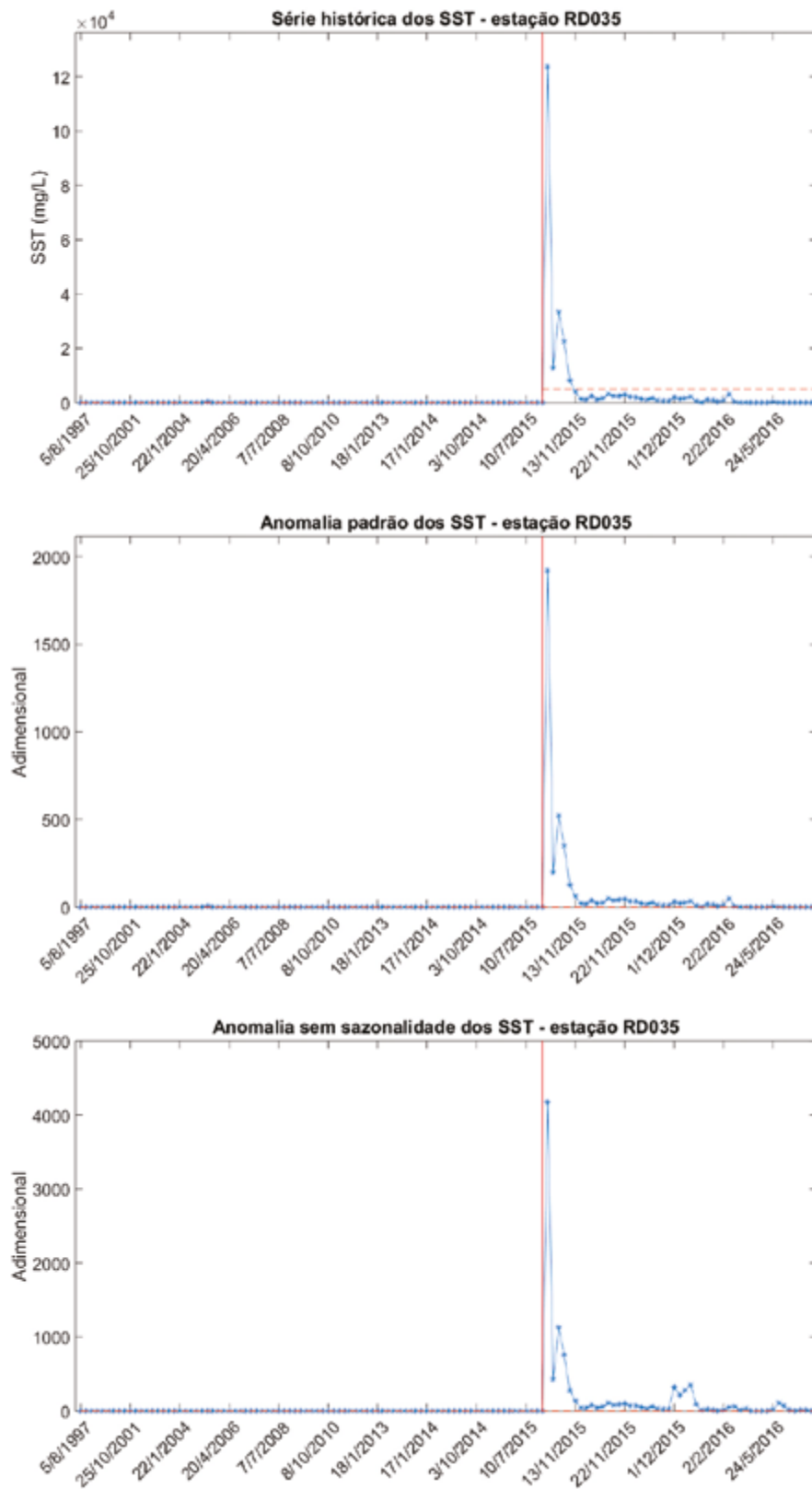


Figura 238 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD039. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

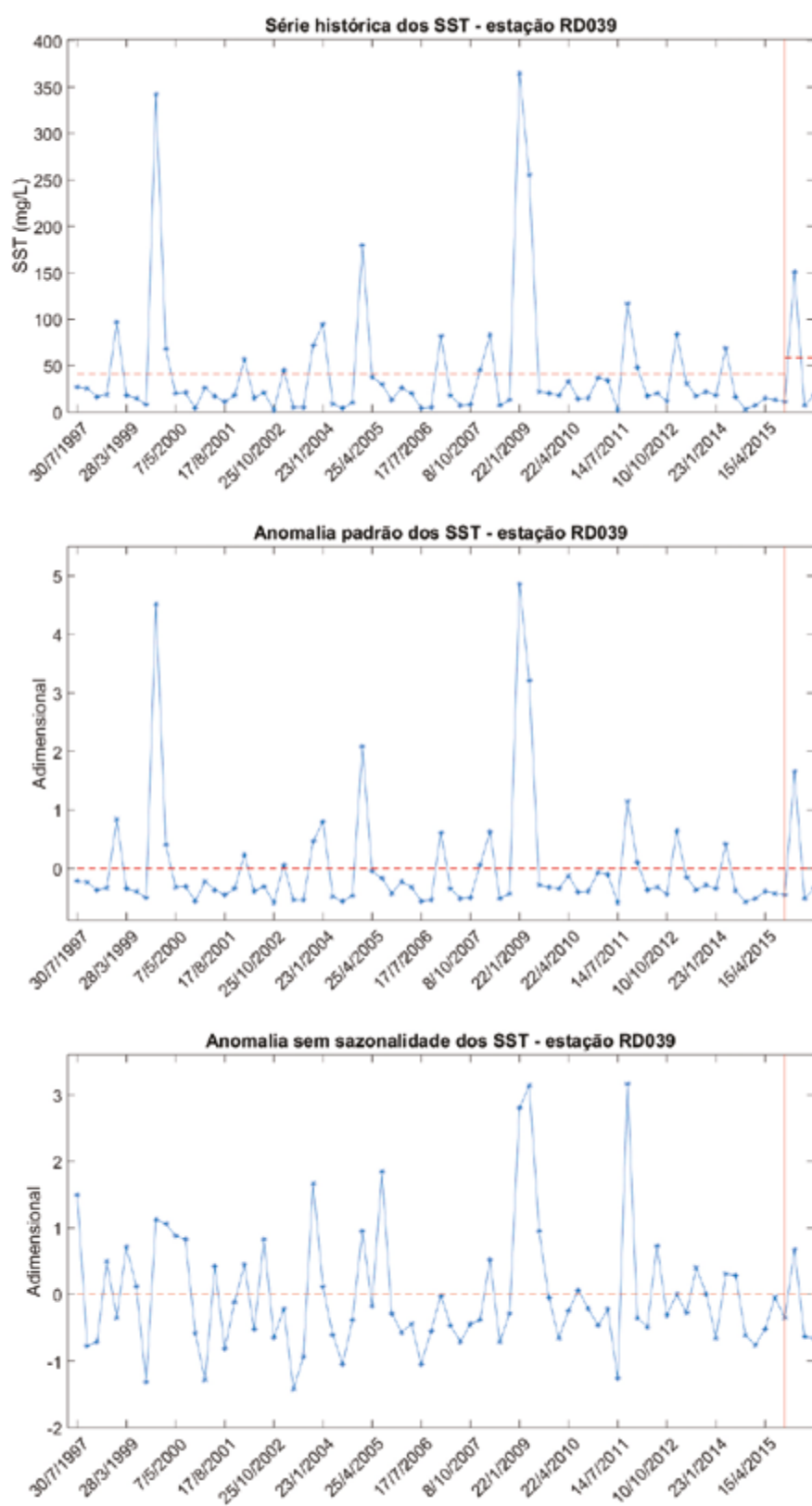


Figura 239 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD044. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

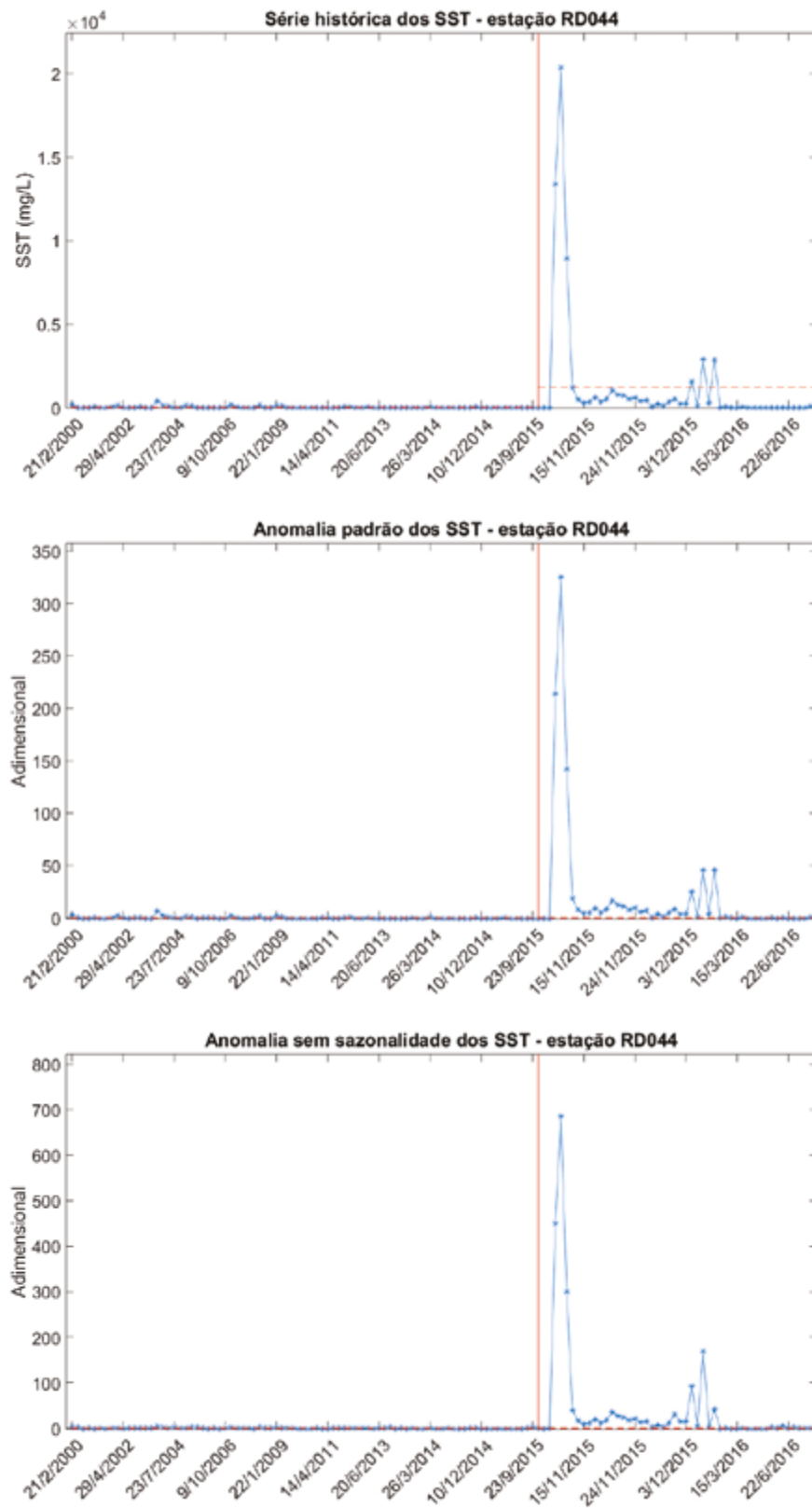


Figura 240 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD045. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

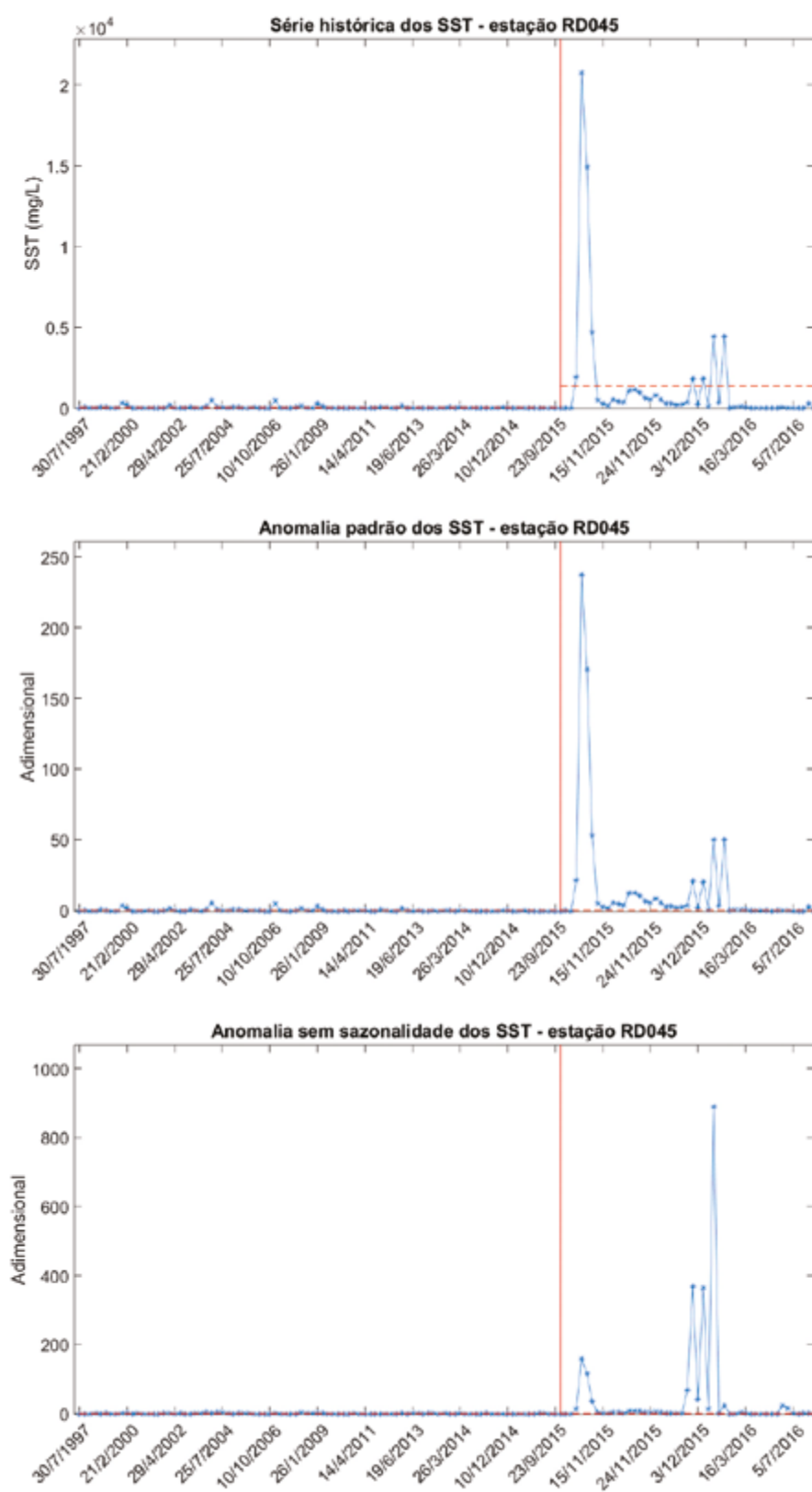


Figura 241 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD053. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

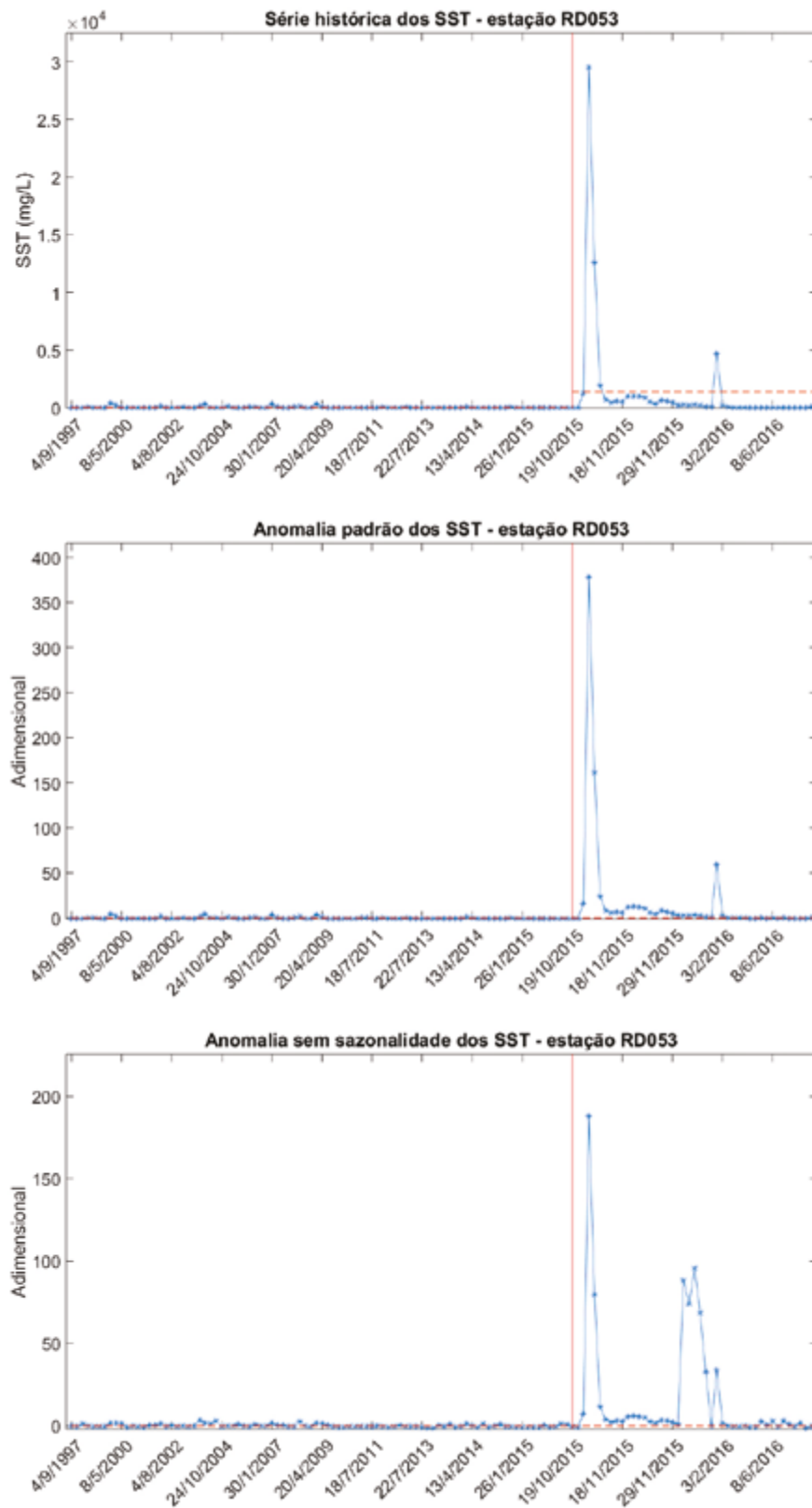


Figura 242 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD058. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

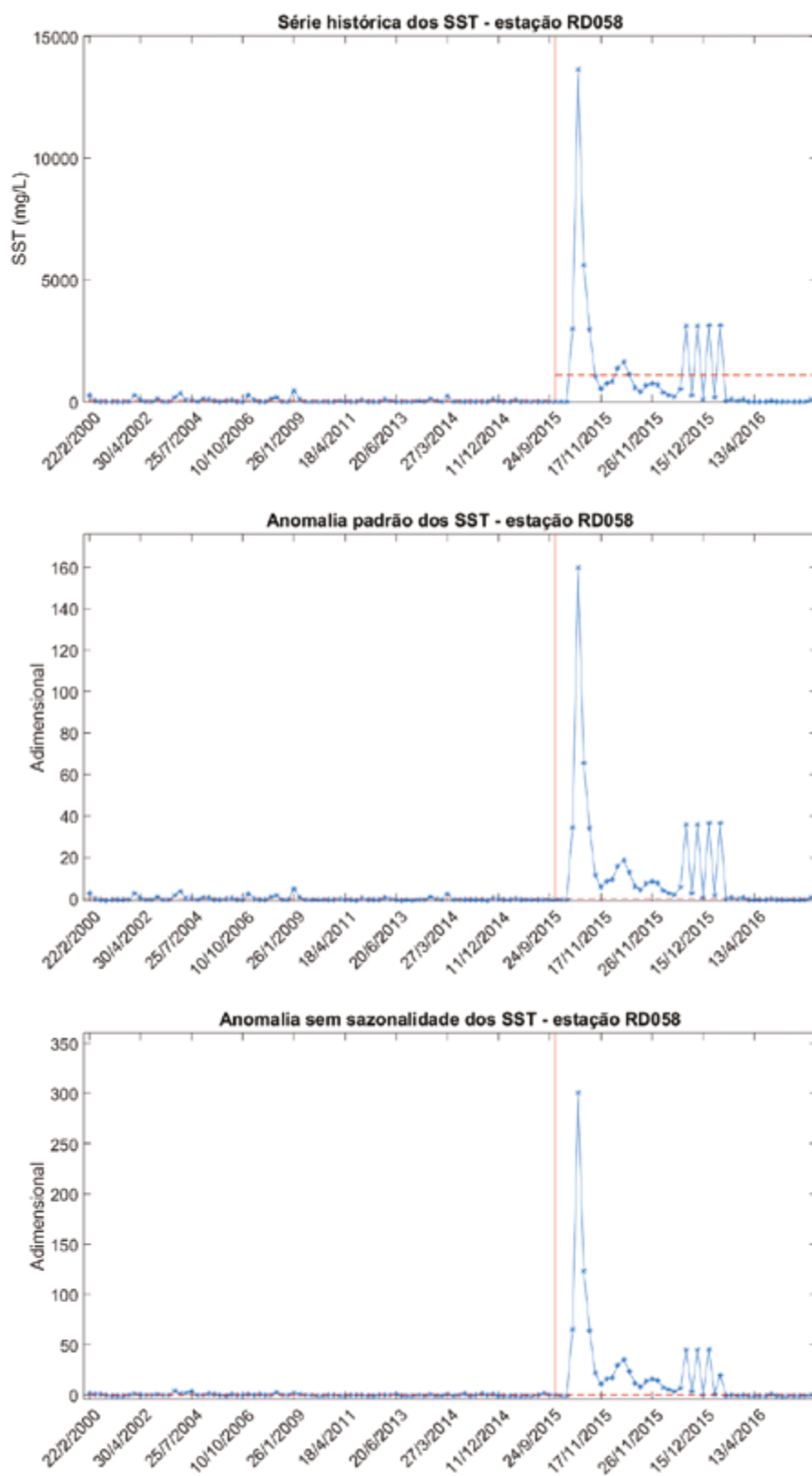


Figura 243 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD059. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

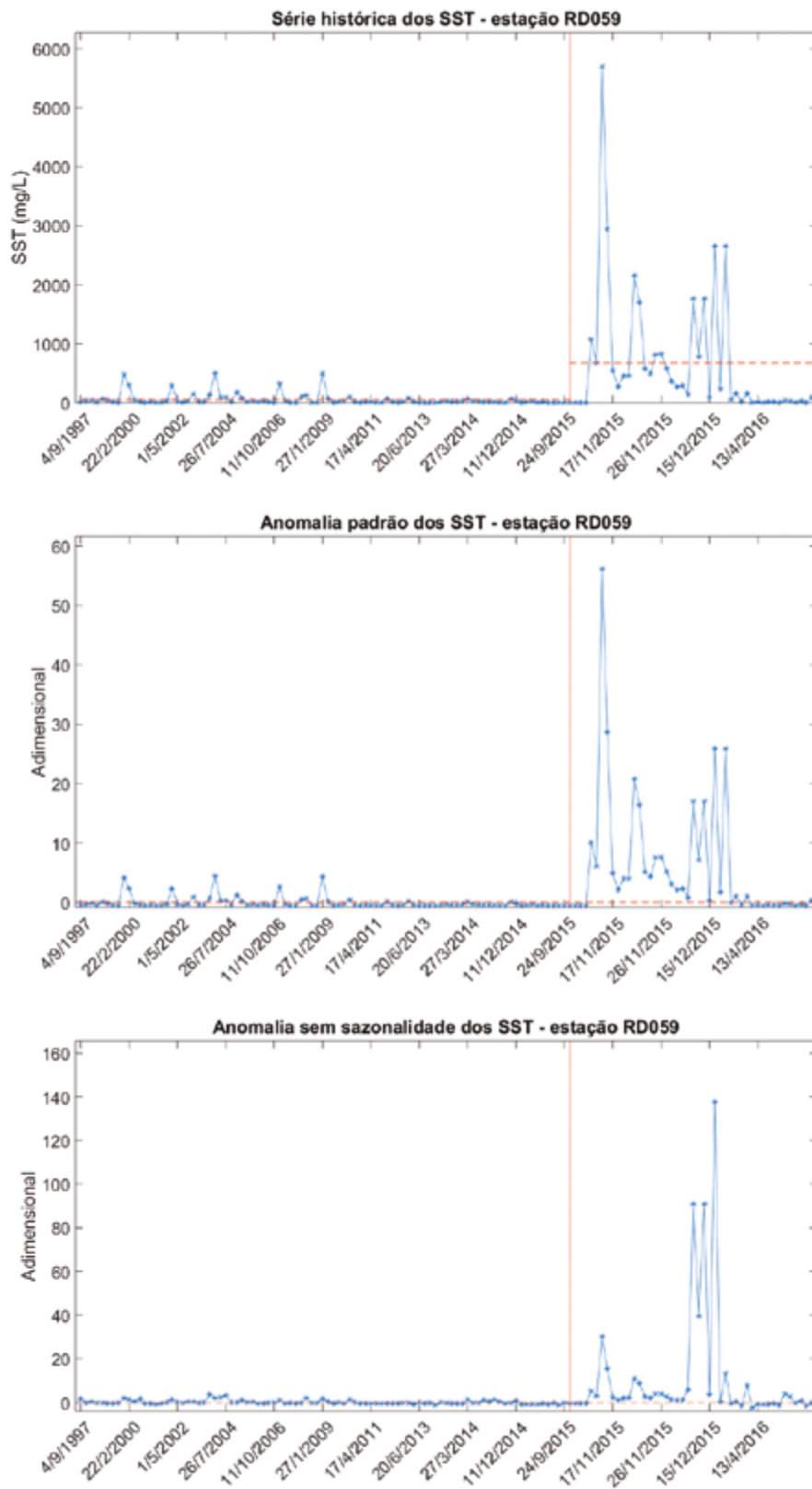


Figura 244 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD067. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

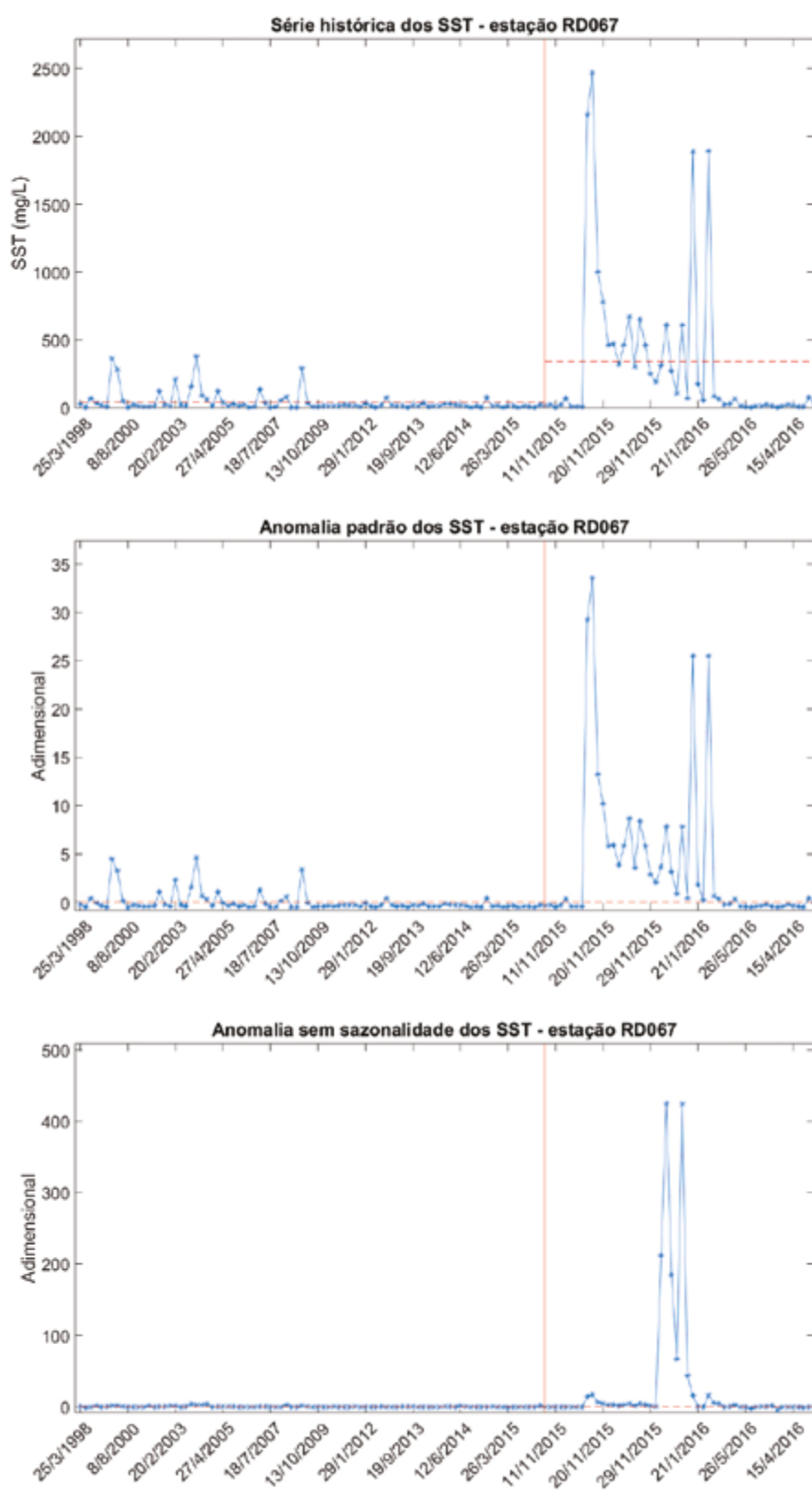


Figura 245 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD071. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

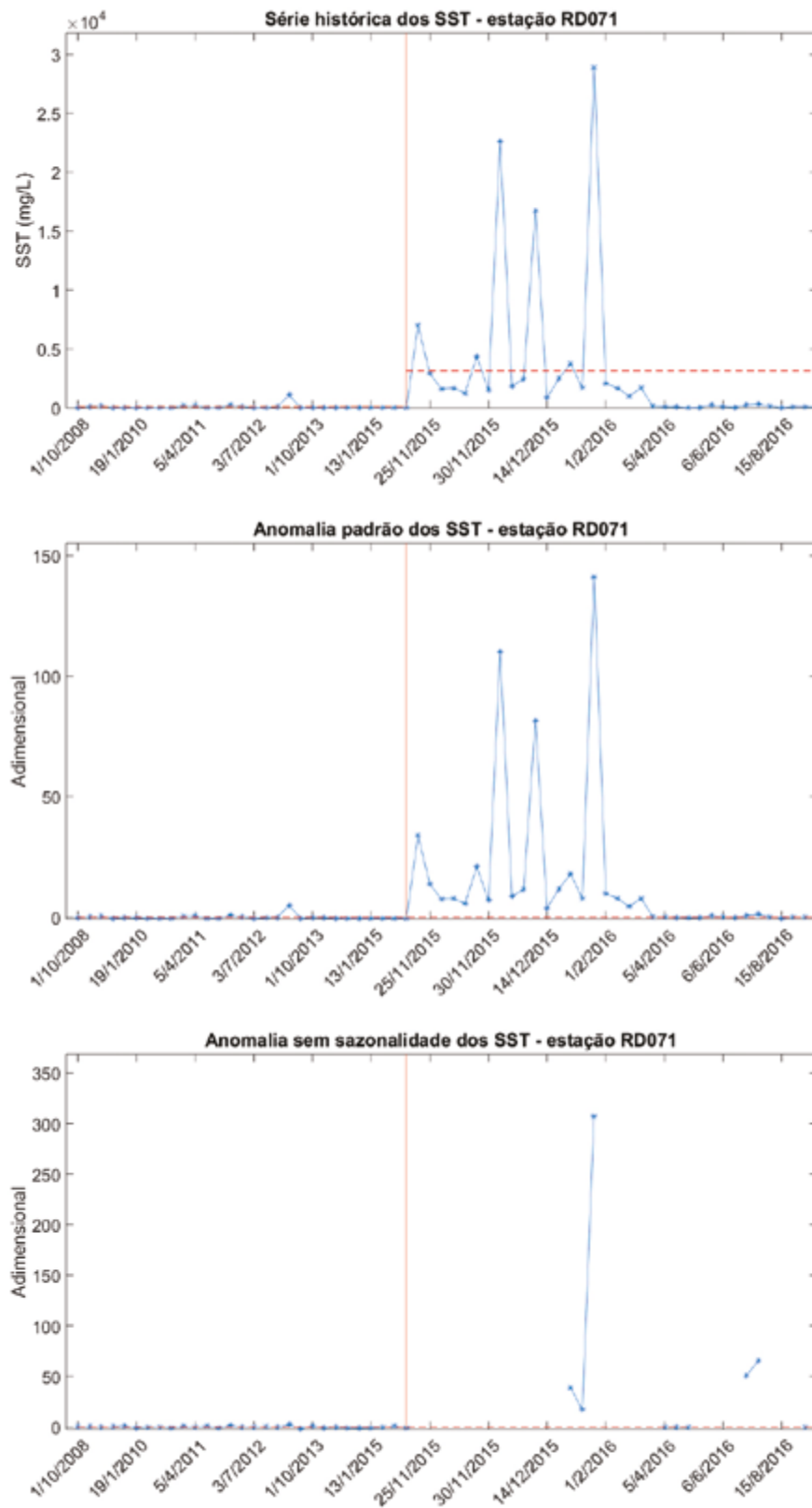


Figura 246– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD072. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

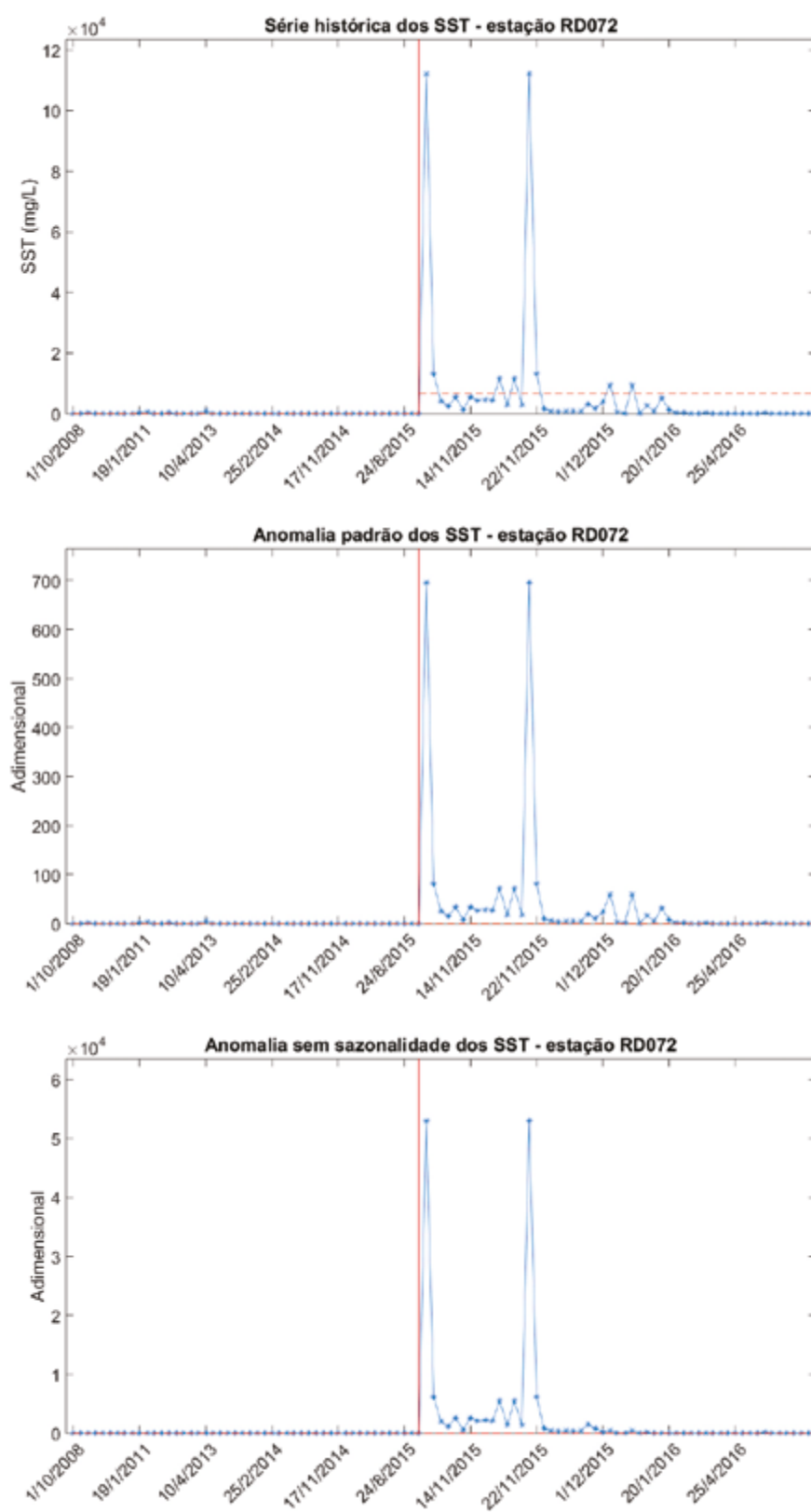


Figura 247– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD083. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de sólidos suspensos totais antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

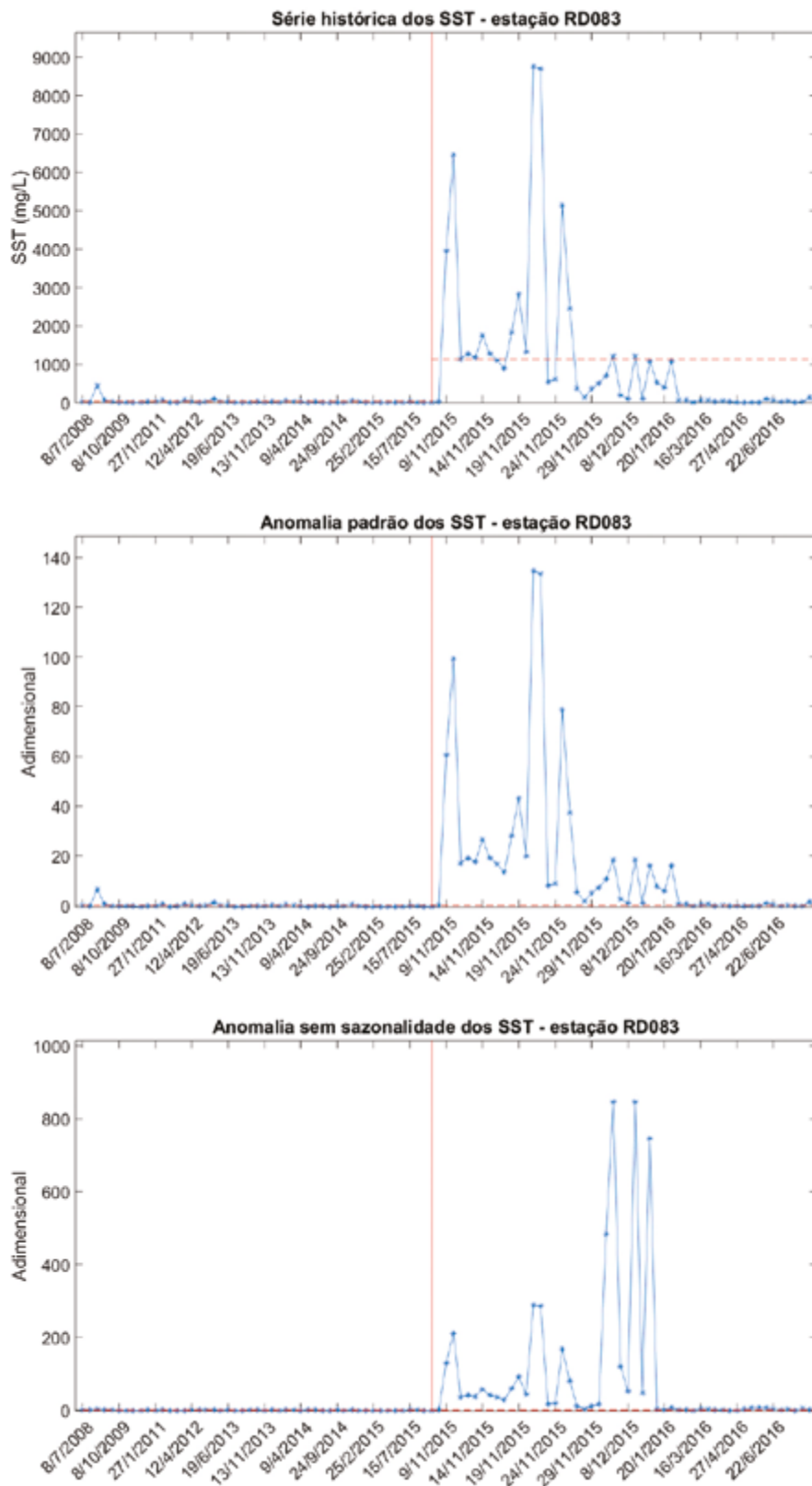
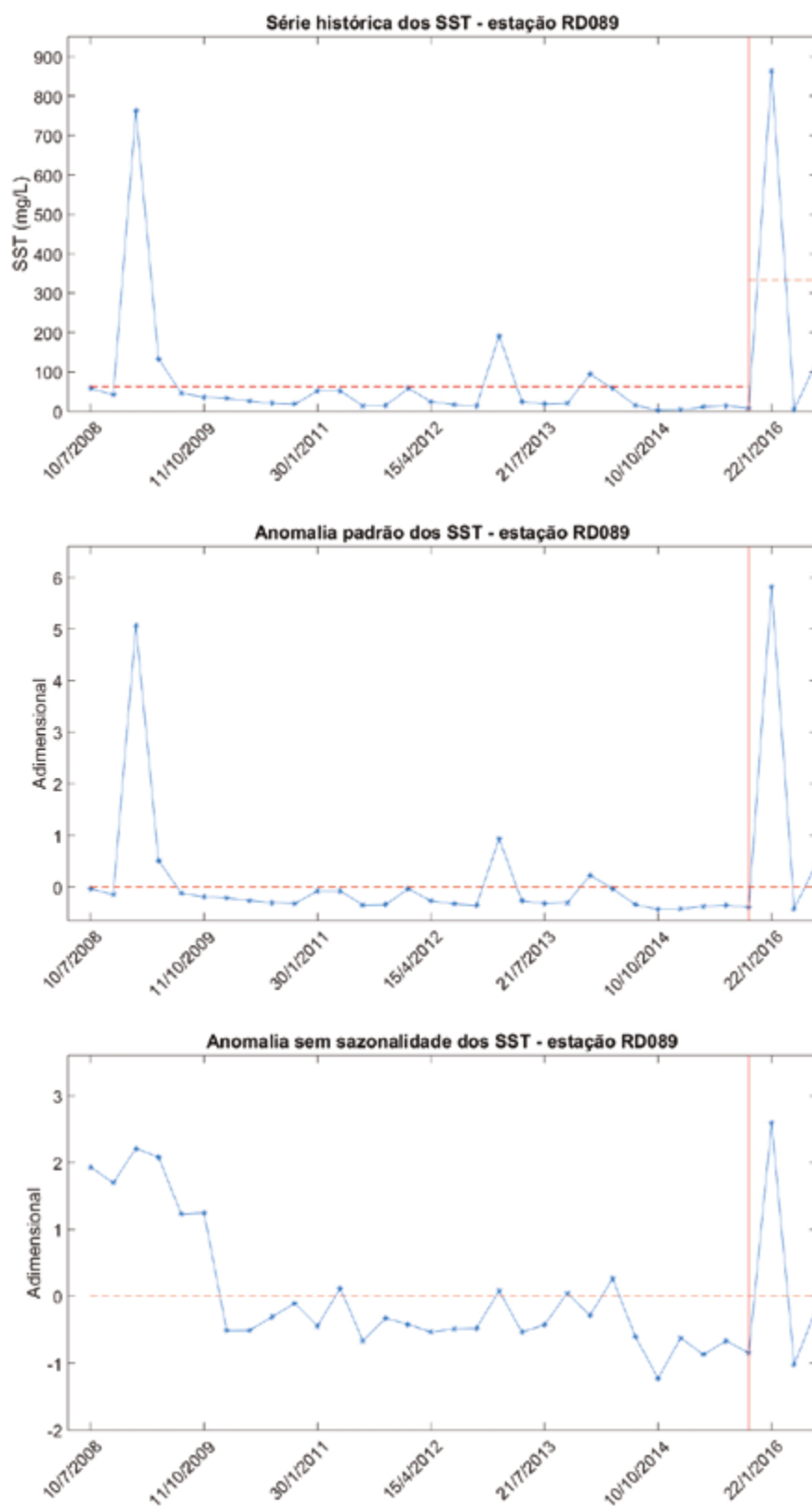


Figura 248— Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação RD089

REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE SUPERFÍCIE NA FAIXA DO VERMELHO

Figura 249 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF01. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

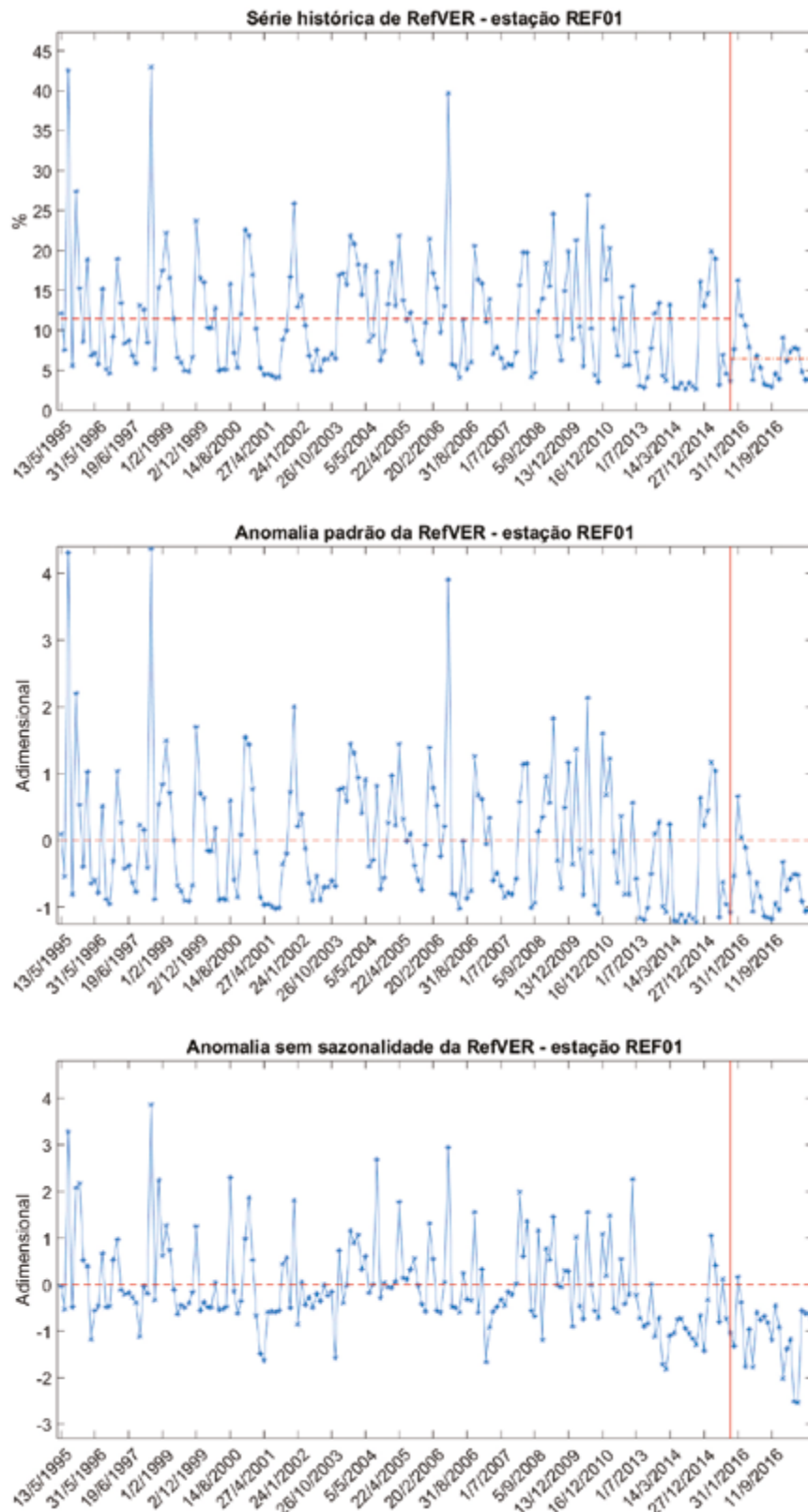


Figura 250 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF02. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

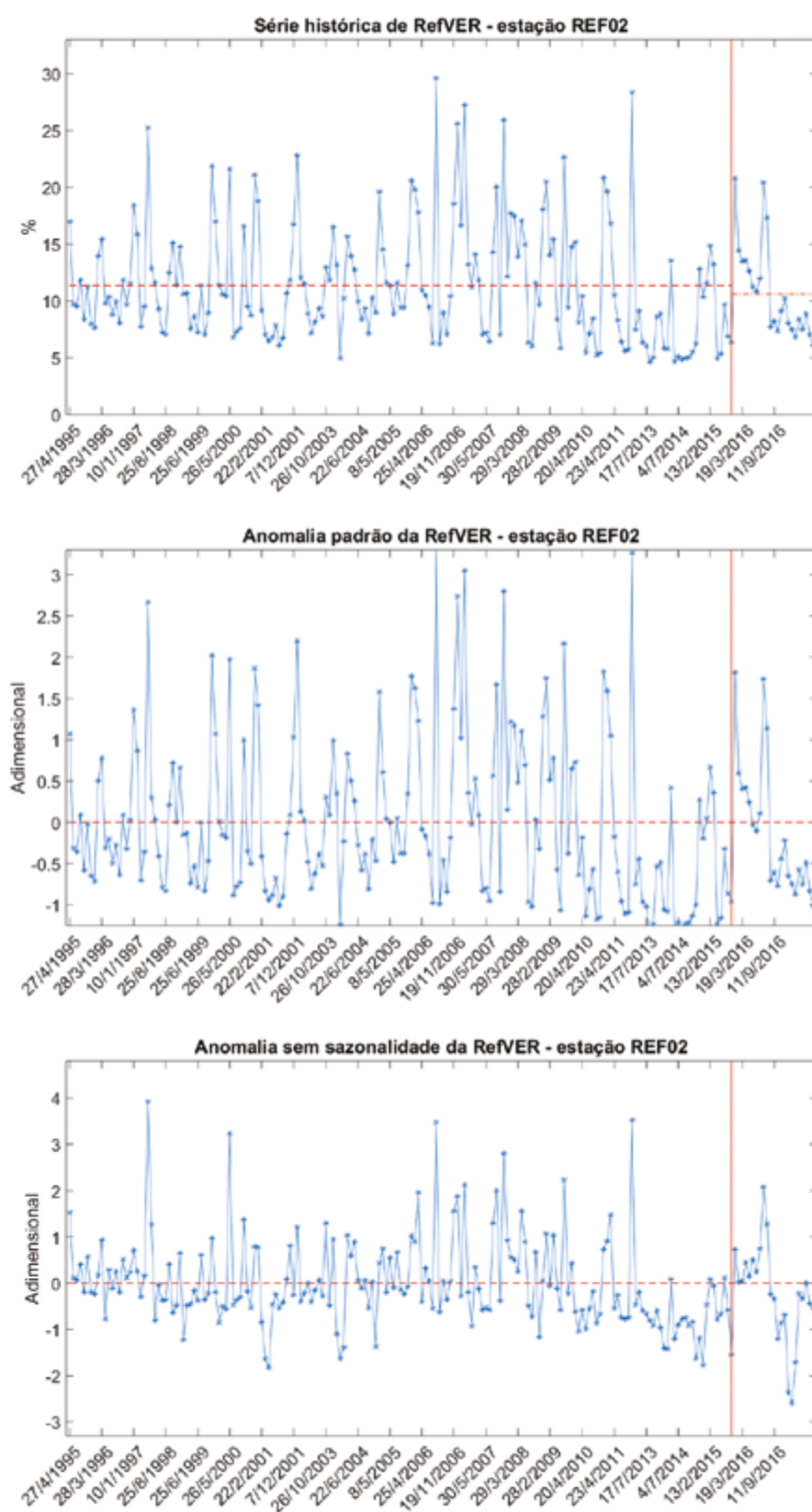


Figura 251 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF03. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

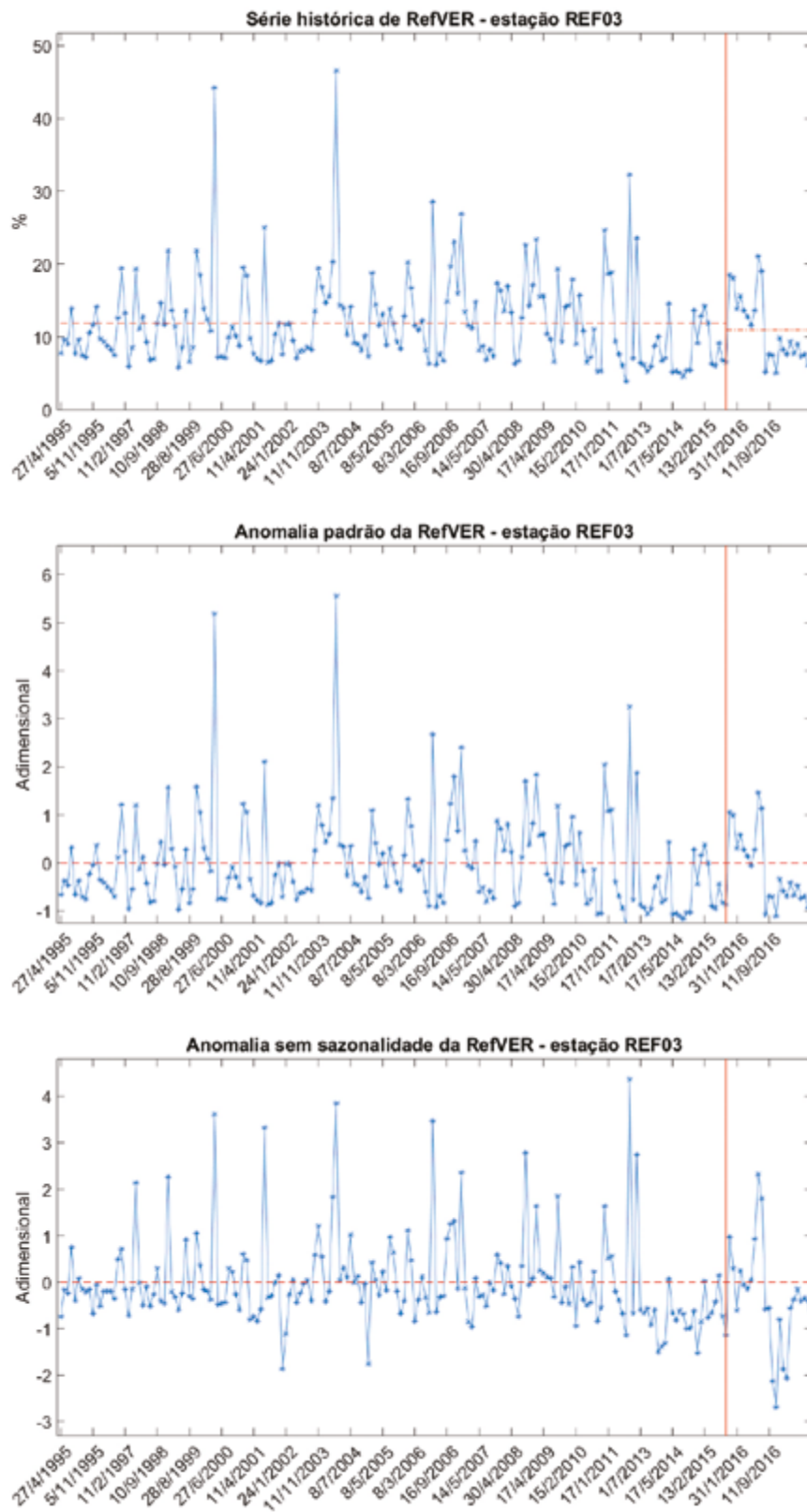


Figura 252 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF04. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

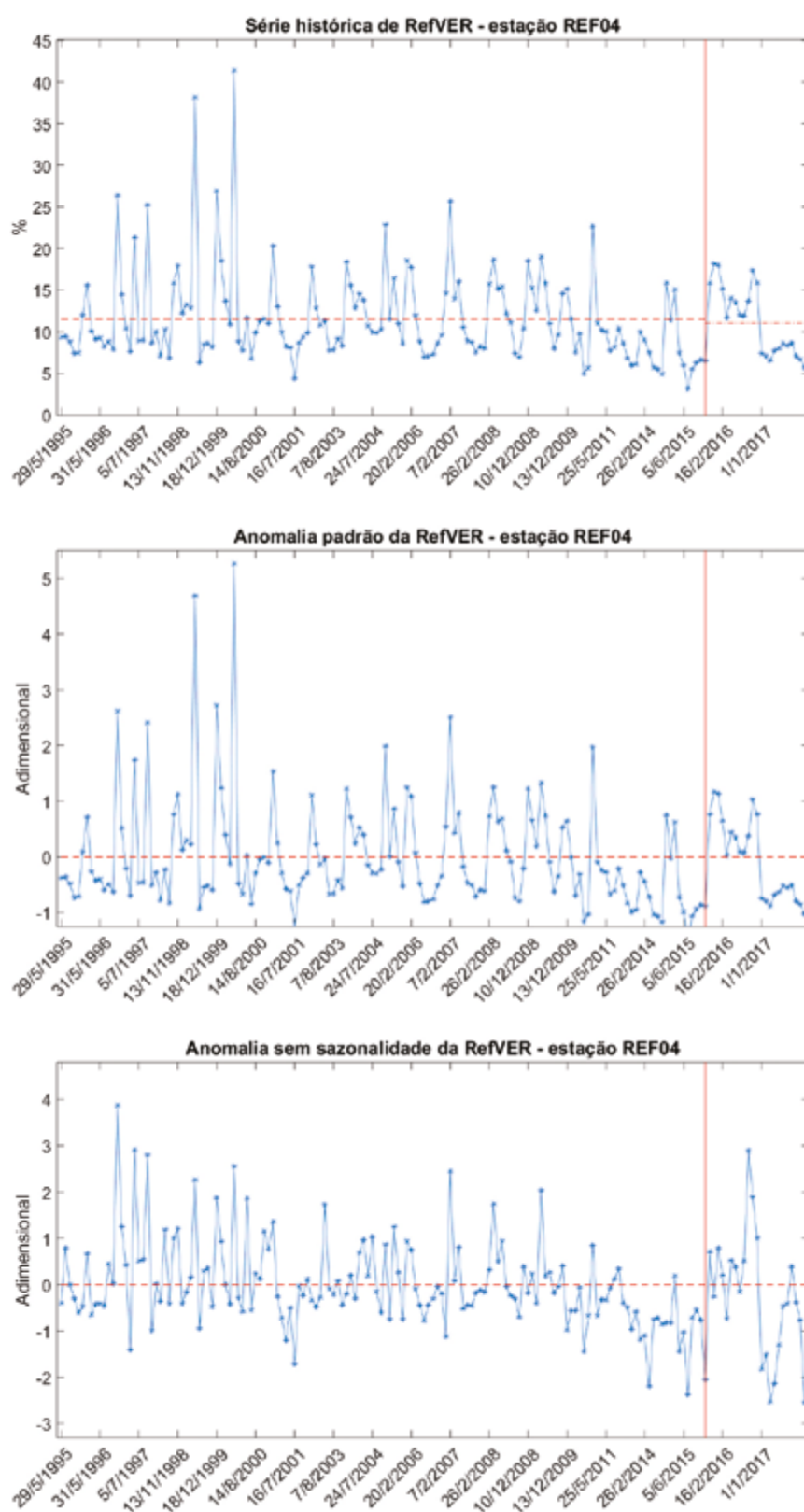


Figura 253 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF05. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

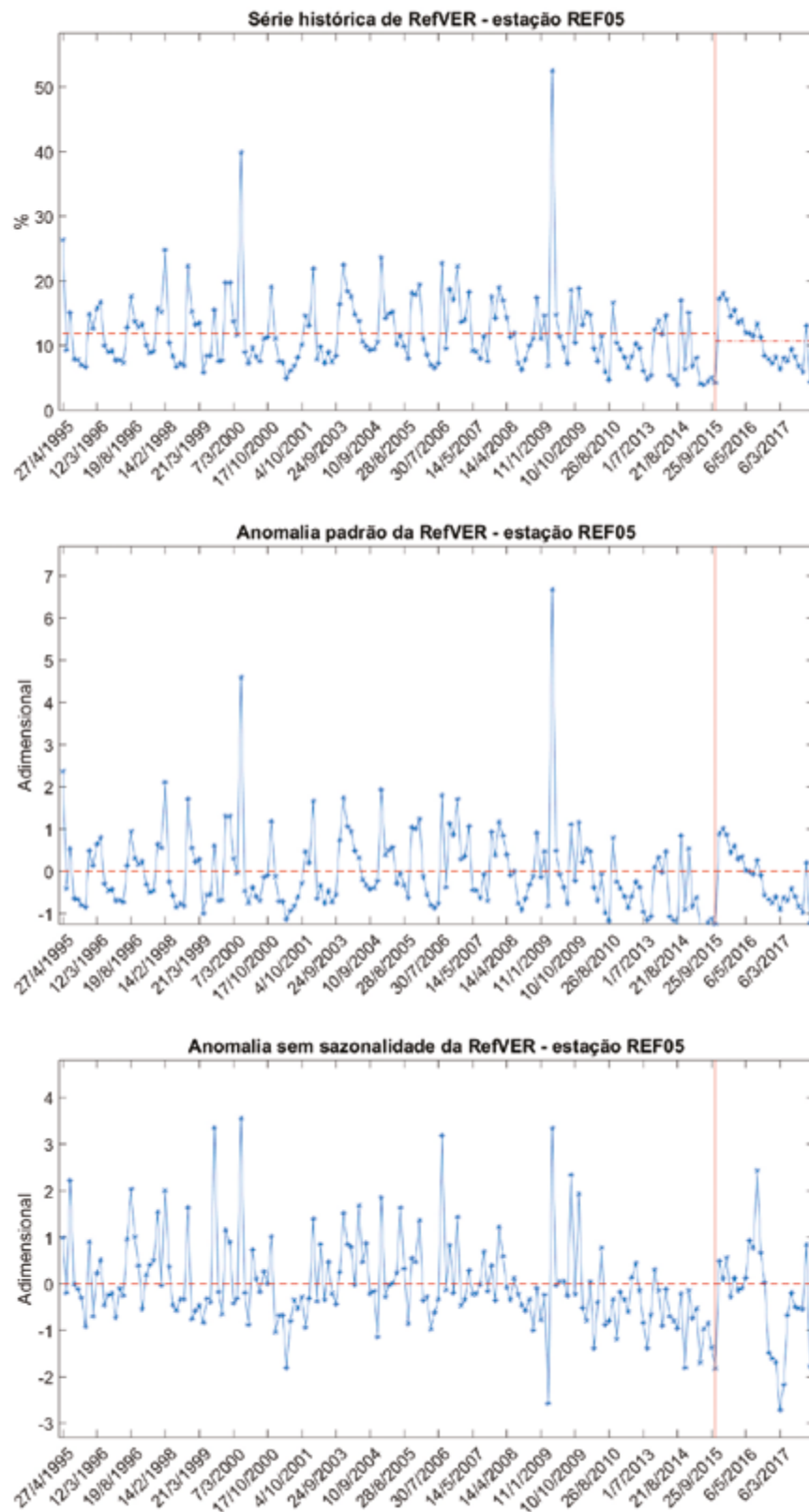


Figura 254 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF06. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

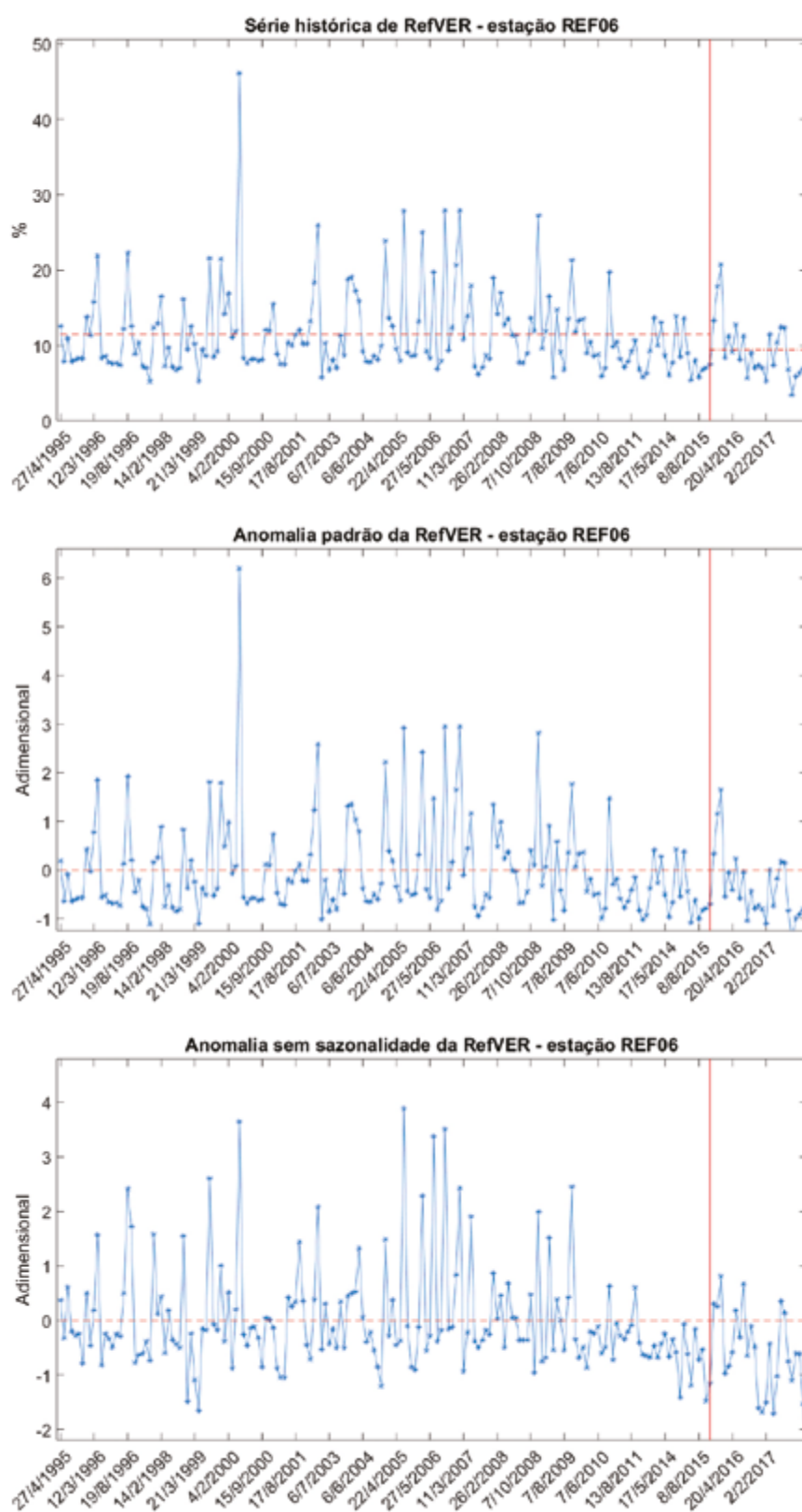


Figura 255 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF07. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

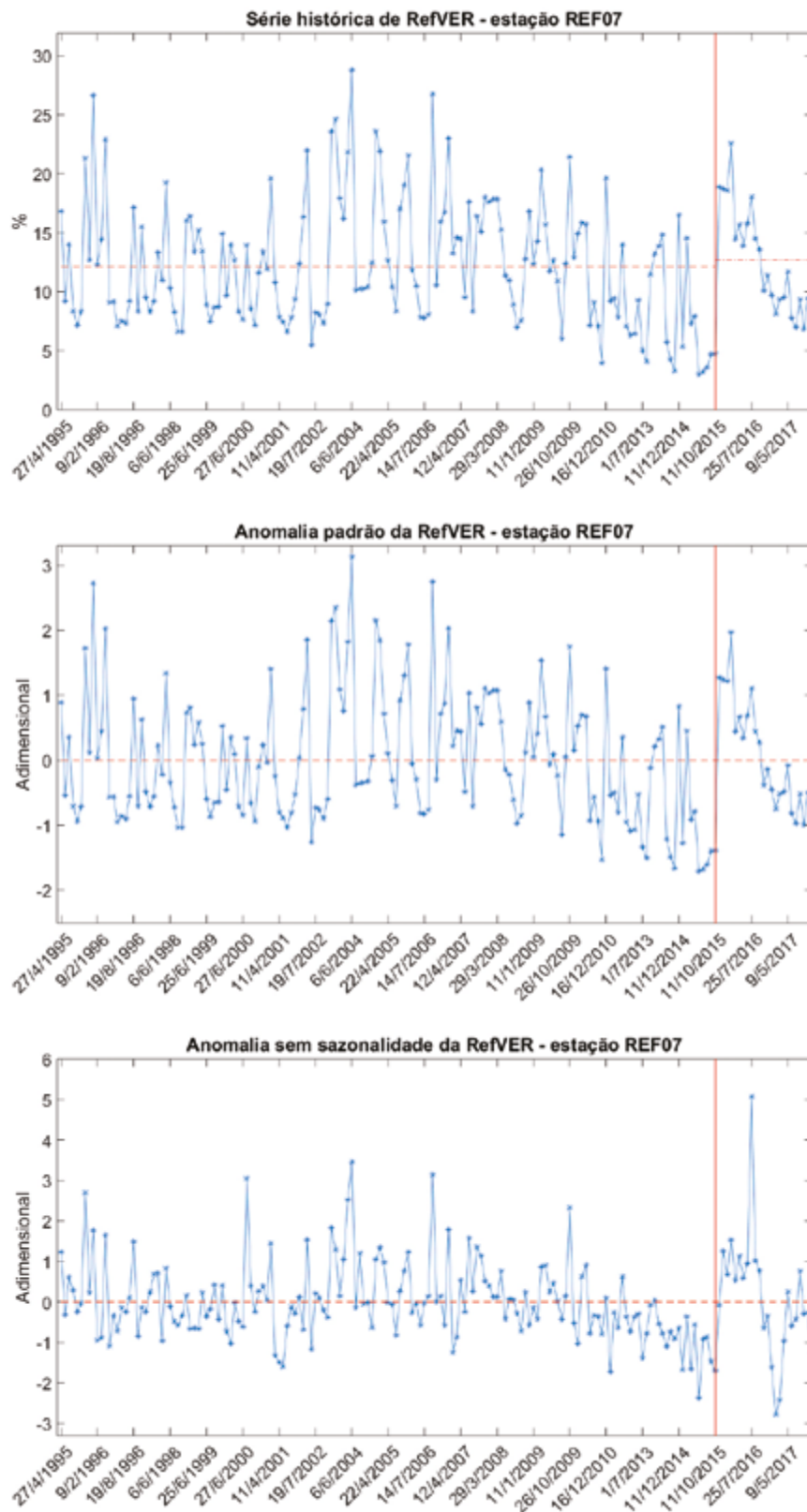


Figura 256 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF08. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

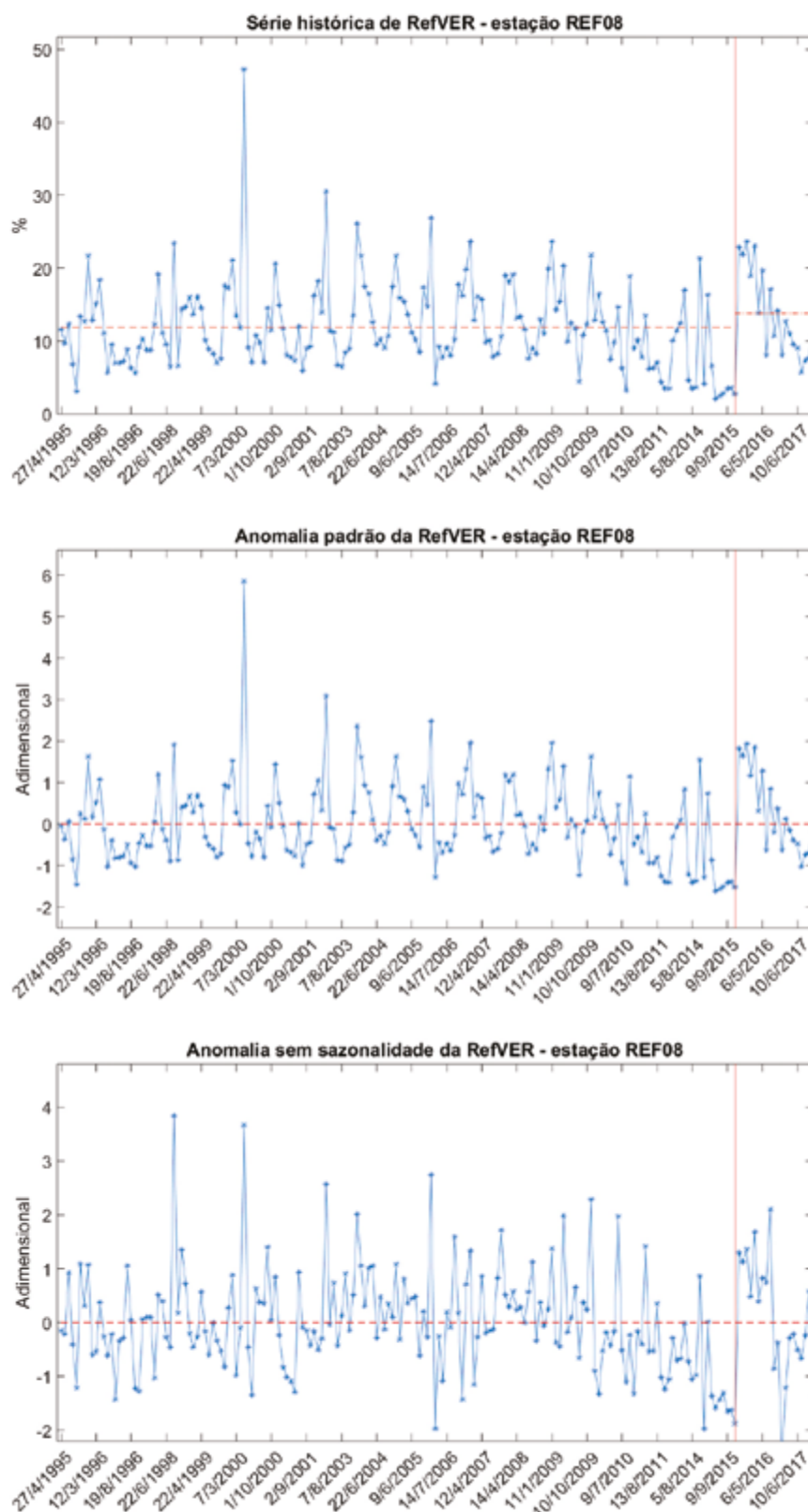


Figura 257 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF09. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

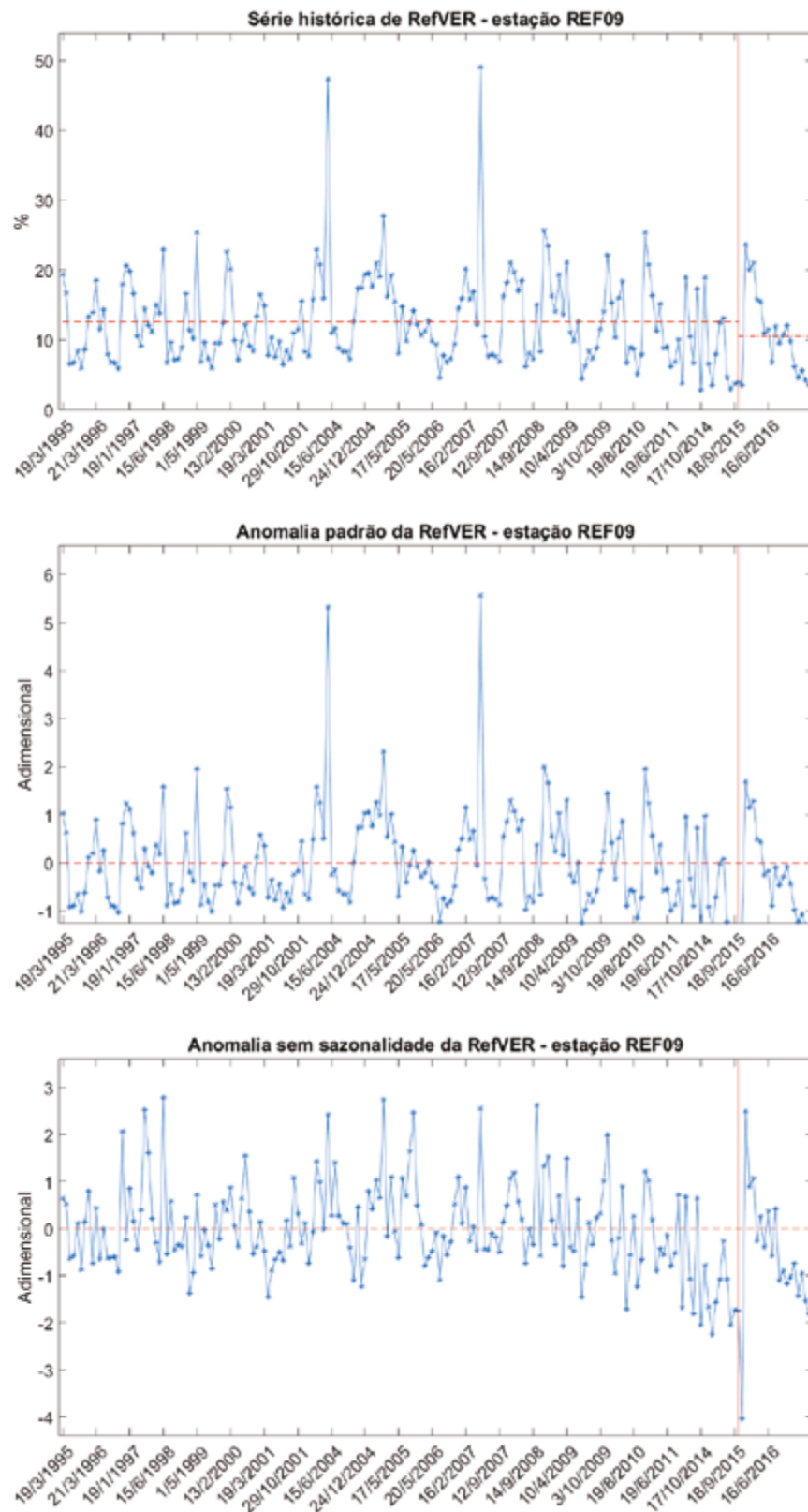


Figura 258 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF10. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

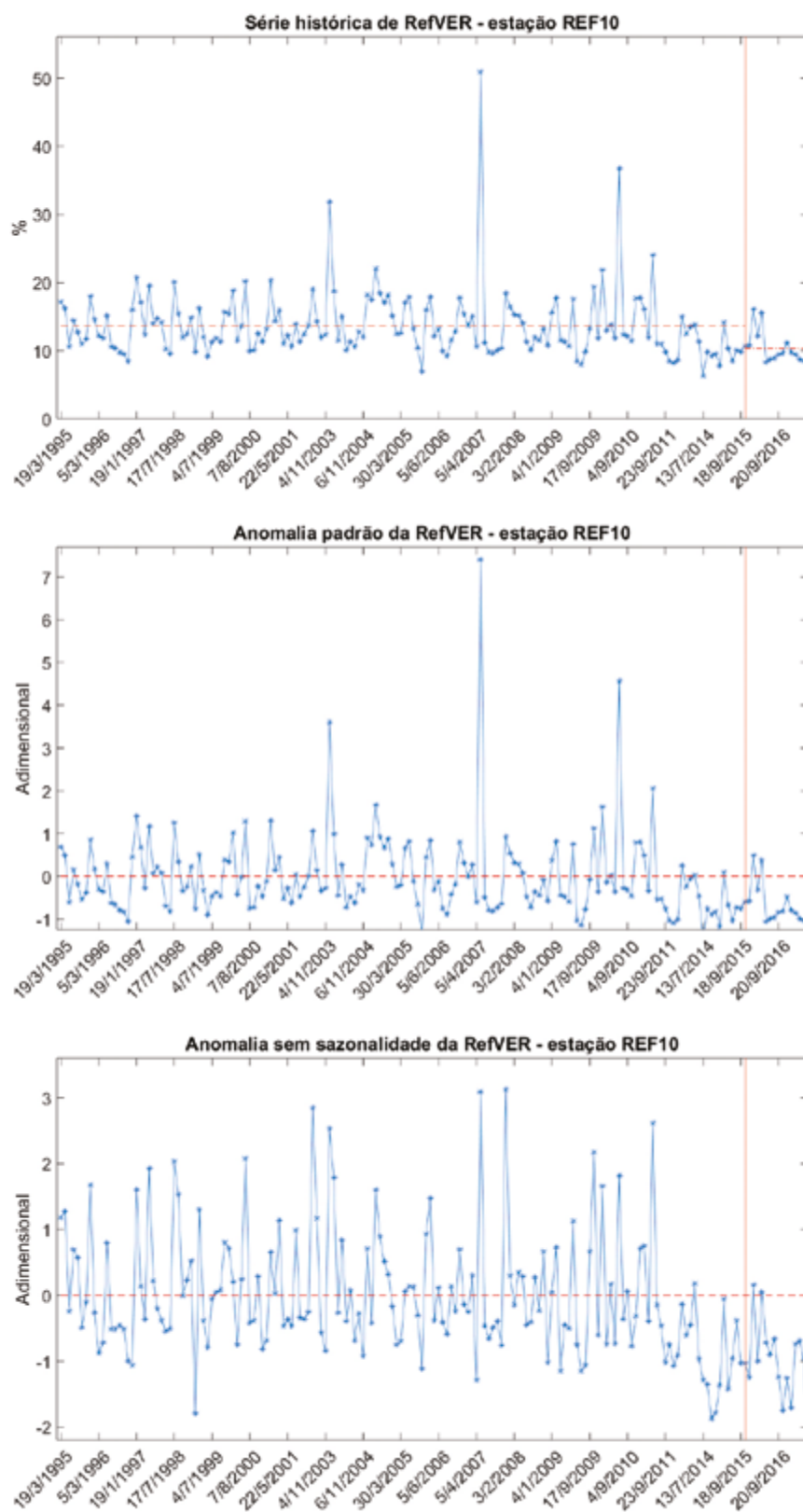


Figura 259 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF11. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

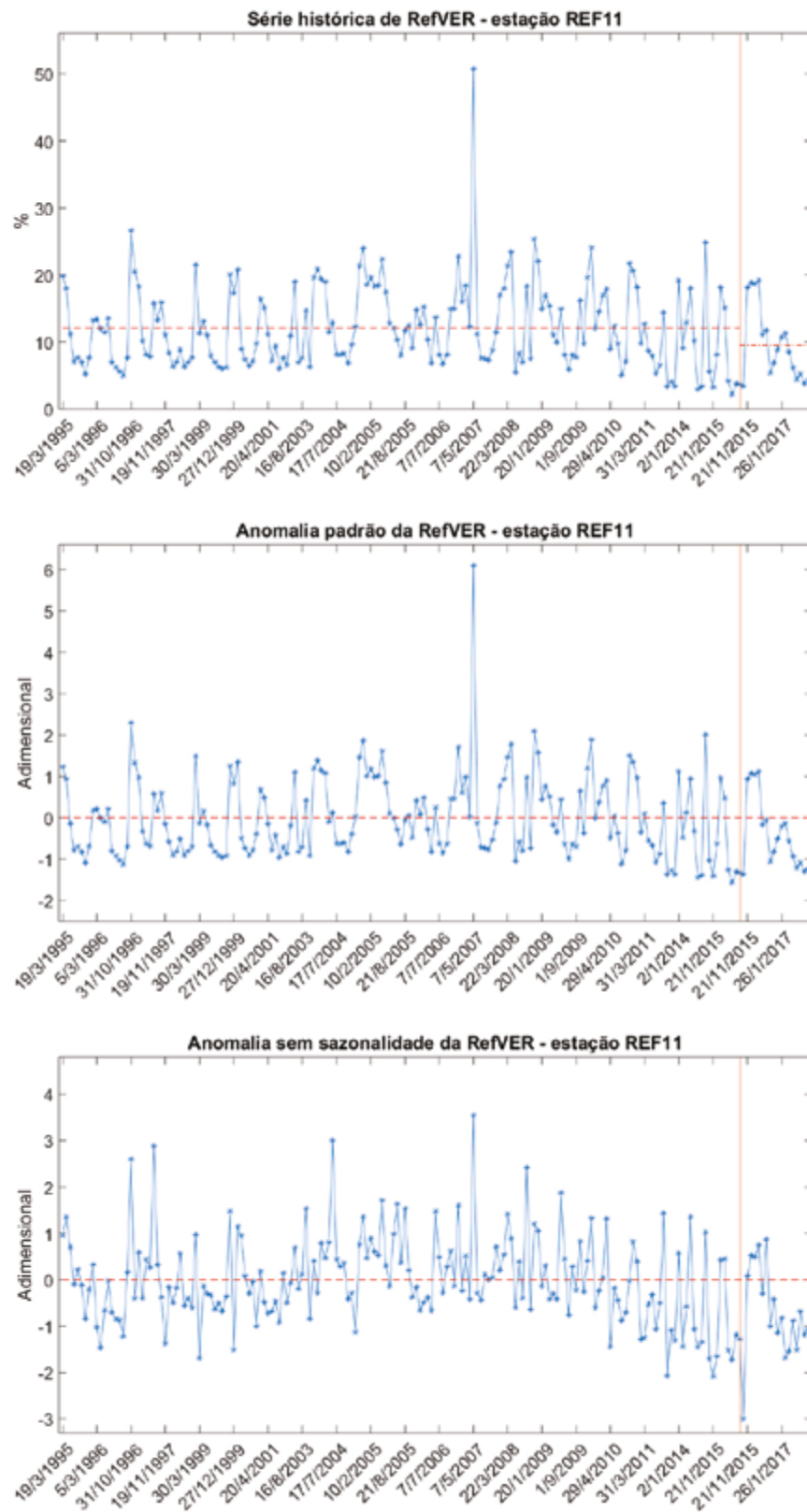


Figura 260 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF12. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

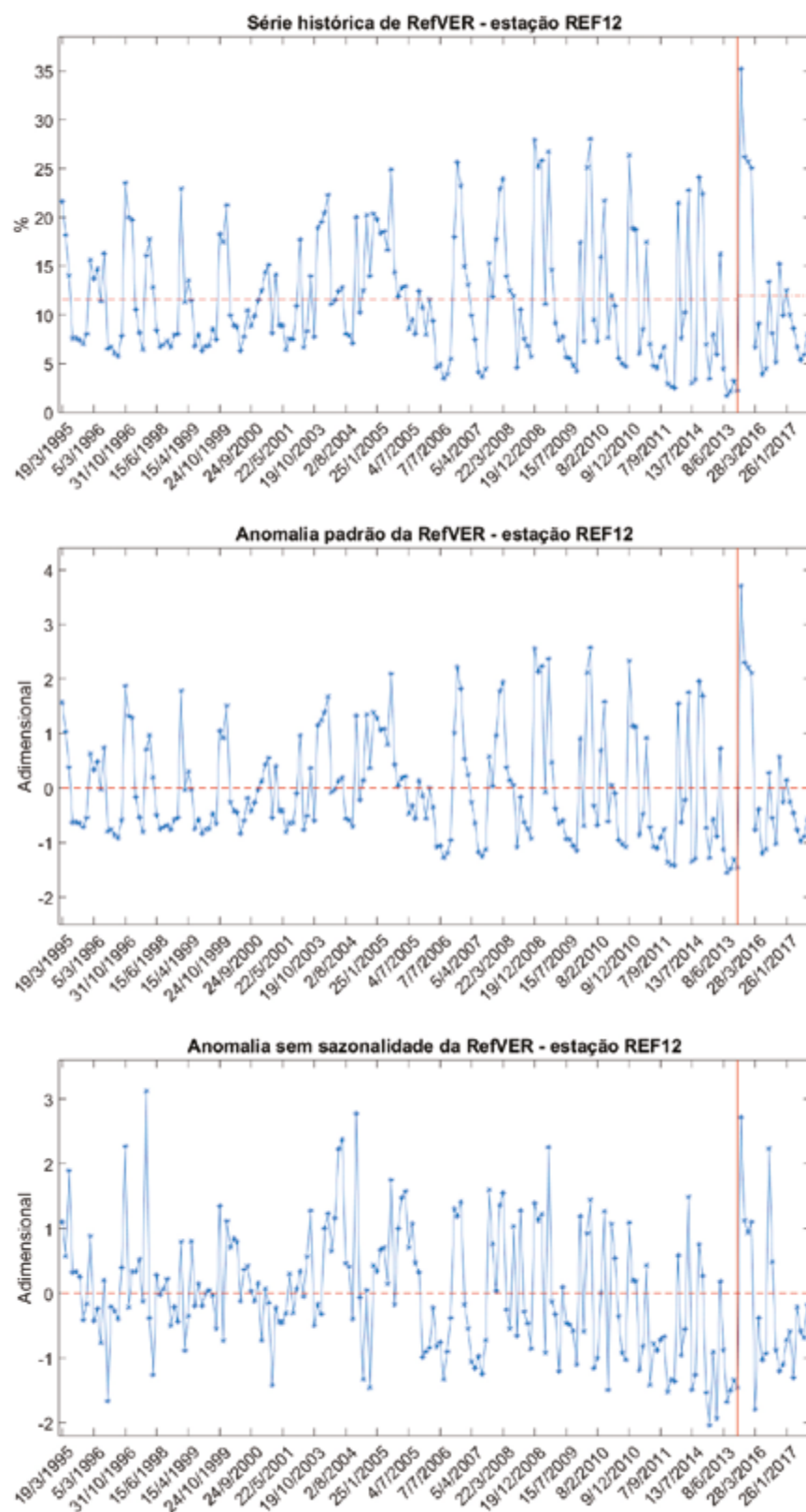


Figura 261 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF13. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

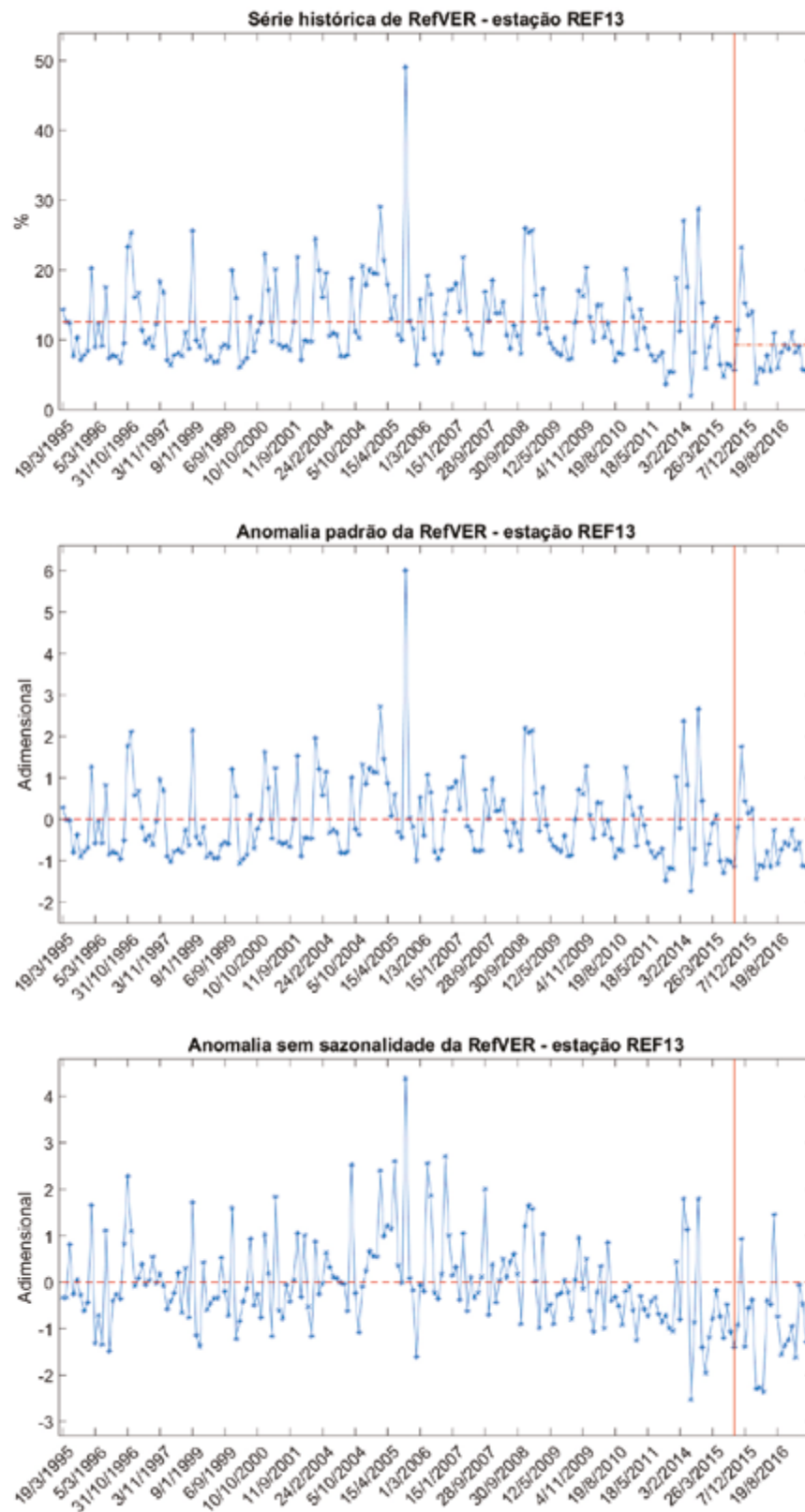


Figura 262 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF14. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

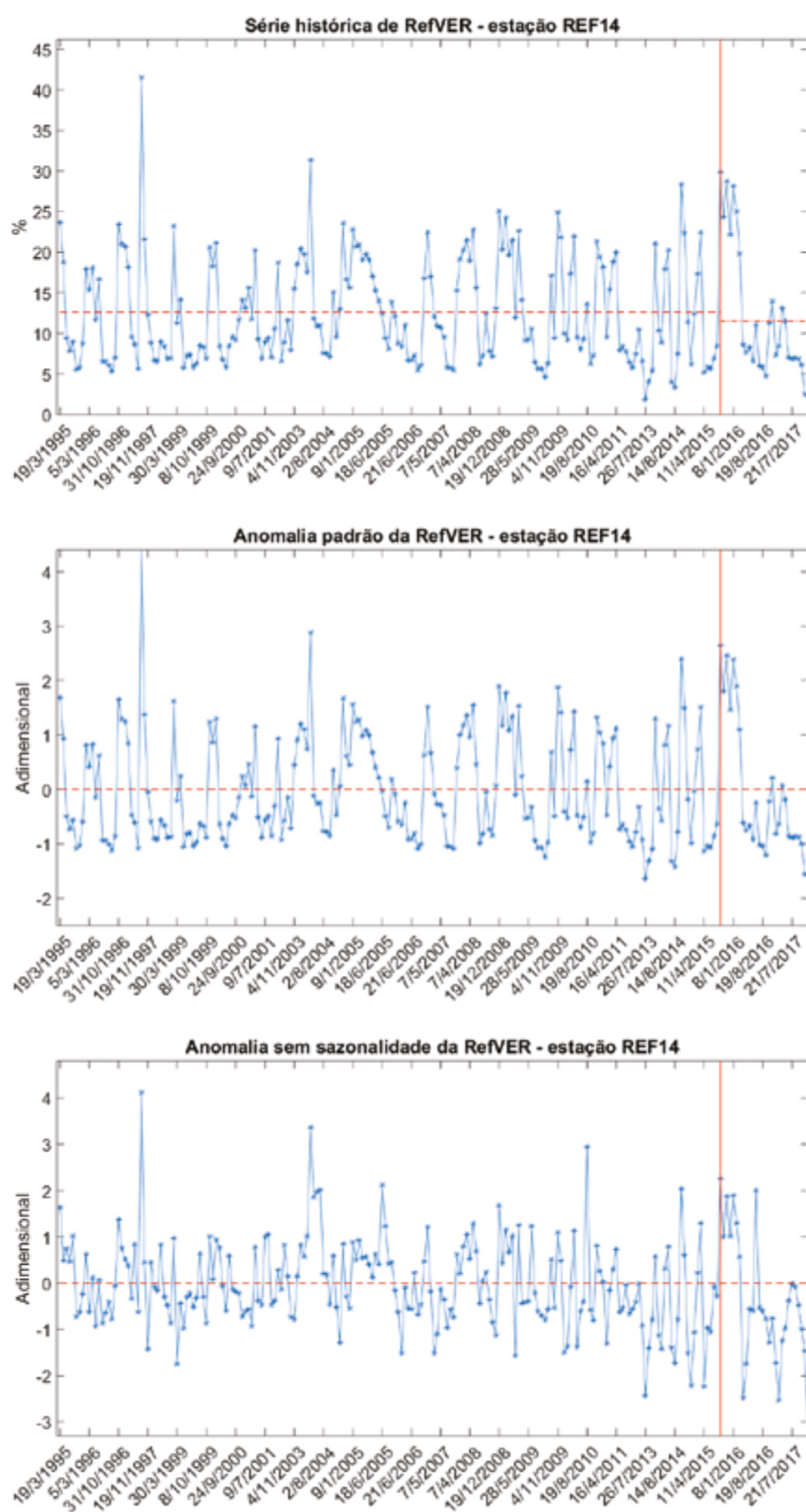
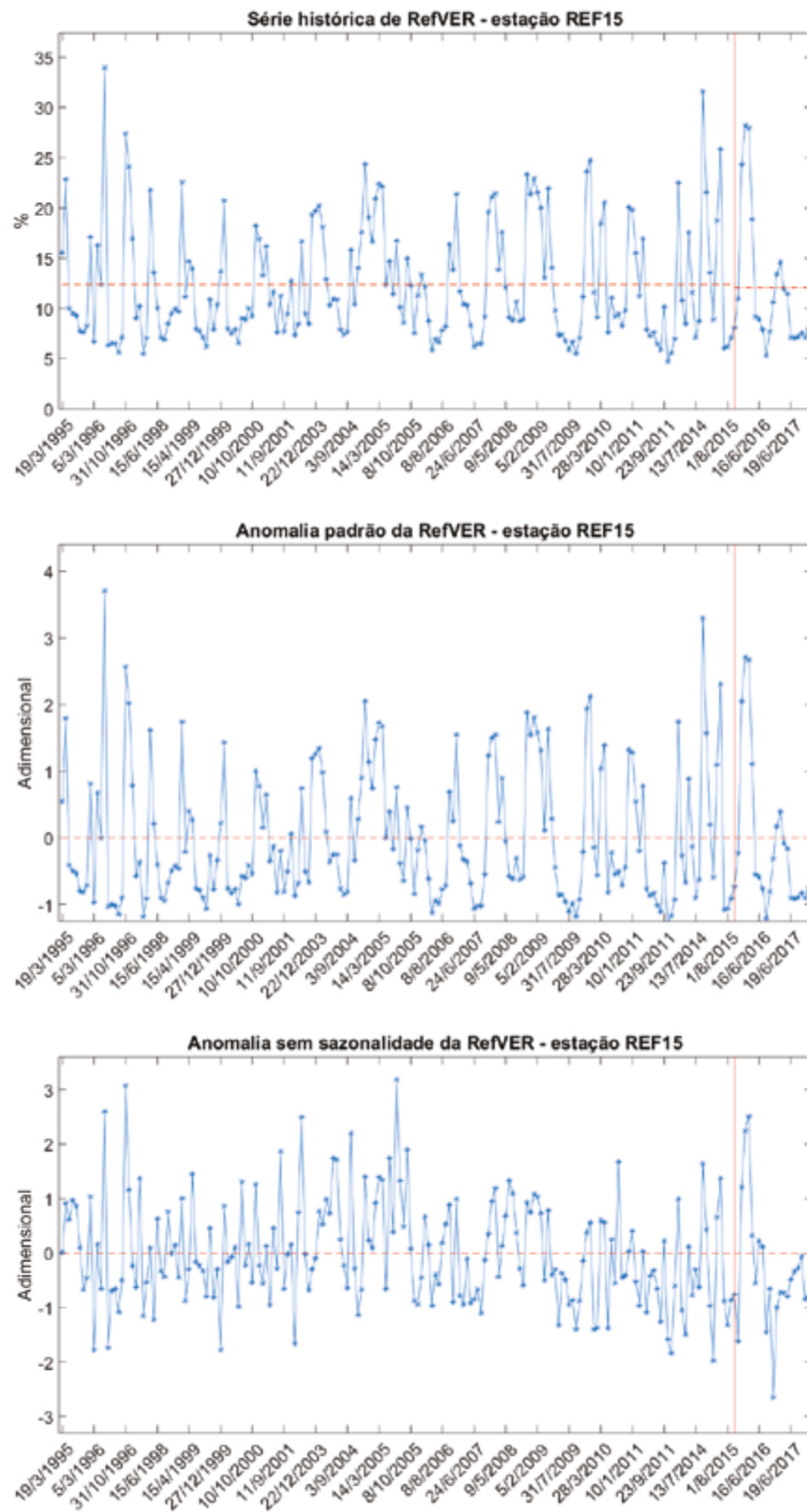


Figura 263 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF15. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).



REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE SUPERFÍCIE NA FAIXA DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

Figura 264— Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF01. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

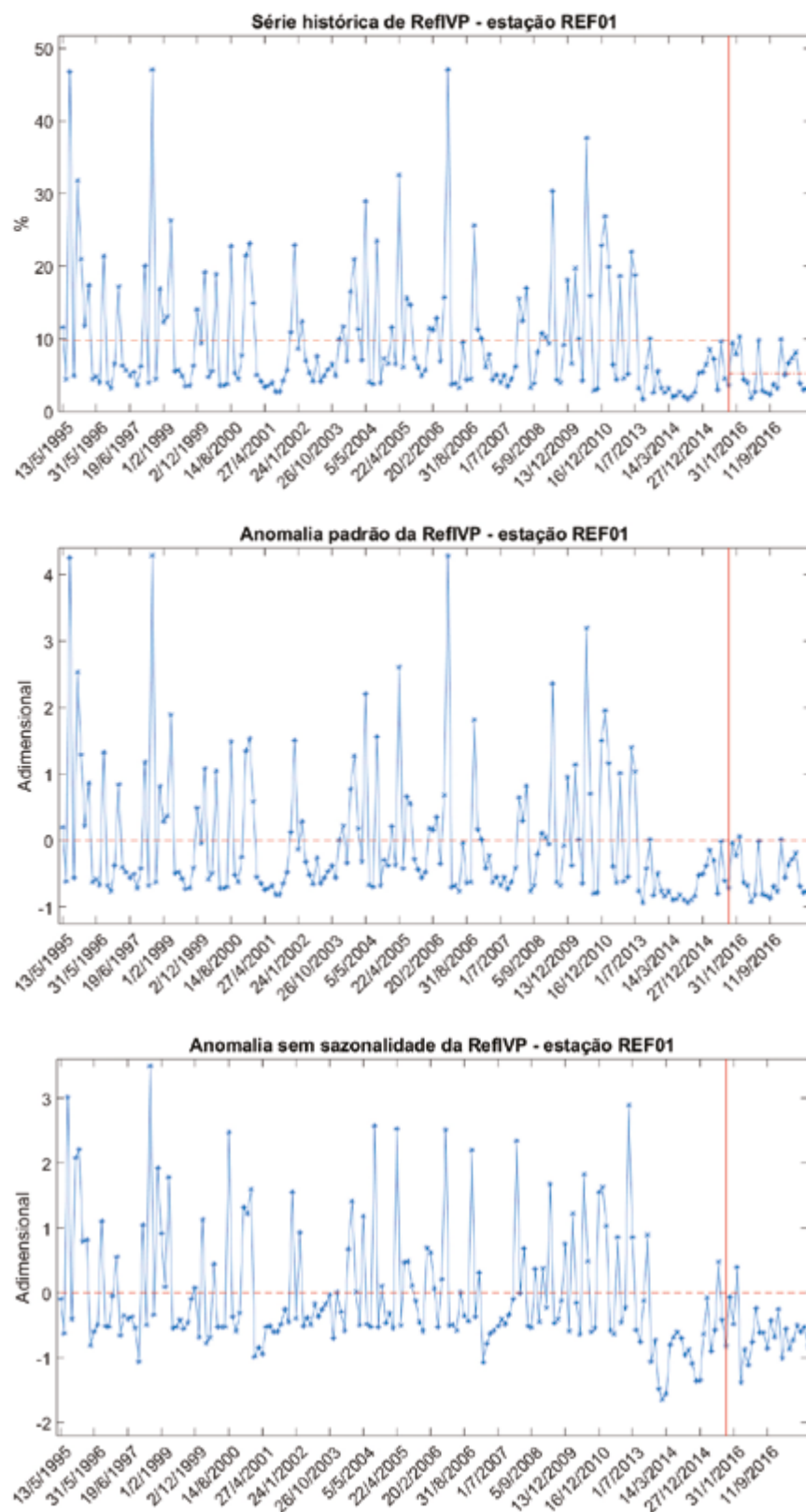


Figura 265 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF02. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

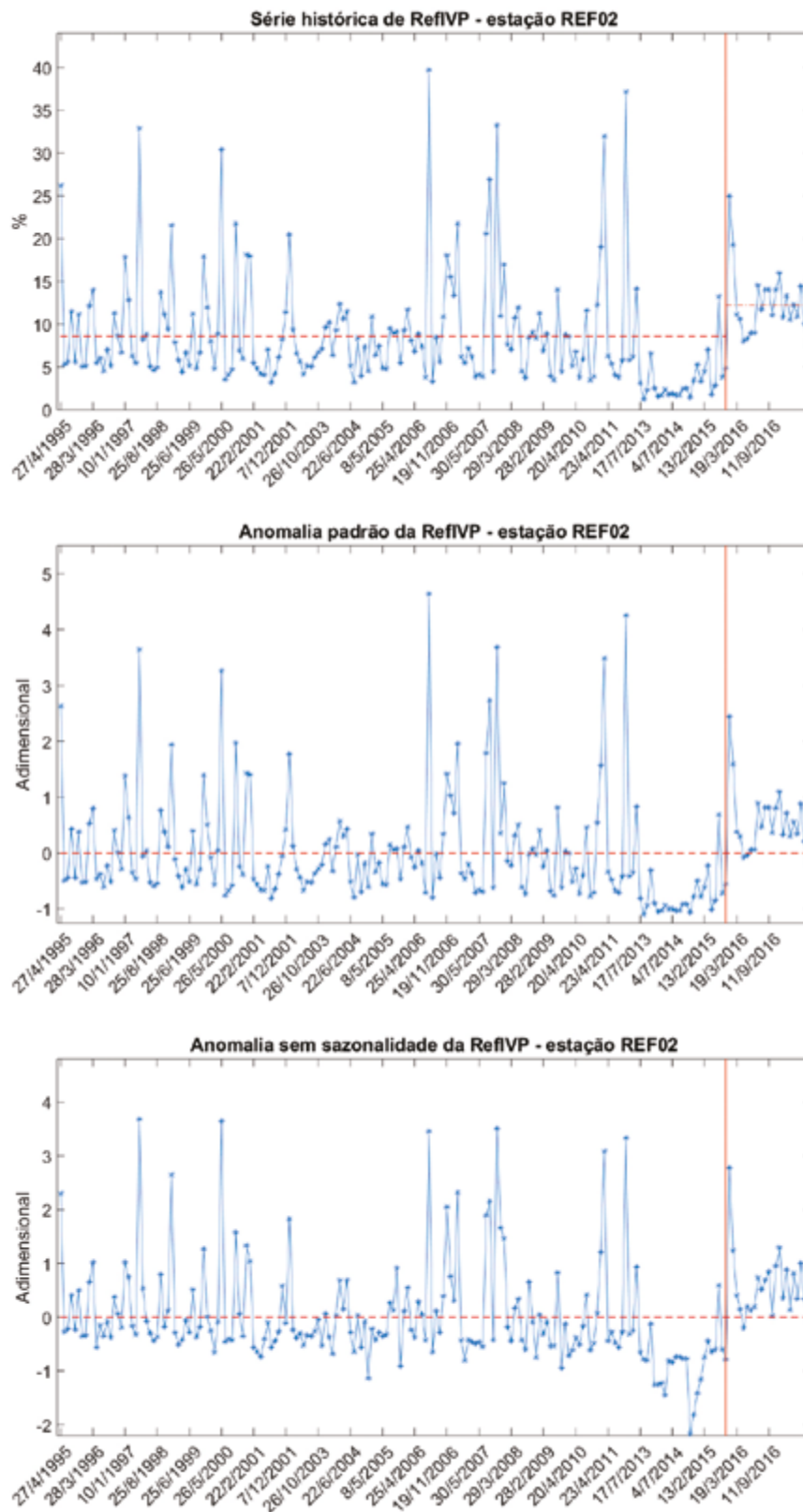


Figura 266— Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF03. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

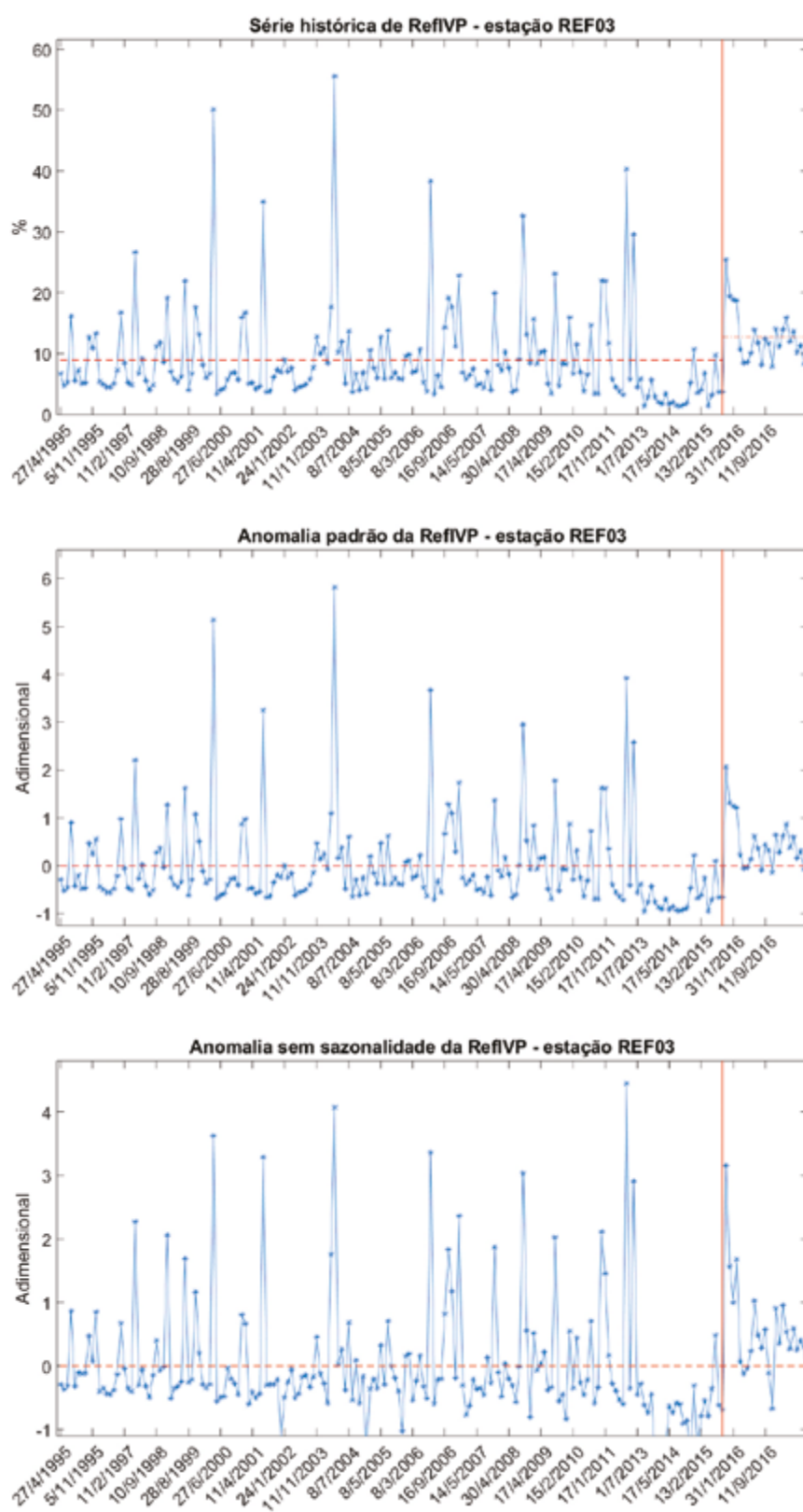


Figura 267 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF04. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de refletância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

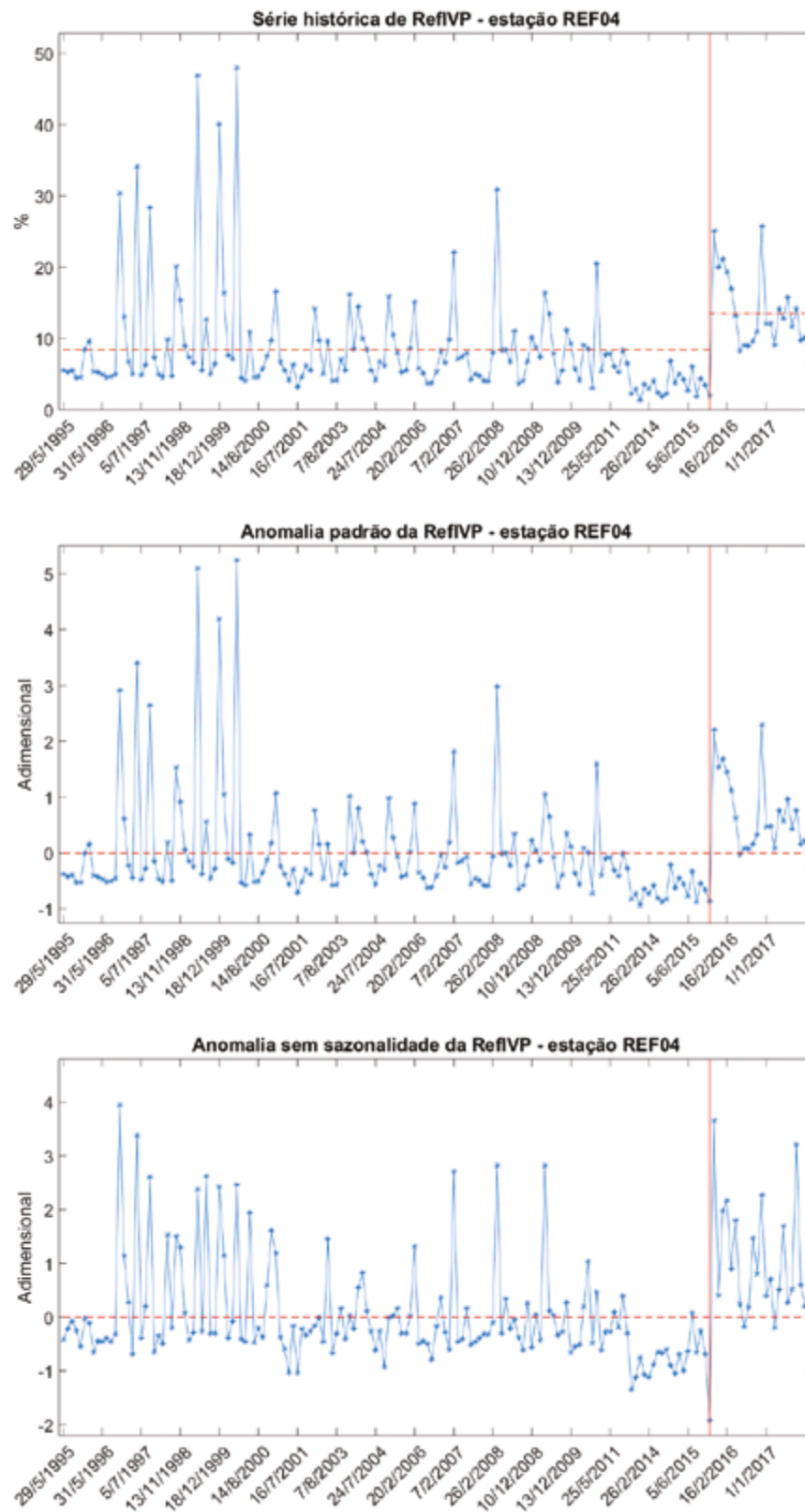


Figura 268 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF05. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

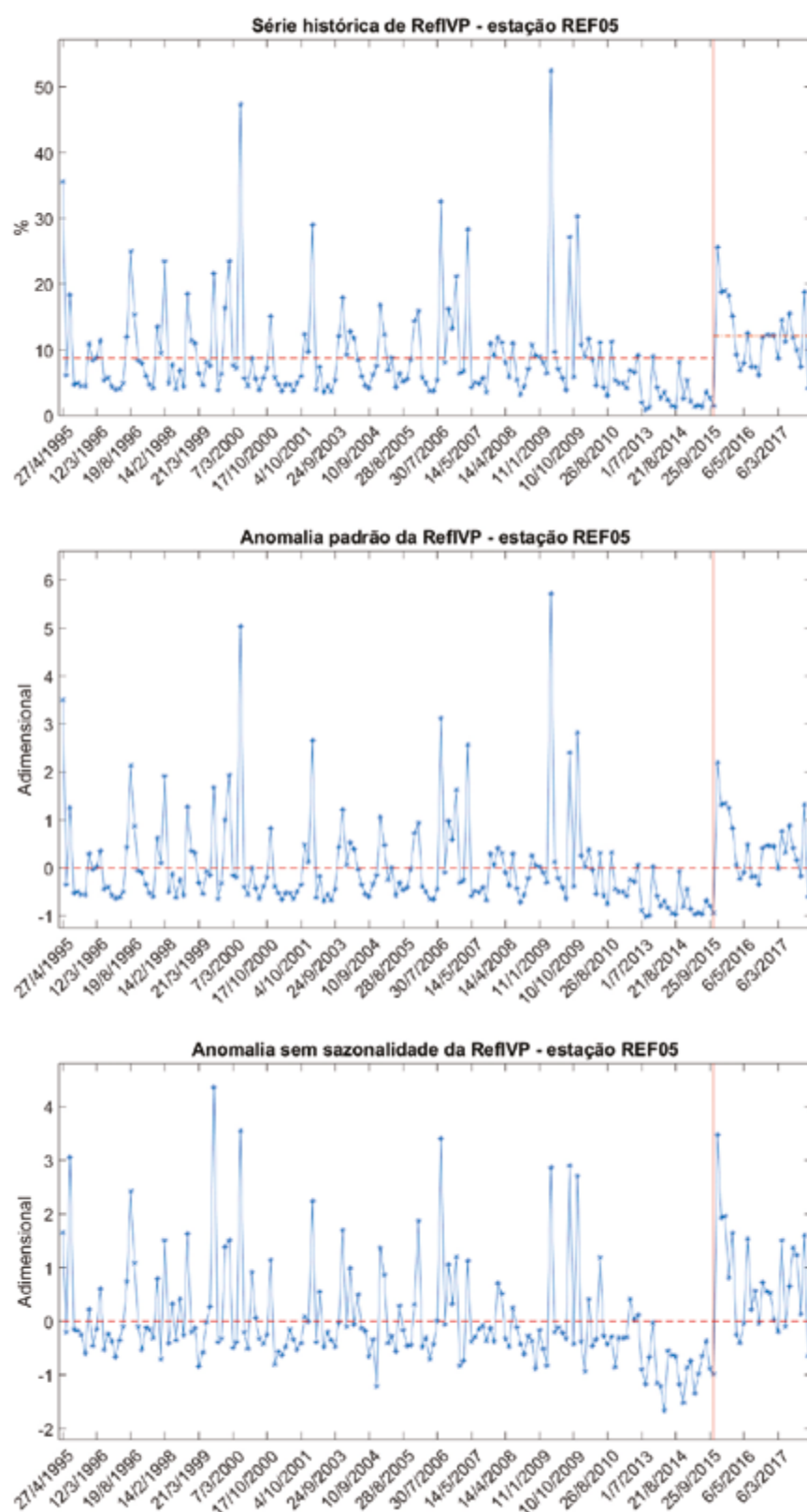


Figura 269– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF06. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de refletância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

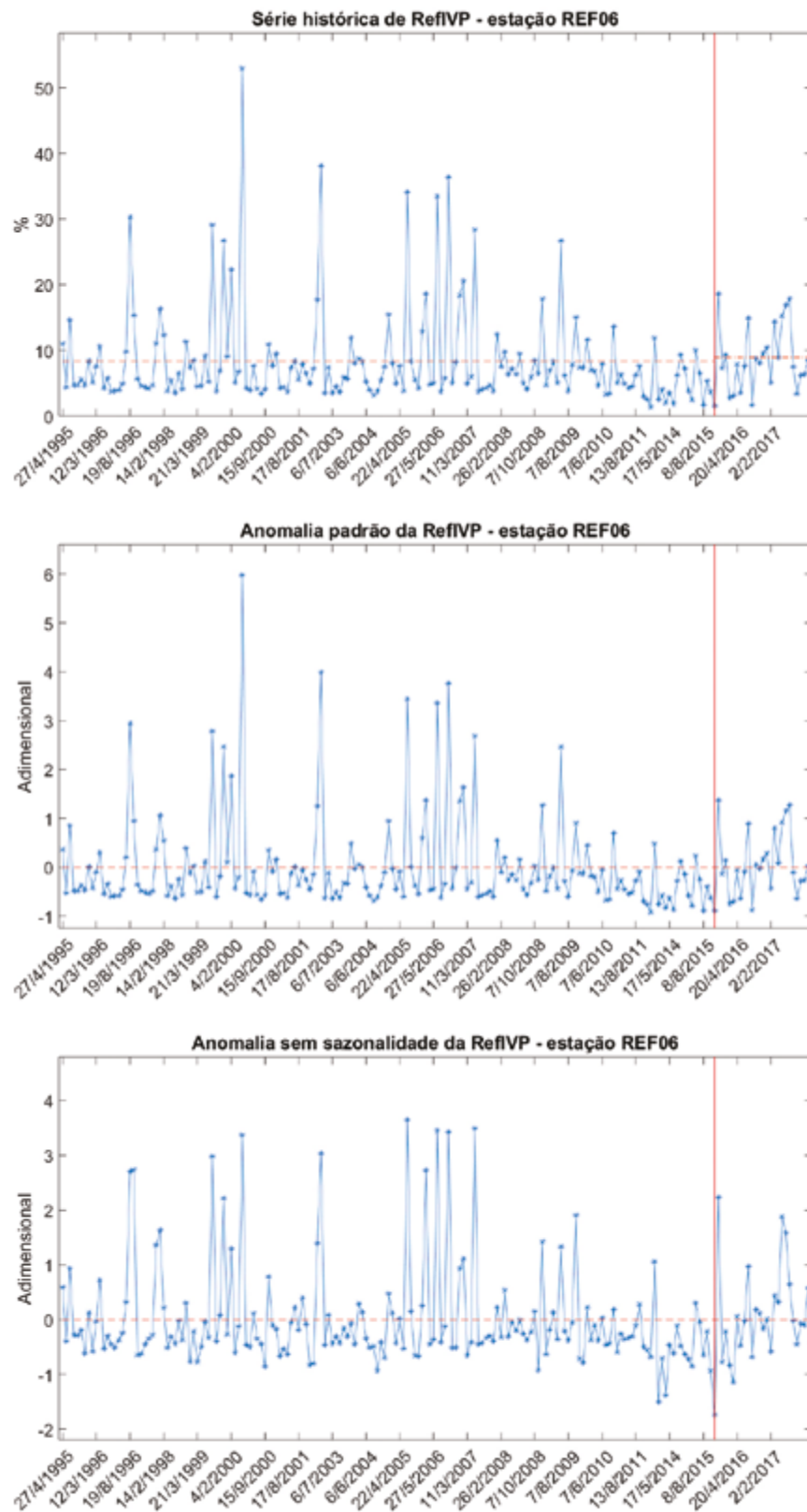


Figura 270 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF07. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

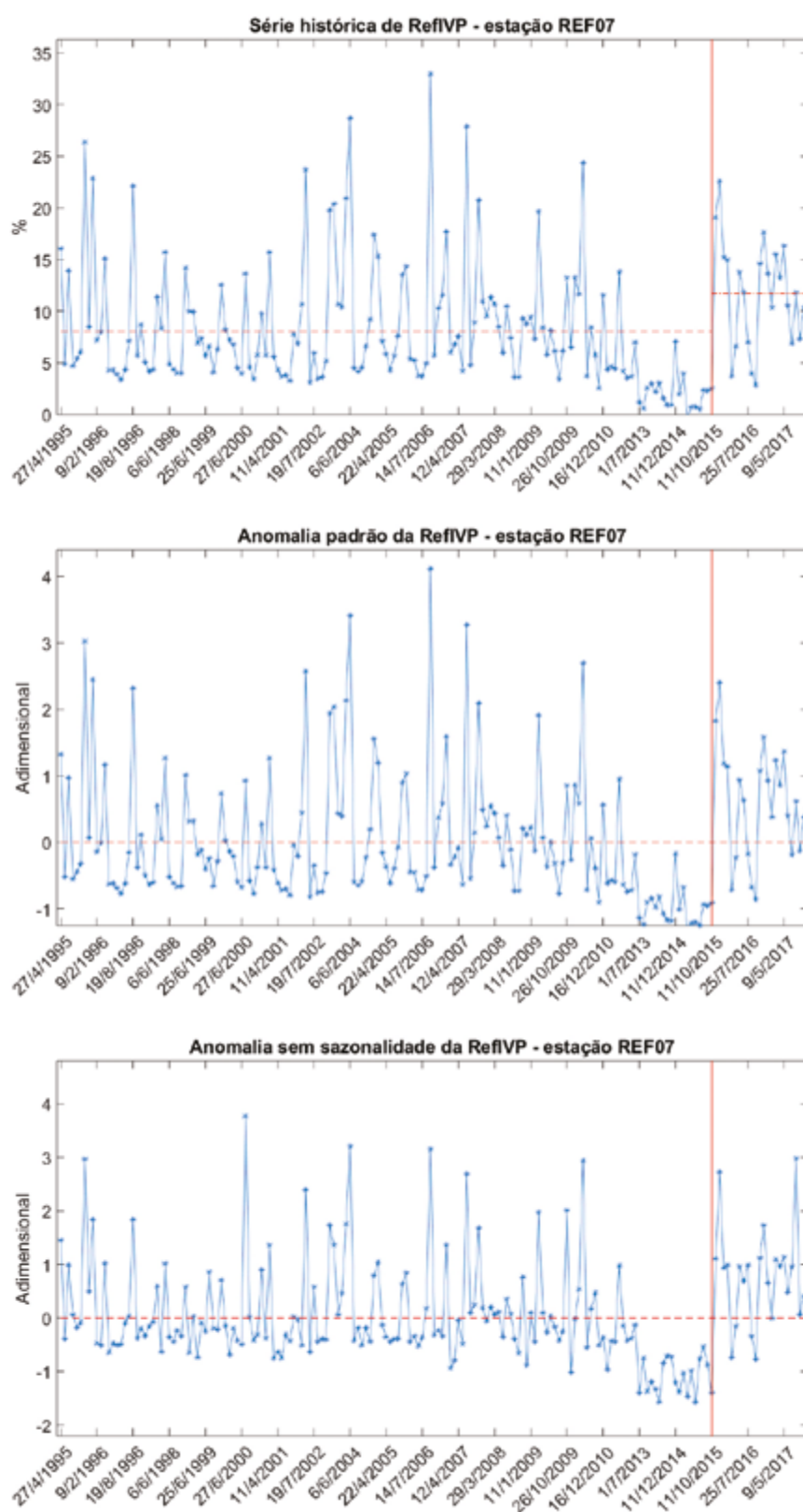


Figura 271— Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF08. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

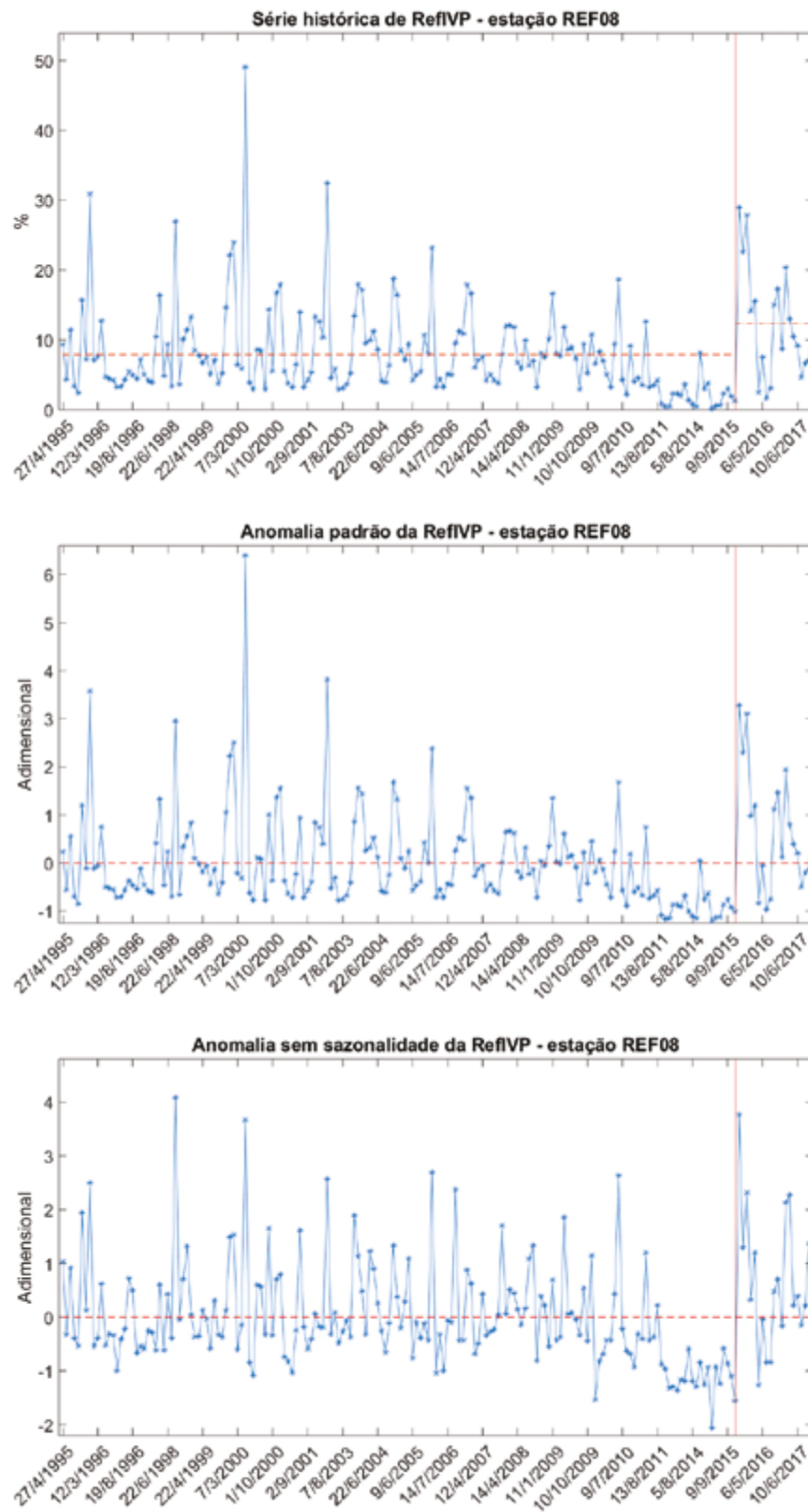


Figura 272– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF09. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua).

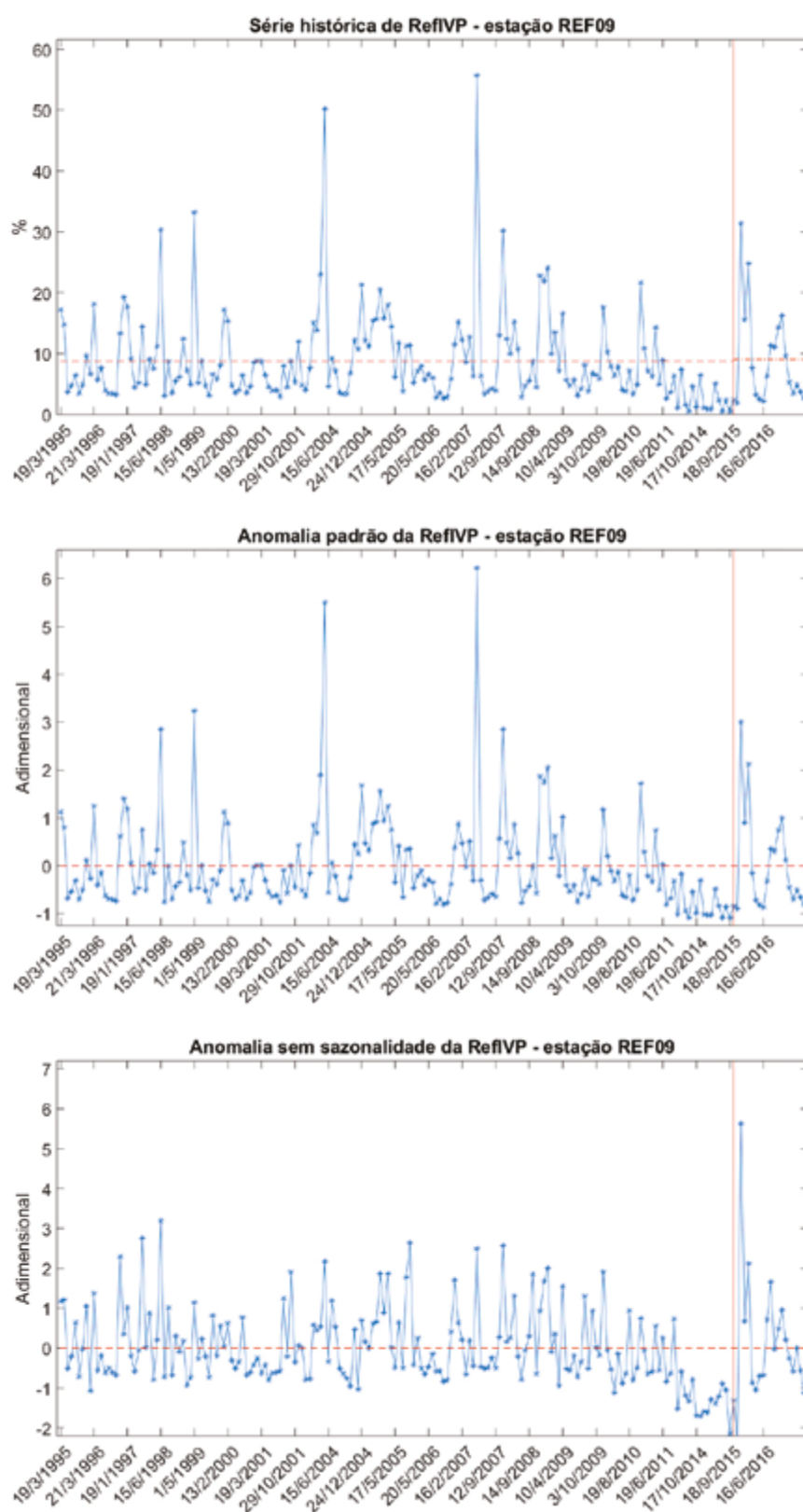


Figura 273 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF10. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de refletância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

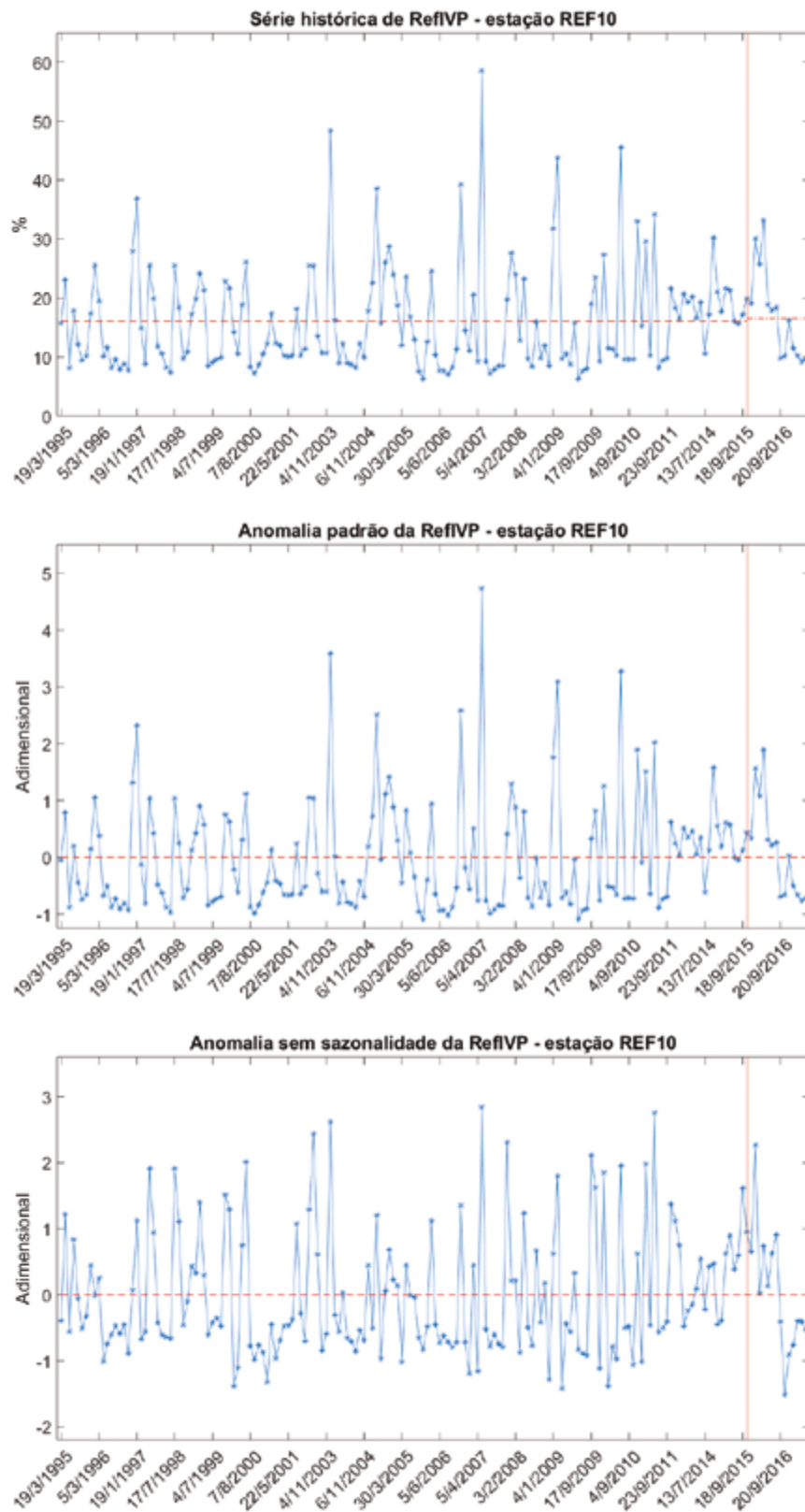


Figura 274 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF11. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

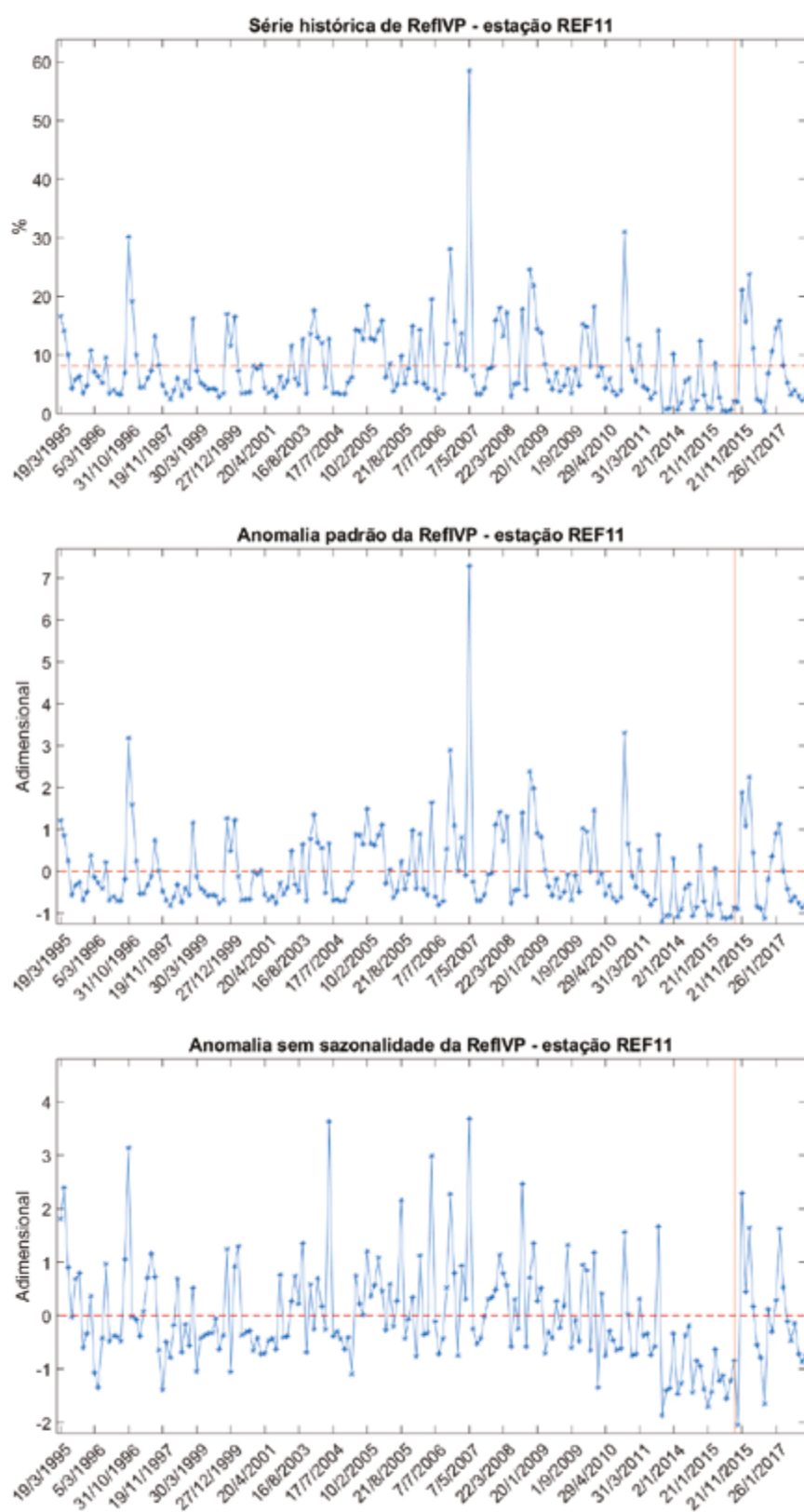


Figura 275 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF12. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de refletância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

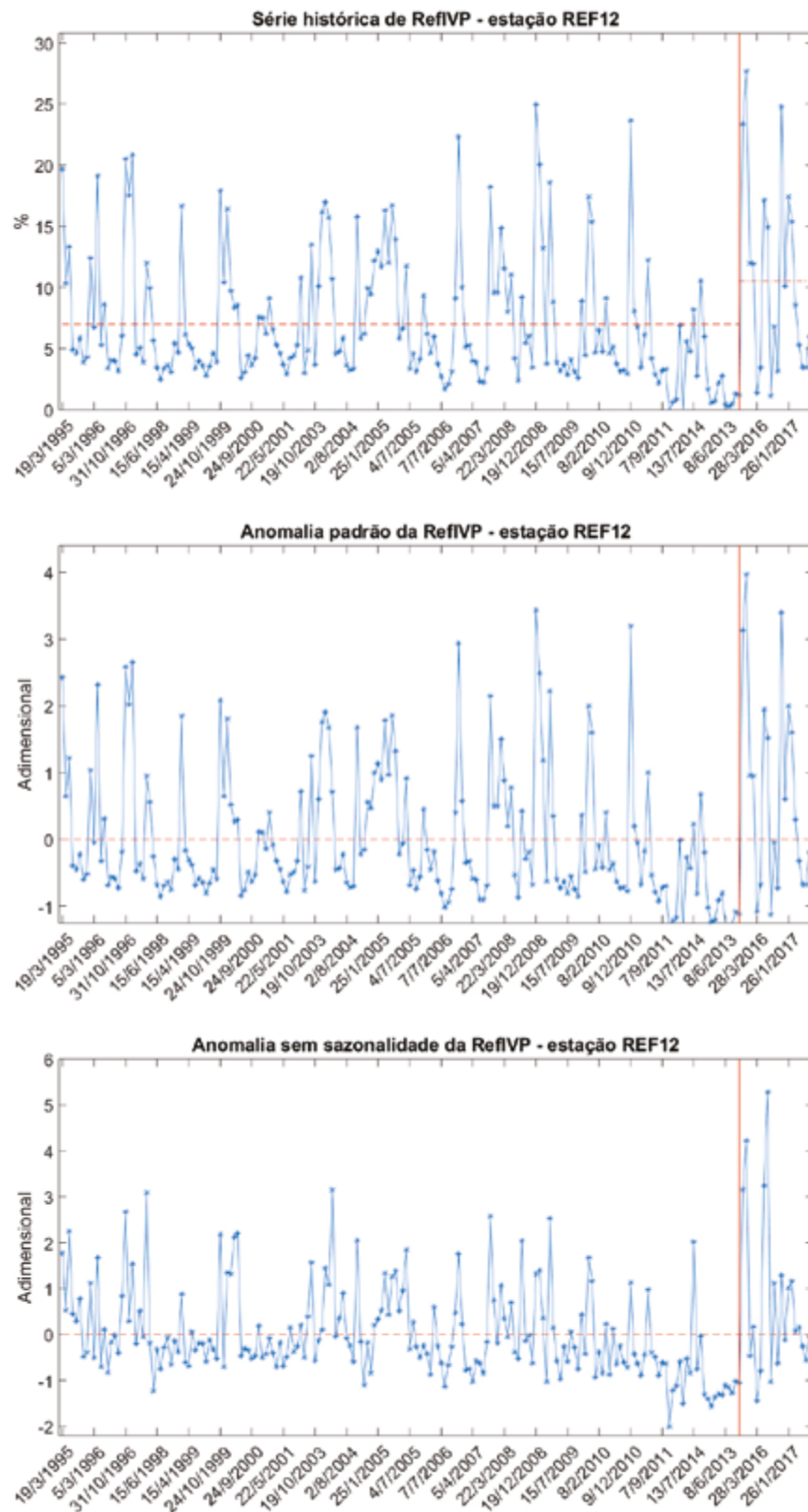


Figura 276 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF13. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)

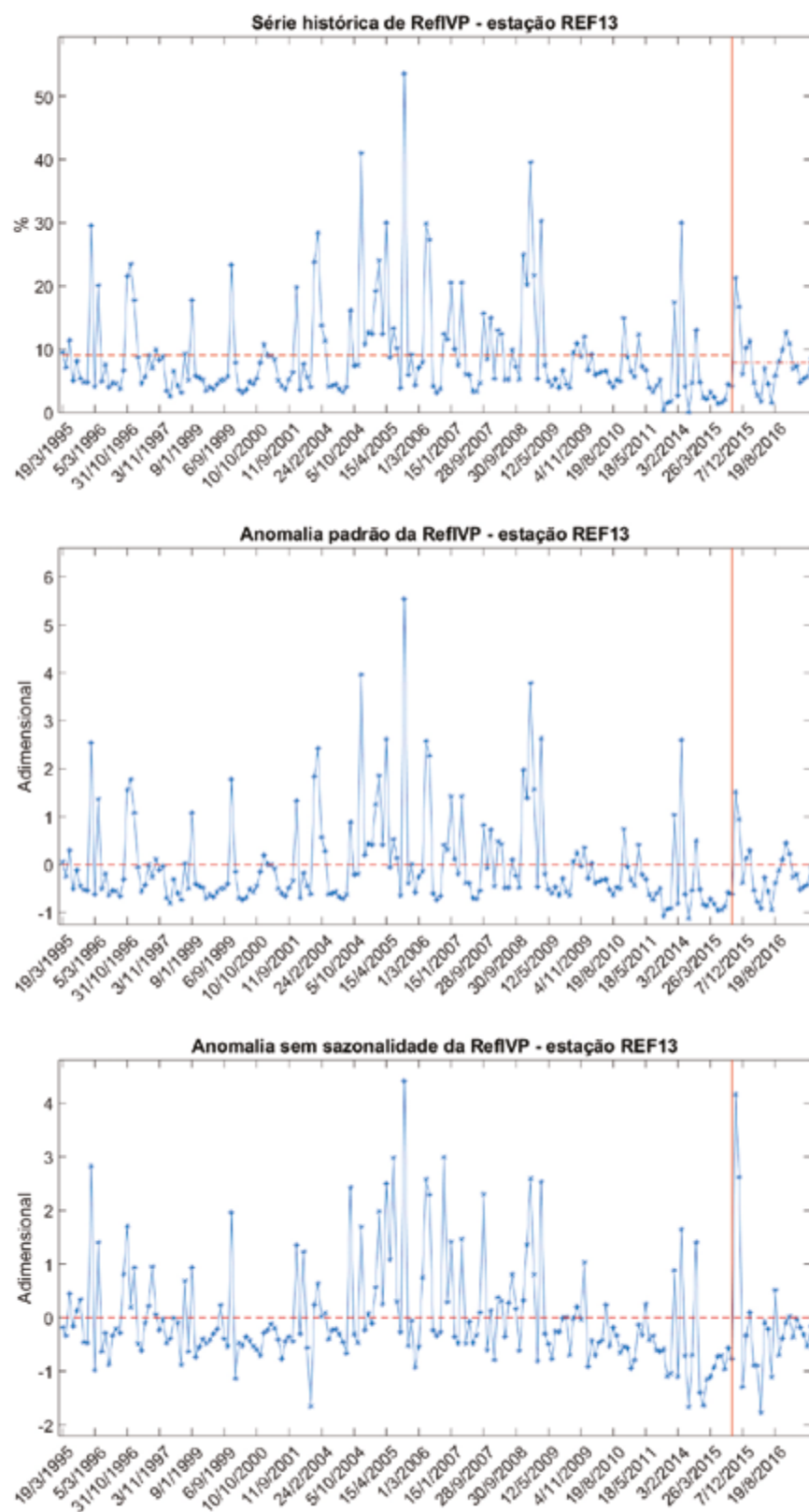


Figura 277 – Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF14. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha CONTÍNUA)

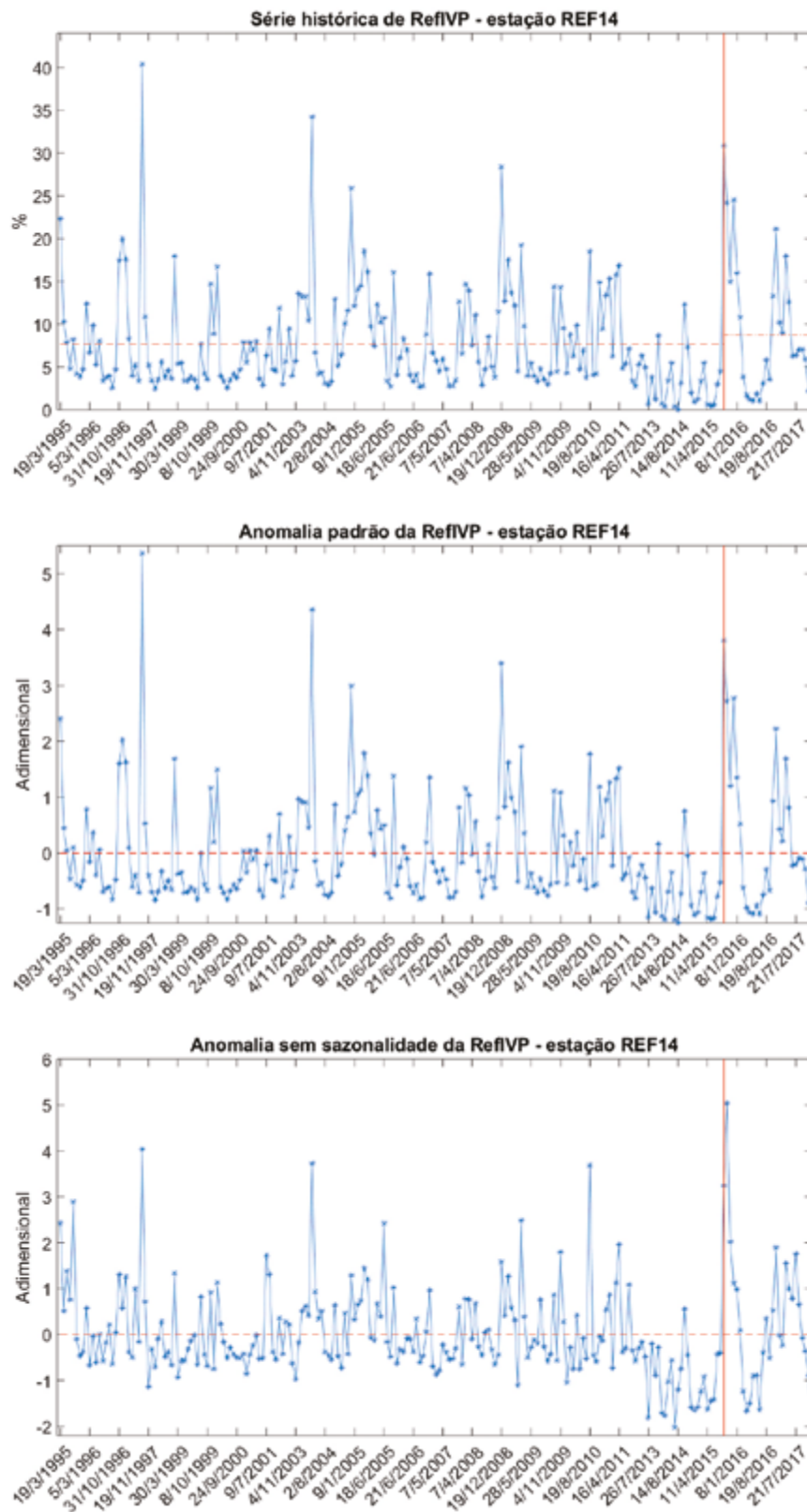
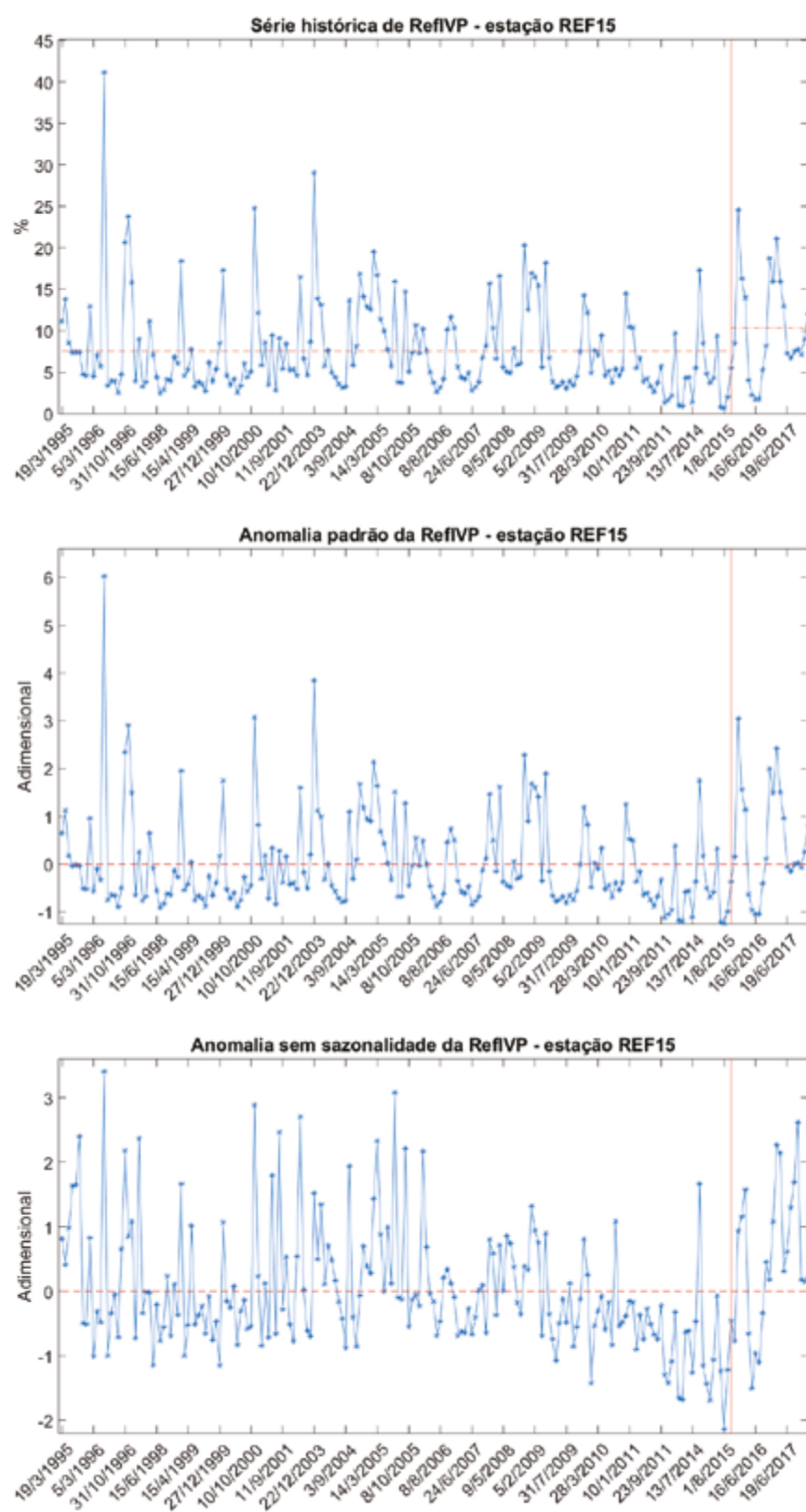


Figura 278– Série histórica, anomalia padrão e anomalia sem sazonalidade para a estação REF15. Médias (linhas vermelhas tracejadas) de reflectância espectral de superfície na faixa do infravermelho próximo antes e após a data do desastre de Mariana (linha vermelha contínua)



APÊNDICE C - ESTATÍSTICA DESCRITIVA

NÚMERO DE DADOS VÁLIDOS

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Trecho 1 - Rio Gualaxo do Norte	195	246	207	63	195	46	182	186	178	181	185	63
Trecho 2 - Rio do Carmo/Barra Longa	105	121	109	7	104	3	99	104	81	99	104	7
Trecho 3 - Barra Longa/Candonga	128	135	140	65	147	42	143	144	138	144	144	65
Trecho 4 - Rio Piracicaba/Rio Doce	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Trecho 5 - Candonga/Ipatinga	72	75	70	39	68	13	67	67	58	66	67	39
Trecho 6 - Ipatinga/Gov. Valadares	306	313	256	56	273	17	272	272	249	267	271	56
Trecho 7 - Gov. Valadares / Limite MG	306	352	268	70	2800	6	272	277	233	273	278	70
Trecho 8 - ES/Litoral	514	683	525	435	780	17	752	777	586	771	760	295
TOTAL	1628	1924	1577	737	1849	149	1789	1829	1525	1803	1811	597

Trecho 1 - Rio Gualaxo do Norte

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,077	5,6	393,39	16	19,79	5,97	6,531	5,97	8,95	0,395	8,551	0,105
Mediana	0	2,22	214,1	12	12	8	3,275	3	4,01	0,1	5,2	0,09
Q1	0	0,27	84,69	8,3	6,41	1,42	1,95	1,1	3	0,05	1,77	0,05
Q3	0,04	7,41	516,5	18,2	24,65	8	7,6	9	7	0,4	13	0,12
Mínimo	0	0	516,5	5	0,5	0,7	0,341	0,05	0,01	0,01	0,064	0,01
Máximo	1,55	36,62	2970	102,1	145	18	106,109	32	161	15,7	57,8	0,868
Amplitude	1,55	36,62	2968,84	97,1	144,5	17,3	105,768	31,95	106,99	15,69	57,736	0,858
Desvio-padrão	0,215	7,61	456,13	13,9	20,98	4,67	10,494	6,69	20,33	1,199	9,223	0,121
CV	278,926	135,84	11,95	87	106,04	78,25	160,678	112,11	227	303,485	107,866	114,712

Trecho 2 - Rio do Carmo/Barra Longa

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,01	3,995	306,8	19,57	19,39	8,333	5,74	5,76	12,28	0,21	6,89	0,082
Mediana	0	1,31	116	21	11,9	8	3,39	2,68	3,7	0,1	3,21	0,09
Q1	0	0,457	77,2	12,5	6,82	8	2,11	1,55	3,51	0,052	2,14	0,04
Q3	0	4,85	383	24,5	27,45	8,5	6,65	8,25	5,2	0,4	10,8	0,12
Mínimo	0	0	32,3	9	0,5	8	0,1	0,05	0,01	0,01	0,1	0,02
Máximo	0,6	31,8	3240	33	78,5	9	22,7	29,1	313	1	29	0,144
Amplitude	0,6	31,8	3207,7	24	75	1	22,6	29,05	312,99	0,99	28,9	0,124
Desvio-padrão	0,07	6,202	428,3	8,87	17,8	0,577	5,59	6,83	44,05	0,208	6,95	0,049
CV	685,56	155,257	139,6	45,3	91,82	6,928	97,39	118,49	358,76	99,196	100,89	59,65

Trecho 3 - Barra Longa/Candongua

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,276	7,436	470,04	22,1	26,7	7,66	9,51	5,39	8,42	1,35	11,96	0,248
Mediana	0,08	4,32	369,5	18	17,9	8	6,3	3	3,7	0,4	9,5	0,08
Q1	0	1,855	170,5	11	10,6	4	3	1,1	3,7	0,4	6,35	0,02
Q3	0,32	7,855	760,5	26,7	34,8	8	12	6,85	7	1	17,45	0,123
Mínimo	0	0,001	1,25	5	2,7	0,7	0,5	0	0	0,01	0,65	0
Máximo	2,77	47,04	1660	94,2	143	21,8	79,5	35,2	104	20,8	42,1	2,85
Amplitude	2,77	47,039	1658,75	89,2	140,3	21,1	78	35,2	104	20,79	41,45	2,85
Desvio-padrão	0,493	8,591	371,72	16,5	25,8	4,45	11,75	6,32	13,85	3,01	8,17	0,505
CV	178,729	1115,536	79,08	74,8	96,4	58,03	123,55	117,11	164,48	222,83	68,35	203,695

Trecho 4 - Rio Piracicaba/ Rio Doce

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,35	3,26	612,5	10,5	33,5	8	9,5	7,5	59	1	8	0,011
Mediana	0,35	3,26	612,5	10,5	33,5	8	9,5	7,5	59	1	8	0,011
Q1	0,33	2,48	556	8	31	8	8	6	38	1	8	0,011
Q3	0,37	4,04	669	13	36	8	11	9	80	1	8	0,011
Mínimo	0,33	2,48	559	8	31	8	8	6	38	1	8	0,011
Máximo	0,37	4,04	669	13	36	8	11	9	80	1	8	0,011
Amplitude	0,04	1,56	113	5	5	0	3	3	42	0	0	0
Desvio-padrão	0,028	1,1	79,9	3,54	3,54	0	2,12	2,12	29,7	0	0	0
CV	8,081	33,84	13	33,67	10,55	0	22,33	28,28	50,3	0	0	0

Trecho 5 - Candonga/Ipatinga

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,984	11,76	498	26,9	35,4	7,985	13,1	13,81	12,84	0,586	14,4	0,069
Mediana	0,25	3,7	400	26	31,6	8	9	11,5	11,97	1	11,5	0,05
Q1	0	1,16	92	15,4	20,4	8	5,6	4,85	5,83	0,1	8	0,025
Q3	1,73	25,02	757	35,2	45,9	8	18,1	17	17	1	21	0,119
Mínimo	0	0	1	8	3	6,5	0,5	0,3	0,05	0,01	0,5	0,011
Máximo	7,41	40	2734	76,6	109,6	9,3	62,3	149,5	44,9	1,29	44,2	0,18
Amplitude	7,41	40	2733	68,6	106,6	2,8	61,8	149,2	44,85	1,28	43,7	0,169
Desvio-padrão	1,456	12,93	539	13,8	21,8	0,573	11,3	18,63	9,45	0,468	10,1	0,051
CV	147,937	109,94	108	51,2	61,6	7,174	86	134,86	73,6	79,78	70,1	73,604

Trecho 6 - Ipatinga/Gov. Valadares

	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,579	4,597	354,6	47,9	33,97	9,47	9,94	9,48	9,06	0,329	11,53	0,074
Mediana	0	1,613	116,8	42,1	24,6	8	5,68	4,92	4,67	0,1	7,34	0,07
Q1	0	0,288	53,2	26	9,44	8	1,89	1,87	2,33	0,05	2,5	0,02
Q3	0	5,81	488,1	60,2	50,5	8	15,31	15,9	13,3	0,4	20	0,105
Mínimo	0	0	1	10	0,5	8	0,25	0,05	0,01	0,02	0,1	0,011
Máximo	9,19	34,9	2916	145,6	185,2	17	68,2	57,7	68,27	1,49	51,7	0,26
Amplitude	9,19	34,9	2915	165,6	184,7	9	67,95	57,65	38,26	1,47	51,6	0,249
Desvio-padrão	1,509	6,882	489,2	28,7	32,22	2,98	10,83	10,04	10,96	0,368	11,22	0,056
CV	260,781	149,693	138	60,7	94,84	31,48	108,94	105,87	120,95	111,831	97,27	75,661

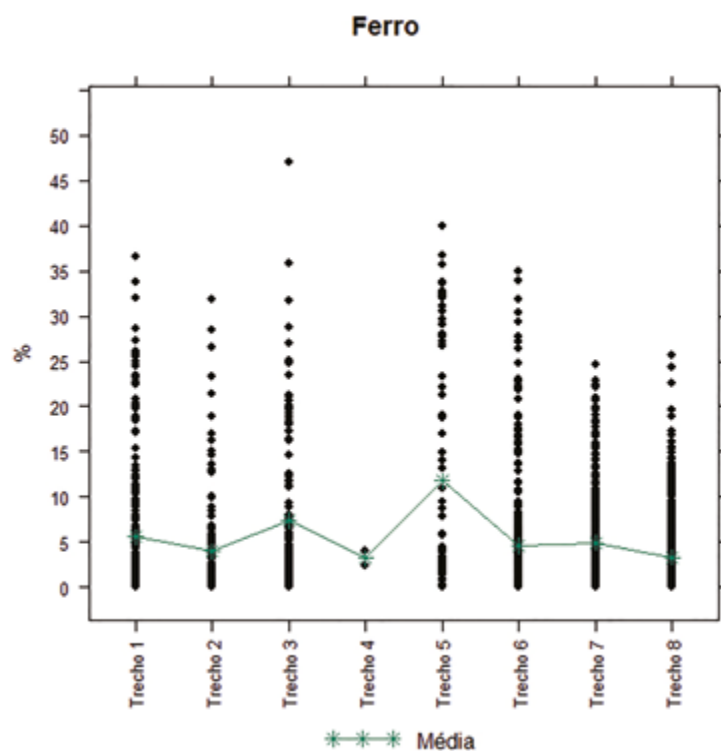
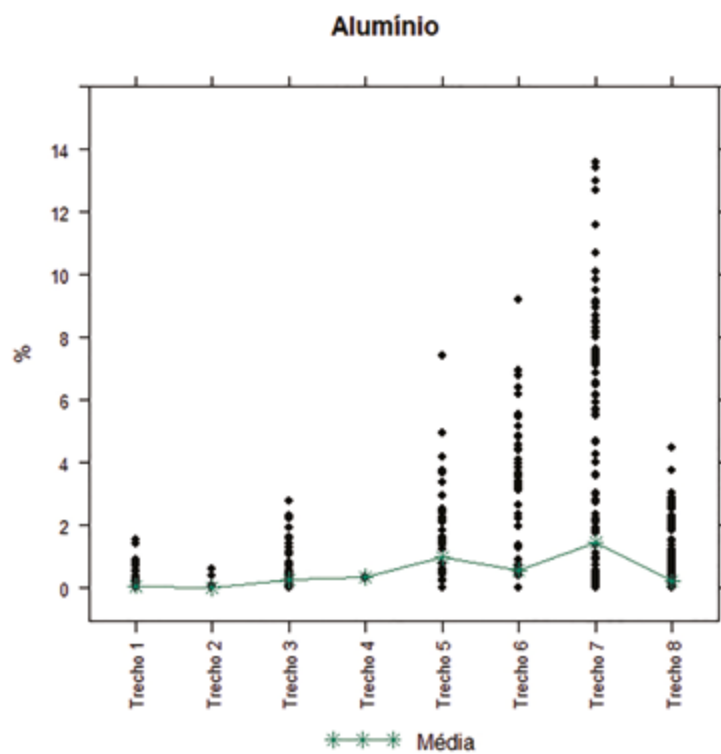
Trecho 7 - Gov. Valadres/Limite MG

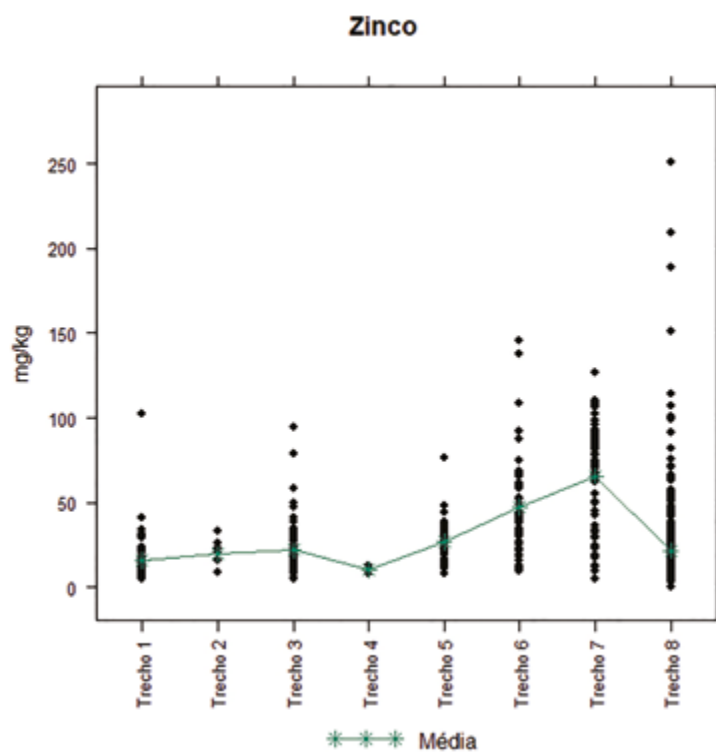
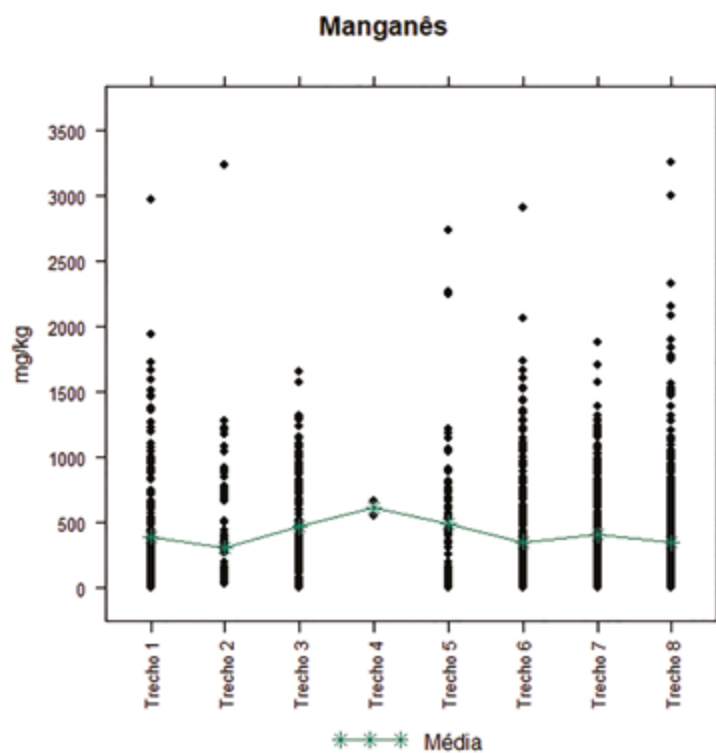
	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	1,48	4,973	407,8	65,9	37,307	10,15	13,708	12,406	7,81	0,517	14,54	0,088
Mediana	0	2,85	235,6	71	26,05	8	7,55	6,5	5,18	0,1	8,25	0,07
Q1	0	0,444	98,5	42,7	9,67	8	2,745	2,4	2,75	0,059	3	0,04
Q3	0,42	8,107	675	86,3	52,185	12,2	17,25	18,9	11,7	0,4	20	0,13
Mínimo	0	0	1	5	0,366	8	0,046	0,006	0,01	0,02	0,1	0,011
Máximo	13,6	24,6	1882	126,9	178,6	16,7	80,5	71,5	35	44	88,9	0,21
Amplitude	13,6	24,6	1881	121,9	178,234	8,7	80,454	71,494	34,99	43,98	88,8	0,199
Desvio-padrão	3,1	5,413	396,2	30,2	35,99	3,62	16,054	13,118	13,118	2,67	16,12	0,059
CV	209,11	108,846	97,1	45,9	96,74	35,69	117,112	105,737	105,737	516,804	110,85	67,428-

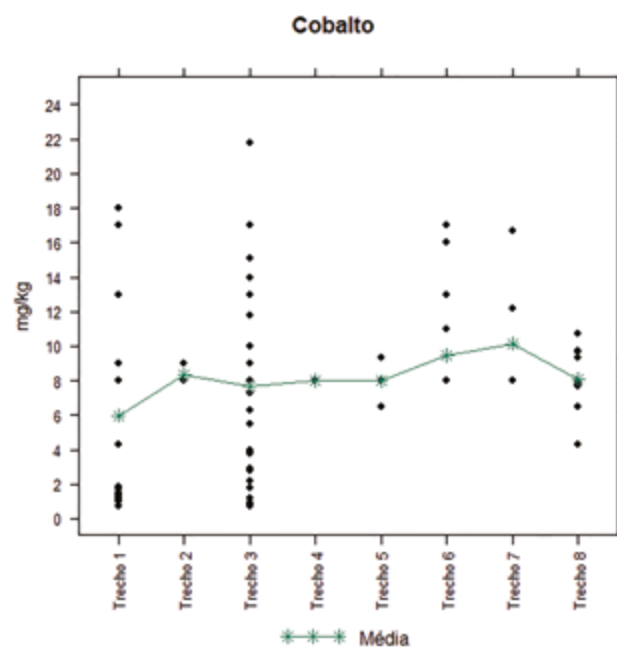
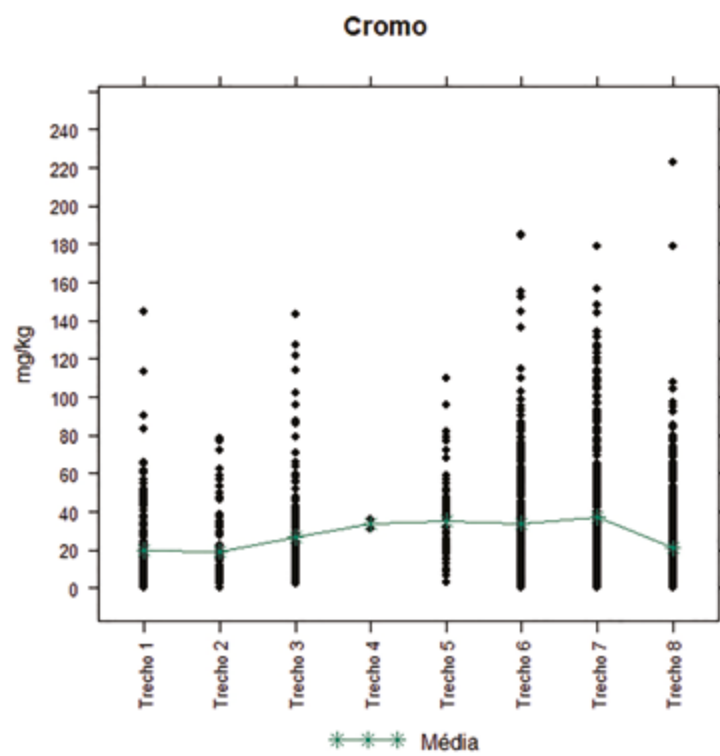
Trecho 8 - ES/Litoral

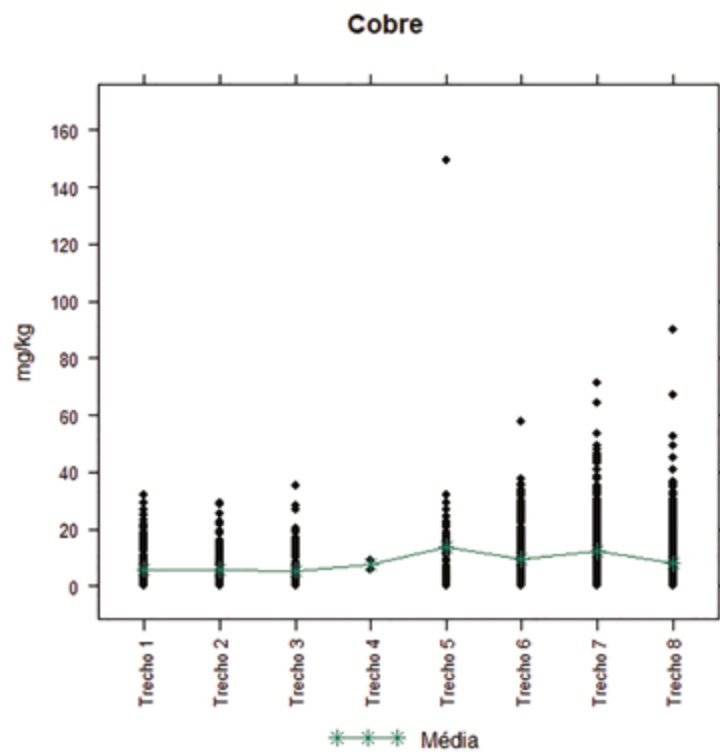
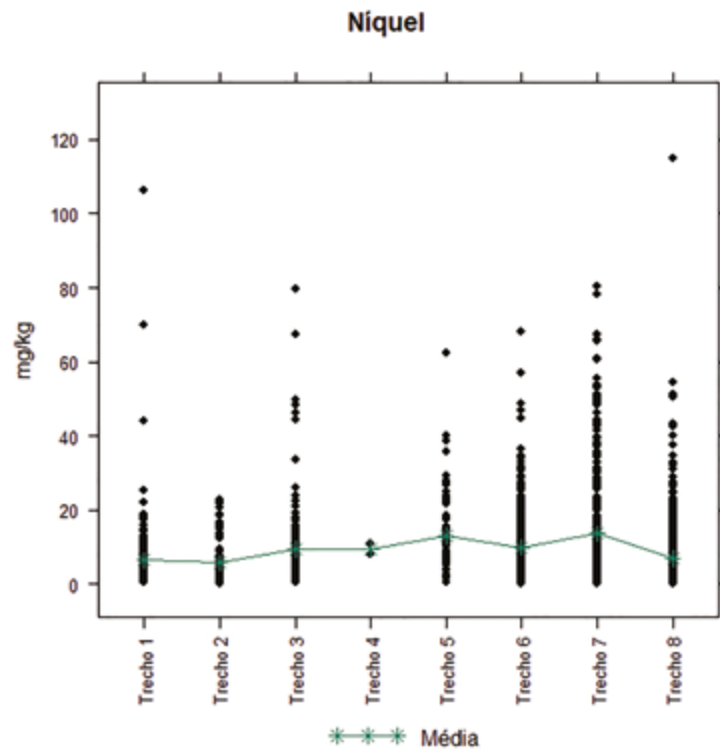
	Al%	Fe%	Mn mg/kg	Zn mg/kg	Cr mg/kg	Co mg/kg	Ni mg/kg	Cu mg/kg	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Hg mg/kg
Média	0,213	3,332	346,906	21,82	20,9	8,1	6,99	7,92	6,03	0,334	7,29	0,049
Mediana	0	1,71	156,47	13,68	14,8	8	4,5	4,34	3,7	0,067	4,34	0,05
Q1	0	0,364	78	7,33	8	8	2,29	1,85	2,47	0,05	2,08	0,05
Q3	0,08	5,057	476	28,4	27,9	8	8,91	11,5	6,76	0,1	9,92	0,05
Mínimo	0	0	0,006	0	0	4,3	0	0	0	0	0	0
Máximo	4,47	25,68	3261	251	223	10,7	115	90	55,17	42,5	88,9	0,25
Amplitude	4,47	25,68	3260,99	251	223	6,4	115	90	55,17	42,5	88,9	0,25
Desvio-padrão	0,596	4,021	436,875	25,29	19,9	1,38	8,03	9,2	6,72	2,04	7,82	0,037
CV	280,416	120,678	125,935	115,89	95,2	17,08	114,89	116,19	11,52	610,662	107,24	74,916

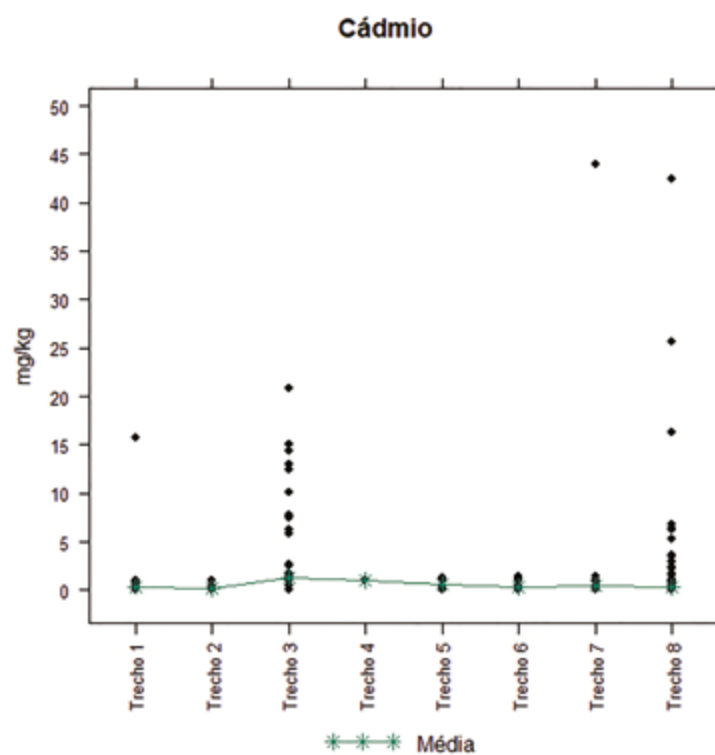
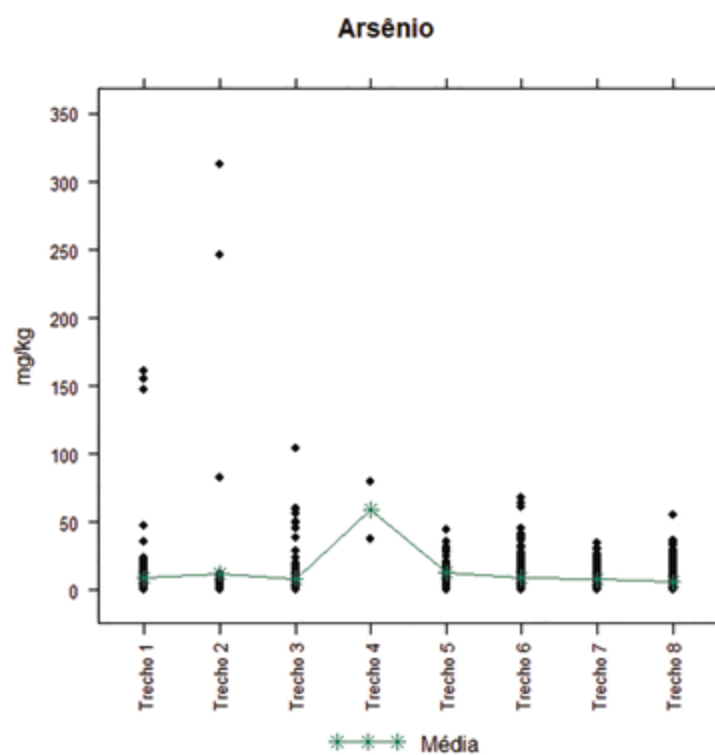
APÊNDICE D - GRÁFICOS DE DISPERSÃO DOS DADOS ANALISADOS POR TRECHO

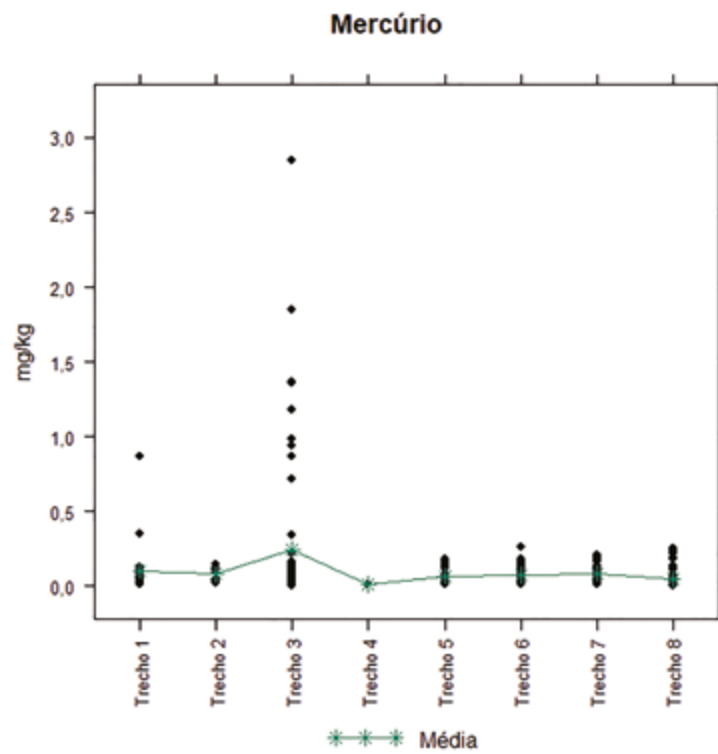
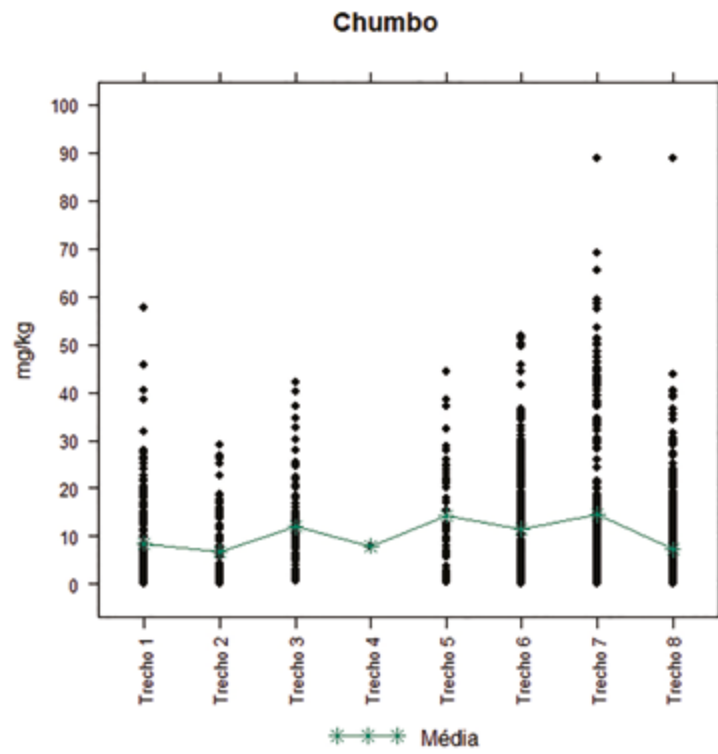












APÊNDICE E – LISTA DE ESPÉCIES COMPLEMENTARES À LINHA-BASE AMOSTRADAS NOS LIMITES LESTE (PEREIRA ET AL., 2017) E SUDESTE (KAMINSKI ET AL., 2015) DA BACIA DO RIO DOCE.

Grupo	Espécie	Localidade	Fonte:
Lepdoptera	<i>Thisbe silvestre</i>	Serra do Caparaó	Kaminski et al. 2015
Lepdoptera	<i>Hamadryas feronia</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Callicore sorana</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Catonephele acontius</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Myscelia orsis</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Archaeoprepona demophoon</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Fountainea ryphea</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Memphis moruus</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Blepolenis batea</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Caligo arisbe</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Dasyophthalma rusina</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Eryphanis automedon</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Opoptera syme</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Opsiphanes invirae</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Carmina griseldis</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Erichthodes narapa</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Forsterinaria necys</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Forsterinaria quantius</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Godartiana muscosa</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Hermeuptychia sp</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Moneuptychia itapeva</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Moneuptychia soter</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Paryphthimoides eous</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Paryphthimoides phronius</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Paryphthimoides poltys</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Pharneuptychia sp</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Pharneuptychia phares</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Praepedaliodes phanias</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Yphthimoides angularis</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Yphthimoides manasses</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Yphthimoides ochracea</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Yphthimoides pacta</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Yphthimoides straminea</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Yphthimoides yphthima</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017
Lepdoptera	<i>Zischkaia pronophila</i>	Serra do Cipó	Pereira et al. 2017

APÊNDICE F – ESPÉCIES COM OCORRÊNCIA PROVÁVEL E/OU CONFIRMADA NA ÁREA AFETADA PELO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, ENTRE OS ESTADOS DE MINAS GERAIS (MG) E ESPÍRITO SANTO (ES). SÃO INFORMADOS OS *STATUS* DE CONSERVAÇÃO REGIONAL, NACIONAL E INTERNACIONAL E ENDEMISMOS (X = ENDÊMICOS DA MATA ATLÂNTICA; X* = ENDÊMICAS DE REGIÕES SERRANAS DA MATA ATLÂNTICA).

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
AMPHIBIA														
GYMNOPHIONA														
Siphonopidae														
<i>Luetkenotyphlus brasiliensis</i>	cecília		X							X				X
<i>Siphonops annulatus</i>	cecília	X								X				
ANURA														
Brachycephalidae														
<i>Brachycephalus ephippium</i>	sapinho-pingo de-ouro		X											
<i>Brachycephalus</i> cf. <i>didactylus</i>	sapo-pulga		X											
<i>Ischnocnema</i> aff. <i>guentheri</i>	rã-do-folhicho		X						X	X				
<i>Ischnocnema izecksohni</i>	rã-do-folhicho		X	X		X				X				X*
<i>Ischnocnema</i> gr. <i>lacteus</i>	rã-do-folhicho			X						X				
<i>Ischnocnema juipoca</i>	rã-do-folhicho									X				
<i>Ischnocnema</i> aff. <i>parva</i>	rã-do-folhicho	X	X	X						X				
<i>Ischnocnema oea</i>	rã-do-folhicho			X									NT	X
<i>Ischnocnema</i> cf. <i>rolti</i>	rã-do-folhicho			X										
<i>Ischnocnema surda</i>	rã-do-folhicho									X				X
<i>Ischnocnema</i> aff. <i>verrucosa</i>	rã-do-folhicho	X	X	X										X
Bufonidae														
<i>Rhinella crucifer</i>	sapo-cururu				X			X		X				
<i>Rhinella pombali</i>	sapo-cururu	X	X	X			X	X	X					

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Rhinella binotattus</i>	sapo-cururu	X												
<i>Rhinella granulosa</i>	sapo-cururu			X										
<i>Rhinella ornata</i>	sapo-cururu									X				X
<i>Rhinella rubescens</i>	sapo-cururu									X				
<i>Rhinella schneideri</i>	sapo-comum			X				X	X					
Odontophrynidae														
<i>Odontophrynus cultripes</i>	rã-boi		X					X	X	X				
<i>Proceratophrys boiei</i>	rã-de-chifre		X	X		X			X	X				X
<i>Proceratophrys aff. melanopogon</i>	rã-de-chifre		X	X										
Cycloramphidae														
<i>Cycloramphus eleutherodactylus</i>	rã-de-riacho									X				X
<i>Thoropa megatympanum</i>	rã-das-pedras									X				X*
<i>Thoropa miliaris</i>	rã-das-pedras		X	X						X				X
<i>Zachaeus carvalhoi</i>	sapo		X											
Craugastoridae														
<i>Haadus binotatus</i>	rã-do-folhicho	X	X	X					x	X				X
Centrolenidae														
<i>Vitreorana uranoscopia</i>	perereca-de-vidro		X	X						X	VU (MG)			X
<i>Vitreorana eurygnatha</i>	perereca-de-vidro		X	X						X	VU (ES)			
Ceratophryidae														
<i>Ceratophrys aurita</i>	sapo-intanha		X											
Eleutherodactylidae														
<i>Adelophryne</i> sp.	rãzinha	X								X				
Hemiphractidae														
<i>Gastrotheca ernestoi</i>	perereca		X											
Hylidae														
<i>Aparasphenodon brunoii</i>	perereca	X		X										
<i>Aplastodiscus arildae</i>	perereca-flautinha		X	X		X		X		X				X

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Aplastodiscus cavicola</i>	perereca			X		X		X		X			NT	X
<i>Aplastodiscus weygoldti</i>	perereca			X									NT	X
<i>Aplastodiscus leucopeygus</i>	perereca-verde		X	X										X
<i>Bokermannohyla alvarengai</i>	perereca									X				
<i>Bokermannohyla caramaschii</i>	perereca		X	X										X
<i>Bokermannohyla gr. circumdata*</i>	perereca							X	X	X				X
<i>Bokermannohyla martinsi</i>	perereca									X				X*
<i>Bokermannohyla nanuzae</i>	perereca									X				X*
<i>Bokermannohyla ibitipoca</i>	perereca		X	X										X
<i>Bokermannohyla saxicola</i>	perereca									X				X*
<i>Dendropsophus anceps</i>	perereca	X		X										X
<i>Dendropsophus branneri</i>	perereca			X						X				
<i>Dendropsophus decipiens</i>	perereca	X	X	X						X				X
<i>Dendropsophus elegans</i>	perereca		X	X			X	X	X	X				X
<i>Dendropsophus minutus</i>	perereca-ampulheta		X	X			X	X		X				
<i>Dendropsophus giesleri</i>	perereca									X				X
<i>Dendropsophus rubicundulus</i>	perereca								X	X				
<i>Dendropsophus ruschii</i>	perereca			X							VU (ES)			X
<i>Dendropsophus seniculus</i>	perereca								X	X				X
<i>Hypsiboas albomarginatus</i>	perereca-verde		X	X	X					X				X
<i>Hypsiboas albopunctatus</i>	perereca-de-pontos-brancos		X	X					X	X				

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Hypsiboas crepitans</i>	perereca			X						X				
<i>Hypsiboas faber</i>	perereca-ferreira		X	X	X		X	X	X	X				
<i>Hypsiboas lundi</i>	perereca								X	X				
<i>Hypsiboas pardalis</i>	perereca		X	X						X				X
<i>Hypsiboas polytaenius</i>	perereca		X	X		X		X	X	X				
<i>Hypsiboas raniceps</i>	perereca							X						
<i>Hypsiboas semilineatus</i>	perereca		X	X						X				X
<i>Ololygon carnevallii</i>	perereca			X										X
<i>Ololygon gr. catharinae</i>	perereca-risonha			X										
<i>Ololygon flavoguttata</i>	perereca		X							X				X
<i>Ololygon luizotavioi</i>	perereca		X	X	X			X		X				X*
<i>Ololygon cf. longilinea</i>	perereca				X		X	X		X				X*
<i>Ololygon aff. machadoi</i>	perereca									X				X*
<i>Ololygon gr. perpusillus</i>	perereca		X	X										
<i>Ololygon aff. rizibilis</i>	perereca-risadinha		X					X						
<i>Ololygon tripui</i>	perereca		X	X						X				X
<i>Scinax cf. caldarum</i>	perereca		X								VU (MG)			
<i>Scinax crospedospilus</i>	perereca			X						X				X
<i>Scinax curicica</i>	perereca		X							X				X*
<i>Scinax eurydice</i>	perereca		X	X					X	X				X
<i>Scinax fuscomarginatus</i>	perereca			X						X				
<i>Scinax fuscovarius</i>	perereca-raspa-de-cuia		X	X			X	X	X	X				
<i>Scinax cf. alter</i>	perereca		X						X					
<i>Scinax aff. prereca</i>	perereca-esverdeada		X	X						X				
<i>Scinax rogerioi</i>	perereca									X				
<i>Scinax gr. ruber</i>	perereca-raspa-de-cuia					X		X						

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Scinax squalirostris</i>	perereca-listrada									X				
<i>Scinax x-signatus</i>	perereca-de-banheiro-									X				
<i>Sphaenorhincus canga</i>	perereca-da-canga									X				X*
<i>Trachycephalus mesophaeus</i>	perereca-leiteira	X												
Hylodidae														
<i>Crosodactylus gr. gaudichaudii</i>	rãzinha		X	X										
<i>Crosodactylus trachystomus</i>	perereca-da-canga									X				X*
<i>Hylodes babax</i>	rãzinha		X	X						X				X
<i>Hylodes lateristrigatus</i>	rãzinha		X	X										X*
<i>Hylodes uai</i>	rãzinha									X				
<i>Megaelosia apuana</i>	rãzinha		X	X							VU (MG)			X
<i>Megaelosia sp.</i>	rãzinha		X											
Leptodactylidae														
<i>Adenomera thomei</i>	rãzinha			X						X				X
<i>Leptodactylus camaquara</i>	rãzinha									X				X*
<i>Leptodactylus cunicularius</i>	rãzinha									X				X*
<i>Leptodactylus cupreus</i>	rã		X											
<i>Leptodactylus furnarius</i>	rã									X				
<i>Leptodactylus fuscus</i>	rã-assobiadora		X	X				X	X	X				
<i>Leptodactylus labyrinthicus</i>	rã-pimenta	X	X	X				X	X	X				
<i>Leptodactylus mystacinus</i>	rã-de-bigode		X	X						X				
<i>Leptodactylus cf. mystaceus</i>	rã		X											
<i>Leptodactylus latrans</i>	rã-manteiga	X	X	X	X			X		X				
<i>Leptodactylus aff. spixii</i>	rã			X					X					

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Leptodactylus sertanejo</i>	caçote									X				
<i>Leptodactylus troglodytes</i>	rã								X					
<i>Physalaemus erythros</i>	rã									X				X*
<i>Physalaemus evangelista</i>	rã									X				X*
<i>Physalaemus centralis</i>	rã													
<i>Physalaemus cuvieri</i>	rã-cachorro	X	X	X					X	X				
<i>Physalaemus feioi</i>	rãzinha		X	X										X
<i>Physalaemus</i> cf. <i>combrie</i>	rãzinha	X		X						X				X
<i>Physalaemus maximus</i>	rãzinha		X							X		VU		X
<i>Physalaemus orophilus</i>	rãzinha									X				X
<i>Pseudopaludicola murundu</i>	rãzinha									X				
Microhylidae														
<i>Chiasmocleis albopunctatus</i>	rãzinha-preto-e-branca									X				
<i>Chiasmocleis</i> aff. <i>achubarti</i>	rã-grilo	X												
<i>Chiasmocleis mantiqueira</i>	rã-grilo		X											
<i>Elachistocleis cesarii</i>	rã-apito-de-guarda		X	X					X	X				
<i>Myersiella micros</i>	rãzinha-assobiadora-da-mata			X										X
<i>Stereocyclops incrassatus</i>	rãzinha-do-folhiço	X		X										
Phyllomedusidae														
<i>Phyllomedusa burmeisteri</i>	perereca-macaco		X	X			X	X	X	X				

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Phasmahyla exilis</i>	perereca			X						X	EP (ES)			X
<i>Phasmahyla jandaia</i>	perereca									X				X*
<i>Phasmahyla sp.</i>	perereca		X											
<i>Pithecopus ayeaye</i>	perereca									X	CR (MG)			X*
<i>Pithecopus rhodei</i>	perereca-macaco			X				X		X				X
REPTILIA														
SQUAMATA														
Amphisbaenidae														
<i>Amphisbaena alba</i>	cobra-cega			X				X		X				
<i>Leposternon microcephalum</i>	cobra-cega		X							X				
<i>Leposternon infraorbitale</i>	cobra-cega		X	X										
<i>Leposternon wuchereri</i>	cobra-cega			X										X
Anguidae														
<i>Ophiodes striatus</i>	cobra-de-vidro		X	X				X		X				
<i>Diploglossus fasciatus</i>	lagarto-listrado		X											
Dactyloidae														
<i>Norops fuscoauratus</i>	lagarto			X										
Gekkonidae														
<i>Hemidactylus mabouia</i>	lagartixa			X	X				X	X				
Gymnophthalmidae														
<i>Cercosaura quadrilineata</i>	lagartinho									X				
<i>Cercosaura ocellata</i>	lagartinho		X											
<i>Cercosaura quadrilineata</i> ¹	lagartinho													
<i>Ecpleopus gaudichaudi</i>	lagartinho		X	X						X				X
<i>Heterodactylus imbricatus</i>	lagartinho		X	X						X				X
Leiosauridae														
<i>Enyalius cf. bilineatus</i>	papa-vento		X	X					X	X				

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Enyalius brasiliensis</i>	papa-vento			X										X
<i>Enyalius perditus</i>	papa-vento		X							X				X
<i>Urostrophus vautieri</i>	iguana-rajada		X	X						X				X
Phyllodactylidae														
<i>Gymnodactylus darwinii</i>	lagarto			X	X									X
Polychrotidae														
<i>Polychrus acutirostris</i>	camaleão								X					
<i>Polychrus marmoratus</i>	camaleão			X										
Mabuyidae														
<i>Aspronema dorsivittatum</i>	mabuia		X							X				
<i>Notomabuya frenata</i>	mabuia									X				
<i>Psychosaura macrorhyncha</i>	mabuia			X										
Teiidae														
<i>Ameiva ameiva</i>	calango			X	X		X	X	X	X				
<i>Ameivula ocellifera</i>	calango							X						
<i>Salvator merianae</i>	tejú		X	X	X			X	X	X				
Tropiduridae														
<i>Tropidurus montanus</i>	calango									X				X*
<i>Tropidurus semitaeniatus</i>	calango-listrado							X						
<i>Tropidurus torquatus</i>	calango		X	X	X				X	X				
Anomalepididae														
<i>Liotyphlops wilderi</i>	cobra-da-terra			X										
Boidae														
<i>Boa constrictor</i>	jiboia				X			X						
<i>Corallus hortulanus</i>	suaçubóia			X										
<i>Epicrates</i> sp.	salamanta		X	X										
Colubridae														
<i>Chironius bicarinatus</i>	cobra-cipó		X	X										X
<i>Chironius brazil</i>	cobra-cipó									X				

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Chironius flavolineatus</i>	cobra-cipó							X						
<i>Chironius fuscus</i>	cobra-cipó			X										
<i>Chironius exoletus</i>	cobra-cipó		X	X						X				
<i>Chironius quadricarinatus</i>	cobra-cipó									X				
<i>Drymarchon corais</i>	papa-pinto							X						
<i>Drymoluber brazili</i>	cobra-cipó									X				
<i>Drymoluber dichrous</i>	cobra			X										
<i>Mastigodryas bifossatus</i>	corredeira							X		X				
<i>Spilotes sulphureus</i>	papa-ovo			X										X
<i>Spilotes pullatus</i>	caninana		X	X						X				
<i>Tantilla boipiranga</i>	cobra-rainha									X			VU	
Dipsadidae														
<i>Apostolepis assimilis</i>	cobra-rainha									X				
<i>Atractus pantostictus</i>	cobra-da-terra									X				
<i>Atractus zebrinus</i>	cobra-da-terra									X				X
<i>Boiruna maculata</i>	muçurana									X				
<i>Coronelaps lepidus</i>	cobra-rainha									X				X
<i>Dipsas cf. albifrons</i>	papa-lesma													
<i>Echianthera cephalostriata</i>	cobra-cipó									X				X
<i>Echianthera melanostigma</i>	corredeira			X						X				X
<i>Elapomorphus lepidus</i>	cobra-da-terra		X											
<i>Elapomorphus quinquelineatus</i>	cobra-da-terra-listrada		X	X	X									X
<i>Erythrolamprus almadensis</i>	jararaquinho-do-campo									X				
<i>Erythrolamprus aesculapii</i>	falsa-coral		X	X										
<i>Erythrolamprus jaegeri</i>	cobra-verde									X				
<i>Erythrolamprus maryelenae</i>	cobra-verde									X				

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Erythrolamprus miliaris</i>	cobra-da-água		X	X						X				
<i>Erythrolamprus poecilogyrus</i>	falsa-coral		X	X				X	X	X				
<i>Erythrolamprus reginae</i>	cobra-verde									X				
<i>Erythrolamprus typhlus</i>	cobra-verde									X				
<i>Imantodes cenchoa</i>	cobra-cipó									X				
<i>Leptodeira annulata</i>	falsa-jararaca									X				
<i>Lygophis meridionalis</i>	cobra-listrada									X				
<i>Mussurana montana</i>	muçurana			X										X
<i>Mussurana plúmbea</i>	muçurana				X					X				
<i>Mussurana quimi</i>	muçurana									X				
<i>Oxyrhopus clathratus</i>	falsa-coral		X	X						X				X
<i>Oxyrhopus guibei</i>	falsa-coral									X				
<i>Oxyrhopus rhombifer</i>	falsa-coral								X	X				
<i>Philodryas aestiva</i>	cobra-verde									X				
<i>Philodryas agassizii</i>	cobra-listrada									X				
<i>Philodryas laticeps</i>	cobra-cipó									X	CR (MG)			
<i>Philodryas nattereri</i>	papa-pinto							X						
<i>Philodryas olfersi</i>	cobra-cipó									X				
<i>Philodryas patagoniensis</i>	papa-pinto									X				
<i>Sibynomorphus neuwiedi</i>	dormideira		X	X					X	X				X
<i>Sibynomorphus mikani</i>	dormideira									X				
<i>Taeniophallus affinis</i>	corredeira		X	X						X				X
<i>Taeniophalus occipitalis</i>	corredeira									X				
<i>Thamnodynastes hypoconia</i>	cobra-espada									X				
<i>Thamnodynastes cf. nattereri</i>	cobra-espada									X				

Táxon	Nomes populares	Estudos									Status de conservação			Endemismo
		RIVERS (2010)	MOURA (2011)	SANTOS (2013)	BRANDT, (2004)	BRANDT (2005)	BRANDT, 2006	ERG. 2007	BRANDT (2009)	AMPLO (2017)	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
<i>Thamnodynastes strigatus</i>	cobra-espada									X				
<i>Tropidodryas serra</i>	falsa-jararaca								X					
<i>Tropidodryas striaticeps</i>	falsa-jararaca		X							X				X
<i>Xenodon merremii</i>	boipeva		X	X						X				
<i>Xenodon neuwiedii</i>	boipeva		X	X						X				X
<i>Xenopholis undulatus</i>	cobra-de-veludo									X				
Elapidae														
<i>Micrurus corallinus</i>	coral		X	X				X		X				X
<i>Micrurus frontalis</i>	coral		X		X			X	X	X				
<i>Micrurus lemniscatus</i>	coral		X		X				X	X				
Leptotyphlopidae														
<i>Trilepida jani</i>	cobra									X				X*
<i>Trilepida salgueiroi</i>	cobra-da-terra		X											
Tropidophiidae														
<i>Tropidophis preciosus</i>	Jiboinha									X				X*
Viperidae														
<i>Bothrops alternatus</i>	cruzeira									X				
<i>Bothrops bilineatus</i>	jararaca-verde							X			VU (ES)			
<i>Bothrops jararaca</i>	jararaca		X	X	X			X	X	X				X
<i>Bothrops jararacuçu</i>	jararacuçu			X				X						X
<i>Bothrops moojeni</i>	caiçaca			X										
<i>Bothrops gr.neuwiedii</i>	jararaca-pintada				X			X	X	X				
<i>Crotalus durissus</i>	cascavel			X	X			X	X	X				
<i>Lachesis muta</i>	surucucu			X							VU (ES)		VU	

APÊNDICE G – ESPÉCIES COM OCORRÊNCIA CONFIRMADA NA ÁREA AFETADA PELO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, ENTRE OS ESTADOS DE MINAS GERAIS E ESPÍRITO SANTO. SÃO APRESENTADOS, O STATUS DE CONSERVAÇÃO REGIONAL, NACIONAL E INTERNACIONAL E ENDEMISMOS NA MATA ATLÂNTICA.

Táxon	Nomes populares	Espécies confirmadas		Status de conservação			Endemismo
		JUCÁ (2017)	Visita técnica	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
AMPHIBIA							
ANURA							
Bufonidae							
<i>Rhinella crucifer</i>	sapo-cururu	X					
<i>Rhinella pombali</i>	sapo-cururu		X				
<i>Rhinella schneideri</i>	sapo-comum		X				
Hylidae							
<i>Bokermannohyla gr. circumdata</i>	perereca	X					X
<i>Dendropsophus elegans</i>	perereca	X					
<i>Dendropsophus minutus</i>	perereca-ampulheta	X	X				
<i>Hypsiboas albopunctatus</i>	perereca-de-pontos-brancos	X	X				
<i>Hypsiboas crepitans</i>	perereca	X					
<i>Hypsiboas faber</i>	perereca-ferreira	X	X				
<i>Hypsiboas pardalis</i>	perereca	X					X
<i>Hypsiboas semilineatus</i>	perereca	X					X
<i>Ololygon aff. rizibilis</i>	perereca-risadinha		X				
<i>Scinax eurydice</i>	perereca	X					X
<i>Scinax fuscomarginatus</i>	perereca		X				
<i>Scinax fuscovarius</i>	perereca-raspa-de-cuia	X	X				
<i>Scinax aff. prereca</i>	perereca-esverdeada	X					
Leptodactylidae							
<i>Leptodactylus furnarius</i>	rã		X				
<i>Leptodactylus fuscus</i>	rã-assobiadora	X	X				
<i>Leptodactylus labyrinthicus</i>	rã-pimenta	X					
<i>Leptodactylus mystacinus</i>	rã-de-bigode	X	X				
<i>Leptodactylus latrans</i>	rã-manteiga		X				
<i>Physalaemus centralis</i>	rã	X					
<i>Physalaemus cuvieri</i>	rã-cachorro	X					
<i>Physalaemus cf. combrie</i>	rãzinha	X					X
Microhylidae							
<i>Elachistocleis cesarii</i>	rã-apito-de-guarda	X					
Pipidae							
<i>Pipa carvalhoi</i>	rã	X					

Táxon	Nomes populares	Espécies confirmadas		Status de conservação			Endemismo
		JUCÀ (2017)	Visita técnica	Regional MG/ES	Nacional	IUCN	
REPTILIA							
SQUAMATA							
Amphisbaenidae							
<i>Amphisbaena alba</i>	cobra-cega		X				
Gekkonidae							
<i>Hemidactylus mabouia</i>	lagartixa		X				
Teiidae							
<i>Ameiva ameiva</i>	calango		X				
<i>Salvator merianae</i>	tejú		X				
Tropiduridae							
<i>Tropidurus torquatus</i>	calango		X				
Dipsadidae							
<i>Dipsas cf. albifrons</i>	papa-lesma		X				
<i>Oxyrhopus guibei</i>	falsa-coral		X				
<i>Sibynomorphus neuwiedi</i>	dormideira		X				X
<i>Xenodon merremii</i>	boipeva		X				
<i>Xenodon neuwiedii</i>	boipeva		X				X
Elapidae							
<i>Micrurus corallinus</i>	coral		X				X



www.institutoslactec.org.br

CONTATO

Leonardo Pussieldi Bastos
Divisão de Meio Ambiente
T + 55 (41) 3361-6882
leonardo.bastos@lactec.org.br