

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

Atualização Linha-Base Ambientes Aquáticos Continentais

Institutos Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Junho/2019



Documento:	Revisão Linha-Base – Ambientes Aquáticos Continentais
Considerações Gerais:	Este documento refere-se à revisão do relatório de linha-base até outubro de 2018, quanto aos ambientes aquáticos continentais, parte integrante do Diagnóstico Socioambiental dos Danos Decorrentes do Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce e Região Costeira Adjacente, o qual apresenta a caracterização dos ambientes antes do desastre.
Contrato:	4500173758 – Samarco/Lactec
Solicitante:	Empresa: Ministério Público Federal Procuradoria da República em Minas Gerais
	Endereço: Av. Brasil, 1877
	Bairro: Bairro Funcionários
	Cidade: Belo Horizonte/MG
	CEP: CEP 30140-007
	A/C: Dr. José Adercio Leite Sampaio
E-mail: joseadercio@mpf.mp.br	
Executante:	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 Meio Ambiente
	Aprovado por: _____ Tânia Lucia Graf de Miranda, D. Sc. Engenheira Agrônoma / CREA RS 069105/D Gerente de Serviços Tecnológicos e Inovação
	_____ Luiz Alkimin de Lacerda, D. Sc. Engenheiro Civil / CREA PR 155674/D Gerente de Pesquisa e Inovação

PRESIDÊNCIA		
Luiz Fernando Vianna	Diretor-Presidente	
DIRETORIA		
Lauro Elias Neto	Diretor de Operações Tecnológicas	
Hélio Padilha	Diretor de Desenvolvimento Tecnológico	
Luiz Fernando Vianna	Diretor Administrativo-Financeiro	
GERÊNCIA DE SEGMENTO		
André Ricardo Capra	MSc., Engenheiro Mecânico	Ensaios e Análises Laboratoriais
Luiz Alkimin de Lacerda	DSc., Engenheiro Civil	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Tania Lucia Graf de Miranda	DSc., Engenheira Agrônoma	Serviços Tecnológicos e Inovação
GERÊNCIA DE ÁREA		
Betina Lepretti Medeiros	MSc., Engenheira Civil	Estruturas Cíveis
Fabiano Scheer Hainosz	MSc. Engenheiro Cartógrafo	Geossoluções
Guilherme Cunha da Silva	DSc., Engenheiro Eletricista	Materiais
Leandro Zem	Administrador de Empresas	Escritório de Projetos
Jefferson Arndt	Esp., Analista de Sistemas	Inteligência de Negócios
Rodrigo Soares Ferreira	MSc., Químico	Análises Químicas
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	MSc., Engenheira Civil	Meio Ambiente
EQUIPE TÉCNICA		
COORDENAÇÃO DO PROJETO		
Leonardo Pussieldi Bastos	MSc., Biólogo	Coordenação Geral
Luiz Alkimin de Lacerda	DSc., Engenheiro Civil	Coordenação Técnica
Tania Lucia Graf de Miranda	DSc., Engenheira Agrônoma	Coordenação Técnica
Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	MSc., Engenheira Ambiental	Coordenação Executiva
GESTÃO E ACOMPANHAMENTO		
Franciele Dãobroski	Esp., Eng. Eletricista	Analista de Projeto
Guilherme de Poli	Administrador de Empresas	Analista de Projeto
EQUIPE EXECUTORA		
Ana Paula Zampieri da Silva	Téc. em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Cesar João Andreazza	Analista de Sistemas	Geoprocessamento
Danielle Drago	Engenheira Cartógrafa	Geoprocessamento
Edson Haruo Yoshizumi	Téc. em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Lázaro Filipe de Souza	Geógrafo	Geoprocessamento
Maricler Toigo	Esp., Analista de Sistemas	Geoprocessamento
Peterson da Silva Beherend	Técnico em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Yuri Arnold Gruber	Engenheiro Civil	Geoprocessamento
Karime Dawidziak Piazzetta	MSc., Processos Ambientais	Qualidade do Ar
Luis Eduardo Soares Mayer	Geógrafo	Qualidade do Ar
Alika Solange Ferraro Pires	MSc., Engenheira Química	Saneamento
Bruna Pereira de Souza	MSc., Engenheira Ambiental	Saneamento e Fontes de Poluição

Ellen Christine Prestes Ferronato	Esp., Engenheira Ambiental	Saneamento
Thiago Carvalho de Mello	MSc., Engenheiro Químico	Fontes de Poluição
Betina Lepretti Medeiros	MSc., Engenheira Civil	Caracterização do rejeito
Bruno Endo Ribeiro	Engenheiro Civil	Caracterização do rejeito
Kleber Franke Portella	Dr., Químico	Caracterização do rejeito
Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança	Dra., Engenheira Ambiental	Caracterização do rejeito
Joubert Weigert Favaro	Engenheiro Ambiental	Geotecnia e Caracterização do Rejeito
José Henrique Ferronato Pretto	M.Sc., Engenheiro Civil	Geotecnia e Caracterização do Rejeito
Marcelo Buras	M.Sc., Engenheiro Civil	Geotecnia e Caracterização do Rejeito
Rodrigo Moraes da Silveira	Dr., Engenheiro Civil	Geotecnia e Caracterização do Rejeito
Antônio Carlos Vargas Motta	Dr., Engenheiro Agrônomo	Solos
Araína Hulmann Batista	Dra., Engenheira Agrônoma	Solos
Bernardo Lipski	MSc., Engenheiro Agrônomo	Solos
Letícia de Pierri	Dra., Engenheira Agrônoma	Solos
Fernando Mainardi Fan	Dr., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Hugo de Oliveira Fagundes	M.Sc., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Irani dos Santos	Dr., Geógrafo	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Batista Dias de Paiva	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Paulo Jankowski Saboia	M.Sc., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Julio Werner Yoshioka Bernardo	M.Sc., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	M.Sc., Engenheira Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rubem Luiz Daru	D.Sc., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Tobias Bernward Bleninger	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Gheysa do Rocio Morais Pires	M.Sc., Química Ambiental	Qualidade dos Sedimentos
Isabella Françoso Rebutini Figueira	Dra., Geóloga	Geologia, Qualidade dos Sedimentos e Caracterização do Rejeito
Ernesto Goldfarb Figueira	MSc., Geólogo	Águas subterrâneas, geologia, Espeleologia, Qualidade dos Sedimentos, Solos e Caracterização do Rejeito.
Leoardo Evangelista Lagoeiro	Dr., Geólogo	Geologia e Caracterização do Rejeito
André Virmond Lima Bittencourt	Dr., Engenheiro Químico	Águas Subterrâneas
Ana Carolina Canossa Becker	Engenheira Civil	Águas Superficiais Fluviais
Ana Carolina Wosiack	MSc., Bióloga	Águas Superficiais Fluviais
Marianne Schaefer França Sieciechowicz	MSc., Engenheira Ambiental	Águas Superficiais Fluviais
Nicole Machuca Brassac de Arruda	Dra., Bióloga	Águas Superficiais Fluviais
Alexandre Brandelli	MSc., Oceanólogo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Emilio Marcelo Dolichney	BSc., Oceanógrafo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras

Fernando Luiz Diehl	MSc., Oceanógrafo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Josiane Rovedder	MSc., Bióloga	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Luciano Hermanns	Dr., Oceanólogo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Ludmilla Dias Vincula Veado	Msc., Oceanógrafa	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras e Zooplâncton
Rafaela Michels da Silveira	MSc., Oceanógrafa	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Susan da Silva	Tecnóloga em Gestão Ambiental	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Tomaz Bohrer Brentano	Engenheiro Ambiental	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Priscila Izabel Tremarin	Dra., Bióloga	Fitoplâncton, Águas Superficiais Fluviais, Estuarinas e Costeiras
Patrícia Dammski Borges de Andrade	MSc., Bióloga	Águas Superficiais Fluviais, Zooplâncton e Cetáceos
Camila Ghilardi Cardoso Fontanella	M.Sc., Bióloga	Macroinvertebrados Aquáticos e Quelônios
Rosemary Aparecida Brogim	Dra., Bióloga	Bentos de Fundo Inconsolidados
Fernando Camargo da Silva	Esp., Engenheiro Florestal	Flora
Juliano José da Silva Santos	MSc., Biólogo	Flora e Espeleologia
Marcelo Alejandro Villegas Vallejos	MSc., Biólogo	Fauna Silvestre
Robson Odeli Espíndola Hack	Esp., Biólogo	Fauna Silvestre e Áreas de Conservação
Luiz Eduardo Macedo Reis	Dr., Biólogo	Entomofauna
Rafael Lucchesi Balestrin	Dr., Biólogo	Herpetofauna Terrestre
Fabício Locatelli Trein	Esp., Biólogo	Quelônios
Letícia de Paulo Koproski	Dra., Médica Veterinária	Quelônios
Lucas Reinert Laufer Pereira Mendes	Biólogo	Quelônios
Matheus Ferreira de Souza	Médico Veterinário	Quelônios
Raphael Eduardo Fernandes Santos	Esp., Biólogo	Avifauna
Andressa Gatti	Dra., Bióloga	Mastofauna Terrestre
Daniel da Silva Ferraz	Dr., Biólogo	Mastofauna Terrestre
João Eduardo Cavalcanti Brito	MSc., Biólogo	Mastofauna Terrestre
Michel Barros Faria	Dr., Biólogo	Mastofauna Terrestre
Paulo Rogerio Mangini	Dr., Médico Veterinário	Mastofauna Terrestre
Matheus Oliveira Freitas	Dr., Biólogo	Ictiofauna e Pesca
Maurício Belézia de Oliveira	Esp., Biólogo	Ictiofauna e Pesca
Vinícius Abilhoa	Dr., Biólogo	Ictiofauna e Pesca, Bentos de Fundo Consolidados
Leonardo Liberali Wedekin	Dr., Biólogo	Cetáceos
Samira Costa da Silva	MSc., Médica Veterinária	Cetáceos
Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra., Bióloga	Ecotoxicologia

ESTAGIÁRIOS

Nayara Caroline Majewski Ulbrich	Agronomia	Solos
----------------------------------	-----------	-------

Alcides Conte Neto	Estatística	Solos, Águas Superficiais Fluviais, Qualidade de Água e Qualidade de Sedimentos
Angel Aparecida Maia	Geologia	Qualidade dos Sedimentos
Jéssica Cristina Lozovei	Geografia	Qualidade dos Sedimentos
Andressa Muraro	Engenharia Cartográfica	Geoprocessamento
Eliana Vieira de Freitas	Engenharia Cartográfica	Geoprocessamento
Matheus de Andrade Machado	Engenharia Cartográfica	Geoprocessamento
Nilo Kruschelski	Engenharia Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Marcos Carvalho	Engenharia Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Luiz Guilherme Tatsch Henriqui	Engenharia Ambiental	Ecotoxicologia
Priscila Brum de Camargo	Engenharia Sanitária e Ambiental	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Camila da Silva Moreira	Engenharia Química	Saneamento
Karin Thays Ferreira Gomes	Engenharia Química	Saneamento
Esther Dyck	Engenharia Civil	Geotecnia
Natália Nadolny Ungaratti	Engenharia Ambiental	Águas Superficiais Fluviais
Eduardo Miguel Zanette Correia	Ciências Biológicas	Cetáceos
Jaqueline Schmidt	Ciências Biológicas	Zooplâncton
Isabela Martins Hoff Grando	Ciências Biológicas	Zooplâncton
Karina Macagnam	Engenharia Química	Indústrias
Renan José Alberton Disner	Engenharia Ambiental	Indústrias

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Definição esquemática da extensão da área de estudo.....	46
Figura 2 – Serviços ecossistêmicos proporcionados por ambientes de água doce.....	47
Figura 3 – Representação do ciclo hidrológico.....	51
Figura 4 – Curva de descarga da estação Colatina (código 56994500).	53
Figura 5 – Curva de permanência da estação Colatina (código 56994500).	54
Figura 6 – Diagrama de Shields – parâmetro de Shields contra número de Reynolds de corte da partícula.....	57
Figura 7 – Curva-chave de sedimentos em três diferentes locais do rio Doce.	65
Figura 8 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.....	71
Figura 9 – Totais anuais de precipitação para a bacia do rio Doce.....	72
Figura 10 – Rede de monitoramento selecionada para as análises fluviométricas.	74
Figura 11 – Mapa com interpolação de vazões médias específicas de longo termo da bacia do rio Doce.....	77
Figura 12 – Diagrama das vazões médias absolutas de longo termo.	77
Figura 13 – Diagrama das vazões médias específicas de longo termo ao longo do rio Doce.....	78
Figura 14 – Diagrama das vazões médias específicas de longo termo para afluentes do rio Doce.	79
Figura 15 – Mapa com interpolação de vazões máximas diárias específicas de 10.000 anos.	81
Figura 16 – Mapa com interpolação de vazões mínimas específicas $Q_{10,7}$ da bacia do rio Doce.....	82
Figura 17 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas.	84
Figura 18 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação Resplendor.....	85
Figura 19 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação Ponte Nova.	85
Figura 20 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação São Sebastião da Encruzilhada.	86
Figura 21 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação Baixo Guandu.....	86
Figura 22 – Distribuição espacial das vazões sólidas suspensas médias específicas de longo termo da bacia do rio Doce.....	91
Figura 23 – Distribuição espacial das vazões sólidas totais médias específicas de longo termo da bacia do rio Doce.....	91
Figura 24 – Diagrama das vazões sólidas médias específicas ao longo do rio Doce.	92
Figura 25 – Diagrama das vazões sólidas médias específicas de afluentes do rio Doce.	92
Figura 26 – Potencial de produção de sedimentos na bacia, calculado em toneladas por quilômetro quadrado por ano.....	94
Figura 27 – Perda de solo específica média por minibacia calculada a partir da MUSLE para a bacia do rio Doce.....	96

Figura 28 – Mapa de susceptibilidade erosiva da bacia do rio Doce.....	99
Figura 29 – Solo exposto com pouca cobertura vegetal.....	100
Figura 30 – Exposição de solos friáveis ocasionando a formação de voçorocas e/ou ravinas.....	100
Figura 31 – Intensificação do processo de degradação do solo pelo pisoteio do gado.....	101
Figura 32 – Ausência de mata ciliar nas margens do rio Doce.....	101
Figura 33 – Prática de cultivo às margens do rio Doce.....	102
Figura 34 – Trilhos da EFVM próximo à calha do rio Doce.....	102
Figura 35 – Trajeto da EFVM próximo à calha do rio Doce.....	103
Figura 36 – Bacia do rio Doce a montante da UHE Risoleta Neves.....	104
Figura 37 – Número de afluentes e incremento de área de drenagem entre fundão e UHE Risoleta Neves.....	104
Figura 38 – Número de afluentes e incremento de área de drenagem entre Fundão e UHE Risoleta Neves.....	105
Figura 39 – Relação entre vazão média e área drenagem na bacia do rio doce a montante da UHE Risoleta Neves.....	106
Figura 40 – Dispersão entre largura do canal e vazão líquida nas estações fluviométricas.....	107
Figura 41 – Dispersão entre profundidade média e vazão líquida nas estações fluviométricas.....	108
Figura 42 – Variação da área de drenagem e da largura do canal fluvial entre Fundão e UHE Risoleta Neves.....	109
Figura 43 – Dispersão entre largura do canal fluvial e vazão média entre Fundão e UHE Risoleta Neves.....	109
Figura 44 – Processos da modelagem hidrossedimentológica usando o modelo MGB-SED.....	112
Figura 45 – Aporte de sedimentos gerados na bacia até a rede de drenagem.....	116
Figura 46 – Resultados da simulação hidrológica com o modelo MGB-IPH.....	122
Figura 47 – Bacia hidrográfica do rio Doce e localização das estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas e dos postos virtuais de reflectância de superfície.....	123
Figura 48 – Comparação dos resultados de CSS calculados com dados de CSS observados e RefVer para os postos sedimentométricos da Agência Nacional de Águas.....	124
Figura 49 – Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) simulada e observada nas estações.....	126
Figura 50 – Coeficiente de correlação (r) calculado entre os dados observados e calculados de CSS e entre os dados observados de RefVer para as estações: Colatina (56994500), Baixo Guandu (56992000), São Sebastião da Encruzilhada (56990000), Tumiritinga (56920000), Vila Matias (56891900), Naque Velho (56825000), Mario de Carvalho (56696000) e Fazenda Cachoeira D’Antas (56425000).....	127
Figura 51 – Coeficiente de correlação entre os valores de CSS calculados com o modelo MGB-SED e dados observados de RefVer para todos os postos virtuais de reflectância).....	127

Figura 52 – Perda de solo específica média (1970-2010), por minibacia, para a bacia do rio Doce calculada a partir da MUSLE.	128
Figura 53 – Descarga sólida média diária total para cada trecho de rio de cada minibacia.	128
Figura 54 – Comparação das reflectâncias ao longo da bacia entre os períodos seco e chuvoso, com média e valores das reflectâncias de superfície para: a) o rio principal; e b) os afluentes.	129
Figura 55 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca/MG.....	132
Figura 56 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito/MG.....	133
Figura 57 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena/MG.	133
Figura 58 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares/ES.....	134
Figura 59 – Resultados comparados para a estação RD023 (rio Doce).	134
Figura 60 – Resultados comparados para a estação RD044 (rio Doce).	135
Figura 61 – Resultados comparados para a estação RD045 (rio Doce).	135
Figura 62 – Localização das estações de monitoramento de qualidade de água na região de estudo.	141
Figura 63 – Representação esquemática do gráfico <i>box plot</i>	146
Figura 64 – Localização do ponto SAI, no vertedouro da barragem de Santarém.....	150
Figura 65 – Locais avaliados no rio Gualaxo do Norte, em Minas Gerais.....	152
Figura 66 – Locais avaliados nos rios Guandu, Santa Joana e Doce, no Espírito Santo.	153
Figura 67 – Locais monitorados pelo IEMA dias antes da passagem da lama de rejeitos.	155
Figura 68 – Localização dos pontos de captação no rio Doce do SANEAR Colatina.....	156
Figura 69 – Medianas dos valores de cor verdadeira para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	160
Figura 70 – Medianas dos valores de cor verdadeira para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	160
Figura 71 – Gráficos de dispersão dos dados de cor verdadeira ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	161
Figura 72 – Gráficos de dispersão dos dados de cor verdadeira ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	162
Figura 73 – Medianas dos valores de sólidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	163
Figura 74 – Medianas dos valores de sólidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	164
Figura 75 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).	164

Figura 76 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).....	165
Figura 77 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).....	166
Figura 78 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).....	167
Figura 79 – Medianas dos valores de sólidos dissolvidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.....	169
Figura 80 – Medianas dos valores de sólidos dissolvidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	170
Figura 81 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos dissolvidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	171
Figura 82 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos dissolvidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	172
Figura 83 – Medianas dos valores de sólidos em suspensão totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.....	175
Figura 84 – Medianas dos valores de sólidos em suspensão totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	175
Figura 85 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos em suspensão totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	176
Figura 86 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos em suspensão totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	177
Figura 87 – Medianas de turbidez para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.....	180
Figura 88 – Medianas de turbidez para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	180
Figura 89 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).....	181
Figura 90 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).....	182
Figura 91 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte I).....	183
Figura 92 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte II).....	184
Figura 93 – Comparação entres os dados médios de turbidez e sólidos suspensos totais ao longo das estações de monitoramento.....	185
Figura 94 – Comparação entres os dados médios de cor verdadeira e sólidos dissolvidos totais ao longo das estações de monitoramento.....	185
Figura 95 – Medianas dos valores de alcalinidade total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.....	187

Figura 96 – Medianas dos valores de alcalinidade total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	187
Figura 97 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	188
Figura 98 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	189
Figura 99 – Medianas dos valores de alcalinidade de bicarbonato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	190
Figura 100 – Medianas dos valores de alcalinidade de bicarbonato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	190
Figura 101 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade de bicarbonato ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	191
Figura 102 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade de bicarbonato ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	192
Figura 103 – Medianas dos valores de cianeto livre para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	193
Figura 104 – Medianas dos valores de cianeto livre para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	193
Figura 105 – Gráficos de dispersão dos dados de cianeto livre ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	194
Figura 106 – Gráficos de dispersão dos dados de cianeto livre ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	195
Figura 107 – Medianas dos valores de cloreto total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	197
Figura 108 – Medianas dos valores de cloreto total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	197
Figura 109 – Gráficos de dispersão dos dados de cloreto total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	198
Figura 110 – Gráficos de dispersão dos dados de cloreto total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	199
Figura 111 – Medianas dos valores de condutividade elétrica <i>in loco</i> para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	200
Figura 112 – Medianas dos valores de condutividade elétrica <i>in loco</i> para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	200
Figura 113 – Gráficos de dispersão dos dados de condutividade elétrica <i>in loco</i> ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	201
Figura 114 – Gráficos de dispersão dos dados de condutividade elétrica <i>in loco</i> ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	202
Figura 115 – Comparação entre os dados médios de condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais ao longo das estações de monitoramento.	203

Figura 116 – Medianas dos valores de demanda bioquímica de oxigênio para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	205
Figura 117 – Medianas dos valores de demanda bioquímica de oxigênio para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	206
Figura 118 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).	207
Figura 119 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).	208
Figura 120 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).	209
Figura 121 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).	210
Figura 122 – Medianas dos valores de dureza total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	211
Figura 123 – Medianas dos valores de dureza total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	211
Figura 124 – Gráficos de dispersão dos dados de dureza total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	212
Figura 125 – Gráficos de dispersão dos dados de dureza total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	213
Figura 126 – Medianas dos valores de fenóis totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	215
Figura 127 – Medianas dos valores de fenóis totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	216
Figura 128 – Gráficos de dispersão dos dados de fenóis totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	216
Figura 129 – Gráficos de dispersão dos dados de fenóis totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	217
Figura 130 – Medianas dos valores de fósforo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	221
Figura 131 – Medianas dos valores de fósforo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	221
Figura 132 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).	222
Figura 133 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).	223
Figura 134 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).	224
Figura 135 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).	225

Figura 136 – Medianas dos valores de nitrogênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	228
Figura 137 – Medianas dos valores de nitrogênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	228
Figura 138 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).....	229
Figura 139 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).....	230
Figura 140 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).	231
Figura 141 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).	232
Figura 142 – Medianas dos valores de nitrato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	235
Figura 143 – Medianas dos valores de nitrato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	235
Figura 144 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrato ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	236
Figura 145 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrato ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	237
Figura 146 – Medianas dos valores de nitrito para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	239
Figura 147 – Medianas dos valores de nitrito para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	239
Figura 148 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrito ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	240
Figura 149 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrito ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	241
Figura 150 – Medianas dos valores de nitrogênio amoniacal para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	243
Figura 151 – Medianas dos valores de nitrogênio amoniacal para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	243
Figura 152 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio amoniacal ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	244
Figura 153 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio amoniacal ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	245
Figura 154 – Medianas dos valores de nitrogênio orgânico para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	246
Figura 155 – Medianas dos valores de nitrogênio orgânico para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	246

Figura 156 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio orgânico ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	247
Figura 157 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio orgânico ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	248
Figura 158 – Medianas das concentrações de oxigênio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	251
Figura 159 – Medianas das concentrações de oxigênio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	251
Figura 160 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).....	252
Figura 161 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).....	253
Figura 162 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte I).	254
Figura 163 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte II).	255
Figura 164 – Medianas dos valores de pH <i>in loco</i> para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	258
Figura 165 – Medianas dos valores de pH <i>in loco</i> para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	258
Figura 166 – Gráficos de dispersão dos dados de pH <i>in loco</i> ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).....	259
Figura 167 – Gráficos de dispersão dos dados de pH <i>in loco</i> ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).....	260
Figura 168 – Gráficos de dispersão dos dados de pH <i>in loco</i> ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).....	261
Figura 169 – Gráficos de dispersão dos dados de pH <i>in loco</i> ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).	262
Figura 170 – Medianas dos valores de selênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	264
Figura 171 – Medianas dos valores de selênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	264
Figura 172 – Gráficos de dispersão dos dados de selênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	265
Figura 173 – Gráficos de dispersão dos dados de selênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	266
Figura 174 – Medianas dos valores de sulfato total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	268
Figura 175 – Medianas dos valores de sulfato total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	268

Figura 176 – Gráficos de dispersão dos dados de sulfato total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	269
Figura 177 – Gráficos de dispersão dos dados de sulfato total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	270
Figura 178 – Medianas dos valores de alumínio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	271
Figura 179 – Medianas dos valores de alumínio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	272
Figura 180 – Gráficos de dispersão dos dados de alumínio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	272
Figura 181 – Gráficos de dispersão dos dados de alumínio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	273
Figura 182 – Medianas das concentrações de alumínio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	276
Figura 183 – Medianas das concentrações de alumínio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	276
Figura 184 – Gráficos de dispersão dos dados de alumínio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	277
Figura 185 – Gráficos de dispersão dos dados de alumínio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce.	278
Figura 186 – Medianas dos valores de arsênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	281
Figura 187 – Medianas dos valores de arsênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	281
Figura 188 – Gráficos de dispersão dos dados de arsênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	282
Figura 189 – Gráficos de dispersão dos dados de arsênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	283
Figura 190 – Medianas dos valores de bário total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	285
Figura 191 – Medianas dos valores de bário total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	285
Figura 192 – Gráficos de dispersão dos dados de bário total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	286
Figura 193 – Gráficos de dispersão dos dados de bário total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	287
Figura 194 – Medianas dos valores de boro total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	289
Figura 195 – Medianas dos valores de boro total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	289

Figura 196 – Gráficos de dispersão dos dados de boro total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	290
Figura 197 – Gráficos de dispersão dos dados de boro total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	291
Figura 198 – Medianas dos valores de boro dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	292
Figura 199 – Medianas dos valores de boro dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	292
Figura 200 – Gráficos de dispersão dos dados de boro dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	293
Figura 201 – Gráficos de dispersão dos dados de boro dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	294
Figura 202 – Medianas dos valores de cádmio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	296
Figura 203 – Medianas dos valores de cádmio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	296
Figura 204 – Gráficos de dispersão dos dados de cádmio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	297
Figura 205 – Gráficos de dispersão dos dados de cádmio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	298
Figura 206 – Medianas dos valores de cálcio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	299
Figura 207 – Medianas dos valores de cálcio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	299
Figura 208 – Gráficos de dispersão dos dados de cálcio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	300
Figura 209 – Gráficos de dispersão dos dados de cálcio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	301
Figura 210 – Medianas dos valores de chumbo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	304
Figura 211 – Medianas dos valores de chumbo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	304
Figura 212 – Gráficos de dispersão dos dados de chumbo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	305
Figura 213 – Gráficos de dispersão dos dados de chumbo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	306
Figura 214 – Medianas dos valores de cobre total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	307
Figura 215 – Medianas dos valores de cobre total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	308

Figura 216 – Gráficos de dispersão dos dados de cobre total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	309
Figura 217 – Gráficos de dispersão dos dados de cobre total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	310
Figura 218 – Medianas dos valores de cobre dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	312
Figura 219 – Medianas dos valores de cobre dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	313
Figura 220 – Gráficos de dispersão dos dados de cobre dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	314
Figura 221 – Gráficos de dispersão dos dados de cobre dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	315
Figura 222 – Medianas dos valores de cromo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	317
Figura 223 – Medianas dos valores de cromo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	317
Figura 224 – Gráficos de dispersão dos dados de cromo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	318
Figura 225 – Gráficos de dispersão dos dados de cromo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	319
Figura 226 – Medianas dos valores de cromo hexavalente para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	320
Figura 227 – Medianas dos valores de cromo hexavalente para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	320
Figura 228 – Gráficos de dispersão dos dados de cromo hexavalente ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	321
Figura 229 – Gráficos de dispersão dos dados de cromo hexavalente ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	322
Figura 230 – Medianas dos valores de cromo trivalente para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	323
Figura 231 – Medianas dos valores de cromo trivalente para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	323
Figura 232 – Gráficos de dispersão dos dados de cromo trivalente ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	324
Figura 233 – Gráficos de dispersão dos dados de cromo trivalente ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	325
Figura 234 – Medianas das concentrações de ferro dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	328
Figura 235 – Medianas das concentrações de ferro dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	328

Figura 236 – Gráficos de dispersão dos dados de ferro dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	329
Figura 237 – Gráficos de dispersão dos dados de ferro dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce.	330
Figura 238 – Medianas dos valores de magnésio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	331
Figura 239 – Medianas dos valores de magnésio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	331
Figura 240 – Gráficos de dispersão dos dados de magnésio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	332
Figura 241 – Gráficos de dispersão dos dados de magnésio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	333
Figura 242 – Comparação entre os dados médios de cálcio e magnésio ao longo das estações de monitoramento.....	333
Figura 243 – Medianas das concentrações de manganês total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	336
Figura 244 – Medianas das concentrações de manganês total para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	336
Figura 245 – Gráficos de dispersão dos dados de manganês total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	337
Figura 246 – Gráficos de dispersão dos dados de manganês total ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce.	338
Figura 247 – Comparação entre os dados médios de ferro dissolvido e manganês total ao longo das estações de monitoramento.....	339
Figura 248 – Medianas dos valores de mercúrio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	341
Figura 249 – Medianas dos valores de mercúrio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	341
Figura 250 – Gráficos de dispersão dos dados de mercúrio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	342
Figura 251 – Gráficos de dispersão dos dados de mercúrio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	343
Figura 252 – Medianas dos valores de níquel total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	346
Figura 253 – Medianas dos valores de níquel total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	346
Figura 254 – Gráficos de dispersão dos dados de níquel total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	347
Figura 255 – Gráficos de dispersão dos dados de níquel total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	348

Figura 256 – Medianas dos valores de potássio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso o longo das estações de monitoramento do rio Doce.	349
Figura 257 – Medianas dos valores de potássio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	349
Figura 258 – Gráficos de dispersão dos dados de potássio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	350
Figura 259 – Gráficos de dispersão dos dados de potássio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	351
Figura 260 – Medianas dos valores de sódio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	352
Figura 261 – Medianas dos valores de sódio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	353
Figura 262 – Gráficos de dispersão dos dados de sódio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.....	354
Figura 263 – Gráficos de dispersão dos dados de sódio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	355
Figura 264 – Comparação entre os dados médios de potássio dissolvido e sódio dissolvido ao longo das estações de monitoramento.....	356
Figura 265 – Medianas dos valores de zinco para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.....	358
Figura 266 – Medianas dos valores de zinco para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	358
Figura 267 – Gráficos de dispersão dos dados de zinco ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.	359
Figura 268 – Gráficos de dispersão dos dados de zinco ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.....	360
Figura 269 – Medianas das concentrações de coliformes termotolerantes para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	363
Figura 270 – Medianas das concentrações de coliformes termotolerantes para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.	363
Figura 271 – Gráficos de dispersão dos dados de coliformes termotolerantes ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).	364
Figura 272 – Gráficos de dispersão dos dados de coliformes termotolerantes ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).	365
Figura 273 – Gráficos de dispersão dos dados de coliformes termotolerantes ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte I).....	366
Figura 274 – Gráficos de dispersão dos dados de coliformes termotolerantes ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte II).....	367
Figura 275 – Ordenamento dos parâmetros de qualidade de água para a base de dados do IGAM..	370
Figura 276 – Ordenamento dos parâmetros de qualidade de água para a base de dados do IEMA. .	371

Figura 277 – Parâmetros de qualidade de água com percentuais de não conformidade mais expressivos ao longo da região de estudo.	372
Figura 278 – Distribuição temporal dos resultados dos ensaios de ecotoxicidade nos pontos avaliados pelo IGAM no rio Doce.	373
Figura 279 – Distribuição temporal dos resultados dos ensaios de ecotoxicidade nos pontos avaliados pelo IGAM nos afluentes do rio Doce.	374
Figura 280 – Contribuição das classes de microalgas para a riqueza de espécies registrada no rio Doce e seus afluentes.	392
Figura 281 – Contribuição relativa das classes de algas para a composição da comunidade nas estações de monitoramento ao longo do rio Doce durante os períodos chuvoso e seco.	393
Figura 282 – Contribuição relativa das classes de algas para a composição da comunidade nas estações de monitoramento nos afluentes durante os períodos chuvoso e seco.	393
Figura 283 – Densidade média de indivíduos encontrada nas estações avaliadas ao longo do rio Doce durante os períodos chuvoso e seco.	394
Figura 284 – Densidade média de indivíduos encontrada nas estações avaliadas nos afluentes do rio Doce durante os períodos chuvoso e seco.	394
Figura 285 – Valores médios (x), mediana (linha), mínimos e máximos (barra) de clorofila-a ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	395
Figura 286 – Medianas dos valores de clorofila-a para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.	395
Figura 287 – Valores médios (x), mediana (linha), mínimos e máximos (barra) de clorofila-a nas estações de monitoramento nos afluentes do rio Doce.	396
Figura 288 – Medianas dos valores de clorofila-a para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento nos afluentes do rio Doce.	397
Figura 289 – Densidade celular (cél.mL ⁻¹) das cianobactérias registradas no rio Doce.	398
Figura 290 – Densidade celular (cél.mL ⁻¹) das cianobactérias registradas nos afluentes do rio Doce.	399
Figura 291 – <i>Kellicottia bostoniensis</i> (Rotifera), espécie exótica invasora de ocorrência no rio do Carmo.	405
Figura 292 – Riqueza do zooplâncton em sete rios da bacia do médio rio Doce.	406
Figura 293 – Densidade do zooplâncton em sete rios da bacia do médio rio Doce.	406
Figura 294 – Riqueza dos principais grupos zooplanctônicos nos rios Piracicaba e médio rio Doce, entre 2000 e 2003.	407
Figura 295 – Rede de amostragem do zooplâncton utilizada para o EIA Integrado do Complexo Germano.	407
Figura 296 – Pontos de amostragem do zooplâncton no rio do Carmo.	408
Figura 297 – Formas biológicas das macrófitas aquáticas de acordo com a distribuição no corpo d'água: emersas, fixas com folhas flutuantes, submersas enraizadas, submersas livres e flutuantes.	409
Figura 298 – Aspecto da vegetação na lagoa próxima ao rio Doce.	411

Figura 299 – Mapa das ecorregiões aquáticas do Brasil.	413
Figura 300 – Frequência absoluta de táxons levantados para a bacia hidrográfica do rio Doce, distribuídos de acordo com as ordens.	415
Figura 301 – Número de táxons levantados para a bacia hidrográfica do rio Doce, distribuídos de acordo com as famílias.....	416
Figura 302 – Peixes de água doce como ocorrência na bacia do rio Doce.....	417
Figura 303 – Modelo geral de migração de peixes de água doce do Brasil.	419
Figura 304 – Importância relativa (%) das espécies de peixes de água doce levantadas para a bacia do rio Doce para as atividades relacionadas com a pesca.	421
Figura 305 – <i>Acanthochelys radiolata</i> , espécie ocorrente na bacia do rio Doce.....	432
Figura 306 – <i>Phrynops geoffroanus</i> , espécie ocorrente no leito principal do rio Doce e de seus maiores afluentes.....	432
Figura 307 – Jabutis (<i>Chelonoidis carbonarius</i> à esquerda e <i>C. denticulatus</i> à direita), espécies ocorrentes na bacia do rio Doce.	433
Figura 308 – Localização dos empreendimentos hidrelétricos e respectivos reservatórios instalados na calha do rio Doce, no trecho percorrido pela lama de rejeitos.....	440
Figura 309 – Perfil longitudinal da bacia do rio Doce com a localização das UHEs de Risoleta Neves (Candongá), Baguari, Aimorés e Mascarenhas.	441
Figura 310 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios com indicação dos principais problemas decorrentes.	442
Figura 311 – Curva de eficiência de retenção de sedimentos segundo Churchill (Curva 5) e Brune (Curva 4).	445
Figura 312 – Batimetria realizada pela HDC Engenharia em agosto/2007 (pré-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.....	453
Figura 313 – Batimetria realizada pela HDC Engenharia em maio/2014 (pré-desastre) e interpolado pelos Institutos Lactec.....	454
Figura 314 – Localização dos pontos levantados pela HIDROTOPO em junho/2015 antes do desastre.....	457
Figura 315 – Profundidades máximas de água, levantamento de junho/2015.	458
Figura 316 – Evolução das curvas cota-volume do reservatório da UHE Mascarenhas.....	462
Figura 317 – Valores de oxigênio dissolvido na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	466
Figura 318 – Valores de pH na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.....	466
Figura 319 – Valores de condutividade elétrica na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.....	467
Figura 320 – Valores de sólidos dissolvidos totais na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.....	467
Figura 321 – Valores de sólidos suspensos totais na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	468
Figura 322 – Valores de turbidez na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	468
Figura 323 – Valores de cor verdadeira na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	469

Figura 324 – Valores de fósforo total na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	469
Figura 325 – Valores de nitrogênio total na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	470
Figura 326 – Valores de DBO na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	470
Figura 327 – Valores de DQO na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.....	471
Figura 328 – Valores de ferro dissolvido na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.....	472
Figura 329 – Valores de manganês total na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.....	472
Figura 330 – Valores de coliformes termotolerantes na estação CAN-05, entre 2011 e 2015.	473
Figura 331 – Resultados de oxigênio dissolvido (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	474
Figura 332 – Resultados de pH para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	474
Figura 333 – Resultados de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	475
Figura 334 – Resultados de sólidos suspensos totais (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	476
Figura 335 – Resultados de sólidos totais (mg/m3) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.....	476
Figura 336 – Resultados de turbidez (UNT) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	477
Figura 337 – Resultados de cor (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	478
Figura 338 – Resultados de fósforo total (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	479
Figura 339 – Resultados de nitrogênio total (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.	479
Figura 340 – Resultados de DBO (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.....	480
Figura 341 – Resultados de ferro dissolvido (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.....	480
Figura 342 – Resultados de manganês total (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.....	481
Figura 343 – Resultados de coliformes termotolerantes (UFC/100 mL) para o período e estações analisadas na UHE Baguari, de 2010 a 2015.....	482
Figura 344 – Resultados de oxigênio dissolvido (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.....	486
Figura 345 – Resultados de pH para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.....	486
Figura 346 – Resultados de condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	487

Figura 347 – Resultados de sólidos dissolvidos totais (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	487
Figura 348 – Resultados de sólidos suspensos totais (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	488
Figura 349 – Resultados de turbidez (UNT) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	488
Figura 350 – Resultados de cor (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	489
Figura 351 – Resultados de transparência da água (m) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	489
Figura 352 – Resultados de fósforo total (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	490
Figura 353 – Resultados de nitrogênio total (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	490
Figura 354 – Resultados de DBO (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	491
Figura 355 – Resultados de DQO (mg/L) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	491
Figura 356 – Resultados de coliformes termotolerantes (UFC/100 mL) para o período e estações analisadas na UHE Mascarenhas, de 2010 a 2015.	492
Figura 357 – Riqueza dos organismos fitoplanctônicos na UHE Risoleta Neves/MG, no período chuvoso e seco.	497
Figura 358 – Densidade de organismos fitoplanctônicos na UHE Risoleta Neves/MG, no período chuvoso e seco.	497
Figura 359 – Contribuição relativa das classes de algas para a composição da comunidade no reservatório da UHE Risoleta Neves/MG, durante o período chuvoso e seco.	498
Figura 360 – Densidade de cianobactérias (cél./mL) na UHE Risoleta Neves/MG.	498
Figura 361 – Riqueza dos organismos fitoplanctônicos ao longo das estações de monitoramento da UHE Baguari/MG, no período chuvoso e seco.	506
Figura 362 – Densidade de organismos fitoplanctônicos registrados ao longo das estações de monitoramento da UHE Baguari/MG, no período chuvoso e seco.	506
Figura 363 – Contribuição relativa das classes de algas para a composição da comunidade nas estações de monitoramento da UHE Baguari/MG, durante o período chuvoso e seco.	507
Figura 364 – Densidade de cianobactérias (cél./mL) nas estações monitoradas no reservatório da UHE Baguari/MG.	507
Figura 365 – Riqueza dos organismos fitoplanctônicos na UHE Eliezer Batista/MG, no período chuvoso e seco.	514
Figura 366 – Densidade de organismos fitoplanctônicos na UHE Eliezer Batista/MG, no período chuvoso e seco.	515

Figura 367 – Contribuição relativa das classes de algas para a composição da comunidade nas estações de monitoramento da UHE Eliezer Batista/MG, durante o período chuvoso e seco.....	515
Figura 368 – Densidade de cianobactérias (cél./mL) nas estações monitoradas na UHE Eliezer Batista/MG.....	516
Figura 369 – Riqueza dos organismos fitoplanctônicos na UHE Mascarenhas/ES, no período chuvoso e seco.	519
Figura 370 – Densidade de organismos fitoplanctônicos na UHE Mascarenhas/ES, no período chuvoso e seco.	519
Figura 371 – Contribuição relativa das classes de algas para a composição da comunidade nas estações de monitoramento da UHE Mascarenhas/ES, durante o período chuvoso e seco. ...	520
Figura 372 – Densidade de cianobactérias (cél./mL) nas estações monitoradas na UHE Mascarenhas/ES.....	520
Figura 373 – Pontos de amostragem do zooplâncton no reservatório da UHE Risoleta Neves.....	523
Figura 374 – Riqueza do zooplâncton para o reservatório da UHE Risoleta Neves entre setembro de 2012 e setembro de 2015.	524
Figura 375 – Densidade do zooplâncton para o reservatório da UHE Risoleta Neves entre setembro de 2012 e setembro de 2015.	524
Figura 376 – Índice de Diversidade do zooplâncton para o reservatório da UHE Risoleta Neves entre setembro de 2012 e setembro de 2015.....	525
Figura 377 – Riqueza do zooplâncton para o reservatório da UHE Baguari de julho de 2012 a outubro de 2015.	526
Figura 378 – Densidade do zooplâncton para o reservatório da UHE Baguari de julho de 2012 a outubro de 2015.	527
Figura 379 – Índice de Diversidade do zooplâncton para o reservatório da UHE Baguari de julho de 2012 a outubro de 2015.....	527
Figura 380 – Riqueza do zooplâncton no reservatório da UHE Eliezer Batista entre março de 2012 e setembro de 2015.	529
Figura 381 – Densidade do zooplâncton no reservatório da UHE Eliezer Batista entre março de 2012 e setembro de 2015.	529
Figura 382 – Índice de Diversidade do zooplâncton no reservatório da UHE Eliezer Batista entre março de 2012 e setembro de 2015.	530
Figura 383 – Frequência absoluta de táxons levantados para as UHEs de Risoleta Neves (Candongá), Baguari, Aimorés e Mascarenhas, distribuídos de acordo com as ordens.....	532
Figura 384 – Frequência absoluta de táxons levantados para as UHEs de Risoleta Neves (Candongá), Baguari, Aimorés e Mascarenhas, distribuídos de acordo com as ordens.....	533
Figura 385 – Frequência absoluta de táxons endêmicos, nativos e introduzidos (exóticos) levantados para as UHEs de Risoleta Neves (Candongá), Baguari, Aimorés e Mascarenhas.....	533
Figura 386 – Localização das lagoas de água doce estudadas, localizadas na bacia do rio Doce.	540
Figura 387 – Vista geral da lagoa do Limão.....	541
Figura 388 – Vistas da lagoa Nova.	541

Figura 389 – Pontos de amostragem na lagoa Nova.....	543
Figura 390 – Distribuição das estações na lagoa Juparanã.	545
Figura 391 – Frequência absoluta de táxons levantados para os ambientes lacustres da porção do baixo rio Doce, distribuídos de acordo com as ordens.	556
Figura 392 – Número de táxons levantados para os ambientes lacustres da bacia hidrográfica do rio Doce, distribuídos de acordo com as famílias.....	556
Figura 393 – Frequência relativa (%) das espécies de peixes de água doce nativas (de ampla distribuição e endêmicas) e introduzidas (exóticas) levantadas para os ambientes lacustres da bacia do rio Doce.....	557
Figura 394 – Importância relativa (%) das espécies de peixes de água doce levantadas para os ambientes lacustres da bacia do rio Doce para as atividades relacionadas com a pesca.	557
Figura 395 – Área de abrangência, com a localização dos pontos amostrais de cada estudo consultado, dos pontos de <i>background</i> e de controle.	563
Figura 396 – Localização dos pontos de coleta de sedimentos de corrente em áreas não afetadas sobre imagem orbital World View 2 de 10/11/2015.....	570
Figura 397 – Nascentes do rio Piracicaba, local de coleta de sedimentos amostra 01.	571
Figura 398 – A) Visão geral da drenagem onde foi coletada a amostra de sedimento, apontada pela seta, na nascente do rio Jacuba, afluente do rio Gualaxo do Norte e B) Local da coleta de sedimentos.....	572
Figura 399 – Distribuição dos elementos em porcentagem dos pontos de <i>background</i> amostra 01 e amostra 03.	573
Figura 400 – Localização das estações de amostragem.....	574
Figura 401 – Estações de amostragem localizadas no rio Gualaxo do Norte.....	578
Figura 402 – Localização dos pontos amostrais de Costa (2007).	582
Figura 403 – Localização dos pontos amostrais de FEST (2014).....	583
Figura 404 – Localização dos pontos amostrais de Jordão et al. (1996).	584
Figura 405 – Localização dos pontos amostrais de Pacheco (2015).....	586
Figura 406 – Localização das estações de amostragem de Rhodes (2010).	588
Figura 407 – Localização dos pontos amostrais de Silva et al. (2013).	590
Figura 408 – Localização dos pontos amostrais de Santolin (2015).	592
Figura 409 – Concentração de mercúrio nos sedimentos analisados.	593
Figura 410 – Concentração de arsênio nos sedimentos analisados.	594
Figura 411 – Concentração de cromo nos sedimentos analisados.	595
Figura 412 – Concentração de níquel nos sedimentos analisados.....	596
Figura 413 – Concentração de cobre nos sedimentos analisados.....	597
Figura 414 – Concentração de zinco nos sedimentos analisados.....	598
Figura 415 – Concentração de alumínio nos sedimentos analisados.....	599

Figura 416 – Concentração de ferro nos sedimentos analisados.....	600
Figura 417 – Concentração de manganês nos sedimentos analisados.....	601
Figura 418 – Localização dos pontos amostrais de Varejão et al. (2011).	608
Figura 419 – Concentrações de metais pesados em sedimentos desde a barragem de Santarém até Linhares em 2010.	615
Figura 420 – Distribuição dos resultados de arsênio por trecho.....	616
Figura 421 – Distribuição dos resultados de cádmio por trecho.....	617
Figura 422 – Distribuição dos resultados de chumbo por trecho.	618
Figura 423 – Distribuição dos resultados de cobre por trecho.	618
Figura 424 – Distribuição dos resultados de cromo por trecho.	619
Figura 425 – Distribuição dos resultados de mercúrio por trecho.....	620
Figura 426 – Distribuição dos resultados de níquel por trecho.	621
Figura 427 – Distribuição dos resultados de alumínio por trecho.....	623
Figura 428 – Distribuição dos resultados de ferro por trecho.	624
Figura 429 – Distribuição dos resultados de manganês por trecho.	625
Figura 430 – Granulometria obtida nas amostras no período seco.	626
Figura 431 – Granulometria obtida nas amostras no período intermediário.	626
Figura 432 – Granulometria obtida nas amostras no período seco.	627
Figura 433 – Distribuição espacial dos dados granulométricos.	629
Figura 434 – Processos minerários obtidos na ANM, filtrados conforme a fase, presentes na bacia do rio Doce com a localização da bacia do rio Doce sobre imagem SRTM 30 m.....	630
Figura 435 – Articulação das áreas separadas para o detalhe da visualização.	631
Figura 436 – Processos minerários conforme a substância em detalhe na Área I.	631
Figura 437 – Processos minerários conforme a substância em detalhe na Área II.	632
Figura 438 – Processos minerários conforme a substância em detalhe na Área III.	632
Figura 439 – Processos minerários conforme a substância em detalhe na Área IV.	633
Figura 440 – Processos da ANM selecionados conforme a substância potencialmente contaminante.	637
Figura 441 – Localização das amostras de sedimento dos pontos de controle.	638
Figura 442 – A) Ponte sobre o rio Gualaxo do Norte onde foram coletadas amostras na calha do rio com a draga tipo Petersen – amostra 4A; B) Local da coleta de sedimentos nos terraços marginais – amostra 4B e C) Detalhe da draga Petersen e amostra.	638
Figura 443 – A) Visão geral do rio do Carmo B) Ponto de coleta da amostra 05 no rio do Carmo e C) Presença de conchas nas marginais.	639

Figura 444 – A) Visão geral do rio Piranga onde foi coletada a amostra 06 e B) Sedimento acondicionado.....	639
Figura 445 – Distribuição dos elementos em porcentagem dos pontos de controle amostra 4, amostra 4a, amostra 05 e amostra 06.....	642
Figura 446 – Riqueza de macroinvertebrados bentônicos no Programa de Monitoramento Limnológico da UHE Baguari, Programa de Monitoramento Limnológico da UHE Eliezer Batista e Monitoramento de Qualidade de Água da UHE Risoleta Neves.....	649
Figura 447 – Diversidade de macroinvertebrados bentônicos no Monitoramento de Qualidade de Água da UHE Risoleta Neves e no Programa de Monitoramento Limnológico da UHE Baguari.....	650
Figura 448 – Densidade de macroinvertebrados bentônicos no Programa de Monitoramento Limnológico da UHE Baguari, Programa de Monitoramento Limnológico da UHE Eliezer Batista e abundância de macroinvertebrados bentônicos no Monitoramento de Qualidade de Água da UHE Risoleta Neves.....	651
Figura 449 – Totais anuais de precipitação do mês de janeiro na bacia do rio Doce.....	685
Figura 450 – Totais anuais de precipitação do mês de fevereiro na bacia do rio Doce.....	685
Figura 451 – Totais anuais de precipitação do mês de março na bacia do rio Doce.....	686
Figura 452 – Totais anuais de precipitação do mês de abril na bacia do rio Doce.....	686
Figura 453 – Totais anuais de precipitação do mês de maio na bacia do rio Doce.....	687
Figura 454 – Totais anuais de precipitação do mês de junho na bacia do rio Doce.....	687
Figura 455 – Totais anuais de precipitação do mês de julho na bacia do rio Doce.....	688
Figura 456 – Totais anuais de precipitação do mês de agosto na bacia do rio Doce.....	688
Figura 457 – Totais anuais de precipitação do mês de setembro na bacia do rio Doce.....	689
Figura 458 – Totais anuais de precipitação do mês de outubro na bacia do rio Doce.....	689
Figura 459 – Totais anuais de precipitação do mês de novembro na bacia do rio Doce.....	690
Figura 460 – Totais anuais de precipitação do mês de dezembro na bacia do rio Doce.....	690
Figura 461 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56028000.....	691
Figura 462 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56055000.....	691
Figura 463 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56065000.....	692
Figura 464 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56075000.....	692
Figura 465 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56085000.....	693
Figura 466 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56090000.....	693
Figura 467 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56110005.....	694
Figura 468 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56145000.....	694
Figura 469 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56240000.....	695
Figura 470 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56335001.....	695

Figura 471 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56337000.....	696
Figura 472 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56385000.....	696
Figura 473 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56145000.....	697
Figura 474 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56425000.....	697
Figura 475 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56460000.....	698
Figura 476 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56484998.....	698
Figura 477 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56500000.....	699
Figura 478 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56510000.....	699
Figura 479 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56539000.....	700
Figura 480 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56570000.....	700
Figura 481 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56610000.....	701
Figura 482 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56664000.	701
Figura 483 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56659998.....	702
Figura 484 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56696000.	702
Figura 485 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56719998.....	703
Figura 486 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56750000.....	703
Figura 487 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56765000.....	704
Figura 488 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56775000.....	704
Figura 489 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56787000.....	705
Figura 490 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56800000.	705
Figura 491 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56825000.....	706
Figura 492 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56845000.....	706
Figura 493 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56846000.	707
Figura 494 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56850000.	707
Figura 495 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56851000.....	708
Figura 496 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56860000.	708
Figura 497 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56870000.....	709
Figura 498 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56891900.....	709
Figura 499 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56920000.....	710
Figura 500 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56935000.....	710
Figura 501 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56940002.....	711
Figura 502 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56960005.....	711
Figura 503 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56976000.....	712

Figura 504 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56978000.....	712
Figura 505 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56983000.....	713
Figura 506 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56988500.....	713
Figura 507 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56989001.....	714
Figura 508 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56989400.....	714
Figura 509 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56990000.	715
Figura 510 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56990990.....	715
Figura 511 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56991500.....	716
Figura 512 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56992000.....	716
Figura 513 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56993551.	717
Figura 514 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56994500.....	717
Figura 515 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56994510.	718
Figura 516 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56995500.....	718
Figura 517 – Mínima, média e máxima das vazões mensais para a estação 56998400.....	719
Figura 518 – Curva de permanência para a estação 56028000.	719
Figura 519 – Curva de permanência para a estação 56055000.	720
Figura 520 – Curva de permanência para a estação 56065000.....	720
Figura 521 – Curva de permanência para a estação 56075000.	721
Figura 522 – Curva de permanência para a estação 56085000.....	721
Figura 523 – Curva de permanência para a estação 56090000.....	722
Figura 524 – Curva de permanência para a estação 56110005.	722
Figura 525 – Curva de permanência para a estação 56145000.	723
Figura 526 – Curva de permanência para a estação 56240000.....	723
Figura 527 – Curva de permanência para a estação 56335001.	724
Figura 528 – Curva de permanência para a estação 56337000.	724
Figura 529 – Curva de permanência para a estação 56385000.....	725
Figura 530 – Curva de permanência para a estação 56415000.....	725
Figura 531 – Curva de permanência para a estação 56425000.....	726
Figura 532 – Curva de permanência para a estação 56460000.....	726
Figura 533 – Curva de permanência para a estação 56484998.....	727
Figura 534 – Curva de permanência para a estação 56500000.....	727
Figura 535 – Curva de permanência para a estação 56510000.....	728
Figura 536 – Curva de permanência para a estação 56539000.....	728

Figura 537 – Curva de permanência para a estação 56570000.	729
Figura 538 – Curva de permanência para a estação 56610000.	729
Figura 539 – Curva de permanência para a estação 56640000.	730
Figura 540 – Curva de permanência para a estação 56659998.	730
Figura 541 – Curva de permanência para a estação 56696000.	731
Figura 542 – Curva de permanência para a estação 56719998.	731
Figura 543 – Curva de permanência para a estação 56750000.	732
Figura 544 – Curva de permanência para a estação 56765000.	732
Figura 545 – Curva de permanência para a estação 56775000.	733
Figura 546 – Curva de permanência para a estação 56787000.	733
Figura 547 – Curva de permanência para a estação 56800000.	734
Figura 548 – Curva de permanência para a estação 56825000.	734
Figura 549 – Curva de permanência para a estação 56845000.	735
Figura 550 – Curva de permanência para a estação 56846000.	735
Figura 551 – Curva de permanência para a estação 56850000.	736
Figura 552 – Curva de permanência para a estação 56851000.	736
Figura 553 – Curva de permanência para a estação 56860000.	737
Figura 554 – Curva de permanência para a estação 56870000.	737
Figura 555 – Curva de permanência para a estação 56891900.	738
Figura 556 – Curva de permanência para a estação 56920000.	738
Figura 557 – Curva de permanência para a estação 56935000.	739
Figura 558 – Curva de permanência para a estação 56940002.	739
Figura 559 – Curva de permanência para a estação 56960005.	740
Figura 560 – Curva de permanência para a estação 56976000.	740
Figura 561 – Curva de permanência para a estação 56978000.	741
Figura 562 – Curva de permanência para a estação 56983000.	741
Figura 563 – Curva de permanência para a estação 56988500.	742
Figura 564 – Curva de permanência para a estação 56989001.	742
Figura 565 – Curva de permanência para a estação 56989400.	743
Figura 566 – Curva de permanência para a estação 56990000.	743
Figura 567 – Curva de permanência para a estação 56990990.	744
Figura 568 – Curva de permanência para a estação 56991500.	744

Figura 569 – Curva de permanência para a estação 56992000.	745
Figura 570 – Curva de permanência para a estação 56993551.....	745
Figura 571 – Curva de permanência para a estação 56994500.	746
Figura 572 – Curva de permanência para a estação 56994510.	746
Figura 573 – Curva de permanência para a estação 56995500.	747
Figura 574 – Curva de permanência para a estação 56998400.	747
Figura 575 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Porto Firme.....	777
Figura 576 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Ponte Nova Jusante.	777
Figura 577 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Acaiaca Jusante.....	778
Figura 578 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Rio Casca.....	778
Figura 579 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Fazenda Cachoeira D’Antas.	779
Figura 580 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Raul Soares Montante.	779
Figura 581 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Cachoeira dos Óculos Montante.	780
Figura 582 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Fazenda Mario de Carvalho.	780
Figura 583 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Ferros.....	781
Figura 584 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Fazenda Barraca.	781
Figura 585 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Senhora do Porto.	782
Figura 586 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Naque Velho.	782
Figura 587 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Porto Santa Rita.....	783
Figura 588 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Governador Valadares.....	783
Figura 589 – Curva-chave de Sedimentos na Estação São Pedro de Suaçuí.	784
Figura 590 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Vila Matias Montante.	784
Figura 591 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Tumiritinga.....	785
Figura 592 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Dom Cavati.	785
Figura 593 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Fazenda Bragança.....	786
Figura 594 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Assaraí Montante.	786
Figura 595 – Curva-chave de Sedimentos na Estação São Sebastião da Encruzilhada.	787
Figura 596 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Afonso Claudio Monante.	787
Figura 597 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Laranja da Terra.	788
Figura 598 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Baixo Guandu Jusante.....	788
Figura 599 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Jusante Córrego da Piaba.	789
Figura 600 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Colatina.	789
Figura 601 – Curva-chave de Sedimentos na Estação Ponte do Pancas.	790

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados requeridos para cálculo por diversas fórmulas.....	61
Tabela 2 – Intervalo e tipo de dados utilizados no desenvolvimento de algumas equações.....	62
Tabela 3 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.....	69
Tabela 4 – Rede de monitoramento selecionada para as análises fluviométricas.....	72
Tabela 5 – Vazões médias de longo termo para as estações fluviométricas selecionadas.....	75
Tabela 6 – Resultados da análise da vazão máxima diária de 10000 anos (Q_{10000}) para cada estação. ..	79
Tabela 7 – Vazões mínimas específicas $Q_{10,7}$ das estações da bacia do rio Doce.....	82
Tabela 8 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas.....	83
Tabela 9 – Parâmetros das equações das curvas-chave sólidas.....	89
Tabela 10 – Vazões sólidas específicas de longo termo (produção de sedimentos) – 1998-2015.....	90
Tabela 11 – Valores de taxas de emissão de sedimentos estimados por diversos autores.....	95
Tabela 12 – Estações Fluviométricas utilizadas na análise regional da geometria hidráulica.....	107
Tabela 13 – Resumo das estatísticas de erro.....	135
Tabela 14 – Resumo das estatísticas de erro por região da bacia hidrográfica.....	136
Tabela 15 – Tabela comparativa entre os modelos aplicados.....	136
Tabela 16 – Estações de monitoramento de qualidade de água localizadas no rio Doce.....	139
Tabela 17 – Estações de monitoramento de qualidade de água em afluentes do rio Doce.....	140
Tabela 18 – Coordenadas geográficas das estações de monitoramento de qualidade de água na área de estudo.....	142
Tabela 19 – Variáveis de qualidade de água avaliadas e respectivos limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de Classe 2.....	144
Tabela 20 – Definição de quartis.....	146
Tabela 21 – Estações de monitoramento de qualidade de água com avaliação de ensaios de ecotoxicidade.....	148
Tabela 22 – Locais e períodos amostrados por Costa (2001).....	151
Tabela 23 – Variáveis avaliadas no Atlas Geoquímico da bacia do rio Doce.....	153
Tabela 24 – Locais monitorados dias antes da chegada da lama de rejeitos pelo IEMA.....	155
Tabela 25 – Data das coletas de amostras de água antes da chegada da lama de rejeitos.....	155
Tabela 26 – Locais dos pontos de captação no rio Doce do SANEAR Colatina.....	156
Tabela 27 – Parâmetros e períodos monitorados referentes aos laudos recebidos do SANEAR Colatina.....	157
Tabela 28 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cor verdadeira no rio Doce.....	158

Tabela 29 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cor verdadeira em afluentes do rio Doce.....	159
Tabela 30 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos dissolvidos totais no rio Doce.	168
Tabela 31 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos dissolvidos totais em afluentes do rio Doce.	169
Tabela 32 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos em suspensão totais no rio Doce.	173
Tabela 33 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos em suspensão totais em afluentes do rio Doce.	174
Tabela 34 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para a turbidez rio Doce.....	178
Tabela 35 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para a turbidez em afluentes do rio Doce.....	179
Tabela 36 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cloreto total no rio Doce.	196
Tabela 37 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cloreto total em afluentes do rio Doce.	196
Tabela 38 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para demanda bioquímica de oxigênio no rio Doce.....	204
Tabela 39 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para demanda bioquímica de oxigênio em afluentes do rio Doce.....	205
Tabela 40 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fenóis totais no rio Doce.	214
Tabela 41 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fenóis totais em afluentes do rio Doce.	214
Tabela 42 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fósforo total no rio Doce.....	219
Tabela 43 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fósforo total em afluentes do rio Doce.....	220
Tabela 44 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio total no rio Doce.....	227
Tabela 45 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio total em afluentes do rio Doce.....	227
Tabela 46 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrato no rio Doce.....	233
Tabela 47 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrato em afluentes do rio Doce.	234
Tabela 48 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrito no rio Doce.....	238

Tabela 49 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrito em afluentes do rio Doce.	238
Tabela 50 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio amoniacal no rio Doce.	242
Tabela 51 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio amoniacal em afluentes do rio Doce.	242
Tabela 52 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o oxigênio dissolvido no rio Doce.	249
Tabela 53 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o oxigênio dissolvido em afluentes do rio Doce.	250
Tabela 54 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para pH <i>in loco</i> no rio Doce.	256
Tabela 55 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para pH <i>in loco</i> em afluentes do rio Doce.	257
Tabela 56 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para selênio total no rio Doce.	263
Tabela 57 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para selênio total em afluentes do rio Doce.	263
Tabela 58 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sulfato total no rio Doce.	267
Tabela 59 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sulfato total em afluentes do rio Doce.	267
Tabela 60 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o alumínio dissolvido no rio Doce.	274
Tabela 61 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o alumínio dissolvido em afluentes do rio Doce.	275
Tabela 62 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para arsênio total no rio Doce.	280
Tabela 63 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para arsênio total em afluentes do rio Doce.	280
Tabela 64 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para bário total no rio Doce.	284
Tabela 65 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para bário total em afluentes do rio Doce.	284
Tabela 66 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para boro total no rio Doce.	288
Tabela 67 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para boro total em afluentes do rio Doce.	288
Tabela 68 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cádmio total no rio Doce.	295

Tabela 69 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cádmio total em afluentes do rio Doce.....	295
Tabela 70 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para chumbo total no rio Doce.	302
Tabela 71 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para chumbo total em afluentes do rio Doce.	303
Tabela 72 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cobre dissolvido no rio Doce.....	311
Tabela 73 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cobre dissolvido em afluentes do rio Doce.	312
Tabela 74 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cromo total no rio Doce.	316
Tabela 75 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cromo total em afluentes do rio Doce.	316
Tabela 76 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para ferro dissolvido rio Doce.	326
Tabela 77 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o ferro dissolvido em afluentes do rio Doce.	327
Tabela 78 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para manganês total rio Doce.	334
Tabela 79 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o manganês total em afluentes do rio Doce.	335
Tabela 80 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para mercúrio total no rio Doce.....	340
Tabela 81 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para mercúrio total em afluentes do rio Doce.....	340
Tabela 82 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para níquel total no rio Doce.....	344
Tabela 83 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para níquel total em afluentes do rio Doce.....	345
Tabela 84 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para zinco no rio Doce.....	357
Tabela 85 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para zinco em afluentes do rio Doce.....	357
Tabela 86 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para coliformes termotolerantes no rio Doce.....	361
Tabela 87 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para coliformes termotolerantes em afluentes do rio Doce.....	362
Tabela 88 – Número de estações do IGAM (%) em que os parâmetros de qualidade de água apresentaram não conformidades.....	368

Tabela 89 – Número de estações do IEMA (%) em que os parâmetros de qualidade de água apresentaram não conformidades.....	369
Tabela 90 – Percentuais de desacordos para os ensaios de ecotoxicidade nas estações de monitoramento de localizadas no rio Doce.	375
Tabela 91 – Percentuais de desacordos para os ensaios de ecotoxicidade nas estações de monitoramento de localizadas nos afluentes do rio Doce.....	375
Tabela 92 – Listagem e ocorrência de espécies de algas planctônicas encontradas no rio Doce e seus afluentes.	382
Tabela 93 – Composição de espécies do zooplâncton para trechos do rio Doce, rio do Carmo e rio Piracicaba, anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG.	402
Tabela 94 – Lista da composição geral da ictiofauna da bacia hidrográfica do rio Doce registrada por meio de levantamento de dados secundários.....	422
Tabela 95 – Lista das espécies ameaçadas da ictiofauna com ocorrência na bacia hidrográfica do rio Doce.....	426
Tabela 96 – Lista das espécies de peixes introduzidos (exóticos) registrados na bacia hidrográfica do rio Doce.....	427
Tabela 97 – Espécies de quelônios continentais registrados nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e sua ocorrência na bacia do rio Doce.	431
Tabela 98 – Lista de espécies de quelônios continentais ameaçadas de extinção em algum nível, segundo lista de espécies ameaçadas mundial, nacional ou estaduais (MG e ES).	432
Tabela 99 – Principais características morfométricas, de vazão e do tempo de residências dos reservatórios.	441
Tabela 100 – Tipos de operação de reservatórios.	446
Tabela 101 – Constantes W e K para o cálculo do peso específico aparente.....	446
Tabela 102 – Volume máximo de água para os diversos levantamentos (o incremento do volume é o volume assoreado no intervalo dos levantamentos).	454
Tabela 103 – Volume máximo de água para os diversos levantamentos.....	457
Tabela 104 – Volumes assoreados para diversos períodos.....	458
Tabela 105 – Estimativa de taxas de assoreamento pelo método empírico.....	459
Tabela 106 – Evolução das curvas cota-volume do reservatório da UHE Mascarenhas.	461
Tabela 107 – Estações de monitoramento, com dados analisados na UHE Baguari.	463
Tabela 108 – Estações de monitoramento, com dados analisados na UHE Aimorés (Fuso 24K).	464
Tabela 109 – Lista de relatórios avaliados.....	464
Tabela 110 – Listagem do fitoplâncton encontrado na área de influência da UHE Risoleta Neves/MG no período pré-desastre, durante a estação seca (s) e chuvosa (c).	494
Tabela 111 – Listagem do fitoplâncton encontrado na área de influência da UHE Baguari/MG no período pré-desastre, durante a estação seca (s) e chuvosa (c).	499

Tabela 112 – Listagem do fitoplâncton encontrado na área de influência da UHE Eliezer Batista/MG no período pré-desastre, durante a estação seca (s) e chuvosa (c).	508
Tabela 113 – Listagem do fitoplâncton encontrado na área de influência da UHE Mascarenhas/ES no período pré-desastre, durante a estação seca (s) e chuvosa (c).	516
Tabela 114 – Classificação da abundância zooplanctônica.	522
Tabela 115 – Lista de espécies de zooplâncton encontradas no reservatório da UHE Risoleta Neves (Candongá) entre setembro de 2012 e setembro de 2015.	523
Tabela 116 – Lista de espécies de zooplâncton encontradas no reservatório da UHE Baguari entre julho de 2012 a outubro de 2015.	525
Tabela 117 – Lista de espécies de zooplâncton encontradas no reservatório da UHE Eliezer Batista (Aimorés) entre março de 2012 e setembro de 2015.	528
Tabela 118 – Lista da composição geral da ictiofauna registrada nas UHEs da bacia hidrográfica do rio Doce por meio de levantamento de dados secundários.	534
Tabela 119 – Resumo da taxa média de assoreamentos identificados para cada reservatório das UHEs.....	537
Tabela 120 – Dados de qualidade da água da lagoa Nova (2012-2013).	544
Tabela 121 – Continuação dos dados de qualidade da água da lagoa Nova (2012-2013).	544
Tabela 122 – Dados de qualidade da água da lagoa Nova (1986).	545
Tabela 123 – Dados de qualidade da água da lagoa Juparanã.	546
Tabela 124 – Dados de qualidade da água da lagoa Juparanã.	548
Tabela 125 – Espécies de microalgas encontradas na lagoa Juparanã/ES antes do desastre.	550
Tabela 126 – Lista da composição geral da ictiofauna para os ambientes lacustres da bacia hidrográfica do rio Doce registrada por meio de levantamento de dados secundários.....	558
Tabela 127 – Classificação da qualidade do sedimento, de acordo com o Igeo.....	565
Tabela 128 – Classificação granulométrica de sedimento, de acordo com o tamanho da partícula.	567
Tabela 129 – Classificação dos elementos químicos, com base nos efeitos à biota.	568
Tabela 130 – Resultados obtidos para a caracterização química elementar por FRX da amostra 01, expressas na forma de óxidos.	572
Tabela 131 – Resultados obtidos para a caracterização química elementar por FRX da amostra 03 – 2.0177.17 de sedimento de corrente e da rocha 2.0202.17, expressas na forma de óxidos.	572
Tabela 132 – Caracterização química por ICP da amostra 01 e amostra 03 – parte 1.....	573
Tabela 133 – Caracterização química por ICP da amostra 01 e amostra 03 – parte 2.....	573
Tabela 134 – Concentrações dos elementos minoritários e majoritários nos sedimentos da barragem de Timbopeba.....	575
Tabela 135 – Concentrações dos elementos majoritários e minoritários nos sedimentos da barragem de Natividade.....	576
Tabela 136 – Média dos resultados das análises de metais e semimetais realizadas em sedimentos para os elementos majoritários.....	579

Tabela 137 – Média dos resultados das análises de metais e semimetais realizadas em sedimentos para os metais pesados.	580
Tabela 138 – Porcentagem de ocorrência de cada elemento em comparação com os valores estabelecidos para os níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012.....	582
Tabela 139 – Resultados da concentração de metais nos sedimentos.	583
Tabela 140 – Concentrações dos sedimentos analisados no período chuvoso.....	585
Tabela 141 – Concentrações dos sedimentos analisados no período seco.....	585
Tabela 142 – Concentrações de metais das amostras analisadas.	587
Tabela 143 – Resultados das análises de metais em sedimentos.	589
Tabela 144 – Resultados das análises nas amostras de sedimentos.	591
Tabela 145 – Igeo para os elementos arsênio, cromo e cobre.....	602
Tabela 146 – Igeo para os elementos mercúrio, níquel e zinco.	604
Tabela 147 – Igeo para os elementos alumínio, ferro e manganês.....	605
Tabela 148 – FE para os elementos arsênio, cromo, cobre e mercúrio.	606
Tabela 149 – FE para os elementos manganês, níquel, ferro e zinco.....	607
Tabela 150 – Resultados das análises de metais em sedimentos.	609
Tabela 151 – Dados granulométricos das amostras.....	627
Tabela 152 – Dados granulométricos das amostras.....	628
Tabela 153 – Seleção de processos minerários com relevância em potenciais contaminantes.	633
Tabela 154 – Resultados obtidos para a caracterização química elementar por FRX da amostra 04, expressas na forma de óxidos.	640
Tabela 155 – Resultados obtidos para a caracterização química elementar por FRX da amostra 04A, expressas na forma de óxidos.	640
Tabela 156 – Resultados obtidos para a caracterização química elementar por FRX da amostra 05, expressas na forma de óxidos.	640
Tabela 157 – Resultados obtidos para a caracterização química elementar por FRX da amostra 06, expressas na forma de óxidos.	640
Tabela 158 – Caracterização química por ICP da amostra 04, 05 e 06 – parte 1.	641
Tabela 159 – Caracterização química por ICP da amostra 04, 05 e 06 – parte 2.	641
Tabela 160 – Localização dos pontos de coleta dos programas de monitoramento realizados na UHE Baguari, UHE Risoleta Neves e UHE Aimorés.	644
Tabela 161 – Lista de taxa de macroinvertebrados aquáticos com registro na área de passagem e deposição da lama antes do rompimento da barragem de Fundão.....	646
Tabela 162 – Classificação da qualidade de água segundo Junqueira et al. (2000) utilizando a pontuação do BMWP adaptado por Junqueira et al. (2000).....	652

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	45
1.1 Contextualização dos Ambientes Aquáticos Continentais	45
1.2 Importância dos Recursos Ambientais.....	47
2 AMBIENTE FLUVIAL	50
2.1 Hidrologia e Transporte de Sedimentos	50
2.1.1 Conceitos.....	51
2.1.1.1 Ciclo hidrológico.....	51
2.1.1.2 Vazão e curva de descarga.....	52
2.1.1.3 Curva de permanência	53
2.1.1.4 Vazões extremas	54
2.1.1.5 Ciclo hidrossedimentológico	55
2.1.1.6 Transporte fluvial de sedimentos.....	58
2.1.1.7 Medição do transporte de sedimentos.....	60
2.1.1.8 Cálculo da descarga sólida através de fórmulas.....	60
2.1.1.9 Distribuição dos sedimentos no tempo.....	65
2.1.1.10 Estimativa do assoreamento em reservatórios.....	66
2.1.2 Área de abrangência	67
2.1.3 Metodologia.....	67
2.1.4 Resultados.....	69
2.1.4.1 Análise pluviométrica.....	69
2.1.4.2 Análise fluviométrica	72
2.1.4.3 Análise hidrossedimentométrica	83
2.1.4.4 Geomorfologia fluvial	103
2.1.4.5 Estudos de modelagem hidrossedimentológica no rio Doce.....	110
2.2 Qualidade da Água.....	137
2.2.1 Área de abrangência	137
2.2.2 Metodologia.....	137
2.2.2.1 Programas de Monitoramento de Qualidade de Água (IGAM e IEMA)..	138
2.2.2.2 Estudos complementares	149
2.2.3 Resultados – Programas de Monitoramento de Qualidade de Água (IGAM e IEMA)	157
2.2.3.1 Resultados das variáveis físicas da água	157
2.2.3.2 Resultados das variáveis químicas da água (exceto metais e semimetais) ...	186
2.2.3.3 Resultados das variáveis químicas da água (metais e semimetais).....	270

2.2.3.4	Resultados das variáveis bacteriológicas da água.....	361
2.2.3.5	Variáveis de qualidade de água com maior número de não conformidades na região de estudo no período pré-desastre	367
2.2.3.6	Resultados dos ensaios de ecotoxicidade com <i>Ceriodaphnia dubia</i>	373
2.3	Fitoplâncton	380
2.3.1	Área de abrangência	380
2.3.2	Metodologia.....	381
2.3.3	Resultados.....	381
2.4	Zooplâncton	400
2.4.1	Área de abrangência	401
2.4.2	Metodologia.....	401
2.4.3	Resultados.....	401
2.5	Macrófitas Aquáticas	409
2.5.1	Área de abrangência	409
2.5.2	Metodologia.....	409
2.5.3	Resultados.....	410
2.5.4	Abordagem metodológica para linha-base pós-desastre	411
2.6	Ictiofauna	411
2.6.1	Área de abrangência	413
2.6.2	Metodologia.....	413
2.6.3	Resultados.....	415
2.6.3.1	Riqueza.....	415
2.6.3.2	Distribuição.....	417
2.6.3.3	Espécies raras e ameaçadas.....	420
2.6.3.4	Espécies introduzidas (exóticas).....	420
2.6.3.5	Pesca.....	420
2.7	Quelônios	429
2.7.1	Área de abrangência.....	430
2.7.2	Metodologia	430
2.7.3	Resultados	430
2.7.3.1	Distribuição das espécies segundo diferentes ecossistemas aquáticos .	433
2.8	Caracterização do Ambiente	434
3	RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS.....	440
3.1	Hidrologia e Transporte de Sedimentos.....	442
3.1.1	Conceitos.....	442

3.1.1.1	Estimativa do assoreamento através de métodos empíricos.....	443
3.1.1.2	Estimativa do assoreamento através do levantamento da batimetria ..	447
3.1.1.3	Reduzindo erros em levantamentos batimétricos	450
3.1.1.4	Implantação das seções de controle topobatimétricas	450
3.1.1.5	Estimativa do assoreamento através de modelagem computacional....	451
3.1.2	Metodologia.....	452
3.1.3	Resultados.....	453
3.1.3.1	UHE Risoleta Neves (antiga Candonga)	453
3.1.3.2	UHE Baguari	455
3.1.3.3	UHE Eliezer Batista (Aimorés).....	456
3.1.3.4	UHE Mascarenhas	459
3.2	Qualidade da água	463
3.2.1	Metodologia.....	463
3.2.1.1	UHE Risoleta Neves (Candonga).....	463
3.2.1.2	UHE Baguari	463
3.2.1.3	UHE Aimorés (Eliezer Batista).....	464
3.2.1.4	UHE Mascarenhas	465
3.2.2	Resultados.....	465
3.2.2.1	Reservatório da UHE Risoleta Neves (Candonga)	465
3.2.2.2	Reservatório da UHE Baguari.....	473
3.2.2.3	Reservatório da UHE Eliezer Batista (Aimorés)	482
3.2.2.4	Reservatório da UHE Mascarenhas.....	485
3.3	Fitoplâncton	492
3.3.1	Metodologia.....	492
3.3.2	Resultados.....	493
3.3.2.1	Avaliação do fitoplâncton no reservatório da UHE Risoleta Neves	493
3.3.2.2	Avaliação do fitoplâncton do reservatório da UHE Baguari.....	499
3.3.2.3	Avaliação do fitoplâncton no reservatório da UHE Eliezer Batista	508
3.3.2.4	Avaliação do fitoplâncton do reservatório da UHE Mascarenhas.....	516
3.4	Zooplâncton	521
3.4.1	Metodologia.....	521
3.4.2	Resultados.....	522
3.4.2.1	UHE Risoleta Neves (Candonga).....	522
3.4.2.2	UHE Baguari	525
3.4.2.3	UHE Eliezer Batista (Aimorés)	527

3.5 Ictiofauna	530
3.5.1 Metodologia.....	531
3.5.2 Resultados.....	531
3.6 Caracterização do ambiente	537
4 AMBIENTES LACUSTRES.....	539
4.1 Qualidade da água.....	542
4.1.1 Metodologia	542
4.1.2 Resultados.....	543
4.1.2.1 Lagoa Nova.....	543
4.1.2.2 Lagoa Juparanã	545
4.2 Fitoplâncton	548
4.2.1 Metodologia.....	548
4.2.2 Resultados.....	549
4.3 Ictiofauna	554
4.3.1 Metodologia.....	555
4.3.2 Resultados.....	555
4.4 Caracterização do Ambiente	559
5 ZONA BÊNICA	560
5.1 Qualidade dos Sedimentos.....	560
5.1.1 Área de abrangência	563
5.1.2 Metodologia.....	564
5.1.2.1 Dados anteriores ao rompimento da barragem.....	564
5.1.2.2 Caracterização preliminar do <i>background</i> geoquímico dos sedimentos e pontos de controle	568
5.1.2.3 Processos minerários	569
5.1.3 Resultados.....	570
5.1.3.1 Caracterização do <i>background</i> geoquímico dos sedimentos	570
5.1.3.2 Resultados dados anteriores ao rompimento da barragem	574
5.1.3.3 Análise granulométrica	626
5.1.3.4 Processos Minerários	630
5.1.3.5 Pontos de controle.....	637

5.2 Macroinvertebrados bentônicos.....	642
5.2.1 Área de abrangência	642
5.2.2 Metodologia.....	643
5.2.3 Resultados.....	643
5.2.3.1 Composição da comunidade antes do desastre.....	646
5.3 Caracterização do Ambiente	657
6 REFERÊNCIAS.....	659
7 APÊNDICES	684
7.1 Apêndice A – Análise pluviométrica	685
7.2 Apêndice B – Análise fluviométrica	691
7.3 Apêndice C – Análise sedimentométrica	777
7.4 Apêndice D - Medidas estatísticas e gráficos de distribuição dos dados físicos, químicos e microbiológicos da qualidade da água da região de estudo	791
7.5 Apêndice E – Procedimento de Coleta de Sedimentos de Corrente PEA – 413 ...	1002
7.6 Apêndice F – Estatística Descritiva	1007
7.7 Apêndice G – Gráficos de Dispersão dos Dados Analisados por Trecho.....	1011
8 ANEXOS.....	1017
ANEXO A - ENSAIOS DE FRX REALIZADO PARA AMOSTRA DE SEDIMENTOS LAMIR	1017
ANEXO B - ENSAIOS DE DRX REALIZADO PARA AMOSTRA DE SEDIMENTOS - LAMIR	1020
ANEXO C - ENSAIOS DE ICP- REALIZADO PARA AMOSTRA DE SEDIMENTOS - CONTROLE ANALÍTICO.....	1033
ANEXO D - PROCESSOS MINERÁRIOS.....	1052



1 INTRODUÇÃO

Considerando o trajeto percorrido pela lama de rejeitos, no presente volume buscou-se compilar informações pretéritas e caracterizar as condições em que os ambientes aquáticos continentais possivelmente afetados encontravam-se antes do desastre do rompimento da Barragem de Fundão na bacia hidrográfica do rio Doce. O objetivo, portanto, é o de apresentar a análise de dados primários e secundários, bem como o resultado de modelagens disponíveis na área de abrangência do estudo antes de 5 de novembro de 2015.

O relatório inicialmente define os ambientes e compartimentos analisados e os relaciona aos respectivos serviços ecossistêmicos. Posteriormente, são apresentadas as áreas de abrangência, as metodologias e os resultados inerentes a cada tema. Por fim, são analisadas as características de cada tema em conjunto, culminando na caracterização dos ambientes.

A divisão dos temas do diagnóstico relacionados à água em áreas continentais e áreas costeiras e marinhas é justificada pela diferença significativa desses ecossistemas em termos de dinâmica hidrológica, comunidades biológicas e de processos de mistura e dispersão do rejeito advindo do rompimento da barragem de Fundão, bem como em termos de características e resiliência dos ecossistemas. O volume intitulado “Revisão Linha-Base Ambientes Costeiros” contém informações e análises da região costeira e marinha.

Cabe destacar que com a revisão da linha-base algumas regiões anteriormente estudadas foram suprimidas. Isso porque se entendeu que essas regiões não fizeram parte do trajeto percorrido pela lama ou então não foram atingidas mesmo com o extravasamento da lama da calha dos corpos d’água afetados. Isso ocorreu, por exemplo, para as lagoas marginais do Parque Estadual do Rio Doce (PERD) do médio rio Doce. Por outro lado, novos tópicos foram adicionados na medida em que novos dados e informações foram encontrados ou recebidos. Pode-se citar nesse caso a inclusão de dados relacionados aos reservatórios hidrelétricos situados no rio Doce, que fizeram parte do trajeto da lama, bem como de lagoas no estado do Espírito Santo, que foram possivelmente atingidas pelas águas ainda alteradas do rio Doce na cheia ocorrida em janeiro de 2016.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS AMBIENTES AQUÁTICOS CONTINENTAIS

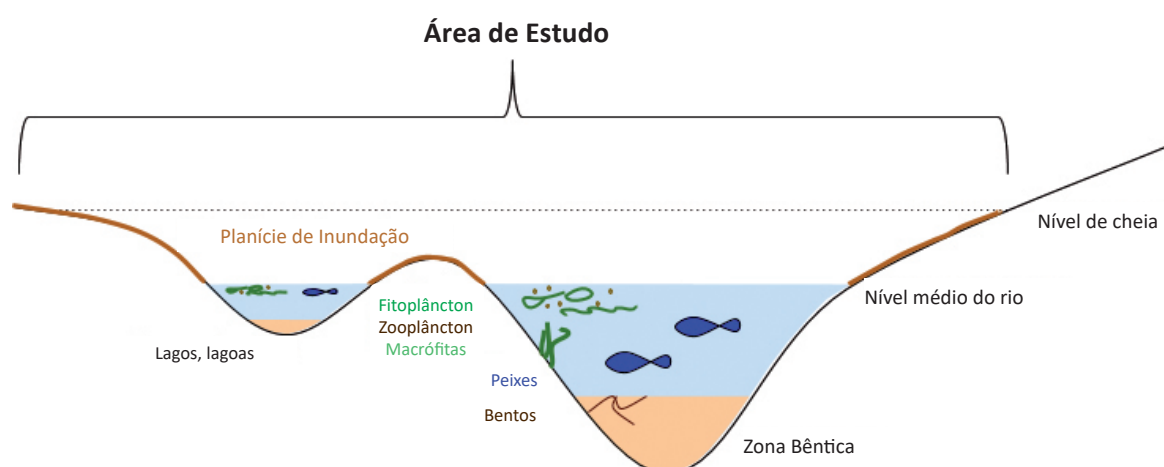
Os ambientes aquáticos continentais são definidos neste estudo como a massa de água doce sobre a superfície terrestre, isto é, rios, lagos, lagoas e reservatórios. Além disso, considerou-se a região que compreende os substratos não consolidados ou consolidados associados ao fundo do sistema aquático, definida como zona bêntica (ESTEVES, 2011).

As principais características dos ambientes aquáticos continentais estão relacionadas com as propriedades físico-químicas da água, como a alta solubilidade, o elevado calor específico, a alta tensão superficial, entre outras características. Essas características peculiares desempenham um papel fundamental para os organismos aquáticos e afetam sua variabilidade espacial e temporal, assim como definem as adaptações morfológicas e fisiológicas dos organismos aquáticos (ESTEVES, 1998; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008).

Em termos de escoamentos, os ambientes podem ser classificados em lótico e lântico. O sistema lótico é um ambiente que apresenta fluxo hídrico rápido, como rios, corredeiras, riachos e nascentes, já o sistema lântico é um ambiente normalmente estratificado com pouco ou nenhum escoamento, como lagos, lagoas e reservatórios (ESTEVES, 2011). Os reservatórios também podem ser considerados ecossistemas híbridos (rios/lagos) em função do gradiente longitudinal (THORNTON, 1990).

A extensão da área de estudo dentro do ambiente aquático continental foi composta, principalmente, pelos rios atingidos pela onda de rejeitos, assim como pelos ambientes aquáticos que compõem a planície de inundação desses rios (Figura 1). A composição da linha-base considerou, sempre que possível, os pontos dentro dessa região. Eventualmente, na ausência de dados próximos à área de passagem da onda de rejeitos ou para efeito de comparação, fez-se necessária a escolha de fontes de informação que estão fora da área de estudo. Por esse motivo, cada tema abordado teve sua área de abrangência particular apresentada e justificada, tendo sempre por objetivo ser consonante com a área atingida pela lama.

Figura 1 – Definição esquemática da extensão da área de estudo.



Em relação à coluna d'água, os temas estudados foram agrupados em ambientes fluviais, lacustres e reservatórios hidrelétricos. No tocante às águas fluviais relacionam-se os rios, que são cursos naturais de água doce, na maioria das vezes com canais definidos e fluxos permanentes ou sazonais, que migram em direção a um oceano, lago ou outro rio. Lagos têm por denominação genérica qualquer porção de água represada, circundada por terras, de ocorrência natural ou resultante da execução de obras, como barragens em curso de água ou escavação do terreno (ANA, 2015). Cabe destacar que os reservatórios hidrelétricos existentes no rio Doce, e que fizeram parte do trajeto da lama, serão tratados como um ambiente particular, visto que operam a fio d'água (ALIANÇA ENERGIA, 2018; CONSÓRCIO UHE BAGUARI, 2016; HOLOS, 2009; ANA, 2007), apresentando baixos tempos de residência, tendo muitas vezes o comportamento de um grande rio com velocidade reduzida.

Os temas abordados em relação a esses ambientes foram hidrologia, transporte de sedimentos e qualidade da água, além dos seguintes componentes da biota aquática: comunidade fitoplanctônica, comunidade zooplanctônica, macrófitas aquáticas, ictiofauna e quelônios. Destaca-se, contudo, que não foi possível estabelecer para todos os temas condições detalhadas de linha-base para os ambientes estudados em virtude da ausência de dados.

A zona bêntica é uma das regiões ecológicas de um corpo d'água, compreendendo o nível mais baixo desse ambiente, incluindo os sedimentos de fundo. Os sedimentos são constituídos por partículas de grande variedade de tamanhos, formas geométricas e composições químicas (MUDROCK; MACKNIGHT, 1994 apud POLETO; MERTEN, 2006), que cobrem o fundo dos rios, lagos e reservatórios. Desse modo, com a finalidade de se avaliar esse compartimento do ecossistema, foram estudados na zona bêntica os sedimentos de fundo em relação aos seus aspectos qualitativos e a comunidade de macroinvertebrados bentônicos, que são organismos aquáticos encontrados nesse substrato.

1.2 IMPORTÂNCIA DOS RECURSOS AMBIENTAIS

A água é um recurso natural renovável, porém finito, essencial à vida e ao equilíbrio ecológico do planeta (WHATELY; HERCOWITZ, 2008). A renovação da água se dá pelo ciclo hidrológico. Já a sua disponibilidade para manutenção da vida depende tanto de aspectos quantitativos quanto qualitativos da água.

A água doce e o ciclo hidrológico propiciam diversos serviços ecossistêmicos, que, embora sejam tão fundamentais, são frequentemente negligenciados (PRESCOTT CREEKS, 2012). Na Figura 2, estão listados alguns exemplos de serviços ecossistêmicos, de acordo com MEA (2005), FIS (2018), Landers e Nahlink (2013) e TEEB (2018).

Figura 2 – Serviços ecossistêmicos proporcionados por ambientes de água doce.



Na bacia do rio Doce, de acordo com Consórcio EcoPLAN-Lume (2010a), foram identificados os seguintes usos da água: irrigação, abastecimento público e industrial, dessedentação animal, geração de energia elétrica, mineração, turismo, lazer e conservação ambiental, no que tange à preservação

da vida silvestre. Apesar de não caracterizados diretamente na literatura, há que se considerar que os demais serviços ecossistêmicos listados na Figura 2 também eram prestados pela bacia do rio Doce.

Além dos usos e serviços ecossistêmicos prestados pelos ambientes aquáticos continentais, há que se considerar a importância da biota aquática, a qual é diretamente dependente da qualidade desse ambiente.

A comunidade de macrófitas constitui um importante componente dos corpos d'água, pois, além de contribuir para a estruturação do espaço físico, proporcionando locais de reprodução e refúgio para diversos organismos (AGOSTINHO; GOMES; JÚLIO JR., 2003; PELICICE; AGOSTINHO; THOMAZ, 2005), interfere na ciclagem de nutrientes e participa da base das teias alimentares como importante produtora dentro dos ecossistemas aquáticos.

As plantas aquáticas também desempenham funções-chave nos ciclos biogeoquímicos, como na produção de carbono orgânico e na mobilização de fósforo, influenciando diretamente a hidrologia e a dinâmica dos sedimentos através de seus efeitos sobre o fluxo de água dos ecossistemas de água doce (DEMARTY; PRAIRIE, 2009; ESTEVES; SUZUKI, 2010; MARINHO et al., 2010). Outro papel ecológico importante é o de agente filtrador e acumulador de materiais particulados, sedimentos e nutrientes, incluindo metais pesados retirados da coluna d'água e dos sedimentos (PEDRALLI; TEIXEIRA, 2003).

Os organismos planctônicos são aqueles incapazes de manter sua distribuição independentemente da movimentação das massas de água (YONEDA, 1999). O fitoplâncton é formado por microalgas fotossintetizantes encontradas em todos os ambientes aquáticos, servindo de fonte de energia para os organismos consumidores primários, decompositores e detritívoros (BARNES, 1980). O zooplâncton abrange a porção animal (metazoários) do plâncton, representado principalmente microcrustáceos (copépodes e cladóceros); rotíferos e protozoários (ALCARAZ; CALBET, 2003; TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008). A riqueza e distribuição desses organismos podem ser influenciadas por diversos fatores, como o fluxo da água, o substrato, a temperatura da água, o oxigênio dissolvido e a concentração de nutrientes (ALLAN; CASTILLO, 2007). Em razão disso, a comunidade planctônica apresenta um caráter muito dinâmico, respondendo rapidamente às alterações físicas e químicas do meio aquático e estabelecendo complexas relações na competição e utilização do espaço e dos recursos (VALIELA, 1995). Variações no regime meteorológico, características geomorfológicas regionais e impactos antropogênicos, estabelecem, em conjunto, o regime hidrográfico particular de cada região e, conseqüentemente, as características taxonômicas e a dinâmica espaço-temporal de suas comunidades planctônicas (BRANDINI et al., 1997; RENNELLA; QUIRÓS, 2006).

No ecossistema aquático, os macroinvertebrados bentônicos são importantes na dinâmica de nutrientes e no fluxo de energia (SILVEIRA, 2004; CALLISTO; ESTEVES apud MARQUES et al., 1999), pois reduzem o tamanho da matéria orgânica e participam do processo de sua decomposição transformando-a em energia. Atuam também na liberação de nutrientes do sedimento para a coluna d'água e no transporte de matéria orgânica a jusante (DEVÁI, 1990). Ainda, são importantes elos da cadeia trófica, com representantes intermediários da cadeia alimentar, se alimentando de algas e microrganismos aquáticos e constituindo fonte de alimento para outros macroinvertebrados aquáticos, anfíbios, répteis, aves, mamíferos e peixes (SILVEIRA, 2004).

Os macroinvertebrados bentônicos são também importantes indicadores biológicos da qualidade ambiental. As comunidades apresentam organismos de diversos níveis tróficos, que utilizam diferentes *habitats*, representando a diversidade ecológica do ambiente. São sensíveis aos impactos antrópicos, mas apresentam espécies resistentes, tornando o grupo excelente indicador de qualidade ambiental (CETESB, 2012). Qualquer alteração nas condições do ambiente aquático se refletirá nas estruturas das comunidades que ali habitam. Aliada a análises físico-químicas, a comunidade de macroinvertebrados é capaz de identificar alterações sutis no ambiente, mesmo longe da fonte de poluição (BUSS; BAPTISTA; NESSIMIAN, 2003), com a vantagem de permitir a identificação de alterações presentes, assim como as ocorridas no passado. De fato, os macroinvertebrados são o grupo mais utilizado em biomonitoramento de águas continentais em todo o mundo (BONADA et al., 2006; RESH, 2008).

Entre as vantagens da utilização do grupo em biomonitoramento, estão: facilidade de coleta (sem utilização de equipamentos onerosos); tamanho dos indivíduos (visíveis a olho nu) e geralmente de fácil reconhecimento; presença de grupos com diferentes tolerâncias a alterações ambientais; ciclo de vida relativamente longo, possibilitando a detecção de alterações pontuais ao longo do tempo (GHETTI apud MUGNAI; NESSIMIAN; BAPTISTA, 2010). Podem ser encontrados em todos os tipos de ambiente aquático, mas possuem mobilidade limitada, fazendo que sua presença ou ausência esteja intimamente associada às alterações das condições ambientais (BONADA et al., 2006; RESH, 2008).

Com relação à ictiofauna, o monitoramento dos padrões biológicos e ecológicos das espécies de peixes é uma importante ferramenta para a identificação de impactos e danos ambientais (WHITFIELD; ELLIOTT, 2002). A composição e a estrutura funcional das comunidades podem funcionar como indicadores biológicos, pois suas variações se correlacionam com determinados fatores e eventos ambientais, expressando sintomas particulares (respostas), geralmente de forma qualitativa, que podem indicar mudanças quando seus habitats são modificados (POMPEU et al., 2005; CASATTI et al., 2006).

Os quelônios desempenham importantes papéis nas cadeias alimentares nos ambientes em que habitam, podendo atuar como consumidores primários, no caso de espécies que se alimentam de vegetais, até serem consumidoras de níveis tróficos superiores, predando invertebrados, peixes, anfíbios, répteis e até mesmo filhotes de mamíferos e de aves, atuando, assim, parcialmente no controle de populações de tais grupos. Há, ainda, espécies que se alimentam de animais mortos, participando, dessa forma, da ciclagem de nutrientes nos ambientes. Em função de todos esses tipos de hábito, os quelônios podem acumular toxinas provenientes dos componentes de sua dieta em seus tecidos, fornecendo informações sobre a qualidade ambiental (WYNEKEN; GODFREY; BELS, 2007).

2 AMBIENTE FLUVIAL

Neste item são apresentadas as informações referentes ao ambiente fluvial afetado pelo desastre, ou seja, os córregos e rios, sobre os temas hidrologia, transporte de sedimentos e qualidade da água, além da biota aquática (comunidades fitoplanctônica, zooplanctônica, macrófitas aquáticas, ictiofauna e quelônios) no tocante à área de abrangência, metodologia e resultados inerentes a cada tema. Ao final deste item é apresentado o capítulo de caracterização do ambiente.

2.1 HIDROLOGIA E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Conforme Tucci (2001, p. 25), a hidrologia é a ciência que:

estuda a água na Terra, sua **ocorrência, circulação, distribuição**, suas **propriedades físicas e químicas** e **sua relação com o meio ambiente**. É uma ciência que está voltada para a representação dos processos físicos que ocorrem na **bacia hidrográfica**, baseando-se na observação dos processos envolvidos.

Após o rompimento da barragem de Fundão, 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.

As principais características hidrológicas e de transporte de sedimentos da bacia do rio Doce são apresentadas nesta seção. Os seguintes tópicos são abordados: regime de precipitação, regime de vazões, transporte de sedimentos típicos, modelagem hidrossedimentológica, morfologia fluvial e nascentes.

A importância do conhecimento da hidrodinâmica e morfologia dos corpos hídricos e do volume e distribuição tempo-espacial dos sedimentos depositados nos reservatórios, leito dos rios, planícies de inundação, áreas estuarina e costeira, bem como a dispersão da pluma formada, está diretamente relacionada aos seguintes aspectos:

- a pluma e depósito de sedimentos interferem no meio ambiente causando prejuízo à beleza cênica, à qualidade ambiental e à biota aquática (morte por: asfixia, soterramento, contaminação por poluentes carreados, diminuição de fonte alimentar etc.);
- a pluma e depósito de sedimentos resultam na diminuição de luminosidade dentro do ambiente aquático e na redução da fotossíntese (em maior ou menor grau se estiverem ou não associados a poluentes);
- a camada laminar de sedimentos depositada sobre o fundo afeta diversas biotas, especialmente organismos bentônicos, zoo e fitoplâncton;
- a camada laminar de sedimentos depositada sobre o fundo causa o comprometimento de fonte energética para teias tróficas aquáticas através do soterramento de matéria orgânica

proveniente das adjacências do corpo d'água, tal como folhas, a qual é processada no fundo dos rios (IBAMA, 2015);

- dispor da ordem de grandeza dos volumes sedimentados e da dispersão das plumas poderá auxiliar na extrapolação dos resultados amostrais das diversas áreas.

Conforme citado em Ibama (2015), os efeitos sobre a biodiversidade aquática podem variar conforme o nível trófico e fisiologia dos organismos. E, ainda, as consequências à comunidade aquática dependem da permanência dos sedimentos no ambiente, da resiliência dos produtores primários afetados e da importância dessa produção endógena na cadeia trófica aquática como um todo. Logo, é importante determinar, ainda que por meio de simulações de cenários futuros, como será a distribuição dos depósitos de sedimentos ao longo dos corpos hídricos e seu comportamento ao longo do tempo, visto que os processos de erosão e de assoreamento são de natureza dinâmica, variável ao longo do tempo, sendo que a etapa do ciclo hidrológico (estação climatológica) ajuda a intensificar um ou outro processo.

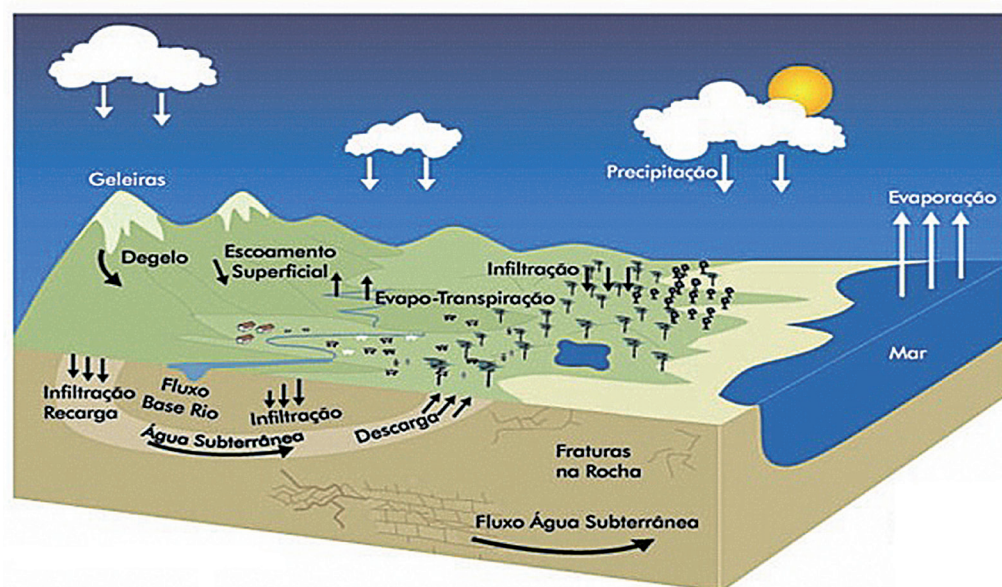
2.1.1 CONCEITOS

2.1.1.1 Ciclo hidrológico

A água é um mineral presente em toda a natureza nos estados sólido, líquido e gasoso, existindo em praticamente todo o planeta: na atmosfera, na superfície dos continentes, no subsolo e nos oceanos. Além de ser essencial para a sobrevivência de homens e animais, a água pode exercer a função de receber, diluir e transportar efluentes. A água é considerada um recurso natural peculiar, pois se renova pelos processos físicos do ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico se constitui no contínuo processo de circulação da água e pode ser representado de forma simplificada pela Figura 3.

Figura 3 – Representação do ciclo hidrológico.



Fonte: mmA 2018.

Conforme Santos et al. (2001), um fator particularmente importante na recuperação do meio ambiente de impactos sofridos é o tempo de residência, definido como a razão entre o volume de água e o fluxo para uma dada parcela do ciclo hidrológico. Verifica-se que esse tempo é de alguns dias para a atmosfera e águas superficiais com fluxo contínuo, e de muitos anos para a água subterrânea e os oceanos.

No ciclo hidrológico é de especial interesse a parcela “terrestre”, retirando o foco da atmosfera e oceanos. Para fazer o estudo dessa parcela do ciclo, pode-se fazer uso da unidade espacial natural da hidrologia, representada pela bacia hidrográfica, a qual é definida como a superfície limitada por um contorno, dentro do qual toda a água precipitada, excluindo o que é evaporado, infiltrado ou retido, escoar para um mesmo ponto, denominado exutória da bacia hidrográfica.

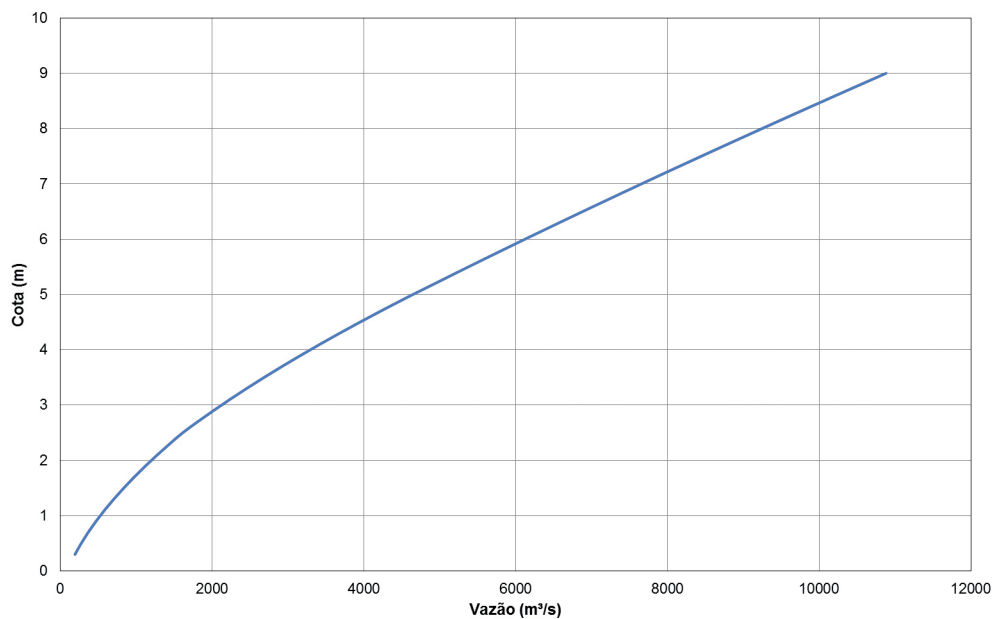
2.1.1.2 Vazão e curva de descarga

A variável hidrológica de interesse final no presente trabalho é a vazão, ou descarga líquida, dos cursos d’água. A vazão corresponde ao volume de água que passa em determinada seção na unidade de tempo. O monitoramento dessa variável hidrológica auxilia na avaliação da disponibilidade hídrica, estudos de eventos críticos como estiagem e cheias, estudos de cotas de inundação, dimensionamento de obras hidráulicas etc.

A vazão de um rio pode ser medida por meio da determinação da velocidade de escoamento, visto que as duas grandezas se relacionam diretamente. A medição de vazão trata-se de um procedimento dispendioso e de logística trabalhosa para que seja realizada continuamente. Logo, são realizadas campanhas esporádicas de medição de vazão, com medição simultânea do nível de água (cota) do rio. O conjunto de pontos cota/vazão permite o estabelecimento de uma relação denominada curva de descarga.

A curva de descarga, ou curva-chave, é uma forma eficiente de obter uma série de vazões em função dos níveis de água que são comumente monitorados de forma contínua, considerando diferentes discretizações de tempo: diária, horária, a cada 15 minutos etc. Quando a vazão não depender de outros fatores, como remanso de marés ou de outros rios e variações sensíveis na declividade da linha de água, a relação cota/vazão é estável e confiável.

A Figura 4 apresenta de forma ilustrativa a curva de descarga da estação Colatina (código ANA: 56994500), situada no rio Doce drenando uma área de 76.400 km².

Figura 4 – Curva de descarga da estação Colatina (código 56994500).

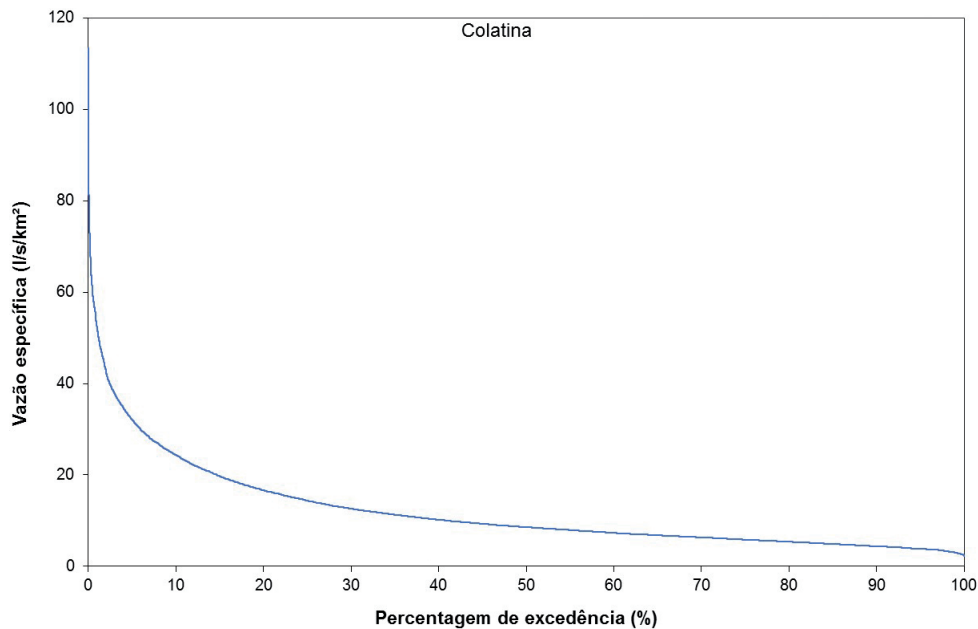
2.1.1.3 Curva de permanência

A curva de permanência expressa a relação entre a vazão e a frequência com que essa vazão é superada ou igualada. A curva de permanência é obtida sobre a série histórica de dados, os quais são classificados de forma a estabelecer as percentagens de ocorrências em que a vazão é maior ou igual ao valor especificado.

A curva de permanência se constitui em uma das análises estatísticas mais simples e mais importantes na hidrologia, auxiliando na análise dos dados de vazão com relação a perguntas como: “O rio tem uma vazão aproximadamente constante ou é extremamente variável?”; “Qual é a porcentagem do tempo em que um rio tem vazão suficiente para atender à determinada demanda?”. Além disso, a curva de permanência é útil para diferenciar o comportamento de rios e para avaliar o efeito de modificações, como desmatamento, reflorestamento, implantação de obras hidráulicas, retirada de água, e, até mesmo, para avaliar impactos causados por desastres, tal como o ocorrido na bacia do rio Doce.

A Figura 5 ilustra a curva de permanência de vazões médias diárias da estação Colatina (código ANA: 56994500).

Figura 5 – Curva de permanência da estação Colatina (código 56994500).



2.1.1.4 Vazões extremas

Estiagens e enchentes são consideradas eventos hidrológicos extremos. Normalmente, a ocorrência desses eventos causa transtornos à população e, por vezes, ao meio ambiente em geral, e, portanto, o estudo do seu risco de ocorrência ajuda no gerenciamento dos recursos hídricos e estudo de ferramentas que minimizem os impactos negativos (planejamento do uso da água, instituição de medidas de controle ou previsão de enchentes etc.).

A aleatoriedade intrínseca dos fenômenos hidrológicos, especificamente as vazões extremas, proporciona a utilização de ferramentas estatísticas para descrever essa variável. Uma dessas ferramentas é a análise de frequência de vazões extremas. O ciclo hidrológico tem uma periodicidade anual e é, portanto, comum a análise da vazão extrema dentro do ano para descrever esses tipos de evento.

No caso da vazão de enchente, a frequência que certa vazão ocorre com magnitude maior ou igual a certo valor pode ser determinada estatisticamente por meio de dados históricos. Daí vem o conceito de Tempo de Recorrência ou Tempo de Retorno (TR), que é o período esperado (estimado) em anos que certa vazão vai repetir ou superar. Assim, o TR é também o inverso da probabilidade de a vazão igualar ou superar certo valor.

As vazões máximas históricas (obtidas do monitoramento do corpo hídrico) são ajustadas a distribuições de probabilidades. Existem diversas distribuições de probabilidades que podem ser utilizadas para análise de eventos extremos de cheia. Com a utilização das distribuições de probabilidades, é possível obter a probabilidade da ocorrência de vazão igual ou superior a qualquer valor. Por exemplo, se uma vazão de 200 m³/s tem um TR = 100 anos, significa que, em média, vazões máximas anuais iguais ou superiores a 200 m³/s ocorrem a cada 100 anos ou, ainda, a probabilidade de ocorrência dessa vazão ou superior é de 1% (1/100 = 0,01). Os valores de TR são importantes para estudos de cheias e inundações a fim de associá-las a riscos de ocorrência.

As vazões máximas consideradas nesses estudos são as vazões instantâneas que diferem da vazão máxima diária (média do dia em que ocorreu a maior vazão). Como o valor da máxima vazão média diária monitorada se refere normalmente à média entre duas leituras, é necessário utilizar um método que estime o pico da vazão no dia. Duas equações bastante comuns para estimar a vazão instantânea são as de Sangal (1983) e a de Fuller (1914). A primeira utiliza dados de vazão diária do dia anterior e posterior ao evento de máxima, e a segunda, a área de drenagem da bacia hidrográfica. Ambas as equações foram obtidas empiricamente.

No caso de eventos de estiagem, a periodicidade anual e o tempo de recorrência também são conceitos utilizados na análise das vazões mínimas. Nesse caso, porém, é importante também considerar a duração de tais eventos, visto que, ao contrário das cheias, os eventos de seca têm duração de semanas a meses e esse fator também descreve sua criticidade. Como exemplo, podemos considerar que uma vazão de estiagem de valor não tão severo, mas com duração muito longa, pode ser mais crítica que uma vazão mínima ainda menor, porém de curta duração. Por isso, no caso dos eventos de estiagem, teremos associados ao valor da vazão mínima um TR e um tempo de duração.

O tempo de duração da estiagem mais comumente estudado é de 7 dias. Isso porque o parâmetro $Q_{10,7}$ (vazão mínima para seca de 7 dias de duração e TR de 10 anos) é geralmente relacionado a equações que dimensionam a mínima vazão necessária para a vida aquática e, conseqüentemente, à liberação de outorga de empreendimentos de obras que envolvem os rios.

Essa vazão de estiagem $Q_{10,7}$ é estimada por meio de um estudo estatístico de vazões mínimas médias móveis para duração de 7 dias, selecionadas em cada ano, a partir da série histórica de vazões diárias. Essa série de vazões de estiagem são normalizadas e ajustadas a distribuições de frequência. As mais comuns são Galton, Log-Gumbel, Weibull e Log-Pearson Tipo III. A escolha entre elas é realizada por meio de testes de ajustes, como, por exemplo, os testes de Máxima Verossimilhança e Método dos Momentos.

2.1.1.5 Ciclo hidrossedimentológico

A água precipitada na bacia hidrográfica tenderá a se mover rumo à saída desta, fluindo sobre (e dentro de) os solos que revestem as vertentes e as calhas da rede de drenagem. Os obstáculos que encontra determinam os caminhos que ela segue e a velocidade com que se desloca. Nesse trajeto, a água remove e transporta partículas sólidas rio abaixo, dissipando boa parte da energia de que está provida (BORDAS; SEMMELMANN, 1993). No presente trabalho, normalmente, é utilizado o termo “sedimentos” para definir essas partículas sólidas, cuja definição está formalmente detalhada no capítulo de Qualidade dos Sedimentos (item 5.1).

A formação do material intemperizado na bacia hidrográfica e seu transporte até os rios é conseqüência da interação dos fatores hidrológicos, sendo os mais importantes a quantidade e a distribuição da precipitação, a estrutura geológica e pedológica, as condições topográficas e a cobertura vegetal, entre outros. Os processos sedimentológicos fluviais incluem remoção, transporte e deposição das partículas, envolvendo toda a dinâmica da bacia de drenagem. Os deslocamentos dos sedimentos carregados pelo escoamento superficial acabam provocando a redistribuição pela bacia de ponderáveis



massas de partículas sólidas, a ponto de poderem alterar o ciclo hidrológico e afetar o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos (BORDAS; SEMMELMANN, 1993).

O material intemperizado formado na bacia hidrográfica pode ser definido como erosão bruta ou perda de solo. Nem toda a quantidade de material disponibilizado na erosão bruta formada na bacia chegará ao exutório da bacia. A parcela que atinge o exutório, ou seja, a quantidade de sedimentos que é removida para fora de uma bacia hidrográfica ou de uma área considerada, pode ser definida como produção de sedimentos e, segundo Silva et al. (2009 apud SILVA, 2015), depende de vários fatores, como: forma da encosta; distância que percorre o fluxo entre a fonte e seu exutório; porcentagem de cobertura vegetal no caminho percorrido pelo fluxo entre a área fonte e a saída da bacia; e textura do material de solo erodido. A produção de sedimentos representa uma parcela do total do material que foi erodido na bacia vertente e no canal fluvial (erosão bruta) e transferido até uma determinada seção do canal fluvial. Em termos quantitativos, a produção de sedimentos é a diferença entre a erosão bruta e a quantidade de sedimentos depositada nas encostas, depressões e canais da bacia vertente de uma determinada seção do canal fluvial que está sendo analisado (WALLING, 1983 apud MINELLA; MERTEN, 2011).

A razão entre a produção de sedimentos no exutório e a erosão bruta na bacia é conhecida como taxa de emissão, entrega ou transferência de sedimentos. Alguns autores, como Vanoni (1975) e Walling (1983, 1990 apud MINELLA; MERTEN, 2011), estabeleceram um conceito empírico para estimar a taxa de emissão de sedimentos, a qual pode variar entre 0 a 1. Esses autores concluíram que, quanto maior a área de drenagem de uma bacia, menor é o valor da taxa de transferência de sedimentos. Logo, uma grande bacia tem maior possibilidade de possuir mais barreiras naturais, por exemplo, depressões, que propiciem a retenção de sedimentos.

Vanoni (1975) é um trabalho de referência na análise da relação entre a taxa de entrega e as características geomorfológicas de uma bacia hidrográfica. A referida pesquisa concluiu que a concentração de sedimentos nos cursos d'água apresenta comportamento diferenciado quando se compara eventos ocorridos em regiões semiáridas com de clima úmido. Por meio desses estudos foi estabelecida uma equação empírica para estimar a taxa de emissão de sedimentos, dada por:

Onde:

$$TES = 0,473 \cdot A^{-0,125}$$

TES – Taxa de Emissão de Sedimentos (adimensional);

A – área de drenagem da bacia (Mi²).

Didoné (2013) frisa que a taxa de entrega de sedimentos ocorre de forma distinta e de maneira heterogênea. Ao longo do tempo, as alterações nos usos do solo podem proporcionar um aumento na erosão bruta influenciando também no valor da taxa de transferência de sedimentos.

Segundo Santos et al. (2001), os mecanismos determinantes dos processos sedimentológicos fluviais estão relacionados às condições ecológicas reinantes nas bacias hidrográficas e, em muitos aspectos, podem derivar de ações antrópicas, causando prejuízos como os relacionados a seguir: (i)

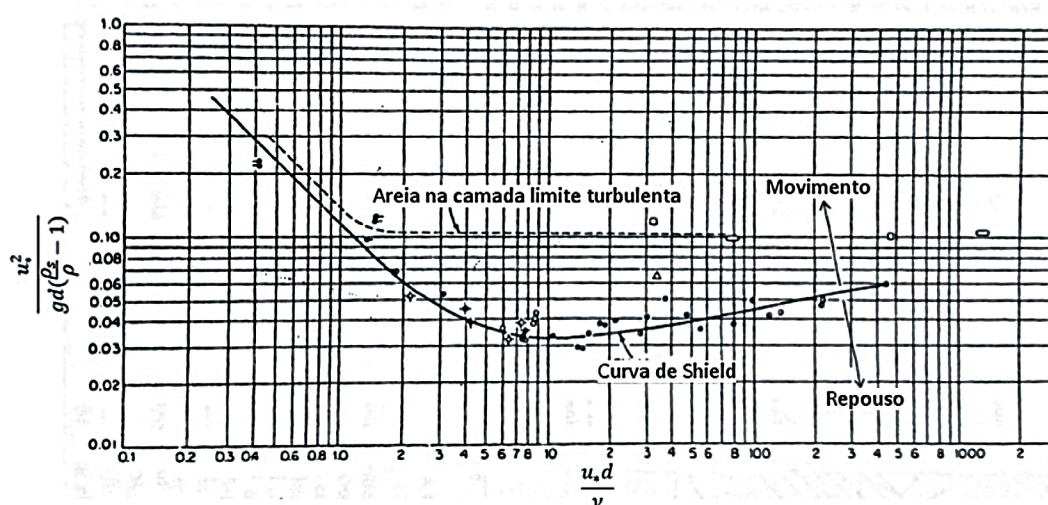
remoção intensa de solos, fertilizantes e pesticidas das vertentes, intensificada, principalmente, por práticas agrícolas inadequadas; (ii) perdas de produção agrícola decorrentes do recobrimento de áreas agricultadas por sedimentos estéreis e do encharcamento destas, resultante da obstrução de drenos naturais; (iii) assoreamento de reservatórios causando custos extras na geração de energia e/ou sua inviabilidade; (iv) deterioração de sistemas de irrigação e de drenagem; (v) assoreamento ou erosão nas vias navegáveis e portos; (vi) degradação de água para uso industrial e doméstico; (vii) erosão em rodovias, ferrovias e oleodutos; (viii) sedimentação de áreas atingidas por inundações; e (ix) alteração das condições físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos.

Nota-se a complexidade e importância da compreensão dos processos de produção, transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas. A ocorrência dos impactos apontados anteriormente tem levado pesquisadores e a própria sociedade a dar mais importância aos problemas decorrentes das alterações do ciclo hidrossedimentológico natural.

A dinâmica do transporte fluvial de sedimentos está diretamente ligada com as flutuações turbulentas de velocidade das águas. A Figura 6 mostra o diagrama de Shields que inter-relaciona a tensão tangencial crítica de arraste, diâmetro da partícula, densidade da partícula e do fluido, viscosidade do fluido e velocidade de corte. As configurações de parâmetros que se localizam acima da linha indicam que o sedimento do fundo está em movimento e, abaixo, em repouso.

Dado que a velocidade e a constituição do material particulado variam ao longo de um canal, é de se esperar que ao longo deste, bem como no decorrer do tempo, ocorram alterações nos processos associados aos sedimentos (erosão, transporte ou deposição). Até mesmo em uma mesma seção transversal podem ocorrer simultaneamente os diversos processos, pois, além da velocidade variar ao longo da seção, varia também a granulometria do material que está sendo transportado.

Figura 6 – Diagrama de Shields – parâmetro de Shields contra número de Reynolds de corte da partícula.



Fonte: Graf (1984, página 96).

Importante ressaltar que a capacidade de erosão das margens e fundo de um rio, bem como o transporte e deposição de sedimentos de um sistema fluvial, reflete uma condição estável (equilibrada) do canal natural. As modificações externas impostas a esse sistema rompem com essa estabilidade,

refletindo em alterações das condições de erosão, transporte e deposição. Entretanto, mesmo após essas alterações, o sistema fluvial vai tender a uma nova condição de equilíbrio (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Conforme Fernandez (1990 apud COELHO, 2007), o ajuste de estabilidade pode ser de curto, médio (alguns a dezenas de anos) ou longo prazo (centenas a milhares de anos). Pode-se dizer que uma bacia hidrográfica submetida a diversos impactos pela alteração de seus usos, por implantação de obras em seus cursos d'água ou próximo a eles, constitui-se em um sistema dinâmico em constante busca de sua estabilidade.

2.1.1.6 Transporte fluvial de sedimentos

A sedimentometria trata da medida da quantidade de sedimentos transportados pelos rios. A carga de sedimentos dos cursos d'água é uma mistura de partículas de várias espécies, tamanhos e formas. Mecanicamente, a espécie da partícula exprime-se pela sua densidade, o tamanho pelo seu diâmetro maior e a forma pelo coeficiente de esfericidade (CHRISTOFOLETTI, 1981).

O termo “descarga sólida” ou “descarga de sedimentos” é definido como a massa total de sedimentos que passa em uma seção transversal do rio por unidade de tempo, geralmente expressa em toneladas por dia (VANONI, 1975). No processo de transporte fluvial de sedimentos, pode-se distinguir três tipos de carga: dissolvida, em suspensão e do leito. No jargão técnico, a soma da carga de sedimentos em suspensão e dissolvida e, na maioria das vezes, é designada como “sólidos suspensos totais”. As partículas de granulometria reduzida, como silte, argila e algumas granulometrias de areia, são pequenas o suficiente para que sejam transportadas pelo fluxo turbulento misturadas à água na forma de uma solução heterogênea, constituindo a carga de sedimentos em suspensão. A distinção entre carga em suspensão e carga do leito baseia-se mais no mecanismo de transporte do que no tamanho da partícula. Por exemplo, partículas transportadas em suspensão em um rio de alta declividade podem constituir carga do leito para rios de planície (SANTOS et al., 2001; CARVALHO, 2008).

A carga dissolvida está associada às características químicas da água, muitas vezes, conferindo odor e sabor a ela, enquanto a carga em suspensão tem maior participação nas características físicas da água. Tanto o escoamento subterrâneo quanto o superficial podem transportar carga dissolvida. O escoamento subterrâneo transporta em solução química constituintes intemperizados das rochas. Já o escoamento superficial pode, por exemplo, contribuir com carreamento de fertilizantes. A relação entre a concentração de sólidos dissolvidos e a vazão é geralmente de forma inversa, pois, normalmente, a maior parcela de carga dissolvida deve-se à contribuição do escoamento subterrâneo, cuja concentração não aumenta em eventos de vazões elevadas. Existe ainda o aporte de cargas dissolvidas em função de fontes poluidoras pontuais, geralmente industriais, que lançam uma variada gama de materiais dissolvidos nos rios, lagos e estuários. Também nesse caso, sendo o aporte de materiais dissolvidos constante, a concentração no rio varia inversamente com a vazão.

Segundo Carvalho (2008), as cargas dissolvidas ou os resíduos filtráveis são a porção dos sólidos totais que passa por filtro de porosidade de 1,2 mm. A carga dissolvida pode representar uma parcela importante da descarga sólida. Estudos realizados na América do Norte indicam que alguns rios carregam, em média, maior quantidade de matéria dissolvida do que de partículas em suspensão

(GUY, 1970). Para as bacias hidrográficas nacionais, no entanto, normalmente a parcela de sólidos suspensos em rios é mais representativa que a de sólidos dissolvidos (CARVALHO, 2008).

O material em suspensão é a fração do material carregado em que as forças provocadas pela ação da turbulência do fluido superam a ação da gravidade impedindo a deposição das partículas (SANTOS et al., 2001). Dessa maneira, a carga em suspensão é carregada praticamente na mesma velocidade do fluxo. Quando a turbulência diminui até um valor que não há mais energia para manter as partículas suspensas, elas se precipitam seguindo uma hierarquia em função da densidade e do tamanho. Por esse motivo, a deposição (sedimentação) é mais intensa em trechos de águas mais calmas ou em lagos (CARVALHO, 2008). As mensurações e observações realizadas nos cursos de água mostram que há certa correlação entre a concentração do material em suspensão e o valor da vazão para uma mesma seção transversal. Isso se deve ao fato da carga detrítica não provir somente da ação abrasiva do rio sobre o fundo e as margens, mas principalmente da lavagem sobre o solo efetuada pelo escoamento superficial (YANG, 1996; SANTOS et al., 2001; CARVALHO, 2008).

Segundo Carvalho (2008), a carga do leito do rio é composta por partículas de granulometria maior, como as areias e cascalhos, que permanecem junto ao fundo do canal e são transportadas por meio da saltação e do arraste, sendo este por deslizamento ou rolamento na superfície do leito sob o efeito da tensão tangencial exercida pelo fluido em movimento sobre o fundo. Nesse processo, os fragmentos vão sendo transportados sempre em contato com a superfície do leito. As partículas em saltação se localizam nas proximidades do leito, formando uma camada adjacente a este, que funciona como uma faixa transicional entre a carga do leito, sempre em contato com o fundo, e as partículas transportadas em suspensão (SANTOS et al., 2001). De maneira geral, quanto maior a carga transportada pelo rio e maior a granulometria do material, maior será o volume transportado junto ao leito. Em rios com sedimentos compostos predominantemente de areia e cascalho, a carga do leito pode atingir valores elevados, chegando a ultrapassar 50% do volume total transportado. Devido ao seu maior volume e à densidade das partículas que se concentram próximo ao leito e à reduzida velocidade da água nessa região da seção, a velocidade da carga do leito é muito mais lenta que a velocidade média do fluxo observada na seção. Além disso, as partículas do leito podem se deslocar de modo intermitente.

Os sedimentos transportados como carga do leito sofrem a abrasão e a redução do tamanho das partículas por meio de processos mecânicos, como choques e atritos, e o selecionamento resultante do transporte diferencial das partículas de tamanhos diferentes. Isso explica, em grande parte, a diminuição da granulometria do material aluvial em direção a jusante. O “seixo rolado”, por exemplo, constitui um formato típico desse material que sofreu o efeito da abrasão durante o transporte (SANTOS et al., 2001).

Para estudos de assoreamento em específico, normalmente, a parcela mais importante corresponde à dos sedimentos em suspensão e de arraste. No caso de reservatórios, por exemplo, a maioria dos sedimentos dissolvidos passa diretamente pelo vertedor ou pelas turbinas, não alterando as características físicas da água e não se constituindo majoritariamente em material disponível para deposição.

2.1.1.7 Medição do transporte de sedimentos

A medição do transporte de sedimentos objetiva determinar a descarga sólida, ou seja, a quantidade de sedimentos que passa em uma seção transversal por unidade de tempo. Embora não exista uma separação clara entre as cargas do leito (arraste e saltação) e cargas em suspensão (suspensão e dissolvida), divide-se a descarga sólida total em descarga sólida do leito, descarga sólida em suspensão e descarga sólida dissolvida. As descargas sólidas em suspensão e dissolvidas são tratadas, frequentemente, em conjunto e a soma é designada como “sólidos totais em suspensão” (SANTOS et al., 2001).

De acordo com Carvalho (2008), a finalidade da amostragem é definir a tipologia e/ou a concentração do material que é transportado no momento da medição do transporte de sedimentos. Devido às diferenças nas características de transporte do sedimento em suspensão e de fundo, as suas obtenções resultam medições distintas, com equipamentos e técnicas de amostragem também diferentes (SANTOS et al., 2001).

Vale lembrar que toda medição completa de descarga sólida é precedida de uma medição de descarga líquida, a qual fornece informações que orientam os procedimentos adotados no processo de amostragem e alguns parâmetros a serem utilizados quando houver a necessidade de aplicação de determinadas fórmulas que estimam a vazão sólida total. Além disso, a vazão líquida é utilizada no próprio procedimento de cálculo da descarga sólida, pois esta é obtida multiplicando a concentração de sedimentos na amostra pela vazão líquida.

A partir da amostragem da carga sólida do leito, é necessário calcular o seu valor final de descarga. Nesse cálculo, deve-se considerar a área de captação do bocal, o peso seco do material amostrado, o tempo de amostragem e a eficiência do amostrador, além das informações relativas à geometria da seção de medição (CARVALHO, 2008).

Existem vários instrumentos e técnicas para medir sedimentos, os quais futuramente deverão ser detalhados conforme métodos a serem adotados para realizar as medições planejadas para o presente estudo. Além de Carvalho (2008), diversos outros trabalhos são considerados boas referências para descrição desses instrumentos e técnicas, tais como: Anderson (2005), ASTM International (2007), Carvalho et al. (2000), Davis (2005) e Edwards e Glysson (1999).

2.1.1.8 Cálculo da descarga sólida através de fórmulas

A forma mais precisa de se determinar a descarga sólida total é por meio da realização de medições diretas, como descrito no item anterior (SANTOS et al., 2001; CARVALHO, 2008). Porém, por se tratarem as medições de processos dispendiosos, demorados e de logística complicada, muitas vezes não é possível medir diretamente a descarga sólida ou se realiza apenas uma das duas medições, suspensão ou arraste. Nesse caso, faz-se necessário lançar mão de fórmulas semiempíricas para determinar as parcelas faltantes, as quais usam informações auxiliares, como: concentração, granulometria do material em suspensão, natureza e granulometria do material de fundo e informações relativas às condições de escoamento na seção de medição (YANG, 1996).

Vários são os métodos para calcular a descarga sólida. Não há um método que possa ser considerado definitivo ou mais adequado. Cada caso deve ser estudado isoladamente e os métodos devem ser criticados individualmente.

Os métodos diferenciam-se pelas características de movimentação das partículas encontradas no rio, e, portanto, estão divididos em dois grupos: material do leito e transporte de fundo. A diferença entre os dois grupos é bastante tênue. Os métodos para o cálculo da descarga sólida do leito (material do leito) consideram que o material do leito se movimenta como carga de arrasto e como carga saltante, incorporando-se também ao material em suspensão, sendo consideradas normalmente partículas maiores que argila e silte (CARVALHO, 2008). Portanto, esses métodos excluem a descarga de material fino. Alguns métodos desse tipo são: Colby, Engelund e Hansen, Ackers e White, Yang, Laursen e Toffaleti.

No caso dos métodos para o cálculo da descarga sólida de arrasto (transporte de fundo), considera-se a carga sólida em contato permanente com o leito, rolando ou deslizando, e partículas que saltitam bem próximas ao leito. São exemplos desse método: Meyer-Peter e Muller, Schoklitsch, Einstein-Brow, Kalinske e Rottner.

A Tabela 1, a seguir, foi reproduzida de Okawa, Manassés e Nagashima (1997) e ilustra os dados requeridos para os cálculos dos seguintes métodos: Ackers e White, Yang, Engelund e Hansen, Schoklitsch, Meyer-Peter e Muller, Colby e Kalinske.

Tabela 1 – Dados requeridos para cálculo por diversas fórmulas.

Variáveis medidas	Método						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Vazão líquida		X			X	X	
Largura da seção	X	X	X				X
Profundidade média	X		X	X	X	X	X
Velocidade média	X		X	X	X	X	X
Declividade da linha de energia	X	X		X	X	X	X
Concentração sedimentos em suspensão			X			X	
Curva granulométrica material leito	X	X		X	X	X	X
Temperatura da água					X	X	
Massa específica da água	X				X		
Peso específico da água	X				X		X
Peso específico material do leito	X				X		X
Viscosidade cinemática					X	X	
Velocidade de queda						X	

Nota: (1) Meyer-Peter e Muller; (2) Schoklitsch; (3) Colby; (4) Kalinske; (5) Ackers e White; (6) Yang; (7) Engelund e Hansen.

Fonte: Okawa, Manassés e Nagashima (1997).

Segundo Carvalho (2008), os três métodos mais populares no meio técnico brasileiro são Colby, Einstein e Meyer-Peter e Muller. Um levantamento feito até 1973 por Alonso (1983 apud MORRIS; FAN, 1997) listou 31 diferentes equações para determinação indireta da descarga sólida do leito. Yang (1996) discute detalhadamente a aplicação de equações e fornece um programa contendo 12 formas para calcular a descarga do leito considerando o material do leito e 8 formas considerando o transporte de fundo. O programa contém as 13 equações consideradas mais usuais: Ackers e White; Colby;

Einstein carga do leito; Einstein material do leito; Engelund e Hansen; Kalinske; Laursen; Meyer-Peter e Muller; Rottner; Schoklitsch; Toffaleti; Yang (1973); e Yang (1984).

Como a maioria das equações para cálculo da descarga sólida de fundo foi desenvolvida para condições específicas, recomenda-se a aplicação de várias delas para, posteriormente, decidir pelos resultados mais coerentes. No entanto, antes da aplicação indiscriminada de equações teóricas, são necessárias duas etapas básicas preliminares (ECKHARDT; WILSON JR, 1998): (i) estudar as equações do transporte sólido a serem utilizadas, verificando suas hipóteses básicas e simplificadoras, as características hidrodinâmicas e sedimentológicas em que foram deduzidas e em que condições experimentais foram obtidos seus coeficientes; (ii) verificar se as hipóteses básicas e simplificadoras, assim como os valores dos coeficientes utilizados, se aplicam aos rios estudados, reproduzindo nestes os ensaios necessários para essas verificações. A Tabela 2 mostra em que condições algumas dessas equações foram desenvolvidas (SANTOS et al., 2001).

Tabela 2 – Intervalo e tipo de dados utilizados no desenvolvimento de algumas equações.

Equação	Tipo	Textura uniforme	Tamanho do material (mm)	Condições da pesquisa
Meyer-Peter e Muller	CL	Sim	0,4 – 30	Canais, $D < 1,2$
Laursen	ML	Não	0,011 – 4,08	Canais e rios
Toffaleti	ML	Não	Areia fina: 0,1 – 1,3	Canais e rios, $0,03 < D < 15,24$
Ackers e White	ML	Sim	1 – 3	Canais e rios de planícies
Yang (areia)	ML	Sim	0,152 – 1,35	Canais e rios $0,03 < D < 15,24$
Colby	ML	Sim	0,1 – 0,8	Canais e rios $0,03 < D < 30,48$
Shen e Hung	ML	Sim	Areias	Canais e rios rasos
Einstein Modificado	CT	Não	0,28	Canais e rios
Einstein	ML	Não	0,785 – 28,65	-

Nota: CL – carga do leito; ML – material do leito; CT – carga total; D – profundidade em metros.

Fonte: Morris e Fan (1997 apud SANTOS et al., 2001).

A seguir, são descritos alguns métodos para o cálculo da descarga sólida do leito (material do leito), da descarga sólida de arrasto (transporte de fundo) e da descarga sólida total. Esses métodos foram utilizados em Lactec (2001), estudo que apresentou os resultados do monitoramento do processo de assoreamento do reservatório da UHE Mascarenhas (evolução do processo até o ano de 2001), bem como a determinação da descarga sólida por diferentes métodos de cálculo em quatro estações fluviométricas da bacia do rio Doce, situadas próximo ao empreendimento. Lactec (2001) apresenta uma breve descrição de diversos métodos de determinação da descarga sólida, a qual se encontra transcrita nos itens a seguir (métodos separados por material do leito, transporte de fundo e descarga sólida total). A análise realizada no referido estudo auxiliou na escolha do método de determinação da descarga sólida a ser adotado no presente estudo.

2.1.1.8.1 *Métodos para o cálculo da descarga sólida do leito (material do leito)*

Colby

Para aplicação do método de Colby, são necessários poucos dados de campo, tais como: velocidade média, área do rio, além da concentração suspensa na água definida em laboratório. Esse método diferencia-se dos demais pelo fato de o gradiente de energia não ser empregado em seus cálculos. Esses fatores tornam o método de Colby o de mais fácil utilização e, portanto, o mais comumente utilizado. Ele é recomendado para areias com diâmetro médio entre 0,1 e 1,0 mm.

Ackers e White

Considera que sedimentos grossos são transportados principalmente como transporte de fundo, e somente uma parte da tensão de cisalhamento no leito do canal causa o movimento dos sedimentos grossos. Sedimentos finos são transportados como carga em suspensão devido à tensão de cisalhamento total que causa o movimento. Nesse processo, tornam-se importantes dados de viscosidade da água, profundidade, velocidade e vazão do rio, sendo o diâmetro médio da partícula um fator de grande importância.

Yang para areias

Baseado na análise dimensional e no conceito de potência unitária do escoamento. A potência unitária do escoamento é o valor de energia potencial dissipada por unidade de peso da água, sendo expressa pelo produto da velocidade da corrente pela declividade. Alguns dados são de fundamental importância e interferem diretamente no resultado obtido, tais como o diâmetro médio e a velocidade de queda da partícula, além da viscosidade.

Laursen

Baseado em equações empíricas, este método calcula a concentração média da descarga do material do leito. Além de dados comumente empregados em métodos anteriormente citados, emprega-se o valor da velocidade de cisalhamento, da velocidade de queda da partícula e o gradiente de energia, sendo este último um fator que interfere diretamente no resultado a ser obtido.

Engelund e Hansen

Este método usa o conceito de potência da corrente e o princípio da similaridade, tendo como única restrição a condição de que o diâmetro médio deve ser superior a 0,15 mm. Os dados empregados nesse método são os normalmente empregados nos demais métodos, sendo o gradiente de energia de fundamental importância.

Toffaleti

Desenvolvido a partir de conceitos de Einstein e de Chien. O sedimento do leito é dividido em classes granulométricas nas quais o tamanho máximo em cada fração é duas vezes o diâmetro mínimo. A descarga sólida é considerada como a soma das descargas parciais calculadas para cada uma das classes. Toffaleti definiu que a fórmula é válida para material do leito de 0,062 a 16 mm. Nesse caso, além do diâmetro médio (D50), é necessário o diâmetro em que passa 65% (D65), além de dados de campo geralmente obtidos, tais como velocidade média, vazão, profundidade e largura do rio.

2.1.1.8.2 Métodos para o cálculo da descarga sólida de arrasto (transporte de fundo)

Schoklitsch

A fórmula de Schoklitsch é baseada no movimento do transporte de fundo, isto é, calcula a carga de arrasto, e foi desenvolvida para sedimentos com granulometria média de 0,3 a 0,5 mm, ou seja, entre areia média e grossa. O princípio desse método é que o material do leito começa a se mover em descarga crítica, sendo que a descarga do leito é proporcional ao valor do trabalho realizado pela força trativa em excesso e é necessária para superar a resistência ao longo do perímetro molhado. Esse método apresenta fórmulas de simples aplicação, as quais requerem poucos dados, tais como o diâmetro médio e o gradiente de energia.

Einstein e Brown

Esta fórmula é uma modificação efetuada por Brown, em 1943, do processo apresentado por Einstein, em 1942. Einstein reconheceu a influência das forças hidrodinâmicas no transporte de sedimento, tendo relacionado a probabilidade do movimento de partículas ao parâmetro adimensional da intensidade de transporte. Fatores tais como viscosidade da água, peso específico do sedimento e tensão de cisalhamento total do leito são levados em consideração na aplicação desse método.

Kalinske

Este método é baseado na equação de continuidade, a qual determina que a descarga do leito é igual ao produto da velocidade média das partículas em movimento pelo peso de cada partícula e pelo número de partículas. A velocidade média da partícula é função da razão do cisalhamento crítico para o cisalhamento total. A fórmula pode ser aplicada à composição de areias pela soma da descarga sólida calculada para todas as classes granulométricas. Esse método leva em consideração a tensão de cisalhamento total no leito, o diâmetro médio das partículas, além da velocidade média do escoamento.

Meyer-Peter e Muller

Baseado em equações empíricas, este método é válido para areias e pedregulhos com diâmetros compreendidos entre 0,4 e 30 mm. Um fator de grande importância nesse processo é o gradiente de energia, pois o potencial do rio influi diretamente nos resultados, além de considerar a profundidade e o diâmetro médio das partículas.

Rottner

Esta fórmula foi baseada em estimativas dimensionais e em coeficientes empíricos. Foi desenvolvida a partir da análise de 2.500 observações experimentais. Rottner aplicou análise de regressão para determinar o efeito de um parâmetro de rugosidade D_{50}/p , desenvolvendo uma equação dimensionalmente homogênea. Levou-se em consideração a profundidade, o diâmetro médio e a velocidade média. Essa equação não é aplicável quando pequenas quantidades de material do leito estão em movimento.

2.1.1.8.3 Cálculo da descarga sólida total

Método Einstein Modificado

Este método aparenta ser mais completo e de maior confiança, comparado com os anteriormente citados, já que calcula a descarga sólida total, através do detalhamento da granulometria do material em suspensão. Para sua execução, são necessários vários dados de campo, tais como profundidade, largura,

velocidade, além de dados de laboratório, como a análise granulométrica do material do leito e em suspensão. O que o distingue dos demais métodos é o fato de usar frações granulométricas, considerando desde argila até cascalho, além dos dados de suspensão, também divididos nessas várias classes.

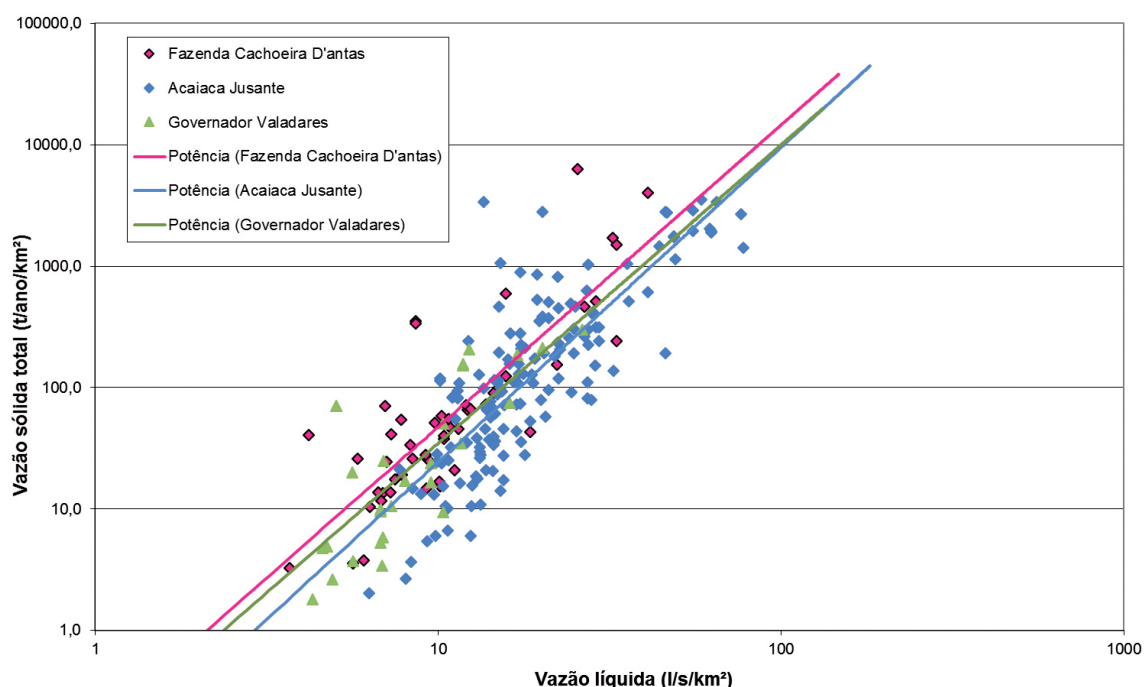
O gradiente de energia citado nos métodos anteriores não é usado aqui, pois o método de Einstein Modificado calcula internamente esse valor. Constatou-se que o valor obtido para o gradiente de energia supera o valor usual, aproximadamente, entre 2 e 5 vezes, podendo ser um fator de distorção dos resultados finais da descarga sólida.

Esse método torna-se sensível devido, primeiramente, ao grande número de dados necessários para sua aplicação, além do número de equações e ábacos necessários para sua finalização. Além disso, nota-se que uma pequena variação nos dados de entrada e na interpretação dos ábacos pode gerar alteração significativa nos resultados, especialmente em períodos de estiagem. Às vezes, torna-se necessária a extrapolação de algumas faixas de certos ábacos. O diâmetro da partícula e a profundidade são de grande importância.

2.1.1.9 Distribuição dos sedimentos no tempo

Segundo Santos et al. (2001), a distribuição dos sedimentos no tempo está relacionada ao comportamento da vazão, ou seja, os maiores volumes de sedimentos (produção sólida) são transportados pelas maiores vazões. Embora não seja linear e sofra grandes variações no espaço e no tempo, essa relação permite associar a massa de sedimentos transportados na unidade de tempo, ou descarga sólida, às vazões líquidas, originando a “curva-chave de sedimentos” ou “curva de descarga sólida”. A obtenção da curva de descarga sólida permite obter séries temporais do volume transportado em determinada seção. A Figura 7 apresenta a curva-chave de sedimentos obtida com os dados monitorados para três distintas estações sedimentométricas do rio Doce.

Figura 7 – Curva-chave de sedimentos em três diferentes locais do rio Doce.



Quando a relação entre descarga sólida e vazão líquida não apresenta bons resultados, pode-se, alternativamente, relacionar a descarga sólida com outras características (regressão simples ou múltipla), tais como velocidade, declividade, profundidade, tensão de cisalhamento, potência da corrente e potência unitária da corrente, adotando-se o melhor resultado (CARVALHO, 2008). Também a correlação da concentração de sedimentos com a precipitação na bacia (às vezes defasada no tempo) pode produzir resultados bastante razoáveis. A curva-chave de sedimentos, que nada mais é do que a equação de regressão sem o termo de erro, permite estimar os valores da descarga sólida ao longo do tempo a partir de medições esporádicas do transporte de sedimentos, desde que se disponha no local de uma série contínua de vazões líquidas médias diárias (CARVALHO, 2008).

Apesar da praticidade dessa aplicação amplamente empregada, cabe ressaltar as limitações dessa metodologia visto que a vazão sólida não depende apenas da vazão líquida, mas de diversos outros fatores, como quantidades de sedimentos disponíveis na calha e depressões, condições das áreas de pastagem (variáveis ao longo do ano), etapa do processo agrícola (aragem da terra, plantio, crescimento, colheita etc.), forma de distribuição da chuva etc.

Todos os fatores acima normalmente desencadeiam no efeito histerese, o qual, segundo Klein (1984 apud MORO, 2011), é considerado como a defasagem verificada entre os picos de vazão e concentração de sólidos em suspensão.

Apesar de todas as limitações impostas anteriormente, a curva-chave de sedimentos pode se constituir em uma metodologia robusta para estabelecer a produção média de sedimentos de uma bacia hidrográfica, desde que esteja disponível um razoável número de medições (faixa ampla de magnitude de vazões líquidas) e cobrindo um período significativo de monitoramento (maior que 15 anos). Além disso, a extensão da extrapolação dessa curva deve ser analisada quanto à interferência nos resultados finais, cuja congruência deverá ser analisada frente à erosão bruta da bacia (perda de solo).

2.1.1.10 Estimativa do assoreamento em reservatórios

Durante a existência de um reservatório, ocorre a alteração das condições hidráulicas do corpo d'água e, conseqüentemente, das condições de transporte de material particulado. Com a redução da velocidade provocada pelo grande volume de água represado pela barragem, parte do material particulado fica retida no reservatório que, com o passar do tempo, terá 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.

O estágio de assoreamento em um reservatório determina sua vida útil. Para os reservatórios destinados à produção de energia elétrica e/ou ao abastecimento, a vida útil é definida como o tempo, normalmente em anos, que o nível do depósito de sedimentos alcança a soleira da tomada d'água (CARVALHO, 2008).

A deposição do material particulado se dá preferencialmente nas seções do lago onde o rio principal ou os afluentes diretos o acessam. Como já exposto anteriormente, 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.

Os sólidos que não sedimentarem no reservatório serão transportados para jusante pela água liberada pelo vertedor ou pelo canal de fuga. Uma vez que a quantidade de material sedimentável é relativamente menor, o rio a jusante pode apresentar caráter mais “erosivo”. Eventuais depósitos de material anteriormente sedimentado 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.

O melhor procedimento de apoio para avaliações do processo de sedimentação já ocorrido em um reservatório é através do levantamento batimétrico (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 modelagem hidromórfica (hidrodinâmica mais morfologia) computacional.

Uma outra metodologia utilizada para estimativa do assoreamento faz uso de modelos empíricos de retenção de sedimentos, tal como a metodologia apresentada em BUREC (1987), a qual consiste na obtenção dos seguintes tópicos:

- produção de sedimentos (descarga sólida média anual obtida preferencialmente a partir de dados observados);
- eficiência de retenção (método empírico – curva de Brune ou Churchill);
- peso específico aparente médio (variável ao longo do tempo);
- 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.

2.1.2 ÁREA DE ABRANGÊNCIA

A bacia hidrográfica compreende a área em que a precipitação é coletada e transportada até uma saída comum. A interconectividade dos corpos hídricos que compõem uma bacia hidrográfica define a distribuição de água e sua qualidade. Portanto, para promover o entendimento sobre a quantidade e a qualidade da água de um determinado rio, é importante considerar todo o caminho percorrido pela água. Assim, grande parte das análises abrange toda a bacia hidrográfica, no entanto a morfologia fluvial e as nascentes foram avaliadas somente na área de drenagem da UHE Risoleta Neves. Essa escolha se justifica pelo fato de que as alterações significativas na morfologia fluvial e o potencial impactos nas nascentes potencialmente ocorreram nas regiões a montante da UHE Risoleta Neves. A jusante da UHE Risoleta Neves, as vazões e níveis registrados durante a passagem da onda foram menores do que as cheias naturais que já ocorreram na região (CPRM, 2015).

2.1.3 METODOLOGIA

Para realizar a caracterização proposta no presente tema, foram utilizados dados de diversas fontes: (a) estações de monitoramento disponibilizados no portal da Hidroweb (utilizados até out./2015); (b), dados consistidos até 2014 disponibilizados diretamente pela Agência Nacional de Águas (ANA); (c)

informações obtidas do Atlas Digital das Águas de Minas; (d) informações obtidas do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a); (e) estudos realizados focando aspectos hidrológicos, hidráulicos e hidrogeomorfológicos da bacia.

A seleção das estações fluviométricas foi realizada com base na disponibilidade do período de dados (30 anos consecutivos até o ano de 2015) e cujo número de falhas não ultrapassasse 30% do total de dias do período selecionado. Além disso, foram selecionadas quaisquer estações situadas nos rios Santarém e Gualaxo do Norte, mesmo que não atendendo aos critérios de seleção adotados. A ideia foi selecionar um grupo de estações cujas análises comparativas pudessem ser realizadas sem o prejuízo de considerar extensões ou períodos muito distintos.

Os dados foram analisados considerando a obtenção de curvas de permanência de vazões médias específicas (contribuição por unidade de área), vazões Médias de Longo Termo (MLTs), vazões de longo termo mês a mês para os valores médios, máximos e mínimos. Todos os resultados citados consideraram apenas o período comum selecionado, ou no caso das estações dos rios Santarém e Gualaxo do Norte para todo o período disponível.

As estações hidrossedimentométricas da bacia do rio Doce foram selecionadas com base na distribuição geográfica e representatividade do período de monitoramento. Assim, foram selecionadas as estações que possuem registros históricos recentes e com um período comum de monitoramento de no mínimo 15 anos.

As medições sólidas da bacia do rio Doce disponíveis na rede de monitoramento da ANA são constituídas da obtenção da concentração de sólidos totais em suspensão. Não são realizadas amostragens da carga sólida por arraste. Dada a ausência de mais informações para aplicação de outras fórmulas para determinação da descarga sólida total, foi utilizado o método de Colby nessa estimativa. No entanto, foram realizadas diversas análises para validação dessa metodologia com base em estudos anteriores.

Foram obtidas as curvas-chave de sedimentos para as diversas estações selecionadas. O transporte sólido médio específico de cada local foi determinado com base na aplicação das curvas-chave sobre as séries de vazões médias diárias para o período base comum (1998-2015), pois se verificou diferenças significativas nessa média ao se adotar períodos distintos. Os valores de transporte sólido médio específico foram utilizados na produção do mapa que representa esse parâmetro sobre a bacia do rio Doce.

A análise de geomorfologia fluvial avaliou a bacia por meio da Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA, georreferenciada em Sirgas 2000 (EPSG 4674) e na escala 1:50.000. Essa base hidrográfica contém todas as áreas de contribuição hidrográfica, divididas em sub-bacias e interbacias, elaboradas por meio de Modelo Digital de Elevação (MDE) construído a partir de dados ASTER (ANA, 2018). A avaliação da geometria hidráulica dos canais da bacia do rio Doce, até o reservatório da UHE Risoleta Neves, foi realizada utilizando-se os dados de medições de descarga líquida de 10 estações fluviométricas da Rede Hidrometeorológica Nacional, gerida pela ANA (2018). A relação direta entre a vazão e a geometria dos trechos de drenagem foi avaliada a partir do ajuste de equações das potências (LEOPOLD; MADDOCK, 1953). O ajuste dessas equações permite a comparação com valores usuais para geometrias consideradas naturais, isto é, geometrias estáveis.

Por fim, uma revisão sobre a modelagem hidrossedimentológica encontrada na literatura foi avaliada e foram apresentadas as características dos modelos, os resultados obtidos pelos trabalhos de modelagem, assim como foi realizada uma comparação entre as modelagens.

2.1.4 RESULTADOS

2.1.4.1 Análise pluviométrica

A Tabela 3 e a **Figura 8** apresentam a rede de monitoramento de 69 estações pluviométricas selecionadas para o presente estudo. Na tabela estão indicados os períodos utilizados, selecionados segundo o critério de adotar, sempre que possível, um período base comum.

O mapa de isoietas foi gerado a partir da média dos totais anuais de cada estação para a bacia do rio Doce (**Figura 9**). Pelo mapa de isoietas, é possível notar que a barragem de Fundão está localizada na região de maior pluviosidade da bacia do rio Doce (sudoeste da bacia).

Tabela 3 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.

Código	Latitude	Longitude	Data de início	Data de fim
1742017	-17,8456	-42,0756	01/01/1985	05/11/2015
1742019	-17,9922	-42,3939	01/01/1985	05/11/2015
1840000	-18,9856	-40,7461	01/01/1985	05/11/2015
1841001	-18,5747	-41,9178	01/01/1985	05/11/2015
1841003	-18,2386	-41,7486	01/01/1985	05/11/2015
1841011	-18,9764	-41,6403	01/01/1985	05/11/2015
1841019	-18,7769	-41,4828	01/01/1985	05/11/2015
1841020	-18,8831	-41,9503	28/11/1985	05/11/2015
1842004	-18,3631	-42,6022	01/01/1985	05/11/2015
1842005	-18,6119	-42,2786	01/01/1985	05/11/2015
1842007	-18,7722	-42,9311	01/01/1985	05/11/2015
1842008	-18,2011	-42,4553	01/01/1985	05/11/2015
1842020	-18,5528	-42,7642	01/01/1985	05/11/2015
1843012	-18,2797	-43,0006	01/01/1985	05/11/2015
1939002	-19,5775	-39,7944	01/01/1985	05/11/2015
1940000	-19,8744	-40,8744	01/01/1985	05/11/2015
1940001	-19,8053	-40,6789	01/01/1985	05/11/2015
1940005	-19,6922	-40,3981	01/01/1985	05/11/2015
1940006	-19,5308	-40,6231	01/01/1985	05/11/2015
1940009	-19,2203	-40,8533	01/01/1985	05/11/2015
1940012	-19,6636	-40,8353	01/01/1985	05/11/2015
1940013	-19,2375	-40,5914	01/01/1985	05/11/2015
1940016	-19,0578	-40,5164	01/01/1985	05/11/2015
1940020	-19,955	-40,7417	01/01/1985	05/11/2015
1940023	-19,2742	-40,3208	01/01/1985	05/11/2015
1941000	-19,7989	-41,7061	01/01/1985	05/11/2015
1941003	-19,5236	-41,0142	01/01/1985	05/11/2015
1941004	-19,3431	-41,2461	01/01/1985	05/11/2015

Código	Latitude	Longitude	Data de início	Data de fim
1941005	-19,0617	-41,5328	01/01/1985	05/11/2015
1941006	-19,5947	-41,4581	01/01/1985	05/11/2015
1941009	-19,6911	-41,02	01/01/1985	05/11/2015
1941010	-19,4925	-41,1617	01/01/1985	05/11/2015
1941011	-19,6783	-41,8361	01/01/1985	05/11/2015
1941012	-19,0592	-41,0275	01/01/1985	05/11/2015
1941018	-19,1617	-41,8622	01/01/1985	05/11/2015
1941019	-19,8111	-41,4378	01/01/1985	05/11/2015
1942002	-19,8336	-42,3178	01/01/1985	05/11/2015
1942006	-19,9989	-42,3475	01/01/1985	05/11/2015
1942008	-19,3736	-42,105	01/01/1985	05/11/2015
1942029	-19,5247	-42,6442	19/09/1986	05/11/2015
1942030	-19,3164	-42,3961	12/11/1986	05/11/2015
1942031	-19,7769	-42,4769	25/11/1986	05/11/2015
1942032	-19,1886	-42,4228	22/11/1986	05/11/2015
1943001	-19,9228	-43,1778	01/01/1985	05/11/2015
1943002	-19,0167	-43,4442	01/01/1985	05/11/2015
1943003	-19,2503	-43,0144	01/01/1985	05/11/2015
1943007	-19,9453	-43,4011	01/01/1985	05/11/2015
1943008	-19,4403	-43,1186	01/01/1985	05/11/2015
1943025	-19,2175	-43,3742	01/01/1985	05/11/2015
1943027	-19,8808	-43,3675	01/01/1985	05/11/2015
2041008	-20,1081	-41,7283	01/01/1985	05/11/2015
2041023	-20,0786	-41,1214	01/01/1985	05/11/2015
2041048	-20,1706	-41,9611	01/01/1985	05/11/2015
2042008	-20,1036	-42,44	01/01/1985	05/11/2015
2042010	-20,2989	-42,4781	01/01/1985	05/11/2015
2042011	-20,2147	-42,6522	01/01/1985	05/11/2015
2042016	-20,6825	-42,8067	01/01/1985	05/11/2015
2042017	-20,2772	-42,3256	01/01/1985	05/11/2015
2042018	-20,3847	-42,9028	01/01/1985	05/11/2015
2042031	-20,0114	-42,6742	01/01/1985	05/11/2015
2043009	-20,3625	-43,1439	01/01/1985	05/11/2015
2043010	-20,6906	-43,2994	01/01/1985	31/07/2015
2043011	-20,39	-43,1803	01/01/1985	05/11/2015
2043014	-20,6703	-43,0881	01/01/1985	05/11/2015
2043025	-20,5167	-43,0167	01/01/1985	05/11/2015
2043026	-20,8475	-43,2419	01/01/1985	05/11/2015
2043027	-20,2856	-43,0989	01/01/1985	05/11/2015
2043059	-20,0969	-43,4881	01/01/1985	05/11/2015
2143003	-21,1492	-43,52	01/01/1985	05/11/2015

As isoietas com as médias dos totais mensais encontram-se no **Apêndice A**. Observa-se um comportamento variável entre os meses do ano.

Figura 8 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.

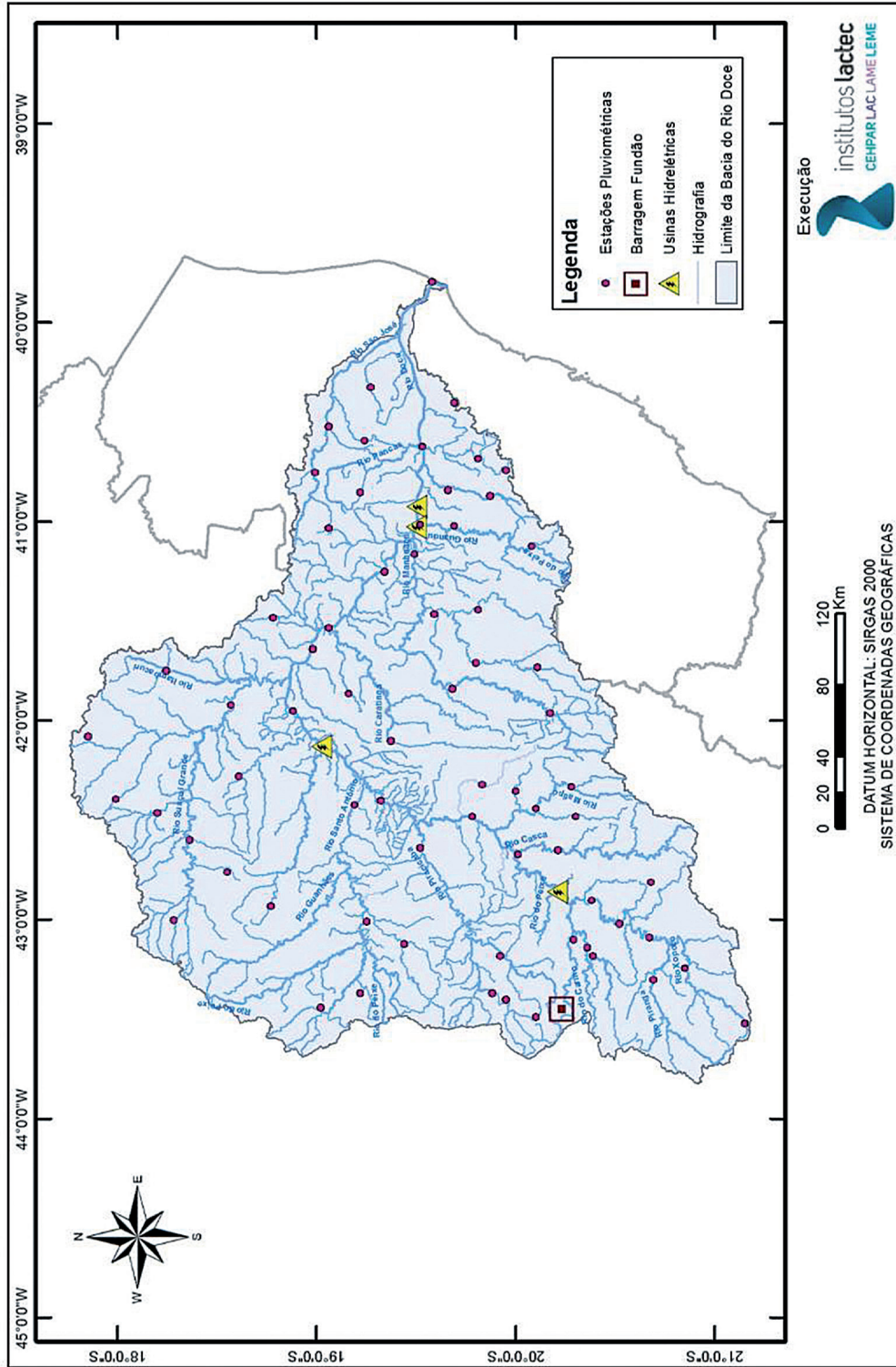
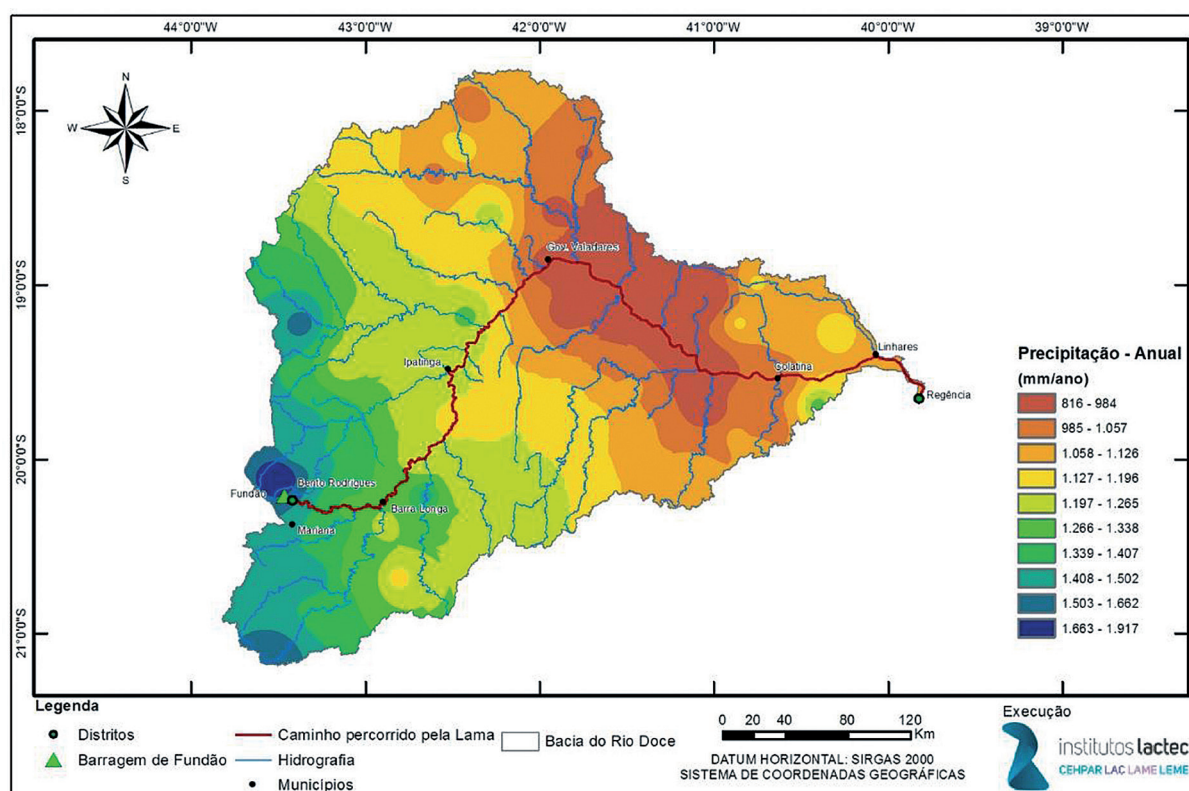


Figura 9 – Totais anuais de precipitação para a bacia do rio Doce.



2.1.4.2 Análise fluviométrica

A Tabela 4 e a Figura 10 apresentam a rede de monitoramento selecionada. Na tabela estão indicados os períodos utilizados, selecionados segundo o critério de adotar, sempre que possível, um período base comum.

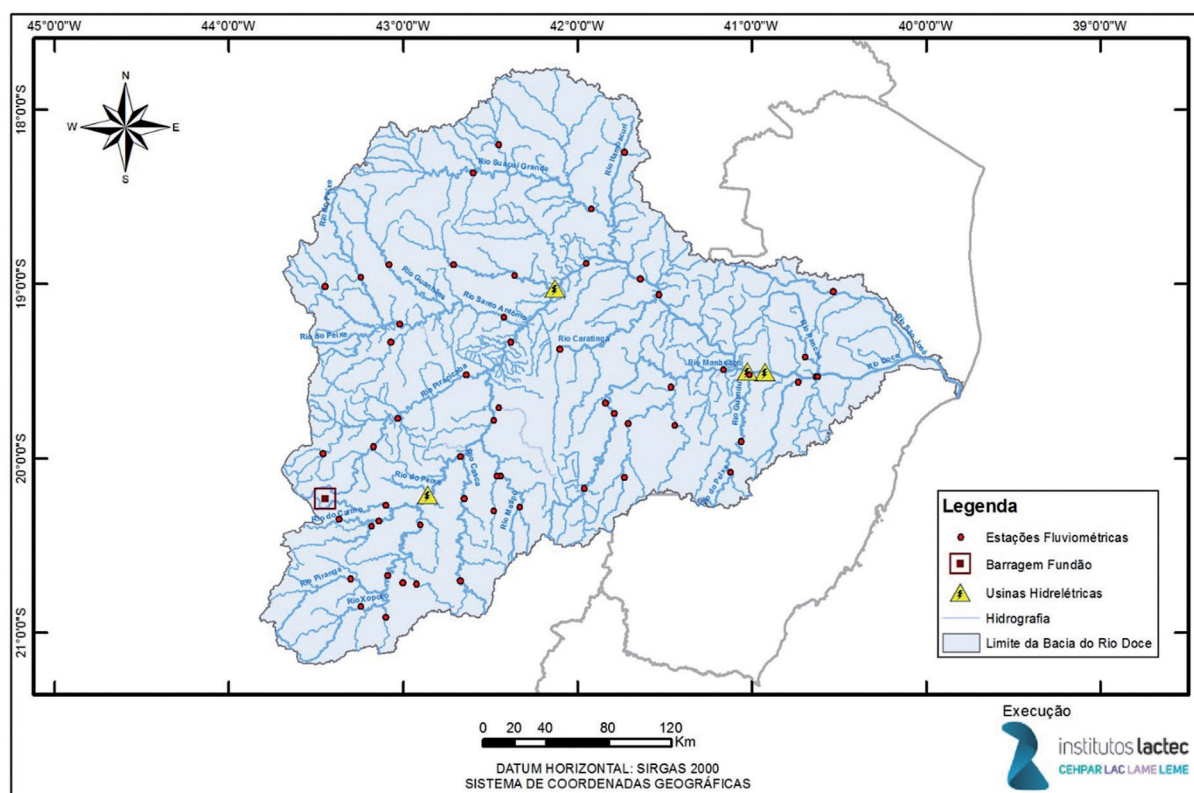
Tabela 4 – Rede de monitoramento selecionada para as análises fluviométricas.

Código	Nome	Rio	Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude	Data de início	Data de fim
56028000	Piranga	Piranga	1400	-20,69	-43,30	01/01/1985	04/11/2015
56055000	Brás Pires	Xopotó	1090	-20,85	-43,24	01/01/1985	04/11/2015
56065000	Senador Firmino	Turvo	297	-20,91	-43,10	01/01/1985	04/11/2015
56075000	Porto Firme	Piranga	4260	-20,67	-43,09	01/01/1985	04/11/2015
56085000	Seriquite	Turvo Sujo	342	-20,72	-42,92	01/01/1988	04/11/2015
56090000	Fazenda Varginha	Turvo Limpo	328	-20,71	-43,00	01/01/1985	04/11/2015
56110005	Ponte Nova Jusante	Piranga	6230	-20,38	-42,90	01/01/1985	04/11/2015
56145000	São Caetano de Mariana	do Carmo	138	-20,35	-43,37	16/06/1930	31/12/1965
56240000	Fazenda Paraíso	Gualaxo do Sul	855	-20,39	-43,18	01/01/1985	04/11/2015
56335001	Acaiaca Jusante	do Carmo	1370	-20,36	-43,14	01/01/1985	31/07/2015
56337000	Fazenda Ocidente	Gualaxo do Norte	529	-20,27	-43,10	01/01/1985	30/04/2015
56385000	São Miguel do Anta	Casca	523	-20,70	-42,67	01/01/1985	04/11/2015

Código	Nome	Rio	Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude	Data de início	Data de fim
56415000	Rio Casca	Casca	2030	-20,23	-42,65	01/01/1985	04/11/2015
56425000	Fazenda Cachoeira D'Antas	Doce	10100	-19,99	-42,67	01/01/1985	04/11/2015
56460000	Matipó	Matipó	616	-20,28	-42,33	29/09/1989	31/07/2015
56484998	Raul Soares Montante	Matipó	1350	-20,10	-42,44	01/01/1985	04/11/2015
56500000	Abre Campo	Santana	273	-20,30	-42,48	30/09/1989	04/11/2015
56510000	Instituto Florestal Raul Soares	Matipó	1870	-20,10	-42,46	01/01/1985	04/11/2015
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	Doce	15900	-19,78	-42,48	01/01/1985	04/11/2015
56570000	Pingo-d'Água	Rib. Sacramento	855	-19,71	-42,45	01/01/1985	04/11/2015
56610000	Rio Piracicaba	Piracicaba	1160	-19,93	-43,17	01/01/1985	31/05/2015
56640000	Carrapato (brumal)	Rib. Santa Bárbara	609	-19,97	-43,46	01/01/1985	04/11/2015
56659998	Nova Era IV	Piracicaba	3060	-19,77	-43,03	01/04/1989	04/11/2015
56696000	Mario de Carvalho	Piracicaba	5270	-19,52	-42,64	19/09/1986	04/11/2015
56719998	Belo Oriente	Doce	24200	-19,33	-42,38	18/10/1986	04/11/2015
56750000	Conceição do Mato de Dentro	Santo Antônio	302	-19,01	-43,45	01/01/1985	04/11/2015
56765000	Dom Joaquim	do Peixe	976	-18,96	-43,24	01/01/1985	04/11/2015
56775000	Ferros	Santo Antônio	4090	-19,23	-43,02	01/01/1985	30/04/2015
56787000	Fazenda Barraca	do Tanque	1260	-19,33	-43,07	01/01/1985	04/11/2015
56800000	Senhora do Porto	Guanhães	1520	-18,89	-43,08	01/01/1985	04/11/2015
56825000	Naque Velho	Santo Antônio	10200	-19,19	-42,42	01/01/1985	04/11/2015
56845000	Fazenda Corrente	Corrente Grande	1050	-18,89	-42,71	01/01/1985	04/11/2015
56846000	Porto Santa Rita	Corrente Grande	1970	-18,95	-42,36	01/01/1985	31/05/2015
56850000	Governador Valadares	Doce	40500	-18,88	-41,95	01/01/1985	04/11/2015
56851000	Campanário	Itambacuri	758	-18,24	-41,73	01/01/1985	31/05/2015
56860000	São Pedro do Suaçuí	Suaçuí Grande	2570	-18,36	-42,60	01/01/1985	30/04/2015
56870000	Santa Maria do Suaçuí	São Félix	622	-18,20	-42,45	01/01/1985	04/11/2015
56891900	Vila Matias Montante	Suaçuí Grande	9770	-18,57	-41,92	01/01/1985	04/11/2015
56920000	Tumiritinga	Doce	55100	-18,97	-41,64	01/01/1985	31/05/2015
56935000	Dom Cavati	Caratinga	775	-19,37	-42,10	01/01/1985	31/05/2015
56940002	Barra do Cuieté Jusante	Cuieté	3220	-19,06	-41,53	01/01/1985	04/11/2015
56960005	Fazenda Vargem Alegre	Manhuaçu	1070	-20,17	-41,96	01/02/1985	04/11/2015
56976000	Fazenda Bragança	Manhuaçu	2260	-19,74	-41,79	01/01/1985	04/11/2015
56978000	Santo Antônio do Manhuaçu	Manhuaçu	2350	-19,68	-41,84	01/01/1985	04/11/2015
56983000	Dores de Manhumirim	José Pedro	384	-20,11	-41,73	01/01/1985	31/05/2015
56988500	Ipanema	José Pedro	1410	-19,80	-41,71	01/01/1985	27/04/2015
56989001	Mutum	São Manoel	1180	-19,81	-41,44	01/01/1985	31/05/2015
56989400	Assaraí Montante	José Pedro	3190	-19,59	-41,46	01/01/1985	31/05/2015

Código	Nome	Rio	Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude	Data de início	Data de fim
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	Manhuaçu	8720	-19,49	-41,16	01/01/1985	31/05/2015
56990990	Afonso Cláudio Montante	Guandu	435	-20,08	-41,12	01/01/1985	27/04/2015
56991500	Laranja da Terra	Guandu	1330	-19,90	-41,06	01/01/1985	31/05/2015
56992000	Baixo Guandu	Guandu	2130	-19,52	-41,01	01/01/1985	31/05/2015
56993551	Jusante Córrego da Piaba	Santa Joana	893	-19,56	-40,73	01/01/1985	30/04/2015
56994500	Colatina	Doce	76400	-19,53	-40,63	03/01/1985	04/11/2015
56994510	Colatina Corpo de Bombeiros	Doce	76400	-19,53	-40,62	01/10/1985	31/10/2015
56995500	Ponte do Pancas	Pancas	920	-19,42	-40,69	01/01/1985	30/04/2015
56998400	Barra de São Gabriel	São José	1070	-19,04	-40,53	01/01/1985	31/05/2015

Figura 10 – Rede de monitoramento selecionada para as análises fluviométricas.



Conforme pode ser verificado pela tabela, não foi possível adotar o mesmo período comum base – 01/01/1985 a 04/11/2015 – para todas as estações devido à disponibilidade de informações. Entretanto, entre as 57 estações selecionadas, apenas seis começam em anos posteriores a 1985 (1986, 1988 e 1989), e uma não possui nenhuma informação dentro do período comum utilizado, pois foi extinta em 1965 e foi selecionada apenas por existirem poucas estações no entorno da área do Complexo Germano.

A Tabela 5 apresenta os valores de vazões MLTs obtidas para as estações da Tabela 4, considerando o período comum e discriminando em valores absolutos e específicos. A **Figura 11** apresenta a distribuição espacial da vazão média específica de longo termo para a bacia do rio Doce.

A **Figura 12** apresenta o diagrama das vazões MLTs em função da área de drenagem (período comum), onde foram discriminados os dados das estações localizadas no rio Doce e nas sub-bacias dos seus afluentes. Verifica-se que, de forma geral, o comportamento das vazões médias em termos de valores absolutos possui homogeneidade para as estações consideradas. A **Figura 12** mostra o bom ajuste de uma função polinomial de 2º grau sobre todos os dados disponíveis, para a qual o coeficiente de determinação ficou igual a 0,9942.

Tabela 5 – Vazões médias de longo termo para as estações fluviométricas selecionadas.

Código	MLT absoluta (m ³ /s)	MLT específica (l/s/km ²)
56028000	22,9	16,3
56055000	19,3	17,7
56065000	5,2	17,5
56075000	69,4	16,3
56085000	4,0	11,7
56090000	3,9	12,0
56110005	98,3	15,8
56145000	4,7	34,3
56240000	18,5	21,6
56335001	29,2	21,3
56337000	12,9	24,3
56385000	8,2	15,6
56415000	25,1	12,4
56425000	159,0	15,7
56460000	9,5	15,4
56484998	17,8	13,2
56500000	4,5	16,6
56510000	23,4	12,5
56539000	216,1	13,6
56570000	10,0	11,7
56610000	24,2	20,8
56640000	12,3	20,2
56659998	54,0	17,6
56696000	94,5	17,9
56719998	321,7	13,3
56750000	6,2	20,4
56765000	14,4	14,8
56775000	85,8	21,0
56787000	22,1	17,5
56800000	15,8	10,4
56825000	150,5	14,8

Código	MLT absoluta (m³/s)	MLT específica (l/s/km²)
56845000	10,4	9,9
56846000	33,4	17,0
56850000	536,0	13,2
56851000	3,9	5,2
56860000	24,4	9,5
56870000	5,5	8,8
56891900	67,2	6,9
56920000	644,3	11,7
56935000	8,8	11,3
56940002	30,4	9,5
56960005	14,9	13,9
56976000	40,5	17,9
56978000	42,2	17,9
56983000	6,7	17,4
56988500	22,6	16,0
56989001	13,3	11,3
56989400	36,1	11,3
56990000	91,7	10,5
56990990	7,5	17,1
56991500	17,2	12,9
56992000	25,0	11,8
56993551	7,1	7,9
56994500	812,2	10,6
56994510	778,0	10,2
56995500	10,1	11,0
56998400	12,9	12,1

Figura 11 – Mapa com interpolação de vazões médias específicas de longo termo da bacia do rio Doce.

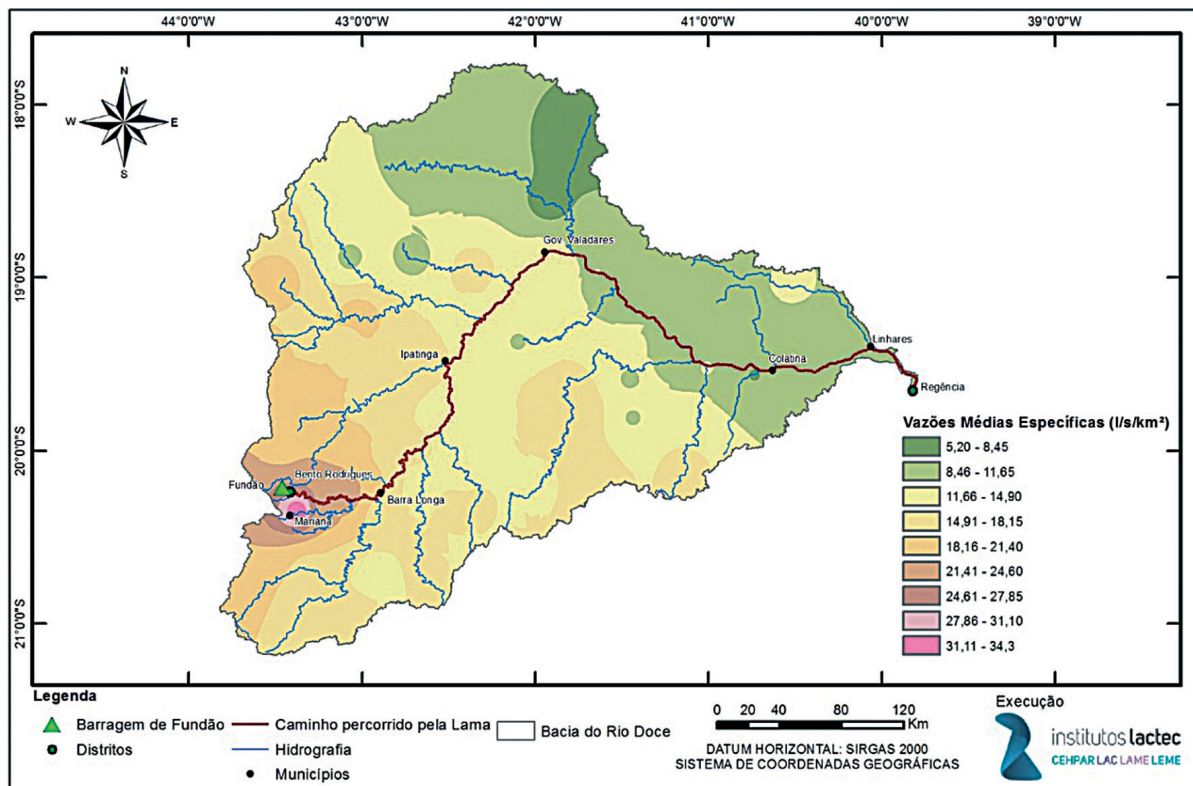
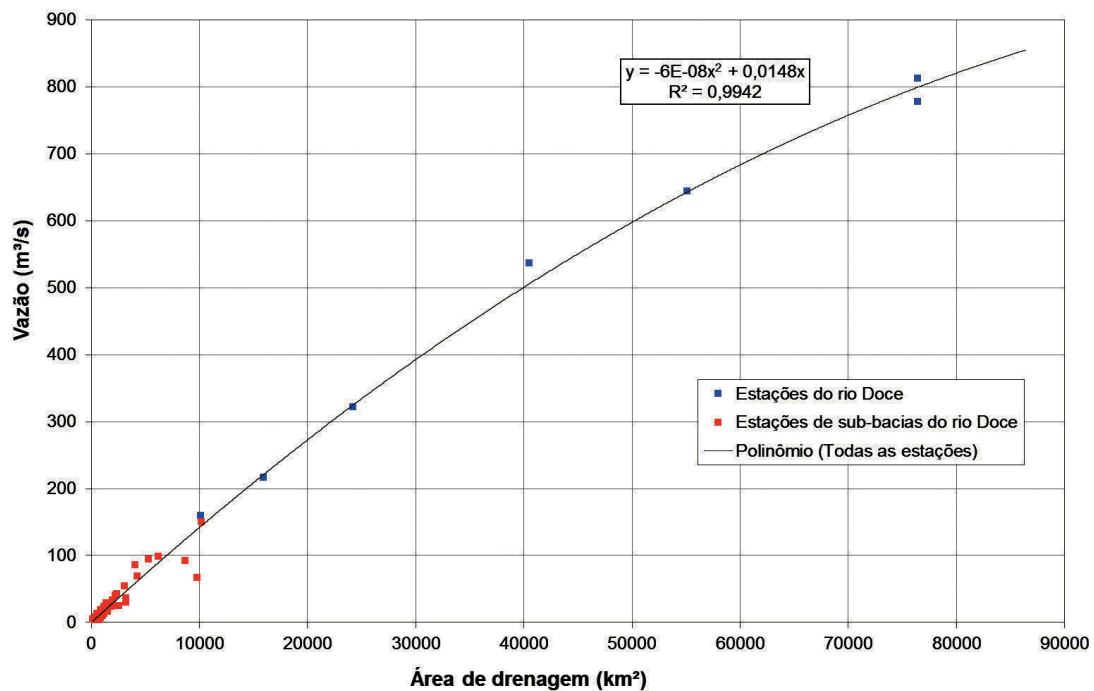
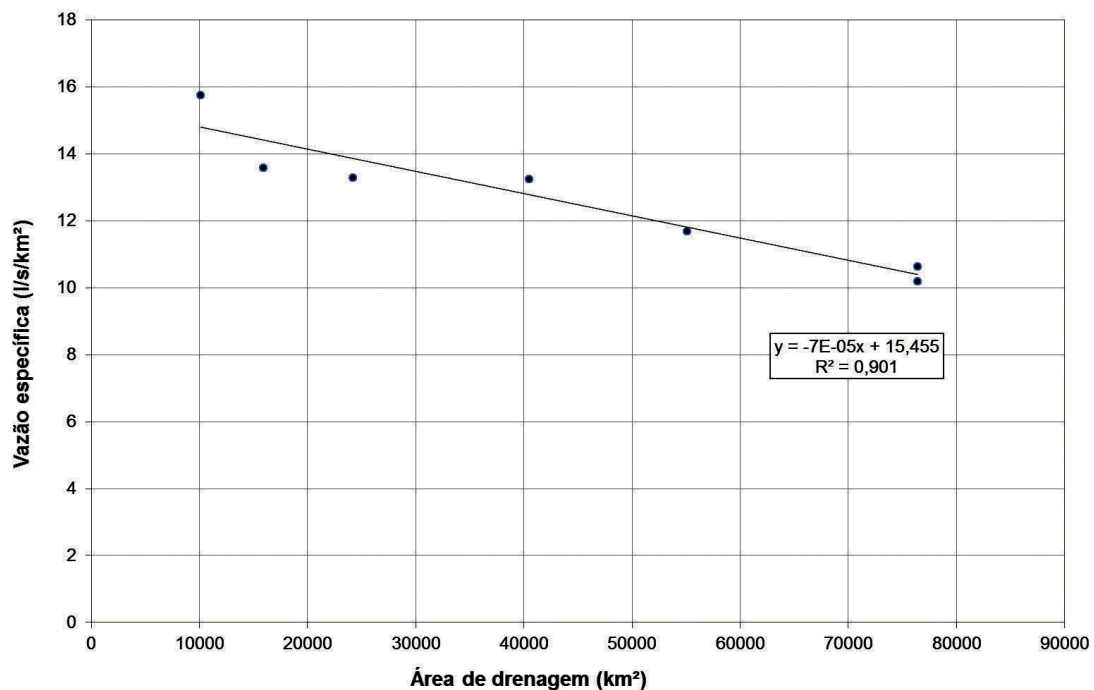


Figura 12 – Diagrama das vazões médias absolutas de longo termo.



O diagrama de vazões médias específicas (por unidade de área) de longo termo para o período comum ao longo do próprio rio Doce é apresentado na **Figura 13**. Observa-se o típico comportamento de decréscimo dos valores de vazão específica com o aumento da área de drenagem, para o qual a função linear determinou um coeficiente de determinação de 0,901.

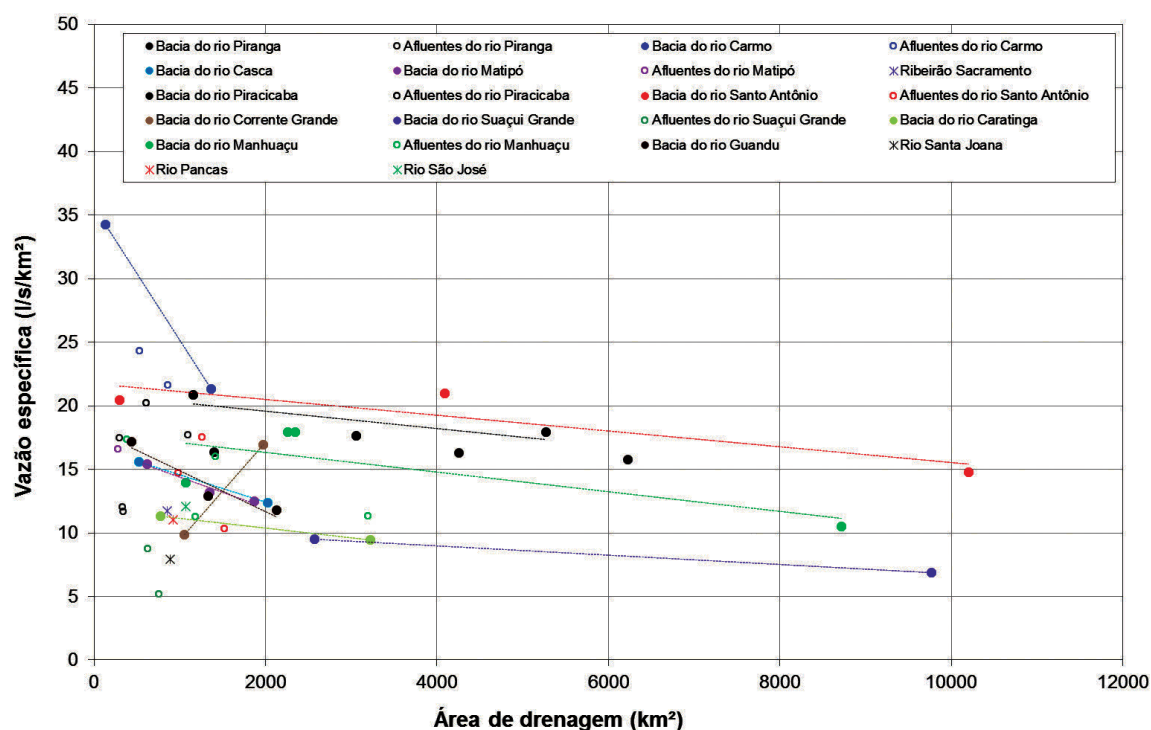
Figura 13 – Diagrama das vazões médias específicas de longo termo ao longo do rio Doce.



A **Figura 14** mostra o diagrama de vazões médias específicas de longo termo em função da área de drenagem (período comum) das sub-bacias dos afluentes do rio Doce, separando os dados por afluentes principais do rio Doce e grupo de afluentes dos tributários principais do rio Doce.

Para os afluentes principais, quando estes possuem duas ou mais estações, foi possível verificar que, de uma forma geral, a tendência de decaimento da vazão média específica com o aumento da área de drenagem é verificada para todos os rios, exceto para a bacia do rio Corrente Grande. Além disso, verifica-se que uma das estações da bacia do rio do Carmo (posto São Caetano de Mariana) possui uma média específica expressivamente maior que das outras sub-bacias (40% maior que o 2º maior valor), fazendo com que a tendência de decaimento dos valores específicos em função da área de drenagem seja maior para essa bacia. No entanto, isso decorre do fato de que essa estação não possui monitoramento dentro do período comum, conforme pode ser verificado pela Tabela 4, distorcendo a sua representatividade dentro do diagrama e não podendo ser comparada diretamente.

Figura 14 – Diagrama das vazões médias específicas de longo termo para afluentes do rio Doce.



Os resultados da análise fluviométrica em relação aos dados de vazões médias diárias se encontram no **Apêndice B**, e abordam os seguintes tópicos: climatologia das vazões máximas, médias e mínimas de longo termo mês a mês; e gráficos com as curvas de permanência de vazões médias diárias específicas das estações.

A análise de frequência de vazões máximas considerou o critério da Eletrobras (1987), o qual recomenda a utilização da distribuição exponencial quando o coeficiente de assimetria é maior que 1,5 e a de Gumbel no caso contrário.

Foram obtidas as vazões máximas diárias e instantâneas (método de Sangal – ver item **2.1.1.4 Vazões extremas**), para diferentes tempos de retorno (variando entre 2 e 10.000 anos).

Na Tabela 6, são apresentados os valores do coeficiente de assimetria, o método de distribuição e o valor da vazão máxima diária para o TR de 10.000 anos em termos específicos (por unidade de área). O mapa da Figura 15 apresenta a distribuição espacial desses valores.

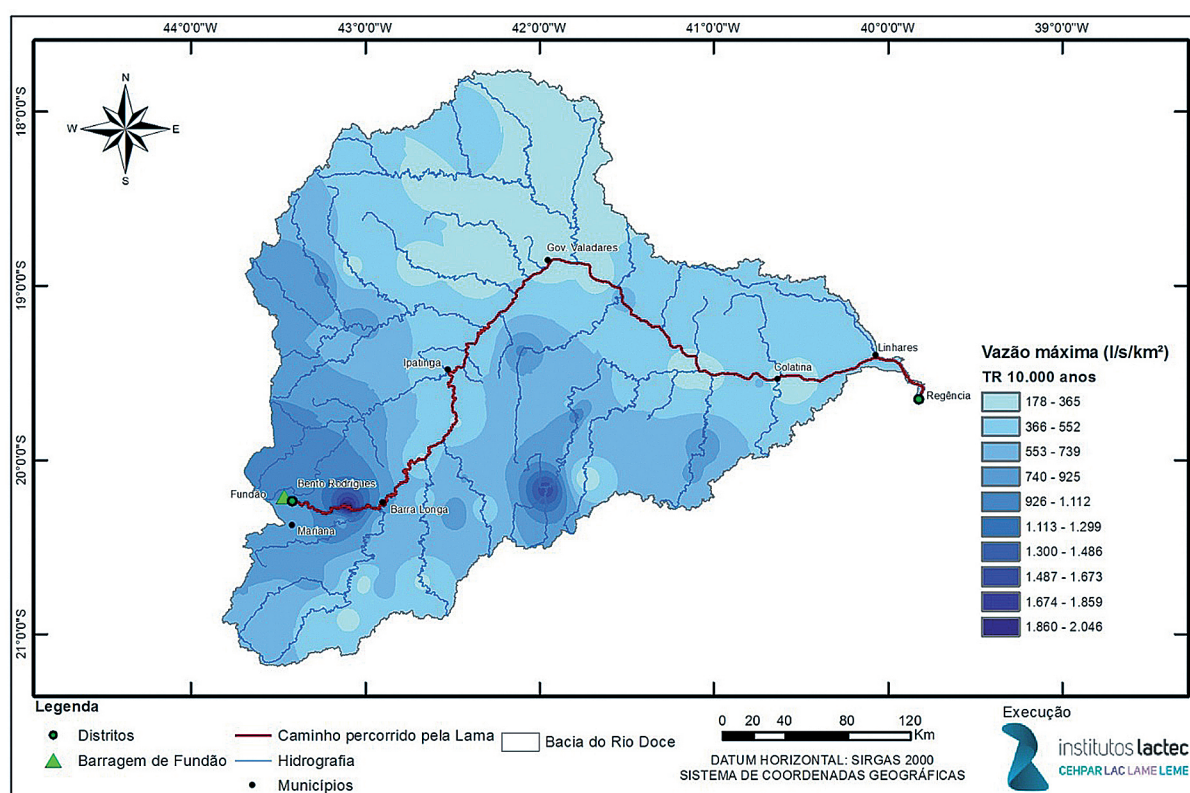
Tabela 6 – Resultados da análise da vazão máxima diária de 10000 anos (Q_{10000}) para cada estação.

Código	Coefficiente assimetria	Método	Q_{10000} (l/s/km ²)
56028000	1,44	Gumbel	864,1
56055000	-0,08	Gumbel	357,6
56065000	1,05	Gumbel	282,2
56075000	1,53	Exponencial	525,2
56085000	0,29	Gumbel	681,6
56090000	0,19	Gumbel	178,3
56110005	1,83	Exponencial	620,8
56145000	0,21	Gumbel	831,2

Código	Coefficiente assimetria	Método	Q₁₀₀₀₀ (l/s/km²)
56240000	1,5	Gumbel	1108,0
56335001	1,37	Gumbel	800,8
56337000	0,94	Gumbel	2046,1
56385000	0,04	Gumbel	328,5
56415000	1,62	Exponencial	477,3
56425000	1,22	Gumbel	329,2
56460000	-0,23	Gumbel	400,9
56484998	1,71	Exponencial	769,6
56500000	1,25	Gumbel	915,8
56510000	1,58	Exponencial	694,1
56539000	0,88	Gumbel	317,5
56570000	-0,01	Gumbel	536,4
56610000	0,9	Gumbel	959,3
56640000	0,39	Gumbel	1098,5
56659998	0,52	Gumbel	854,3
56696000	0,69	Gumbel	525,3
56719998	1,22	Gumbel	387,7
56750000	0,53	Gumbel	904,6
56765000	0,55	Gumbel	971,1
56775000	1,41	Gumbel	887,7
56787000	-0,01	Gumbel	624,7
56800000	0,67	Gumbel	278,2
56825000	0,43	Gumbel	434,3
56845000	1,01	Gumbel	270,7
56846000	0,34	Gumbel	229,4
56850000	1,37	Gumbel	320,4
56851000	0,07	Gumbel	178,4
56860000	0,37	Gumbel	270,0
56870000	1,96	Exponencial	503,0
56891900	1,26	Gumbel	206,6
56920000	0,9	Gumbel	260,6
56935000	2,26	Exponencial	953,8
56940002	1,49	Gumbel	615,7
56960005	3,82	Exponencial	1599,2
56976000	2,06	Exponencial	1143,9
56978000	0,64	Gumbel	523,0
56983000	0,06	Gumbel	210,6
56988500	0,48	Gumbel	526,1
56989001	1,16	Gumbel	590,9
56989400	0,74	Gumbel	418,2
56990000	0,61	Gumbel	266,2
56990990	0,02	Gumbel	753,0
56991500	2,29	Exponencial	857,9

Código	Coefficiente assimetria	Método	Q_{10000} (l/s/km ²)
56992000	0,25	Gumbel	306,1
56993551	1,54	Exponencial	587,0
56994500	0,54	Gumbel	241,1
56994510	0,48	Gumbel	249,3
56995500	1,22	Gumbel	491,0
56998400	0,46	Gumbel	427,0

Figura 15 – Mapa com interpolação de vazões máximas diárias específicas de 10.000 anos.



Observa-se pelo mapa que as maiores vazões máximas específicas se concentram na região sudoeste da bacia do rio Doce, seguindo a tendência das isoietas de totais anuais de precipitação e coincidindo com a região da localização da barragem de Fundão.

Para a estimativa das vazões de estiagem, foi utilizado o método de Weibull considerando diferentes tempos de duração (entre 7 e 180 dias) e também diferentes tempos de retorno (2 a 100 anos). A Tabela 7 apresenta as vazões mínimas específicas $Q_{10,7}$ obtidas para as estações fluviométricas selecionadas.

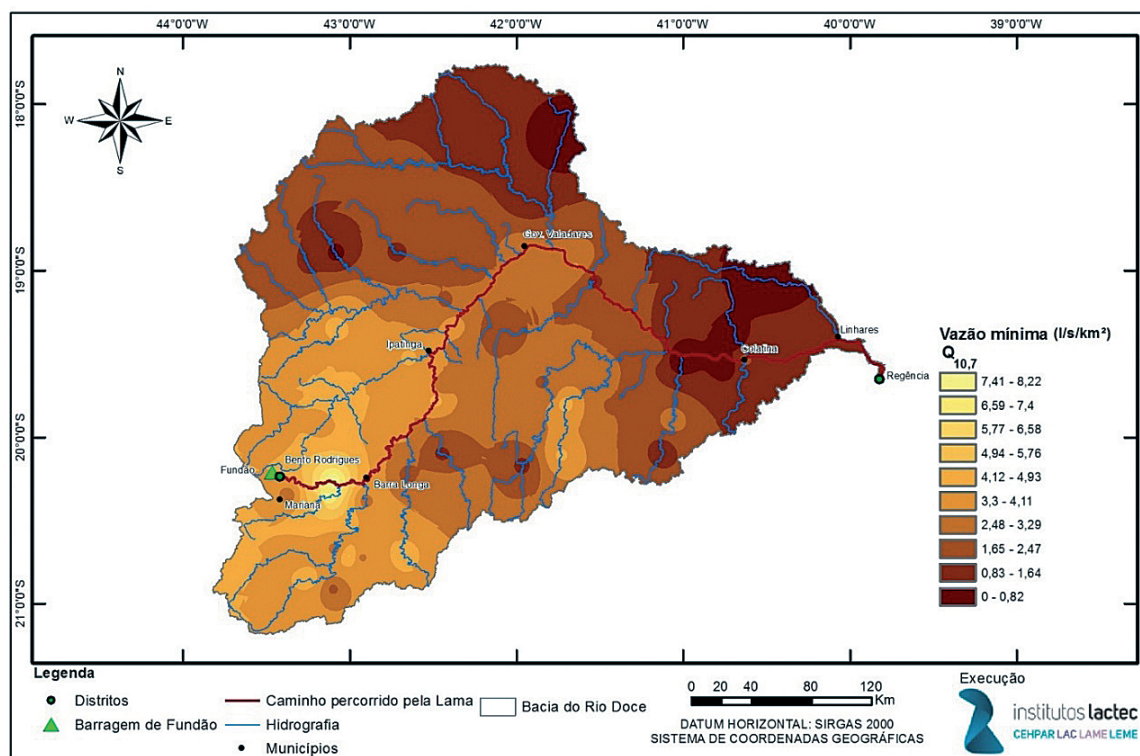
O mapa da Figura 16 apresenta a distribuição espacial das vazões mínimas específicas $Q_{10,7}$ na bacia do rio Doce, onde se observa que a região com secas mais severas (menores valores de $Q_{10,7}$) ocorre no norte e nordeste da bacia e, portanto, mais a jusante do rio Doce.

A análise de frequência completa das vazões extremas está apresentada no **Apêndice B**, onde são apresentadas as tabelas com vazões máximas para diversos tempos de recorrência e as tabelas com vazões mínimas para diversos tempos de recorrência e de duração.

Tabela 7 – Vazões mínimas específicas $Q_{10,7}$ das estações da bacia do rio Doce.

Código	$Q_{10,7}$ (l/s/km ²)	Código	$Q_{10,7}$ (l/s/km ²)	Código	$Q_{10,7}$ (l/s/km ²)
56028000	3,84	56570000	2,95	56920000	3,32
56055000	4,47	56610000	3,80	56935000	1,65
56065000	2,30	56640000	3,46	56940002	1,49
56075000	3,01	56659998	4,59	56960005	1,43
56085000	3,15	56696000	4,25	56976000	3,15
56090000	4,96	56719998	3,61	56978000	2,25
56110005	3,04	56750000	1,86	56983000	4,24
56145000	2,88	56765000	1,51	56988500	4,54
56240000	4,39	56775000	3,57	56989001	2,42
56335001	8,04	56787000	4,56	56989400	2,63
56337000	8,22	56800000	0,57	56990000	1,93
56385000	4,40	56825000	2,37	56990990	1,30
56415000	2,18	56845000	1,53	56991500	2,85
56425000	3,34	56846000	2,13	56992000	0,00
56460000	2,70	56850000	3,07	56993551	0,04
56484998	1,43	56851000	0,00	56994500	1,88
56500000	3,16	56860000	1,93	56994510	1,65
56510000	1,57	56870000	1,22	56995500	0,20
56539000	4,44	56891900	1,00	56998400	0,29

Figura 16 – Mapa com interpolação de vazões mínimas específicas $Q_{10,7}$ da bacia do rio Doce.



2.1.4.3 Análise hidrossedimentométrica

A Tabela 8 e a Figura 17 apresentam a rede de monitoramento selecionada para a análise hidrossedimentométrica. Na tabela estão indicados os períodos utilizados, selecionados segundo o critério de adotar um período base comum – 1998 a 2015 (até a data do rompimento de Fundão).

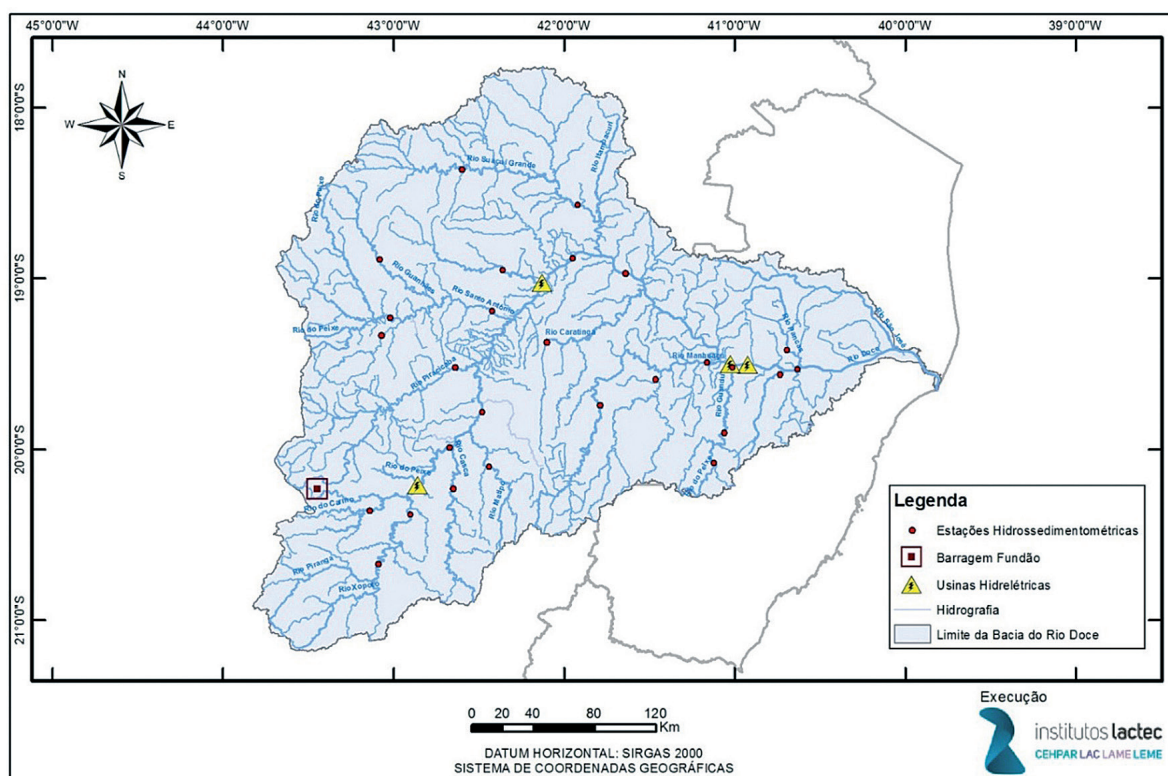
Tabela 8 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas.

Código	Nome	Rio	Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude	1ª medição	Última medição
56075000	Porto Firme	Piranga	4260	-20,67	-43,09	26/04/1998	14/08/2015
56110005	Ponte Nova Jusante	Piranga	6230	-20,38	-42,90	29/01/1998	18/08/2015
56335001	Acaiaca Jusante	do Carmo	1370	-20,36	-43,14	29/01/1998	19/08/2015
56415000	Rio Casca	Casca	2030	-20,23	-42,65	30/04/1998	20/08/2015
56425000	Fazenda Cachoeira D'Antas	Doce	10100	-19,99	-42,67	21/08/1998	21/08/2015
56484998	Raul Soares Montante	Matipó	1350	-20,10	-42,44	02/05/1998	22/04/2015
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	Doce	15900	-19,78	-42,48	20/04/1999	11/08/2015
56696000	Mario de Carvalho	Piracicaba	5270	-19,52	-42,64	28/09/1999	04/11/2015
56775000	Ferros	Santo Antônio	4090	-19,23	-43,02	30/03/1998	30/10/2015
56787000	Fazenda Barraca	do Tanque	1260	-19,33	-43,07	30/03/1998	22/08/2015
56800000	Senhora do Porto	Guanhães	1520	-18,89	-43,08	26/03/1998	20/08/2015
56825000	Naque Velho	Santo Antônio	10200	-19,19	-42,42	04/04/1998	05/08/2015
56846000	Porto Santa Rita	Corrente Grande	1970	-18,95	-42,36	08/07/1998	06/08/2015
56850000	Governador Valadares	Doce	40500	-18,88	-41,95	14/12/1998	09/04/2015
56860000	São Pedro do Suaçuí	Suaçuí Grande	2570	-18,36	-42,60	31/03/1998	18/08/2015
56891900	Vila Matias Montante	Suaçuí Grande	9770	-18,57	-41,92	02/04/1998	07/08/2015
56920000	Tumiritinga	Doce	55100	-18,97	-41,64	22/06/2001	04/08/2015
56935000	Dom Cavati	Caratinga	775	-19,37	-42,10	20/10/1998	01/08/2015
56976000	Fazenda Bragança	Manhuaçu	2260	-19,74	-41,79	17/10/1998	07/08/2015
56989400	Assaraí Montante	José Pedro	3190	-19,59	-41,46	15/10/1998	13/08/2015
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	Manhuaçu	8720	-19,49	-41,16	05/04/1998	15/08/2015
56990990	Afonso Cláudio Montante	Guandu	435	-20,08	-41,12	24/03/1998	04/08/2015
56991500	Laranja da Terra	Guandu	1330	-19,90	-41,06	25/03/1998	04/08/2015
56992000	Baixo Guandu	Guandu	2130	-19,52	-41,01	26/03/1998	31/10/2015
56993551	Jusante Córrego da Piaba	Santa Joana	893	-19,56	-40,73	27/03/1998	09/05/2014
56994500	Colatina	Doce	76400	-19,53	-40,63	27/03/1998	14/03/2012
56995500	Ponte do Pancas	Pancas	920	-19,42	-40,69	30/03/1998	05/11/2015

Verifica-se pela Tabela 8 que, para cinco estações entre as selecionadas, o período disponível inicia pouco depois de 1998 (1999 e 2001) ou finaliza pouco antes de 2015 (2012 e 2014). As estações foram utilizadas para determinar vazões sólidas em suspensão e totais.

Primeiramente, foi necessário validar o método a ser utilizado para a determinação da descarga sólida total, visto que só estão disponíveis dados de concentração da suspensão. Conforme mencionado anteriormente, em Lactec (2001) foram apresentados os resultados da determinação da descarga sólida por diferentes métodos de cálculo em quatro estações fluviométricas da bacia do rio Doce, situadas próximo ao empreendimento da UHE Mascarenhas. A análise desses resultados auxiliou na escolha do método para determinação da descarga sólida total a ser aplicado no presente estudo.

Figura 17 – Rede de monitoramento selecionada para as análises hidrossedimentométricas.



As estações analisadas em Lactec (2001) são Resplendor no rio Doce, situada a montante do reservatório da UHE Aimorés, Ponte Nova no rio Doce, situada a jusante da UHE Mascarenhas e instalada durante o referido projeto, São Sebastião da Encruzilhada no rio Manhuaçu e Baixo Guandu no rio Guandu, sendo estas duas últimas estações de afluentes que deságuam a montante da UHE Mascarenhas. As principais características de todas as estações podem ser visualizadas na Tabela 8, exceto para as estações Resplendor e Ponte Nova, cujas áreas de drenagem são iguais a 61.200 e 73.500 km², respectivamente.

Entre os métodos analisados em Lactec (2001), o método de Einstein Modificado gerou nas análises iniciais valores com uma grande dispersão e muito superiores aos obtidos em outros métodos. Assim, este foi desconsiderado na continuidade dos estudos apresentados em Lactec (2001). Os métodos considerados na avaliação final foram: Colby, Ackers e White, Yang para areias, Laursen, Engelund e Hansen, Toffaleti, Schoklitsch, Einstein e Brown, Kalinske, Meyer-Peter e Muller, e Rottner.

Entre a Figura 18 e a Figura 21 são apresentados os resultados da estimativa da descarga sólida total obtida pelos métodos considerados em Lactec (2001) para as estações Resplendor, Ponte Nova, São Sebastião da Encruzilhada e Baixo Guandu, respectivamente. Ressalta-se que as medições consideradas no referido estudo contemplaram o período entre março e julho de 2001, ou seja, abordando apenas o final da estação de cheia e o período seco. Assim, considera-se que os resultados são limitados e devem ser vistos com parcimônia.

Figura 18 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação Resplendor.

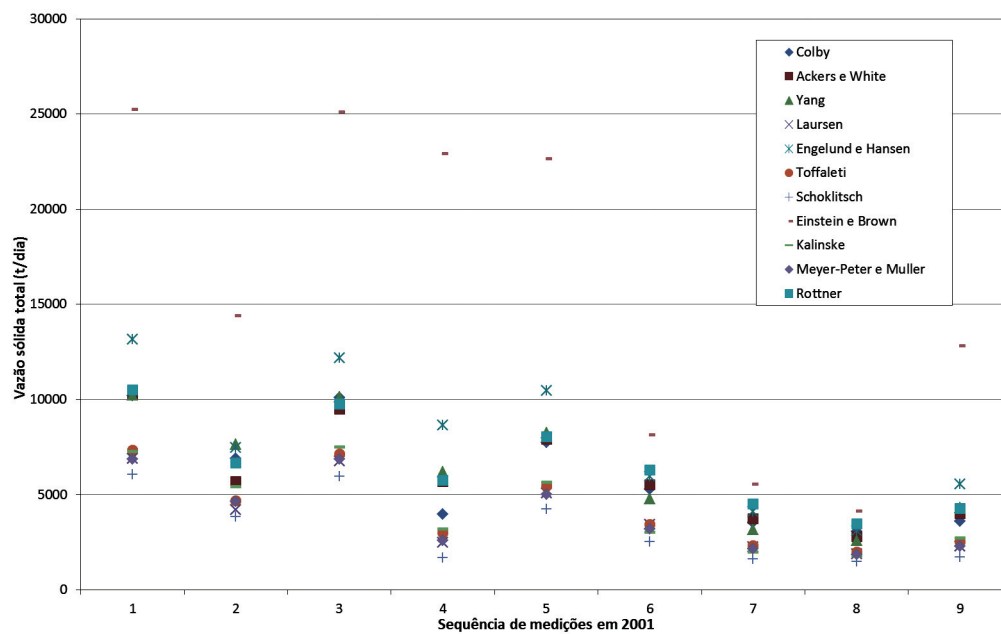


Figura 19 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação Ponte Nova.

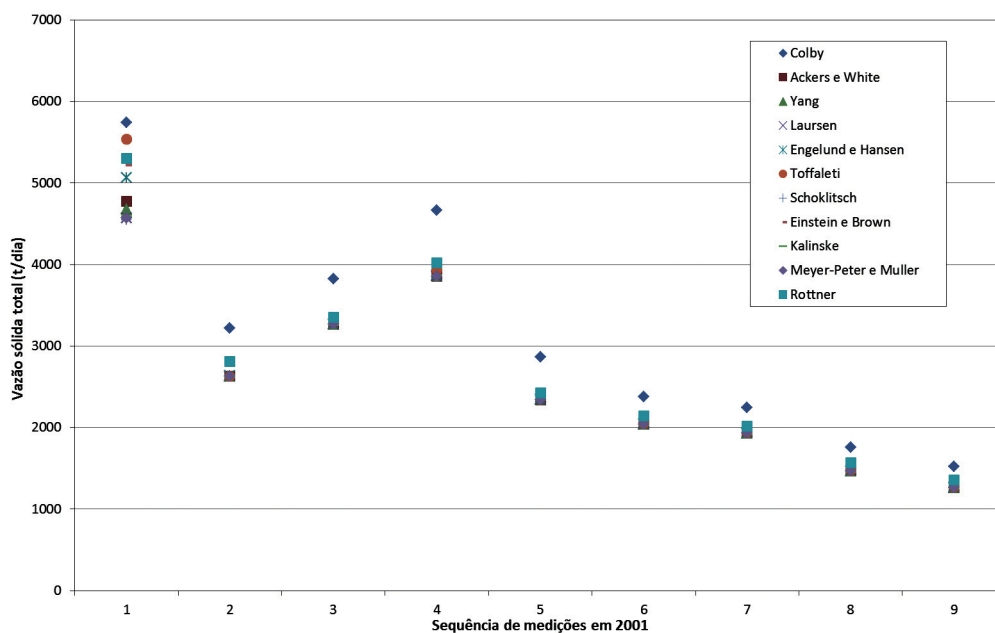


Figura 20 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação São Sebastião da Encruzilhada.

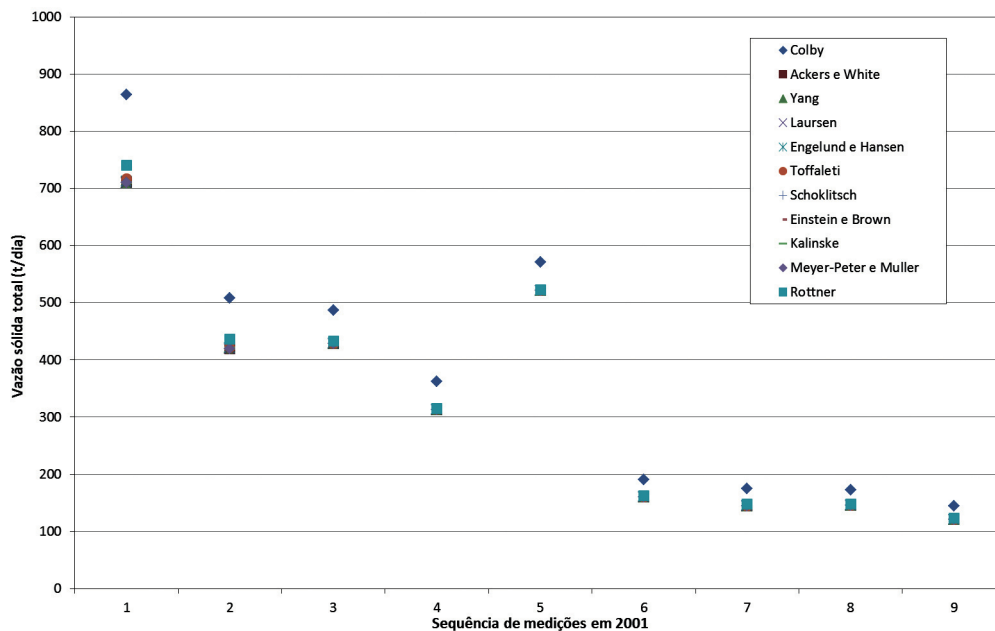
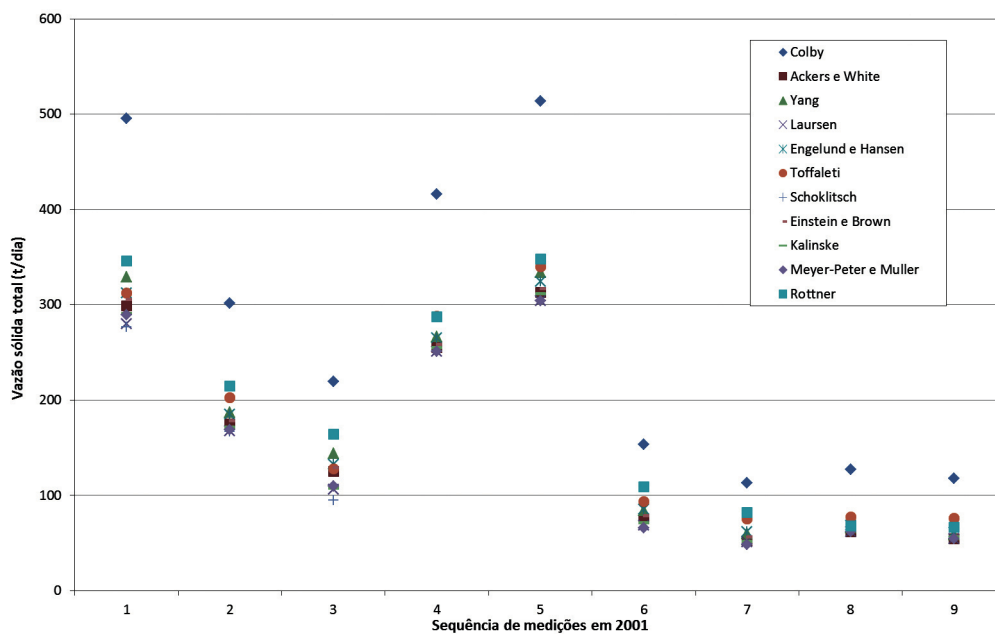


Figura 21 – Vazões sólidas totais obtidas por diversos métodos para a estação Baixo Guandu.



Dado que no presente estudo se dispõe de informações confiáveis apenas para a aplicação do método de Colby, o objetivo é avaliar o comportamento desse método frente a outros disponíveis. Colby é o método mais utilizado para o cálculo do material transportado pelo leito ou por arraste por ser um dos mais simples e não utilizar dados da análise granulométrica do leito ou do material de suspensão. Este último, em especial, dificilmente é coletado ou analisado nas medições de sedimentos.

Em Lactec (2001), nota-se que os resultados por Colby resultaram maiores que os outros métodos, exceto para a estação Resplendor, para a qual os resultados pelo método de Einstein e Brown se mostraram significativamente maiores que para os outros métodos. Para as estações Ponte Nova e

São Sebastião da Encruzilhada, as diferenças entre o método de Colby e os outros não foram marcantes, tendo todos os métodos resultado estimativas bastante similares.

As estações Resplendor e Baixo Guandu apresentam as maiores diferenças entre métodos, sendo que, para a primeira, os resultados por Colby se situam entre as médias dos métodos (excetuando os resultados pelo método de Einstein e Brown, significativamente maiores e que distorcem muito a média); e para a segunda os resultados por Colby são na média 45% maiores que os segundos maiores valores e 50% maiores que a média entre os outros métodos. Ressalta-se que Baixo Guandu possui a menor área de drenagem entre todas as outras analisadas.

Cabe ressaltar que, no estudo apresentado por Lactec (2001), não foi possível comparar os resultados de vazão sólida total obtida pelos métodos com medições completas de sedimentos. Logo, para complementar esse tipo de avaliação, buscou-se na literatura estudos que objetivaram esse tipo de comparação.

Diversos estudos realizados em diferentes bacias hidrográficas analisam a aplicação de diferentes métodos para realizar a estimativa da vazão sólida total através da comparação com medições completas de sedimentos (suspensão e arraste). Um exemplo é o estudo apresentado em Scapin, Paiva e Beling (2007), o qual apresentou os resultados da avaliação dos métodos de Meyer-Peter e Muller, Einstein, Einstein Modificado por Colby e Hembree, Colby, Engelund e Hansen, Yang, Ackers e White, Van Rijn, Karim e Cheng, para o cálculo da descarga sólida em rios, utilizando resultados de 13 medições de descargas líquidas e sólidas, realizadas durante eventos chuvosos (entre dez./2003 e nov./2004). A aplicação dos diferentes métodos foi realizada para o Arroio Cancela, na cidade de Santa Maria/RS. Os métodos de Einstein Modificado por Colby e Hembree e Colby, os quais incorporam dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão, obtiveram os melhores resultados, com relações médias entre a descarga calculada e a descarga medida de 1,01 e 1,33.

Igualmente, a mesma conclusão foi obtida em Rizzardi (2013), cujo trabalho experimental foi desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-Mirim, localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul. O referido estudo utilizou 14 medições em campo para efetuar as comparações com os métodos. Os métodos foram os mesmos utilizados em Scapin, Paiva e Beling (2007), exceto que não foi utilizado Einstein e foram acrescentados os métodos de Toffaleti e Laursen. De acordo com os resultados do referido estudo, dos métodos aplicados o que melhor se ajustou aos dados medidos foi o de Einstein Modificado por Colby e Hembree (índice de dispersão igual a 0,068), seguido pelo método de Colby (índice de dispersão de 2,035).

Em Sobrinho et al. (2013), foram utilizados os métodos de Ackers e White, Colby, Karim e Yang para estimar a vazão sólida total e comparar com dados medidos em três eventos em 2012 e 2013 no Córrego Guariroba, responsável por parte do abastecimento de água do município de Campo Grande. Entre os métodos analisados, Colby foi o único que apresentou resultados satisfatórios com relação à média entre a descarga calculada e a descarga medida de 1,11.

Logo, apesar do método de Colby ter apresentado em Lactec (2001) valores superiores em relação aos outros métodos para alguns locais da bacia hidrográfica do rio Doce, quando comparado com dados medidos, apresenta-se como um método adequado para as estimativas das vazões sólidas totais. Além disso, na análise realizada por Lactec (2001) para quatro estações do rio Doce, esse método

não resultou valores discrepantes em relação à maioria dos outros métodos, exceto para a estação de Baixo Guandu.

Para os locais indicados na Tabela 8 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.

Para algumas estações, a utilização direta de duas funções potência para representar ambas as vazões sólidas totais e suspensas gerou um cruzamento destas na extrapolação superior. Isso ocorreu porque normalmente não se tem um expressivo número de medições de concentração que pudesse também abordar as maiores vazões. Para esses casos, houve uma adaptação da curva representativa das vazões sólidas suspensas no tramo final da curva, separando a curva em duas equações: a originalmente obtida (utilizadas para a maior parte da faixa de vazões, iniciando nas vazões mais baixas); e outra obtida em função da equação relativa às vazões sólidas totais, considerando, no entanto, um termo independente negativo a fim de manter uma diferença constante entre os dois tipos de vazão sólida (utilizada apenas no ramo final da curva).

Para a maioria das estações, a faixa de medições de sedimentos aborda cerca de apenas 1/3 da extensão total da curva de descarga sólida necessária, a qual se estende até a vazão correspondente à máxima cota lida do histórico da estação. Em um reduzido número de estações, a faixa de medições aborda cerca da metade da extensão total da curva de descarga sólida necessária. Para essas estações, foram comparadas as equações potência obtidas considerando todas as medições e considerando apenas as medições cujas vazões não ultrapassassem a faixa de 1/3 da extensão total. Essa análise indicou não haver grande diferença nas equações obtidas para os dois grupos de medições, o que resulta, em um contexto de análise regional, uma validação preliminar das extrapolações das curvas-chave sólidas para as estações da bacia do rio Doce.

A Cemig realizou o monitoramento mais intensivo de sedimentos para uma estação do rio Doce, a Fazenda Ouro Fino, para a qual existe um número muito maior de medições em relação às estações convencionais. Esses dados foram solicitados à concessionária e, assim que disponibilizados, auxiliarão a complementação da validação da extrapolação das curvas-chave de sedimentos.

Para o diagnóstico de danos serão realizadas campanhas de medição de vazões líquidas e sólidas na bacia do rio Doce. Um dos objetivos desse monitoramento é realizar medições em períodos de vazões de enchente. Dependendo da magnitude dos eventos que ocorrerem durante as campanhas, será possível complementar a avaliação da extrapolação das curvas de descarga sólida das estações analisadas no estudo. Com os dados das campanhas será possível também avaliar a adequação do método de Colby na determinação das vazões sólidas totais, visto que se pretende medir vazões em suspensão e de arraste, possibilitando, inclusive, a aplicação de outros métodos.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros de cada uma das equações determinadas ($Vazão_{Sólida} = a.Vazão_{líquida}^b + c$), bem como condições de aplicação de cada equação e coeficientes de determinação (R^2).

O **Apêndice C** apresenta as curvas-chave sólidas em suspensão e sólidas totais das estações selecionadas.

Tabela 9 – Parâmetros das equações das curvas-chave sólidas.

Estação	Total					Suspensão				
	Faixa vazões	a	b	c	R ²	Faixa vazões	a	b	c	R ²
56075000	Toda	0,0950	2,4841	0	0,9215	< 60 l/s/km ²	0,0047	3,2004	0	0,8875
						>= 60 l/s/km ²	0,095	2,4841	-186,1	--
56110005	Toda	0,0158	2,9237	0	0,9372	Toda	0,0041	3,1377	0	0,892
56335001	Toda	0,0219	2,7138	0	0,803	< 123 l/s/km ²	0,0021	3,1855	0	0,7421
						>= 123 l/s/km ²	0,0219	2,7138	-745,2	--
56415000	Toda	0,1044	2,4022	0	0,8013	Toda	0,0534	2,4578	0	0,7338
56425000	Toda	0,2091	2,2634	0	0,7087	< 66 l/s/km ²	0,0253	2,7548	0	0,648
						>= 66 l/s/km ²	0,2091	2,2634	-155,5	--
56484998	Toda	0,0465	2,1523	0	0,841	Toda	0,0295	2,0332	0	0,7454
56539000	Toda	0,4709	1,9627	0	0,7072	< 58 l/s/km ²	0,0934	2,3391	0	0,6887
						>= 58 l/s/km ²	0,4709	1,9627	-118,1	--
56696000	Toda	0,0406	2,6005	0	0,8733	< 200 l/s/km ²	0,0085	2,8942	0	0,8612
						>= 200 l/s/km ²	0,0406	2,6005	-324,7	--
56775000	Toda	0,1295	2,1049	0	0,898	< 153 l/s/km ²	0,0095	2,6173	0	0,8586
						>= 153 l/s/km ²	0,1295	2,1049	-186,2	--
56787000	Toda	0,0742	2,4800	0	0,7889	Toda	0,0042	2,8716	0	0,7838
56800000	Toda	0,0632	2,4375	0	0,8657	Toda	0,0192	2,4932	0	0,7647
56825000	Toda	0,4102	1,8300	0	0,7123	Toda	0,0718	2,1753	0	0,6766
56846000	Toda	0,3110	2,0608	0	0,7891	< 72 l/s/km ²	0,0315	2,5895	0	0,7429
						>= 72 l/s/km ²	0,311	2,0608	-71,8	--
56850000	Toda	0,0458	2,7384	0	0,8406	Toda	0,0167	2,9316	0	0,776
56860000	Toda	0,0434	2,6648	0	0,8797	< 139 l/s/km ²	0,0172	2,8513	0	0,8537
						>= 139 l/s/km ²	0,0434	2,6648	-118,1	--
56891900	Toda	0,9382	2,1424	0	0,9036	< 37 l/s/km ²	0,2419	2,5185	0	0,8863
						>= 37 l/s/km ²	0,9382	2,1424	-12,8	--
56920000	Toda	0,0949	2,5872	0	0,7344	< 56 l/s/km ²	0,0173	3,0063	0	0,6832
						>= 56 l/s/km ²	0,0949	2,5872	-63	--
56935000	Toda	0,0757	2,5279	0	0,8521	Toda	0,0402	2,5247	0	0,8094
56976000	Toda	0,0742	2,0458	0	0,7061	Toda	0,013	2,3212	0	0,6718
56989400	Toda	0,1307	2,3989	0	0,9338	< 53 l/s/km ²	0,0279	2,7647	0	0,9166
						>= 53 l/s/km ²	0,1307	2,3989	-158,9	--
56990000	Toda	0,0404	2,6829	0	0,8528	< 79 l/s/km ²	0,0218	2,8199	0	0,8577
						>= 79 l/s/km ²	0,0404	2,6829	-92,1	--
56990990	Toda	0,2066	2,1667	0	0,9099	Toda	0,0474	2,4044	0	0,8776
56991500	Toda	0,5096	2,0268	0	0,8939	< 54 l/s/km ²	0,0833	2,45	0	0,8794
						>= 54 l/s/km ²	0,5096	2,0268	-192,4	--
56992000	Toda	0,4639	2,3971	0	0,9151	Toda	0,1384	2,6035	0	0,8961
56993551	Toda	0,6046	1,5185	0	0,862	Toda	0,2661	1,585	0	0,834
56994500	Toda	0,4850	2,0049	0	0,6177	< 51 l/s/km ²	0,0734	2,4651	0	0,5328
						>= 51 l/s/km ²	0,485	2,0049	-100,8	--
56995500	Toda	0,7041	1,3185	0	0,8111	Toda	0,1679	1,5183	0	0,7653

A Tabela 10 apresenta as vazões sólidas específicas de longo termo (suspensão e totais), obtidas das séries de vazões diárias e das curvas-chave sólidas, para o período comum considerado (1998 a 2015) para as estações selecionadas.

Tabela 10 – Vazões sólidas específicas de longo termo (produção de sedimentos) – 1998-2015.

Código	Nome	Rio	Área de drenagem (km ²)	Vazão sólida específica (t/ano/km ²)	
				Suspensão	Total
56075000	Porto Firme	Piranga	4260	150	214
56110005	Ponte Nova Jusante	Piranga	6230	206	293
56335001	Acaiaca Jusante	Carmo	1370	278	354
56415000	Rio Casca	Casca	2030	141	217
56425000	Fazenda Cachoeira D'Antas	Doce	10100	164	224
56484998	Raul Soares Montante	Matipó	1350	12	31
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	Doce	15900	88	125
56696000	Mario de Carvalho	Piracicaba	5270	146	202
56775000	Ferros	Santo Antônio	4090	173	223
56787000	Fazenda Barraca	do Tanque	1260	166	461
56800000	Senhora do Porto	Guanhaes	1520	29	78
56825000	Naque Velho	Santo Antônio	10200	67	97
56846000	Porto Santa Rita	Corrente Grande	1970	35	63
56850000	Governador Valadares	Doce	40500	135	179
56860000	São Pedro do Suaçuí	Suaçuí Grande	2570	43	55
56891900	Vila Matias Montante	Suaçuí Grande	9770	92	113
56920000	Tumiritinga	Doce	55100	122	154
56935000	Dom Cavati	Caratinga	775	196	375
56976000	Fazenda Bragança	Manhuaçu	2260	31	58
56989400	Assarai Montante	José Pedro	3190	211	236
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	Manhuaçu	8720	109	120
56990990	Afonso Cláudio Montante	Guandu	435	189	281
56991500	Laranja da Terra	Guandu	1330	166	208
56992000	Baixo Guandu	Guandu	2130	424	585
56993551	Jusante Córrego da Piaba	Santa Joana	893	15	27
56994500	Colatina	Doce	76400	79	109
56995500	Ponte do Pancas	Pancas	920	13	25

As médias da produção sólida específica obtidas considerando o conjunto de estações avaliadas (ponderadas pelas áreas de contribuição) são iguais a 118 e 163 t/ano/km² para as vazões sólidas em suspensão e totais, respectivamente.

A **Figura 22** e a **Figura 23** apresentam, respectivamente, a distribuição espacial das vazões sólidas específicas suspensas e totais, onde se observa uma menor contribuição na porção superior da bacia em contraste com a inferior. Entretanto, mesmo com essa distinção, observa-se uma diferenciação nas características de produção sedimentológica entre bacias vizinhas.

A Figura 24 e a **Figura 25** apresentam os diagramas das vazões sólidas específicas de longo termo em função da área de drenagem (período comum de 1998 a 2015) para as estações localizadas no rio Doce e nas sub-bacias dos seus afluentes, respectivamente. Nas duas figuras, os círculos de tamanho maior representam as vazões sólidas totais e os menores, as suspensas.

Figura 22 – Distribuição espacial das vazões sólidas suspensas médias específicas de longo termo da bacia do rio Doce.

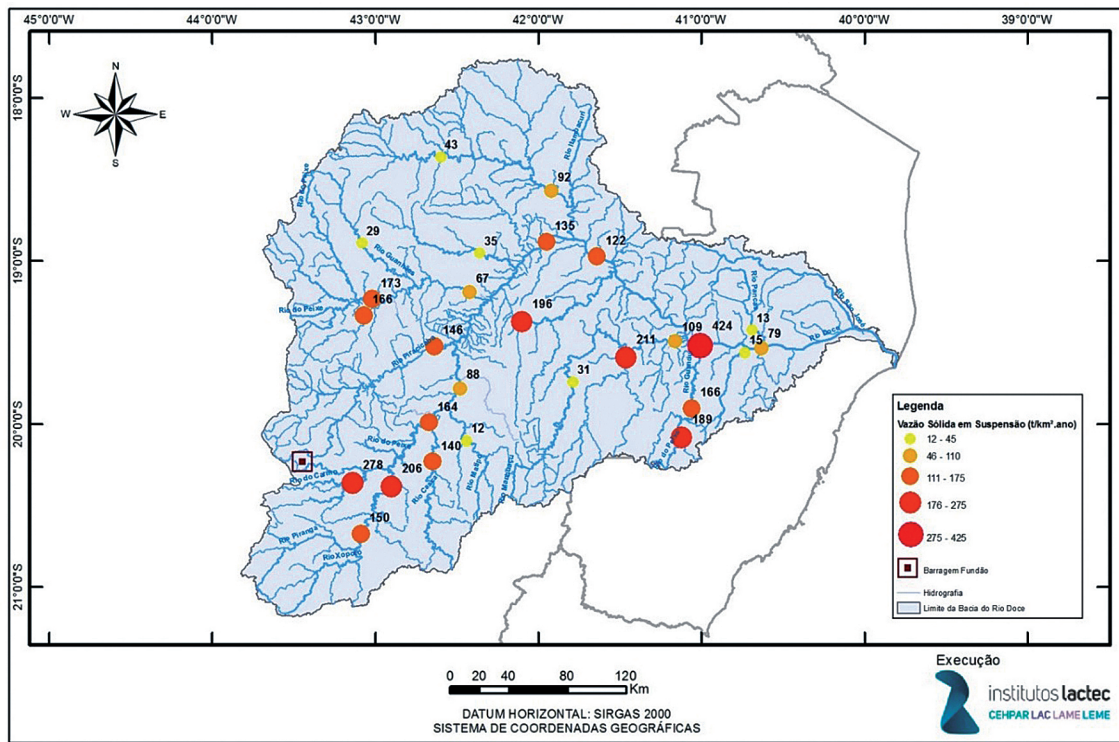


Figura 23 – Distribuição espacial das vazões sólidas totais médias específicas de longo termo da bacia do rio Doce.

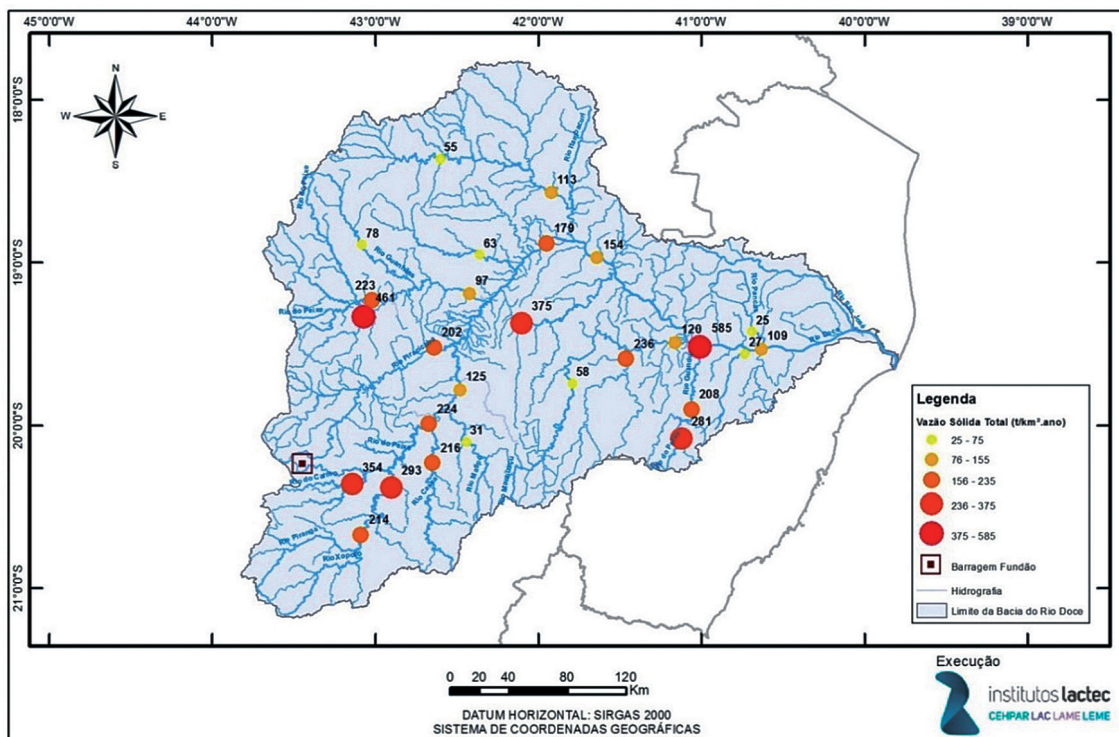


Figura 24 – Diagrama das vazões sólidas médias específicas ao longo do rio Doce.

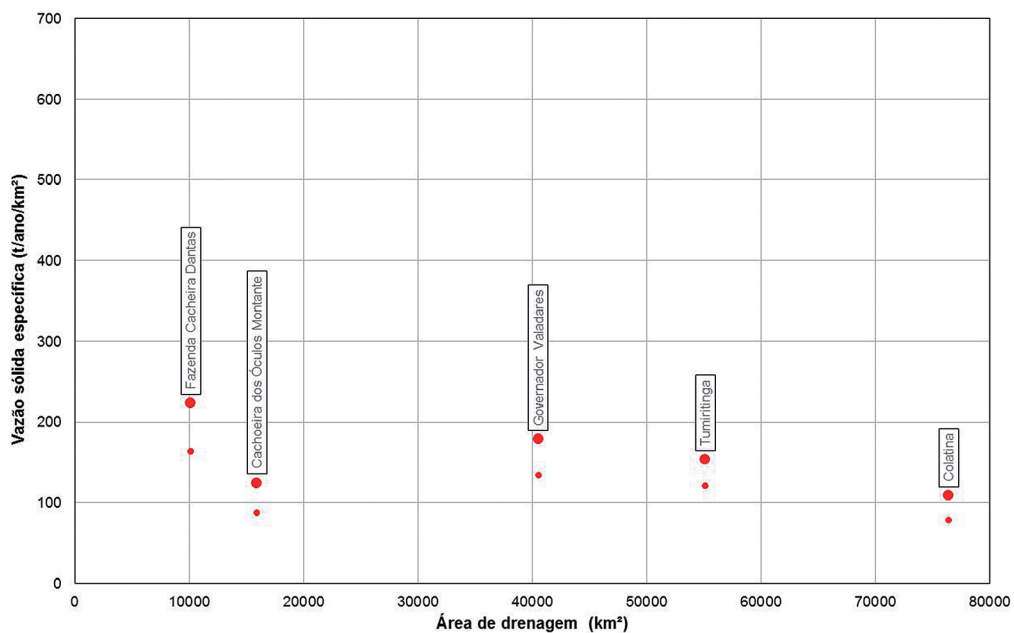
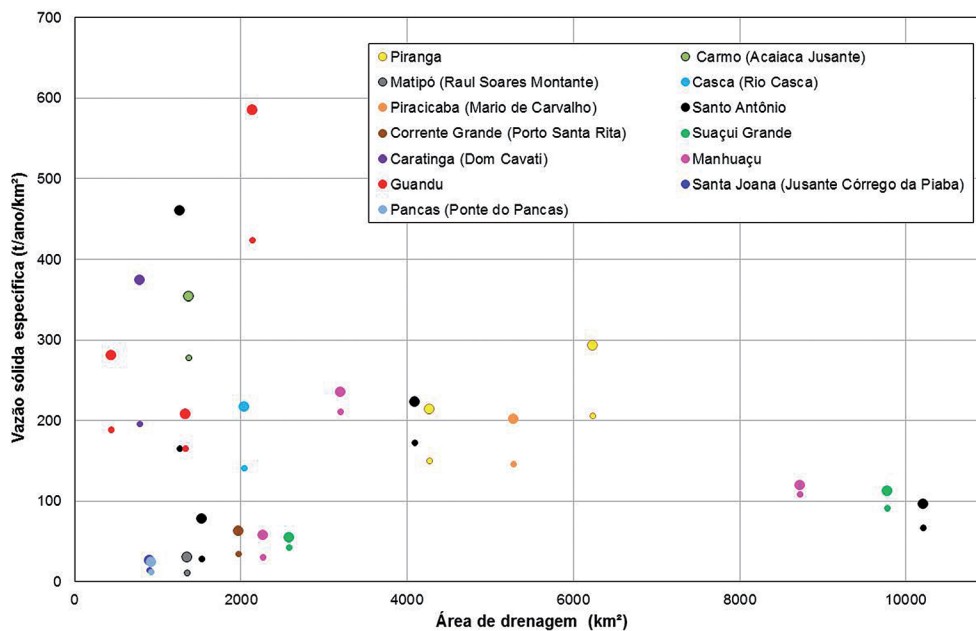


Figura 25 – Diagrama das vazões sólidas médias específicas de afluentes do rio Doce.



Verifica-se que, igualmente ao comportamento das descargas líquidas, as estações do rio Doce possuem um comportamento relativamente homogêneo e decrescente ao longo do percurso. Por outro lado, as estações das sub-bacias possuem comportamento bem variável, com contribuições específicas que variam de valores bem baixos (menores que 50 t/ano/km²) a maiores que 500 t/ano/km².

Outra diferenciação entre estações do rio Doce e dos afluentes é a diferença percentual entre vazões sólidas totais e suspensas, o que pode ser visualizado diretamente na comparação entre os dois gráficos da **Figura 24** e **Figura 25**, visto que a escala vertical é a mesma para ambas as figuras. Para as estações do rio Doce, existe uma variação entre 26 e 42% de diferença entre os dois tipos de

produção sólida. Ressalta-se que as áreas de drenagem das estações do rio Doce são de grande magnitude (maiores que 10.000 km²). Já para as estações dos afluentes a variação entre vazão sólida total e em suspensão está entre 10 e 178%. Para as estações dos afluentes com área drenada maior que 3.000 km², a diferença entre os diferentes tipos de vazão sólida varia entre 10 e 45%. E para estações com drenagem menor que 3.000 km², a variação se situa entre 25 e 178%, sendo que os rios cuja produção sólida total é maior que o dobro da suspensão são o Matipó e afluentes do Santo Antônio.

Os valores de contribuição sólida específica se referem aos valores médios anuais transportados pela vazão em locais específicos. Conforme já mencionado no item 2.1.1.5, o total de sedimentos transportados entre locais depende de uma série de fatores, como características da bacia hidrográfica contribuinte, tais como relevo, solo, intensidade e magnitude das chuvas, usos do solo, existência de práticas conservacionistas etc. Além disso, as características de montante do próprio canal que recebe essas cargas de sedimentos, pontualmente e difusamente, também interferem na quantidade e dinâmica de sedimentos no local monitorado. Ao longo do canal existem locais com propensão a fornecer sedimentos através da erosão ou recebê-los através da deposição. Em um mesmo local, as propriedades de erosão ou deposição podem se acentuar ao longo do tempo, ou mesmo sofrer alternâncias entre uma propriedade e outra. Assim, um mesmo local que sofre erosão durante um determinado tempo poderá sofrer deposição em outro período, sendo que os dois processos podem ocorrer simultaneamente em uma mesma seção transversal. Logo, diferenças nos valores de quantidades totais de sedimentos transportados são esperadas em uma mesma bacia hidrográfica.

Para obter a contribuição sólida específica via hídrica, foi necessário realizar uma considerável extrapolação das curvas de descarga sólida. Portanto, devido a este e todos os outros fatores que acarretam incertezas na estimativa desse tipo de parâmetro, foi realizada uma avaliação desses valores, considerando os seguintes aspectos:

- comparação com os valores obtidos em outros estudos;
- estimativa da perda de solo em função dos valores de produção sólida e aplicação da taxa de transferência de sedimentos;
- avaliação das características da bacia relacionadas à produção de sedimentos.

2.1.4.3.1 *Comparação com os valores obtidos em outros estudos*

Em Eletrobras/IPH (1992), estudo que apresentou o diagnóstico das condições sedimentológicas dos principais rios do Brasil, a bacia do rio Doce é dividida em duas regiões (aproximadamente a montante e jusante de Governador Valadares), denominadas no estudo de E-5 Zona Litoral Leste (porção mais a jusante) e E-6 Zona Mineira (porção mais a montante). Nesse estudo, a Zona Mineira apresentou produção específica sedimentológica média de 250 t/ano/km², enquanto a Zona Litoral Leste apresentou o valor de 43 t/ano/km². Esses valores, entretanto, referem-se apenas à suspensão.

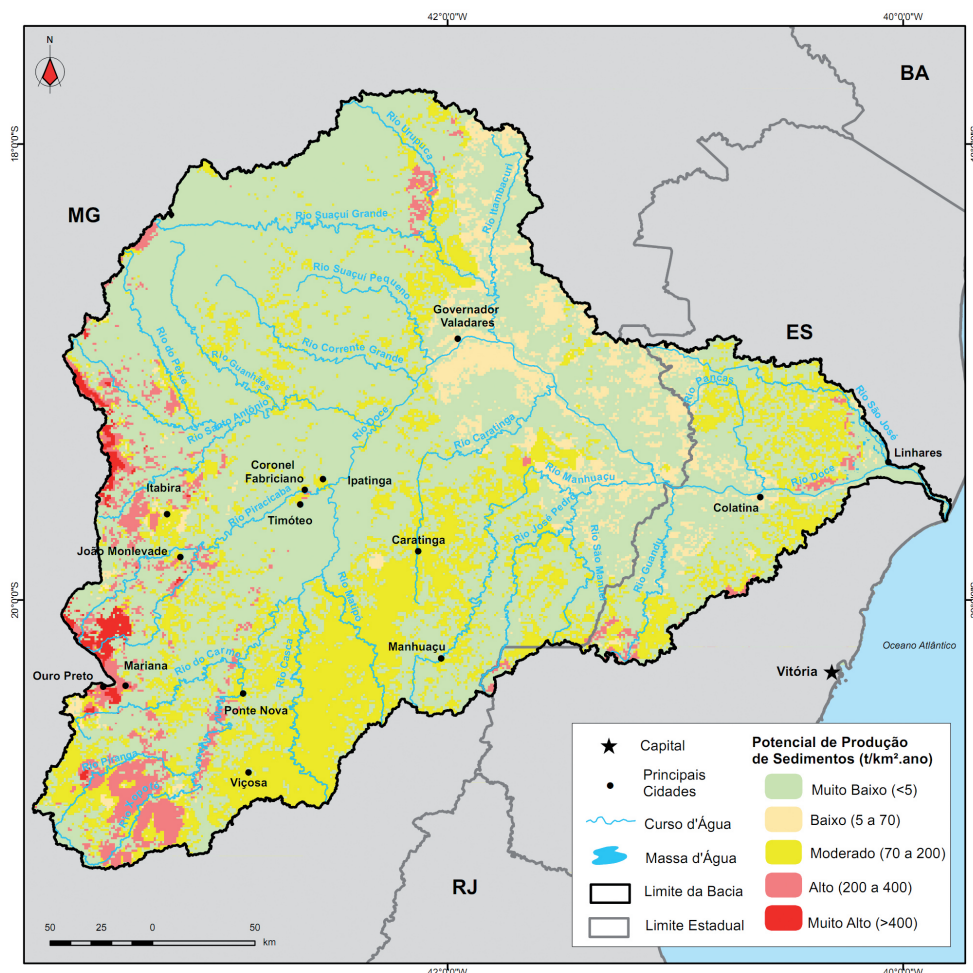
Para as estações e período analisados no presente estudo, a média aproximada para a produção de sedimentos em suspensão para as estações localizadas na Zona Litoral Leste seria de 128 t/ano/km², enquanto as estações da Zona Mineira teriam uma média de 130 t/ano/km², ou seja, sem a distinção marcante para as médias das duas regiões obtida em Eletrobras/IPH (1992). No presente estudo, observou-se que o valor médio da produção sólida é fortemente influenciado pelo conjunto de

estações utilizadas para compor a média. No caso da Zona Litoral Leste, observa-se, por exemplo, que as estações do rio Guandu elevam expressivamente o valor da média. Logo, as diferenças nos valores encontrados entre o presente estudo e o apresentado em Eletrobras/IPH (1992) podem ser explicadas pelos diferentes conjuntos de estações utilizadas, metodologias e períodos.

Outro estudo que contém a avaliação da produção de sedimentos da bacia do rio Doce é apresentado por Campagnoli (2006), o qual elaborou um mapa e uma classificação da produção de sedimentos (suspensão) para todo continente sul-americano com base nas características geológicas, geomorfológicas, pedológicas, de uso do solo, declividades e de precipitação. A partir dessas informações, a ANA (2016b) publicou um estudo somente para a bacia do rio Doce, onde se conclui que, por essa bacia apresentar suas nascentes em regiões montanhosas, onde as vazões são de grande ordem, há um elevado aporte de material de rochas cristalinas do planalto de Minas Gerais, desencadeando uma alta produção de sedimentos. Além disso, as características de solos que compõem a bacia, o uso deste e a forma do relevo, também, favorecem o transporte de solo para o corpo hídrico.

Conforme pode ser observado na Figura 26, ocorrem produções de sedimento da classe moderada (70 a 200 t/ano/km²) a muito alto (> 400 t/ano/km²) em muitos dos rios afluentes e formadores do rio Doce (rio Matipó, rio Casca, rio Xopotó, rio Piranga, rio do Carmo).

Figura 26 – Potencial de produção de sedimentos na bacia, calculado em toneladas por quilômetro quadrado por ano.



Fonte: ANA (2016b).

Ressalta-se que os estudos apresentados em Eletrobras/IPH (1992) e Campagnoli (2006) possuem uma defasagem de tempo em relação aos resultados produzidos no presente trabalho. Assim, é importante ter em mente que mudanças no uso do solo ocorreram após o período adotado nesses trabalhos. Entretanto, por meio de ambos, é possível concluir que a média de produção de sedimentos na bacia é de expressivo valor.

2.1.4.3.2 Estimativa da perda de solo em função dos valores de produção sólida e aplicação da taxa de transferência de sedimentos

Como exposto no item **2.1.1.5**, os sedimentos gerados da perda de solo da bacia são propagados e aportados nos canais fluviais, onde poderão ser monitorados ou estimados os valores de produção sólida. A produção de sedimentos, que é o parâmetro de especial interesse na avaliação hidrossedimentológica, representa uma parcela do total do material que foi erodido na bacia. A razão entre a produção de sedimentos no exutório e a erosão bruta na bacia é conhecida como taxa de emissão de sedimentos.

Didoné (2013) apresentou valores de taxas de emissão de sedimentos estimadas em diversos estudos, cujos principais resultados e características se encontram na Tabela 11. Ressalta-se que as bacias consideradas nas análises citadas são de tamanhos muito diferentes, bem como são diversos os métodos de cálculo de taxa de emissão de sedimentos, o que exige cautela na comparação entre valores.

Tabela 11 – Valores de taxas de emissão de sedimentos estimados por diversos autores.

Referência	Local	Área de drenagem (km ²)	Taxa de emissão de sedimentos (%)
Van Rompaey et al. (2007)*	República Checa	1.960	28
Verstraeten et al. (2007)*	Austrália (diversos rios)	164 – 2.173	20 - 39
Fryirs e Brierley (2001)*	Sul da Austrália (rio Bega)	1040	70
Romero Díaz et al. (1992)*	Espanha (rio Segura)	100 – 1.500	7 - 46
Vente et al. (2008)*	Espanha (61 bacias)	30 – 13.000	0,03 - 55

Nota: Referências apud Didoné (2013).

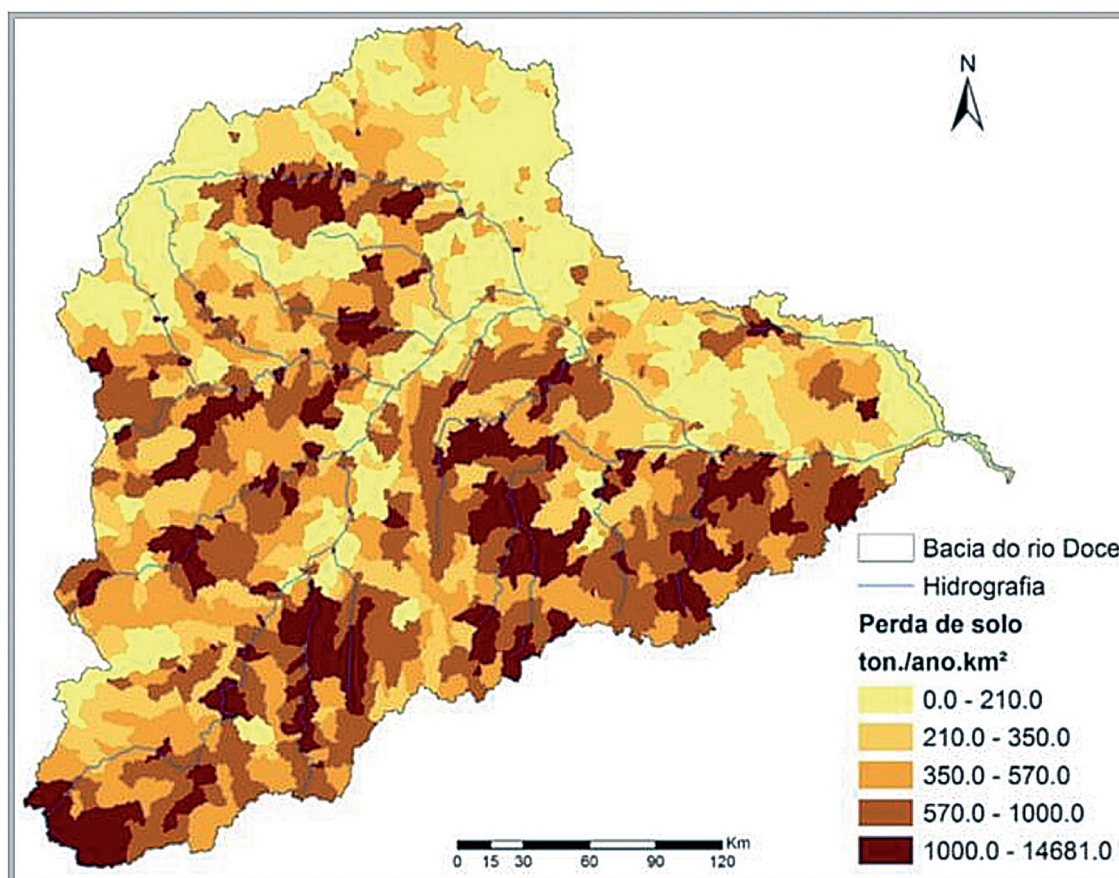
Para realizar uma estimativa da perda de solo da bacia através de um exercício avaliativo dos resultados aqui produzidos e que poderá ser comparada com os resultados de Fagundes et al. (2017), utilizou-se a equação estabelecida empiricamente por Vanoni (1975 apud SILVA, 2015), apresentada no item **2.1.1.5**. Adicionalmente, na seção sobre a modelagem hidrossedimentológica mais detalhes sobre outras modelagens e modelos vão ser abordados. As taxas de emissão variaram entre 17 e 25% para as bacias consideradas, as quais foram aplicadas sobre os valores de produção sólida em suspensão e total apresentados na Tabela 10. Realizando a média ponderada pelas áreas incrementais, foi possível obter a média de perda de solo específica para a bacia igual a 615 t/ano/km². Esse valor considerou o período 1998-2014. Nesse cálculo, foram consideradas as descargas sólidas em suspensão, visto que os sedimentos de arraste (os quais, em conjunto com os sedimentos em suspensão, compõem a descarga sólida total) são normalmente fornecidos em maior parcela pelos materiais dos

próprios canais, margens de inundação e áreas no entorno destas. Por meio da obtenção desse valor, é possível comparar com o resultado obtido em outros estudos, tal como o apresentado por Fagundes et al. (2017).

O estudo de Fagundes et al. (2017) consistiu na aplicação do modelo MGB-SED em uma simulação preliminar (sem calibração dos parâmetros sedimentológicos) na bacia do rio Doce. Um dos resultados apresentados no referido estudo foi o cálculo da perda de solo específica média por minibacia, utilizando a equação universal de perda de solos modificada MUSLE (WILLIAMS, 1975). Conforme Buarque (2015), cujo autor desenvolveu o MGB-SED, o modelo permite a modelagem sedimentológica acoplada aos processamentos hidrológicos (modelo conceitual distribuído) e hidrodinâmicos (método de Muskingum-Cunge e equações completas de Saint Venant).

Os resultados do cálculo da perda de solo específica média para o período da base de dados (1970-2010), determinado por Fagundes et al. (2017), são apresentados na **Figura 27**.

Figura 27 – Perda de solo específica média por minibacia calculada a partir da MUSLE para a bacia do rio Doce.



Fonte: Fagundes et al. (2017).

Conforme observado por Fagundes et al. (2017), a bacia do rio Doce apresenta uma alta variabilidade na quantidade média de sedimentos produzida ao longo dos anos (1970-2010), podendo variar de valores inferiores a 10 t/ano/km² a valores próximos a 14.680 t/ano/km². O valor médio de perda de solo para a bacia do rio Doce resultou 657 ton/ano/km² (valor informado gentilmente pelos autores). Tal como pode ser verificado no presente estudo, a região Norte possui predominância de valores mais

baixos, enquanto a porção inferior apresenta predominantemente maiores valores de perda de solo. Segundo Fagundes et al. (2017), o relevo da bacia parece explicar o padrão espacial apresentado na **Figura 27**, pois as regiões que apresentam maiores valores de perda de solo coincidem, geralmente, com locais com declividades mais elevadas.

Verifica-se haver uma diferença de apenas 6% na comparação direta entre o valor de perda de solo obtido em Fagundes et al. (2017) com a aplicação da MUSLE, e o obtido com a taxa de emissão de sedimentos estimada por Vanoni (1975 apud SILVA, 2015), aplicada sobre os resultados de produção sólida obtidos para as estações adotadas no presente estudo. Entretanto, apesar da semelhança entre resultados, ressalta-se que foram utilizados diferentes períodos de dados nos dois estudos. Considerando a metodologia do presente estudo aplicada sobre o período 1970-2010, ou seja, o mesmo período adotado em Fagundes et al. (2017), obtém-se como média de perda de solo para a bacia o valor de 732 t/ano/km². A diferença nesse caso entre os resultados dos dois estudos é de 11%, valor ainda tido como baixo e compatível com as pesquisas realizadas.

2.1.4.3.3 *Avaliação das características da bacia relacionadas à produção de sedimentos*

Diversos outros estudos têm apontado a erosão (retirada de sedimentos) e assoreamento (depósito de sedimentos) como um dos principais problemas do rio Doce. Conforme apontado por Consórcio Ecoplan-Lume (2010a), o desmatamento generalizado e o mau uso dos solos, para a monocultura do eucalipto ou para agricultura ou pastagem, têm conduzido a região a um intenso processo de erosão dos solos da bacia, cujos sedimentos resultantes tendem a assorear os cursos d'água. Consórcio Ecoplan-Lume (2010a) cita a ocorrência de áreas em que as rochas e o solo têm em sua composição química grandes concentrações de alumínio, agravando ainda mais o problema de contaminação das águas, a qual é potencializada pelo uso indiscriminado de agrotóxicos nas lavouras. Os despejos advindos da mineração e de resíduos industriais e domésticos corroboram esse contínuo processo de assoreamento dos leitos dos rios da bacia.

Segundo Coelho (2007), as condições climáticas da bacia do rio Doce, associadas às características de relevo/solo, proporcionam normalmente: a maior velocidade de decomposição sofrida pelos minerais constituintes do material de origem (rocha) e maior atividade no processo de pedogênese dos solos tropicais e processos naturais de erosões. Tal como Consórcio Ecoplan-Lume (2010a), Coelho (2007) aponta que, considerando a vulnerabilidade natural à erosão da bacia do rio Doce, esse processo tem sido potencializado pelos inadequados uso e manejo do solo. A produção de sedimentos tem se intensificado pela ação do homem por meio do desmatamento extensivo realizado ao longo das décadas passadas, acelerando, assim, os processos de transporte de sedimentos para o canal principal e reservatórios, gerando grandes depósitos de sedimentos e intensificando a ocorrência de cheias. De fato, há algumas décadas a paisagem da bacia era coberta, em sua maior parte, por mata nativa com Campos de Altitude (na serra do Caparaó, serra do Espinhaço e serra da Mantiqueira), Floresta Estacional Semidecidual e o predomínio da Floresta Ombrófila Densa (ou Mata Atlântica) com rico estoque de mata ciliar. Em menos de quatro décadas, grande parte das matas nativas, incluindo a ciliar, deu lugar a uma paisagem de café e pastagem, impulsionada pela construção da ferrovia (COELHO, 2009). Outro fator importante que contribuiu para a supressão das matas na região do médio rio Doce foi a criação do polo industrial (fornecimento de carvão para as siderurgias).

Os fatores que aceleram o processo de erosão são mais devastadores em bacias com terrenos com forte susceptibilidade natural à erosão, a qual é resultante de um conjunto de fatores, como as características da chuva, a topografia e a ocorrência de solos mais vulneráveis ao processo erosivo. Conforme Ross (2004 apud CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a) e Kawakubo et al. (2005 apud CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a), qualquer alteração nos diferentes componentes da natureza (relevo, solo, clima e recursos hídricos) acarreta o comprometimento da funcionalidade do sistema, quebrando o seu estado de equilíbrio dinâmico.

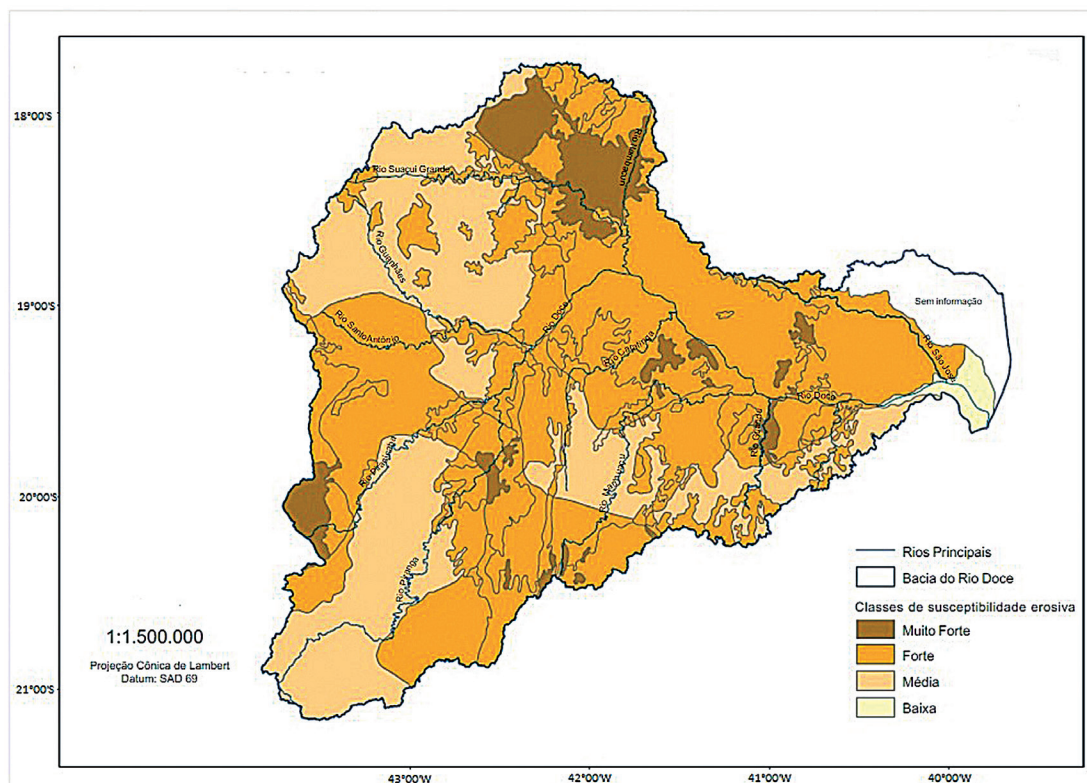
Consórcio EcoPLAN-Lume (2010a) apresentou uma análise do processo erosivo na área da bacia baseada nos estudos relativos ao inventário hidrelétrico da bacia do rio Doce, realizados pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), cujos resultados foram sintetizados em forma de mapa demonstrando a susceptibilidade erosiva do solo. Para a construção desse mapa, foram consideradas as informações obtidas dos mapas de solo, geomorfologia, e de precipitação, considerados como “fatores condicionantes” quanto à fragilidade da área relativa à ocorrência de processos erosivos. A susceptibilidade à erosão foi obtida considerando os seguintes critérios (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a, p. 69):

Do mapa de solos, foram considerados mais susceptíveis à erosão os Cambissolos e os Argissolos em relevo montanhoso e forte ondulado. Do mapeamento geomorfológico foram considerados áreas mais susceptíveis, as cristas e pontões, dada à facilidade que são remobilizados os depósitos de talus no sopé dos afloramentos. Além destas, toda a unidade denominada Depressão do rio Doce, devido a sua propensão natural à erosão e à grande disponibilidade de materiais friáveis e facilmente erodíveis que constituem as rampas de colúvio, bem como os terraços mais antigos e depósitos de cobertura das Superfícies de Aplainamento Pleistocênica. A análise dos mapas de precipitação levou à determinação de duas áreas críticas. Os seus limites foram baseados nos mapas de chuva máxima diária anual (isolinhas de 150mm/diários) e no do coeficiente de variação da precipitação anual (isolinha de 26%). O primeiro caracteriza as áreas submetidas a chuvas bem distribuídas, porém intensas, e o segundo indica períodos de estiagem alternados com chuvas torrenciais.

A hierarquização da susceptibilidade à erosão foi feita por meio da classificação quanto à intensidade do processo:

- muito forte: associação dos três condicionantes ocorrerem na área;
- forte: presença de pelo menos um fator condicionante;
- média: ocorrência esparsa de erosão e devido à escala não foi possível identificar o fator condicionante;
- baixa ou nula: abrange as planícies fluviais e marinhas da foz do rio Doce.

O mapa de susceptibilidade erosiva, transcrito de Consórcio EcoPLAN-Lume (2010a), é mostrado na **Figura 28**. Conforme pode-se observar, a maioria da bacia se encontra na classe de susceptibilidade erosiva forte (58% da área), ocupando principalmente a depressão do rio Doce e várias sub-bacias. Na classe de susceptibilidade muito forte, 7% da área da bacia se insere nessa categoria, sendo que, além de pequenos trechos de sub-bacias distribuídos esparsamente na bacia, as áreas atingidas são: alto curso do Piracicaba, mais precisamente nas cabeceiras do afluente rio Santa Bárbara, e na sub-bacia do Suaçuí Grande. A área onde se encontrava a barragem de Fundão também foi classificada como de susceptibilidade erosiva muito forte. A ocorrência dessa classe nessas áreas está associada às estiagens prolongadas, às chuvas torrenciais, aos solos susceptíveis e aos extensos depósitos superficiais friáveis que ocorrem em terraços fluviais e nas baixas vertentes (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a).

Figura 28 – Mapa de susceptibilidade erosiva da bacia do rio Doce.

Fonte: CETEC (1989 apud CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a; Página 3, Anexo I).

Como explicado anteriormente, a susceptibilidade erosiva está também associada aos usos do solo da bacia. Em relação a esse tópico, Consórcio EcoPLAN-Lume (2010a) informou que cerca de 64% da área total da bacia corresponde ao uso por atividades agropecuaristas. De fato, a inspeção de campo, ocorrida no período entre 3 e 8 de maio de 2017 pela equipe dos Institutos Lactec, permitiu a constatação visual de intensa ocorrência dessa atividade. Nessa ocasião, pôde-se também observar que as áreas do entorno de grande parte do trajeto percorrido encontravam-se degradadas, com solo exposto com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (**Figura 29**), ocorrendo a exposição de solos friáveis e ocasionando a formação de voçorocas e/ou ravinas (**Figura 30**), e com intensificação do processo de degradação pelo pisoteio do gado (**Figura 31**). Em parte do trecho percorrido que margeou o rio Doce, verificou-se a ausência de mata ciliar (**Figura 32**), sendo que, em alguns casos, foi observada a presença de gados ou áreas de cultivo às margens do curso d'água (**Figura 33**).

Figura 29 – Solo exposto com pouca cobertura vegetal.



Figura 30 – Exposição de solos friáveis ocasionando a formação de voçorocas e/ou ravinas.



Figura 31 – Intensificação do processo de degradação do solo pelo pisoteio do gado.



Figura 32 – Ausência de mata ciliar nas margens do rio Doce.



Figura 33 – Prática de cultivo às margens do rio Doce.



Também foi possível visitar diversos locais em que a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) corre muito próximo ao rio (**Figura 34**). O mapa da **Figura 35** mostra que o traçado da EFVM basicamente segue a direção da calha natural do rio Doce, ficando próximo ao seu leito na maioria do trecho.

Figura 34 – Trilhos da EFVM próximo à calha do rio Doce.



Figura 35 – Trajeto da EFVM próximo à calha do rio Doce.



Fonte: <http://vfco.brazilia.jor.br/Carros/efvm/trem-Vitoria-Belo-Horizonte-estacoes.shtml>

Assim, em função de todas as ponderações do presente item, verifica-se que os altos valores de produção sólida obtidos para a bacia do rio Doce no presente estudo são qualitativamente condizentes às características observadas publicadas por diversos pesquisadores, bem como no trabalho de inspeção de campo, realizado pelo próprio Lactec.

2.1.4.4 Geomorfologia fluvial

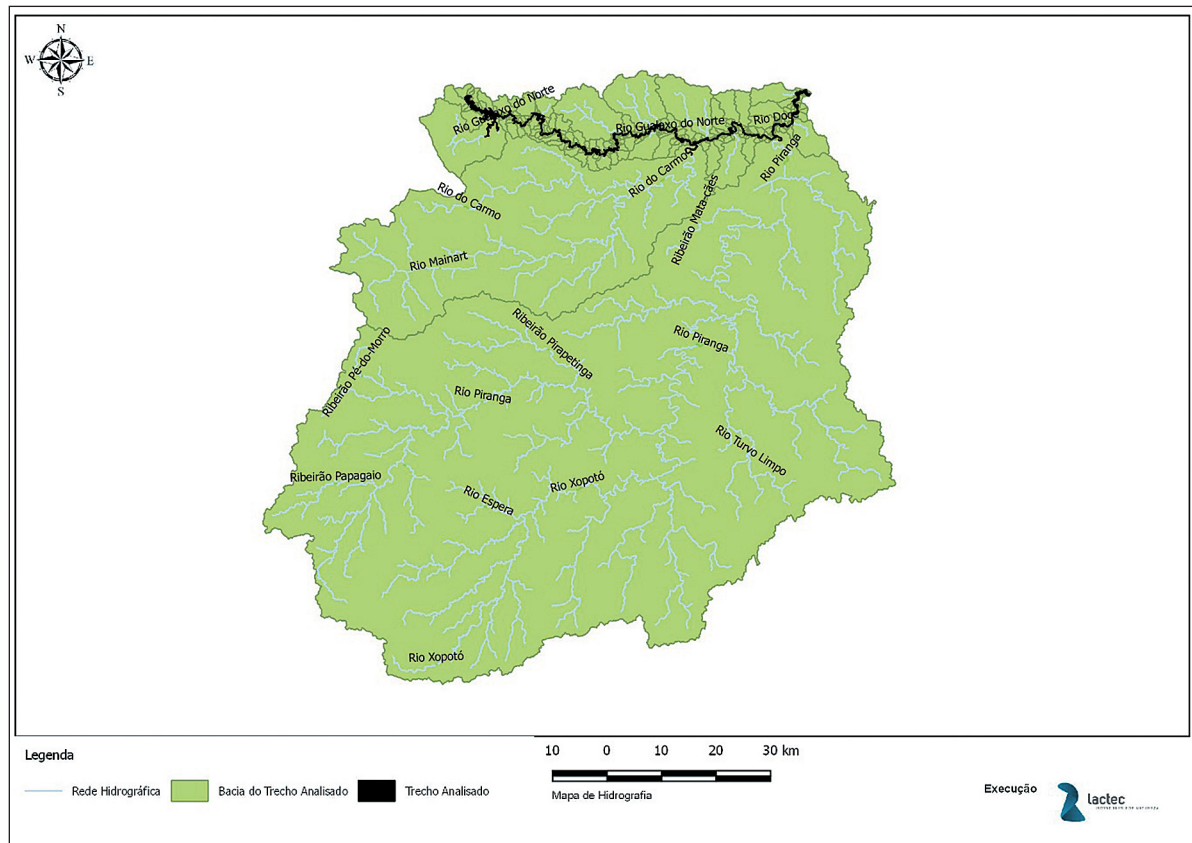
Neste item são abordados aspectos da geomorfologia fluvial da bacia do rio Doce a montante da represa da UHE Risoleta Neves, com área de drenagem de aproximadamente 9.000 km². Nessa porção da bacia do rio Doce está localizado o trecho fluvial mais afetado pelo desastre, com extensão de aproximadamente 109 km, entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves.

Geomorfologia fluvial trata do estudo dos rios no contexto da bacia hidrográfica, com foco no estudo dos processos e das formas relacionadas ao escoamento dos rios. Como premissa básica, destaca-se que, em ambientes naturais, existe ajuste entre as condições de escoamento da bacia e a geometria e composição dos canais fluviais. Nesse sentido, como o trecho fluvial considerado sofreu alterações tanto na planície quanto nas formas e dimensões do canal natural, esses aspectos serão avaliados de forma detalhada, buscando quantificar as modificações e avaliar a dinâmica pós desastre.

Para avaliação da bacia foi utilizada a Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA, georreferenciada em Sirgas 2000 (EPSG 4674) e na escala 1:50.000. Essa base hidrográfica contém todas as áreas de contribuição hidrográfica, divididas em sub-bacias e interbacias, elaboradas por meio de MDE construído a partir de dados ASTER (ANA, 2018).

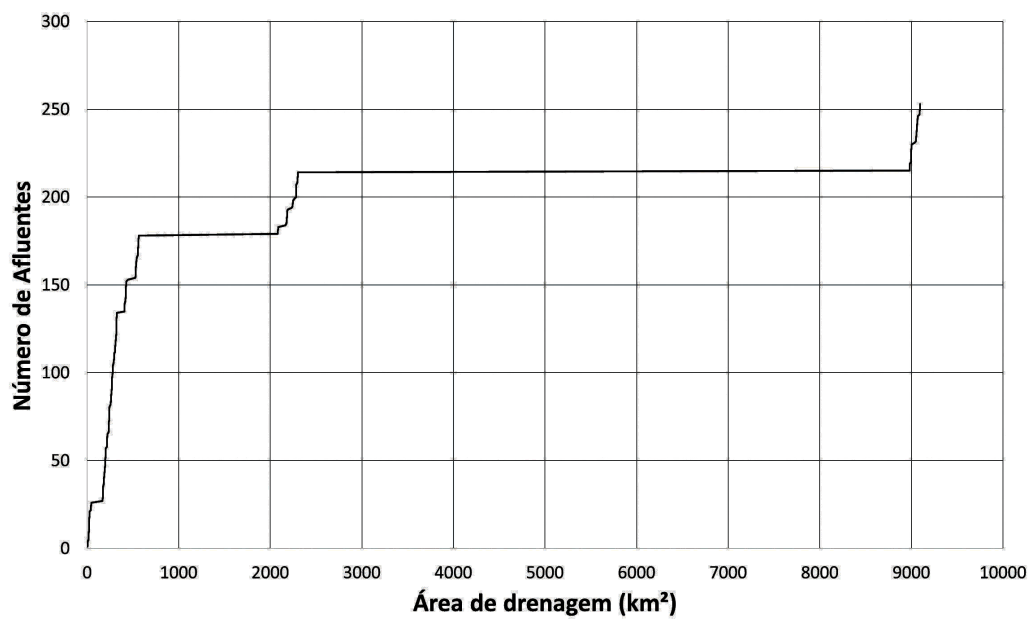
A Figura 36 mostra a bacia do rio Doce a montante da UHE Risoleta Neves. Destaca-se o trecho fluvial afetado pela lama a jusante da barragem de Fundão, localizado ao norte da bacia. O trecho afetado envolve um segmento do Córrego Santarém, quase a totalidade do rio Gualaxo do Norte e um segmento do rio Doce. O trecho afetado recebe pequenos afluentes pela margem esquerda (porção norte da bacia) e os maiores afluentes pela margem direita, com destaque para o rio do Carmo e o rio Piranga (porção sul da bacia).

Figura 36 – Bacia do rio Doce a montante da UHE Risoleta Neves.



O trecho fluvial afetado recebe um total de 253 afluentes, como consequência a área de drenagem ao longo do rio aumenta, variando de cerca de 4 km² na barragem de Fundão até aproximadamente 9.000 km² na UHE Risoleta Neves (Figura 37).

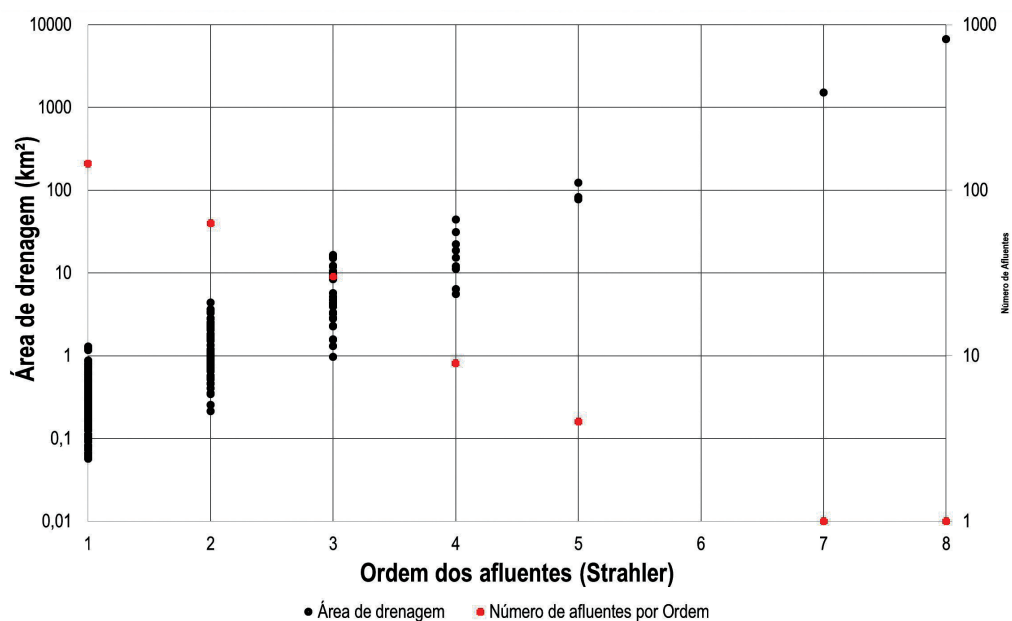
Figura 37 – Número de afluentes e incremento de área de drenagem entre fundão e UHE Risoleta Neves.



A rede de drenagem dos afluentes foi hierarquizada pelo método de Strahler. A Figura 38 mostra a variação da área de drenagem e número de afluentes, classificados pela ordem do canal na confluência com o trecho fluvial afetado. Foram identificados 145 afluentes de primeira ordem, com área de drenagem variando de 0,06 a 1,22 km², sendo que essas pequenas bacias se caracterizam por apresentar um único canal entre a nascente e a confluência com o trecho fluvial afetado. Os demais 108 afluentes apresentam bacias maiores e rede de drenagem mais complexa, com a ordem dos canais variando entre 2 e 8 nas confluências com o trecho de interesse.

Considerando o mapeamento na escala 1:50.000, a rede de drenagem das bacias afluentes ao trecho fluvial afetado apresenta aproximadamente 20.000 nascentes. Destaca-se que as bacias de primeira ordem apresentam uma única nascente em seu interior, sendo que para as demais bacias o número de nascentes é variável em função da complexidade da rede de drenagem.

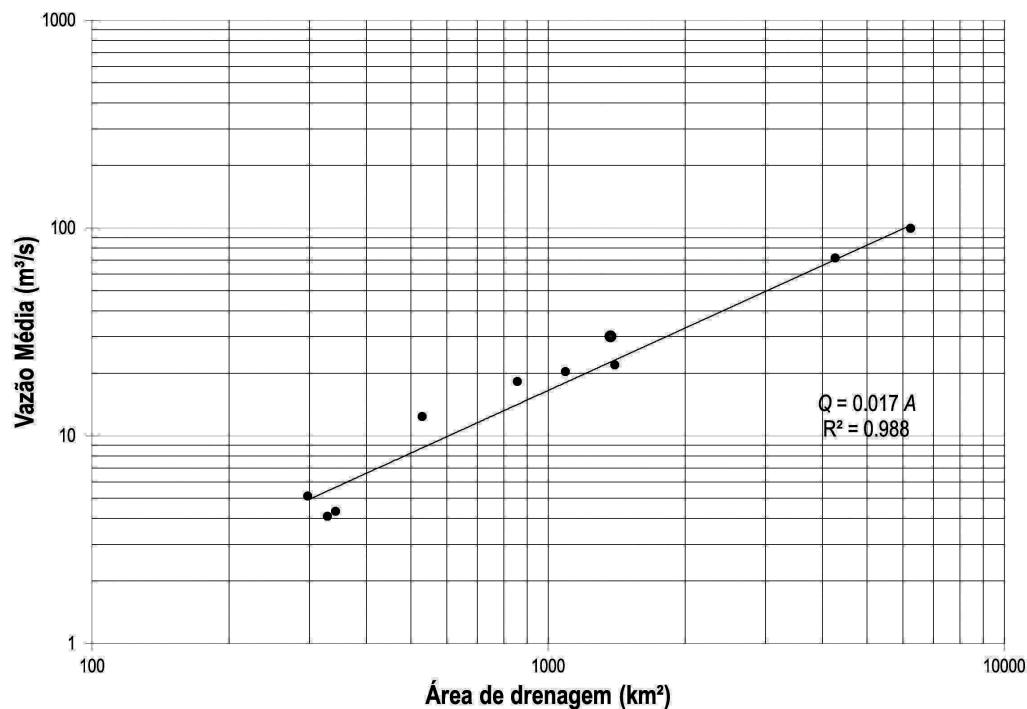
Figura 38 – Número de afluentes e incremento de área de drenagem entre Fundão e UHE Risoleta Neves.



A área de drenagem pode ser considerada a principal variável de análise das bacias hidrográficas, pois condiciona a magnitude das vazões. Em regiões úmidas e hidrológicamente homogêneas, as vazões nos rios são aproximadamente proporcionais ao tamanho da bacia, aumentando, portanto, em direção a jusante e condicionando a geometria hidráulica e composição dos canais fluviais (CHRISTOFOLLETTI, 1981).

A Figura 39 mostra o comportamento das vazões médias de 10 estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Doce a montante da UHE Risoleta Neves (Tabela 12). Nota-se que a vazão média apresenta relação direta com a área de drenagem, resultando uma produção média de água de aproximadamente 17 L/km².

Figura 39 – Relação entre vazão média e área drenagem na bacia do rio doce a montante da UHE Risoleta Neves.



A vazão de um canal (Q) é descrita pela equação $Q=s \cdot v$, que representa a relação entre a área (s) de uma seção transversal do canal e a velocidade média na seção (v). A área (s) da seção transversal é produto da largura (w) e da profundidade média (d). Portanto, a vazão também pode ser expressa por $Q=w \cdot d \cdot v$.

A vazão representa a variável independente na relação com os demais elementos geométricos da seção transversal (s , w e d). Portanto, em condições naturais, a geometria do canal representa uma relação de proporcionalidade e de equilíbrio fluvial em uma determinada seção ou trecho do canal (CUNHA, 2012).

Mudanças no regime de vazão implicam, de imediato, alterações e ajustamentos nas demais variáveis (LEOPOLD; WOLMAN; MILLER, 1964). Ao passo que, no sentido inverso, mudanças nas variáveis de largura e profundidade para um mesmo regime hídrico representam alteração no balanço entre a vazão e o transporte de sedimentos (erosão e deposição).

A relação direta entre a vazão e a geometria dos trechos de drenagem pode ser avaliada de maneira objetiva a partir do ajuste de equações das potências $w=a \cdot Q^b$ e $d=c \cdot Q^f$ (LEOPOLD; MADDOCK, 1953). Os coeficientes a e c e os expoentes b e f são ajustados empiricamente para cada conjunto de dados.

Alterações nas relações de proporcionalidade entre vazão e largura ou entre vazão e profundidade média podem ser avaliadas ao longo do espaço ou do tempo pela comparação entre os expoentes b e f de diferentes conjuntos de dados.

A avaliação da geometria hidráulica dos canais da bacia do rio Doce, até o reservatório da UHE Risoleta Neves, foi realizada utilizando-se os dados de medições de descarga líquida de 10 estações fluviométricas da Rede Hidrometeorológica Nacional, gerida pela ANA (2018).

A Tabela 12 apresenta a lista e principais características das estações fluviométricas cujas medições de descarga líquida foram consideradas para análise das relações de geometria hidráulica.

Tabela 12 – Estações Fluviométricas utilizadas na análise regional da geometria hidráulica.

Código	Nome	Corpo d'Água	Área (km ²)	Latitude	Longitude
56028000	Piranga	rio Piranga	1400	20°41'26.16" S	43°17'57.84" O
56055000	Bráz Pires	rio Xopotó	1090	20°50'51.00" S	43°14'30.84" O
56065000	Senador Firmino	rio Turvo	297	20°54'42.12" S	43°05'49.92" O
56075000	Porto Firme	rio Piranga	4260	20°40'13.08" S	43°05'17.16" O
56085000	Seriquite	rio Turvo Sujo	342	20°43'23.88" S	42°55'22.08" O
56090000	Fazenda Varginha	rio Turvo Limpo	328	20°42'51.84" S	42°59'58.92" O
56110005	Ponte Nova Jusante	rio Piranga	6230	20°23'02.04" S	42°54'10.08" O
56240000	Fazenda Paraíso	rio Gualaxo Do Sul	855	20°23'25.08" S	43°10'54.84" O
56335001	Acaiaca Jusante	rio Do Carmo	1370	20°21'41.04" S	43°08'21.84" O
56337000	Fazenda Ocidente	rio Gualaxo Do Norte	529	20°16'01.92" S	43°06'02.88" O

A análise contemplou 2.562 medições de descarga líquida realizadas entre junho de 1930 e abril de 2015. Os resultados apresentados se referem, portanto, ao período anterior ao rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015.

A Figura 40 e Figura 41 mostram as relações entre a vazão medida e a largura e profundidade dos canais fluviais, respectivamente.

Figura 40 – Dispersão entre largura do canal e vazão líquida nas estações fluviométricas.

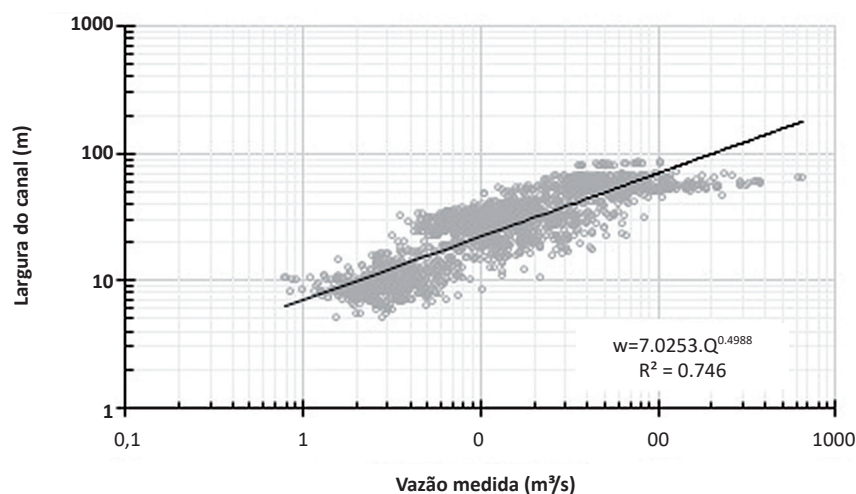
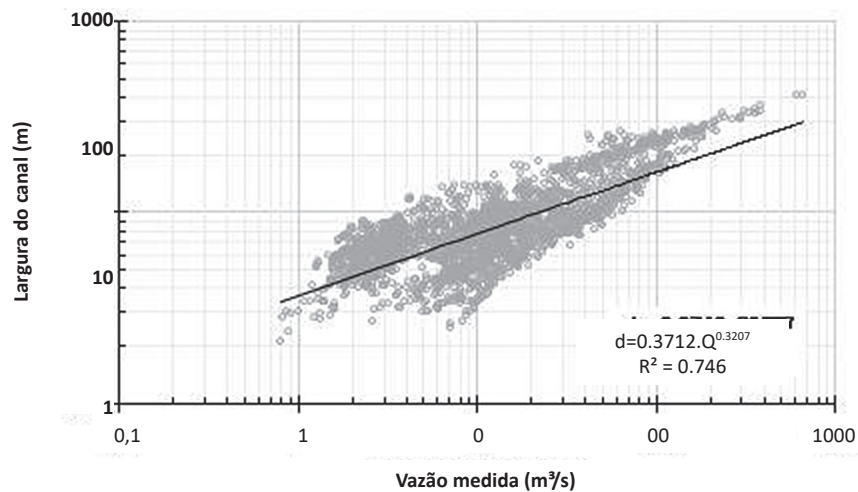


Figura 41 – Dispersão entre profundidade média e vazão líquida nas estações fluviométricas

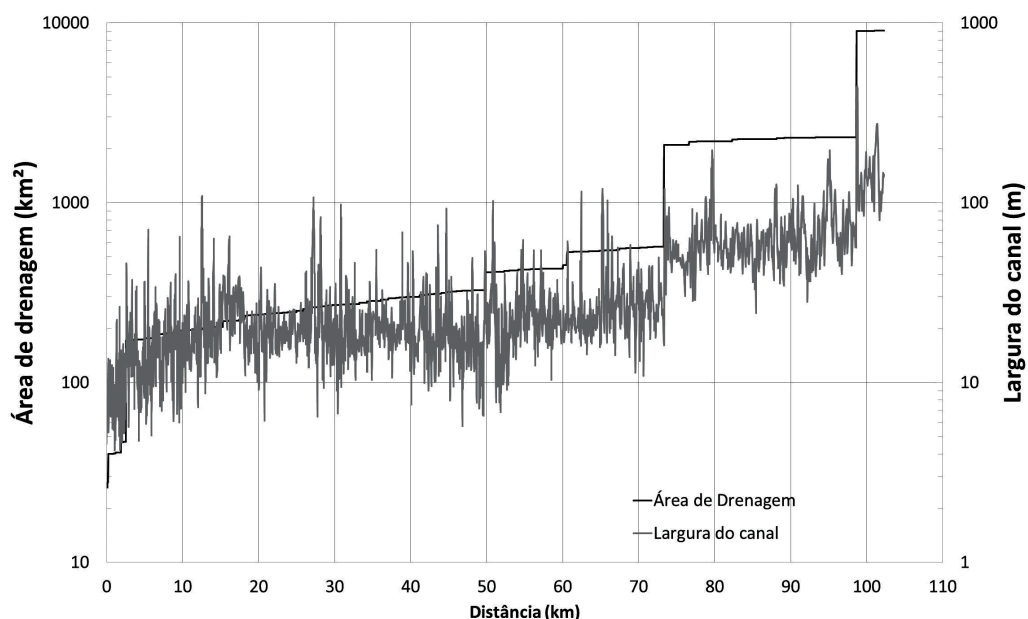


Ressalta-se que a massa de dados analisada contempla trechos de drenagem localizados além da área de contribuição direta do rio Gualaxo do Norte. Portanto, os resultados apresentados retratam a condição média do sistema fluvial das sub-bacias dos rios Gualaxo do Norte e Piranga no período anterior ao evento de Fundão (t_0).

Os expoentes obtidos ($b=0,4988$ e $f=0,3207$) se assemelham aos resultados de Leopold e Maddock (1953). Para esses autores, rios localizados em ambientes úmidos devem exibir expoente b próximo de 0,5 e expoente f próximo de 0,4. Esses resultados demonstram que o sistema fluvial da região apresentava características similares às verificadas em condições naturais.

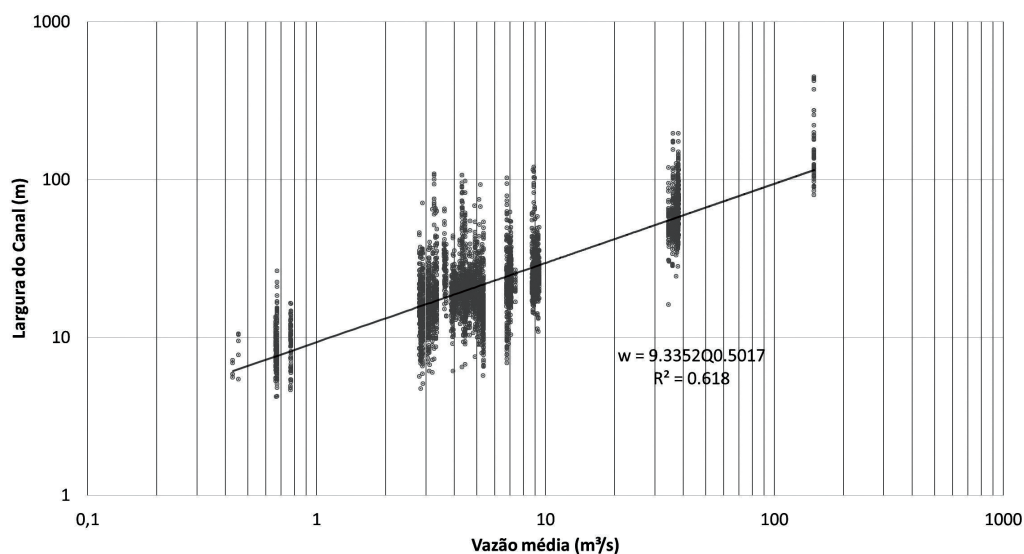
A Figura 42 mostra a variação da largura do canal fluvial ao longo do trecho entre Fundão e UHE Risoleta Neves, juntamente com o incremento da área de drenagem e a distância a partir da barragem de Fundão. As medidas de largura foram realizadas com espaçamento de 25 m. Para a reconstituição da largura do canal foram utilizadas imagens de satélite anteriores ao desastre, e a vetorização foi realizada na escala 1:2.000 no programa QGIS, utilizando-se o SRC Sirgas 2000 Fuso 23S (EPSG 31983).

Figura 42 – Variação da área de drenagem e da largura do canal fluvial entre Fundão e UHE Risoleta Neves.



As vazões médias ao longo do trecho foram calculadas pela relação com a área de drenagem e avaliadas frente aos resultados de largura do canal fluvial em condições anteriores ao desastre (Figura 43). O ajuste resultou em valor do expoente $b=0,5017$ muito próximo ao obtido para as séries de medições de vazões das estações fluviométricas da bacia do rio Doce e do indicado na literatura para rios naturais.

Figura 43 – Dispersão entre largura do canal fluvial e vazão média entre Fundão e UHE Risoleta Neves.



Os resultados referentes ao período anterior a t_0 poderão ser cotejados com os dados referentes às medições de descarga líquida e outros resultados obtidos após o evento do rompimento da barragem de Fundão. Essa comparação entre os coeficientes b e f calculados para diferentes intervalos de tempo permitirá compreender a magnitude da alteração das características naturais da drenagem

afetada, bem como identificar o possível processo de reequilíbrio e restabelecimento da proporcionalidade das variáveis geométricas dos canais.

2.1.4.5 Estudos de modelagem hidrossedimentológica no rio Doce

Esta seção apresenta uma revisão bibliográfica que compõe o relatório de linha-base, integrante do Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Rio Doce, o qual demonstra características ambientais anteriores ao rompimento da barragem de Fundão ocorrido no dia 5 de novembro de 2015, e possíveis ferramentas que podem ser usadas futuramente na modelagem do evento de rompimento.

Para a caracterização das condições ambientais de um curso d'água, é necessária a compreensão e descrição dos processos hidrossedimentológicos que nele ocorrem, quais sejam: os processos de erosão transporte e deposição de sedimentos ao longo da calha fluvial e várzeas adjacentes. Para isso são necessárias medições, tanto na escala espacial quanto na escala temporal. Ou seja, para a adequada caracterização hidrossedimentométrica de um curso d'água, são necessários dados, obtidos através de monitoramento em nível de campo, em quantidade nem sempre disponível.

O acervo de dados sedimentométricos existente na bacia do rio Doce apresenta uma série histórica obtida anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão, que, apesar de conter um número pequeno de estações de medição, possibilita caracterizar o transporte de sedimentos nessa bacia adequadamente, no período anterior ao rompimento.

Os dados disponíveis no período posterior ao rompimento, embora possam permitir a caracterização das condições ambientais da bacia, imediatamente após a ruptura, não são suficientes para descrever a situação em toda a área de estudo e nem para prever a evolução desses processos ao longo do tempo.

Nesse contexto, a modelagem dos processos hidrossedimentológicos, que utilize as informações existentes para simular cenários, assume papel de suma importância.

Existe na literatura uma extensa gama de modelos matemáticos, para diferentes tipos de aplicação, com diferentes graus de complexidade e níveis de exigência de dados. Alguns modelos são capazes de fornecer resultados com boa precisão. Porém, com um nível de detalhamento de dados de solos, vegetação e uso da terra incompatível com a realidade brasileira.

Poucos são os modelos desenvolvidos com foco na realidade brasileira, em escala de grandes bacias hidrográficas. Entre eles, destacam-se os relacionados à modelagem e à compreensão dos processos hidrossedimentológicos do rio Doce desenvolvidos em períodos recentes.

A seguir são apresentados os contextos e os principais resultados obtidos com essas pesquisas, divididos em trabalhos de: (i) desenvolvimento de modelos e compreensão de processos de grande escala; (ii) estudos de comparação de modelagens de turbidez; e (iii) avaliação de modelos simplificados de propagação de ondas de sedimentos.

O objetivo dos próximos itens é revisar as pesquisas e aplicações existentes de modelagens no rio Doce, especialmente no que tange à modelagem da produção e transporte de sedimentos natural da bacia em estado natural, sem considerar o rompimento da barragem de Fundão.

As técnicas e resultados revisados poderão ser usados nas etapas de prognóstico pós-desastre, como ferramenta de aplicação ou como condição de contorno para os estudos.

2.1.4.5.1 *Desenvolvimento de modelos e compreensão de processos de grande escala*

Entre os trabalhos de modelagem hidrossedimentológica na bacia do rio Doce, destacam-se os apresentados por Fagundes et al. (2017), Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017), Fagundes, Paiva e Fan (2017) e Fagundes (2018), que buscaram desenvolver um modelo hidrossedimentológico completo de toda a grande bacia hidrográfica do rio Doce, bem como validar e entender os processos que nela ocorrem, utilizando dados observados em campo, disponíveis para acesso na internet e imagens de sensoriamento remoto.

O modelo utilizado por Fagundes et al. (2017), Fagundes, Paiva e Fan (2017) e Fagundes (2018) foi o MGB-SED, uma versão do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) capaz de simular os processos hidrossedimentológicos, detalhada no item 1.2.1.1. Posteriormente no item 1.2.1.2 são revisados os principais resultados das modelagens.

2.1.4.5.1.1 O Modelo MGB-SED

O modelo hidrológico MGB-IPH, foi desenvolvido por Collischonn (2001) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Desde então, vem sendo aprimorado e validado em diversos estudos, como nos trabalhos realizados por Paiva (2009), Fan e Collischonn (2014), Pontes et al. (2015), Fan (2015), Fleischmann et al. (2017) e Lopes (2017).

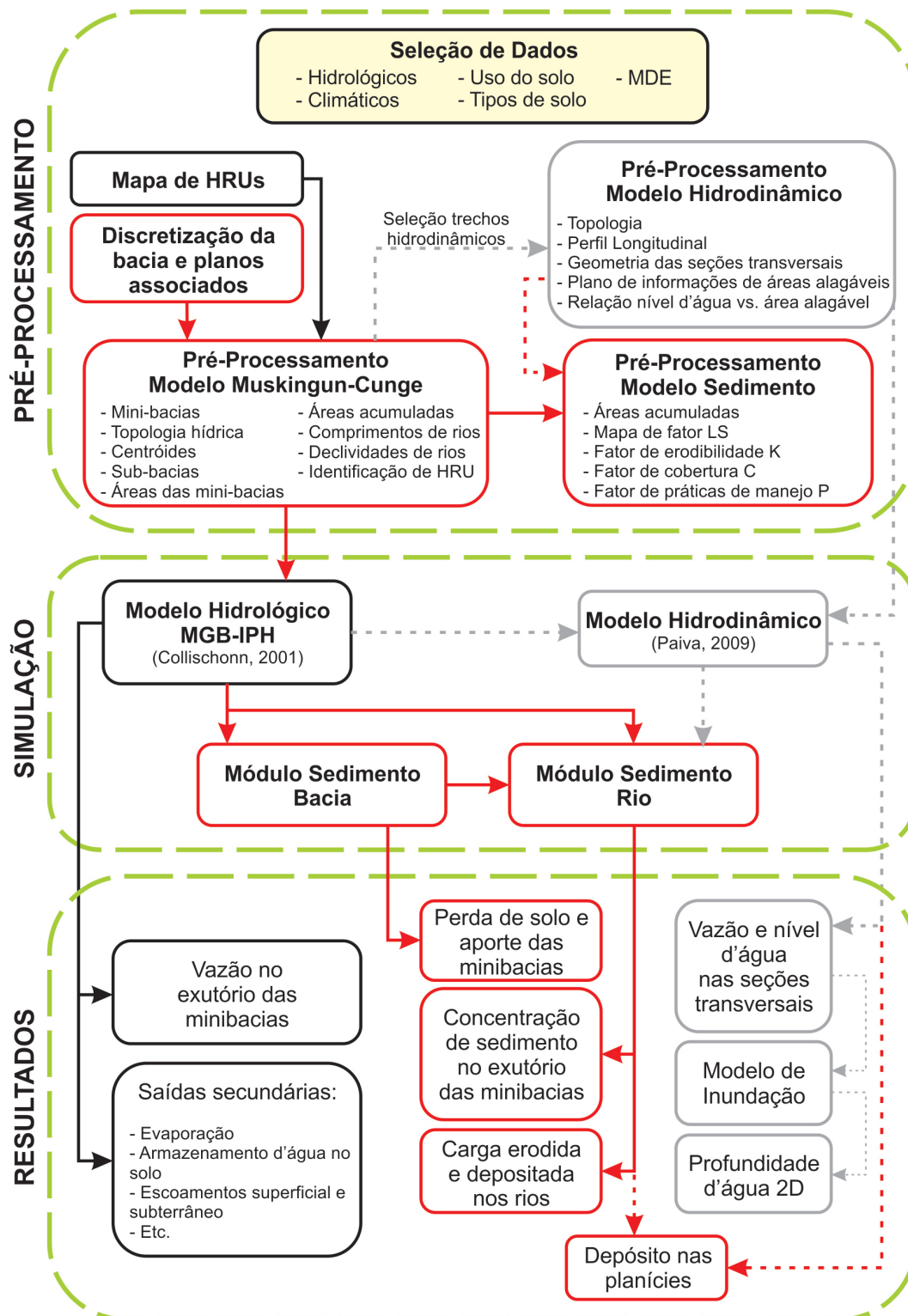
Modelos hidrológicos, como o MGB-IPH, realizam uma transformação chuva-vazão, simulando a descarga fluvial gerada por um evento de precipitação e suas interações com os aspectos bióticos e abióticos da bacia hidrográfica (LOPES, 2017). Preliminarmente, a estrutura do modelo foi baseada no modelo LARSIM (BREMICKER, 1998), com simplificação do seu módulo de balanço de água no solo, o módulo de evapotranspiração seguiu o modelo de Shuttleworth (1993) e Wigmosta, Vail e Lettenmaier (1994) e o módulo de escoamento foi desenvolvido a partir da metodologia de Muskingum-Cunge, descrita por Tucci (1998), que, segundo Paiva (2009), é muito eficiente em casos onde os efeitos de jusante e de armazenamento nas planícies de inundação não são importantes. A bacia hidrográfica é representada por uma subdivisão em minibacias (denominação dada para a discretização em pequenas bacias de trechos de rio), ligadas entre si por canais de drenagem. A simulação inclui os processos de balanço de água no solo, precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, além de armazenamento de água no solo, que fazem parte do ciclo hidrológico (LOPES, 2017).

Além disso, as minibacias são subdivididas em Unidades de Respostas Hidrológicas (URH ou HRU – *Hydrological Response Unit*), isto é, áreas que possuem comportamento hidrológico similar, devido a características físicas relacionadas ao solo e à cobertura vegetal (FAN; COLLISCHONN, 2014). Assim, os processos hidrológicos verticais são simulados em níveis de URH, os volumes gerados são somados e propagados pelas minibacias e, posteriormente, propagados pela rede de drenagem (PAIVA, 2009).

O modelo MGB-IPH é o modelo hidrológico que deu origem ao modelo hidrossedimentológico MGB-SED.

O modelo MGB-SED, desenvolvido por Buarque (2015), é um módulo de sedimentos acoplado ao modelo hidrológico de grandes bacias, o MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007), que foi aplicado pela primeira vez na bacia do rio Madeira com versão de propagação de vazões desenvolvida por Paiva (2009). A Figura 6, retirada de Buarque (2015), mostra como esse acoplamento foi inicialmente desenvolvido.

Figura 44 – Processos da modelagem hidrossedimentológica usando o modelo MGB-SED.



Fonte: Buarque (2015, p. 29).

Segundo Buarque (2015), um dos grandes desafios encontrados na simulação hidrossedimentológica de grandes bacias é devido ao fato de haver um grande percurso entre a geração de sedimentos e sua chegada ao exutório, de forma que parte desses sedimentos é depositada ao longo do curso d'água. Assim, é necessário haver uma integração entre os processos de erosão e de transporte dos sedimentos adequadamente (BUARQUE, 2015). O modelo MGB-SED é composto por dois módulos principais: bacia e rio. Ainda, caso seja adotada modelagem hidrodinâmica, é possível ativar o módulo de planície. A descrição resumida desses três módulos é apresentada nos itens a seguir. Mais detalhes podem ser encontrados em Buarque (2015) e Buarque et al. (2016).

2.1.4.5.1.1.1 Módulo bacia

Segundo Buarque (2015), é nessa etapa que ocorre a estimativa da geração e o aporte de sedimentos da camada superficial do solo das minibacias para a rede de drenagem. A erosão, calculada por minibacia para cada URH, é estimada através da MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), desenvolvida por Williams e Berndt (1972), que utilizam o volume do escoamento superficial e a vazão de pico do escoamento, obtidos a partir do módulo hidrológico do modelo MGB-IPH. Ainda, é utilizado o conceito de reservatório linear simples, para simular o retardo dos sedimentos, gerados nas minibacias, para a rede de drenagem.

A equação MUSLE (WILLIAMS, 1975) é aplicada a cada pixel que compõe as URHs de uma minibacia, de acordo com Buarque (2015). Assim, são calculados parâmetros diretamente do MDE, que traz informações topográficas em formato raster, uma vez que sua representação espacial é dada na forma de uma matriz com linhas (l) e c colunas (c), onde as $l \times c$ posições são definidas como pixels (BUARQUE, 2015). A equação MUSLE é dada por:

$$SED_{i,j}^k = 11,8 \cdot (Dsup_{i,j}^k \cdot qpico_{i,j}^k \cdot Apm_{i,j}^k)^{0,56} \cdot K_j \cdot C_j \cdot P_j \cdot LS_{i,j}^k \cdot FG_j \quad (1)$$

em que, SED [t] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo; $Dsup$ [mm/ha] é o volume de escoamento superficial; $qpico$ [m^3/s] é a taxa de pico do escoamento superficial; Apm [ha] é a área do pixel; K [$0,013.t.m^2.h/(m^3.t.cm)$] é o fator de erodibilidade do solo; C [-] é o fator de cobertura e manejo do solo; P [-] é o fator de práticas conservacionistas; LS [-] é o fator topográfico; FG [-] é o fator que considera a existência de fragmentos grosseiros ou rochas; i e j [-] são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente; k [-] é o pixel ao qual a equação está sendo aplicada.

A vazão de pico do escoamento superficial, em cada pixel, é dada considerando um volume de escoamento uniforme diário, e o volume de escoamento é fornecido pelo módulo hidrológico MGB-IPH (BUARQUE, 2015), como é apresentado a seguir:

$$qpico_{i,j}^k = \frac{Dsup_{i,j}^k \cdot A_{i,j}^k}{86,4} \quad (2)$$

em que, $qpico$ [m^3/s] é a taxa de pico do escoamento superficial; $Dsup$ [mm/ha] é o volume de escoamento superficial; A [ha] é a área de cada pixel para cada minibacia em uma URH.

Segundo Buarque (2015), o fator de erodibilidade do solo (K) é calculado a partir da Equação 3, originalmente implementada no modelo EPIC (WILLIAMS, 1995) e, também, utilizada no modelo SWAT (ARNOLD et al., 1998). Para utilizar essa equação, são necessárias informações sobre porcentagens de silte, de argila, de areia e de matéria orgânica em cada tipo de solo da bacia, como é apresentado a seguir:

$$K_j = Fag_j \cdot Fcs_j \cdot Forg_j \cdot Fa_j \quad (3)$$

em que, K [-] é o fator de erodibilidade do solo; Fag [-] é o fator de areia grossa, que fornece baixos valores de K para solos com grande quantidade de areia grossa e altos valores para solos com pouca areia; Fcs [-] é o fator argila-silte, ele reduz o valor de K para solos com grandes quantidades de silte; $Forg$ [-] é o fator carbono orgânico, que reduz o valor de K para elevadas quantidades de carbono orgânico; Fa [-] é o fator areia, que reduz o valor de K para grandes quantidades de areia; j [-] é o índice que indica a URH. As equações de Williams (1995) que calculam esses fatores são descritas por Buarque (2015) e apresentadas a seguir, através das Equações 4, 5, 6 e 7:

$$Fag_j = 0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[-0,256 \cdot SAN_j \cdot \left(1 - \frac{SIL_j}{100} \right) \right] \quad (4)$$

$$Fcs_j = \left(1 - \frac{SIL_j}{ARG_j + SIL_j} \right)^{0,3} \quad (5)$$

$$Forg_j = 1 - \frac{0,25 \cdot orgC_j}{orgC_j + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC_j)} \quad (6)$$

$$Fa_j = 1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right)}{\left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 2,29 \cdot \left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right) \right]} \quad (7)$$

em que, SAN [%] é a porcentagem de areia presente na camada superior do solo; SIL [%] é a porcentagem de silte presente na camada superior do solo; ARG [%] é a porcentagem de argila presente na camada superior do solo; $orgC$ [%] é a porcentagem de carbono orgânico presente na camada superior do solo; j [-] é o índice que indica a URH.

O fator de cobertura e manejo do solo (C) é utilizado na equação MUSLE para expressar o ciclo de manejo de determinado uso do solo, como o preparo do solo, a cobertura vegetal e a sequência de plantios a serem feitos, apresentando uma relação entre as perdas de solo que ocorrem em determinadas condições e as perdas de solo que ocorrem quando o mesmo solo permanece continuamente sem cobertura vegetal (CARVALHO, 2008). De acordo com Carvalho (2008), o fator C não possui um valor único, ele pode variar de 1,0 (áreas sem nenhuma vegetação) até 0,0001 (áreas de florestas virgens). O ciclo de determinada planta e a geração de resíduos causada por ela determinam a proteção que determinada cultura apresentará no solo, assim, o valor deve ser estimado a partir do uso e cobertura vegetal do solo da região (BUARQUE, 2015). No modelo, o valor C deve ser estimado de acordo com as classes de URHs.

O fator de práticas conservacionistas (P) determina como o plantio foi realizado, mostrando uma relação entre plantios com práticas conservacionistas e plantios em encostas íngremes. Plantio morro abaixo apresenta o valor de P igual a 1,0, plantio em contorno é 0,5, alternância de capinas em conjunto com plantio de contorno é igual a 0,4, cordões de vegetação permanente apresentam o valor 0,2 e terraço apresenta o valor 0,1 (CARVALHO, 2008). Para áreas onde não há práticas conservacionistas, pode-se utilizar o parâmetro P igual a 1,0 (BESKOW et al., 2009).

O fator topográfico (LS) é a combinação do fator comprimento de rampa (L) com a declividade do terreno (S) (BUARQUE, 2015). Segundo Minella, Merten e Ruhoff (2010), quando se utiliza o fator LS , na equação MUSLE, ele se torna uma unidade hidrológica representativa da bacia, apresentando uma dimensão de área, isto é, onde ocorre o escoamento superficial da água. Essa característica torna mais difícil de calcular o fator L , quanto mais complexo for o relevo de uma bacia. Assim, determinar o parâmetro LS apresenta limitações em áreas de relevo complexo ou em grandes extensões (MINELLA; MERTEN; RUHOFF, 2010).

Para o modelo MGB-SED, como apresentado em Buarque (2015), foram acopladas equações para determinar automaticamente o fator LS , em cada pixel do MDE. Assim, o fator L é calculado como Desmet e Govers (1996) e sua aplicação é realizada em um terreno bidimensional para área de contribuição acumulada por unidade de comprimento, conceito de área de contribuição unitária de Kirkby e Chorley (1967). Já o fator declividade (S) é calculado a partir da equação de Wischmeier e Smith (1978). Segundo Buarque (2015), as informações obtidas na etapa de discretização das minibacias são utilizadas para o cálculo do fator LS , como o MDE, o plano de direções de escoamento, o plano das minibacias e o plano de URHs, como é apresentado nas equações a seguir:

$$L_k = \frac{(Am_k + Lp_k^2)^{m+1} - Am_k^{m+1}}{Lp^{m+2} \cdot Xdir_k^m \cdot (22,13)^m} \quad (8)$$

em que, L [-] é o fator de comprimento do pixel; Am [m^2] é a área de drenagem acumulada na entrada do pixel; Lp [m] é a largura do pixel; $Xdir$ [-] é um fator de direção de aspecto para o pixel; m [-] é o expoente do comprimento do declive; k [-] é o índice de identificação de qual pixel a equação está sendo aplicada. O expoente m é obtido a partir da expressão:

$$m = \begin{cases} 0,2 & \text{se } Sf < 1 \\ 0,3 & \text{se } 1 \leq Sf < 3 \\ 0,4 & \text{se } 3 \leq Sf < 5 \\ 0,5 & \text{se } Sf \geq 5 \end{cases} \quad (9)$$

onde, Sf [%] é a declividade do pixel, que mede a taxa de elevação na direção do maior declive, sendo obtido para cada pixel, e é dada pela expressão de Wilson e Gallant (2000):

$$Sf = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (10)$$

onde, Sf [%] é a declividade do pixel; z [m] é a elevação dos seus quatro vizinhos nas direções ortogonais; $\partial z/\partial x$ e $\partial z/\partial y$ [-] são as derivadas parciais de primeira ordem que representam a taxa de variação da elevação z em relação às distâncias ortogonais x e y . De acordo com Buarque (2015), elas são calculadas a partir do método de diferenças finitas:

$$\frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_l^{c+1} - Z_l^{c-1}}{2 \cdot Lp} \quad (11)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_{l+1}^c - Z_{l-1}^c}{2 \cdot Lp} \quad (12)$$

onde, l e c [-] são representadas pela linha e pela coluna na qual se encontra o pixel.

Já o fator de declividade (S) pode ser obtido através da equação de Wischmeier e Smith (1978), como apresentado por Buarque (2015):

$$S_k = 65,41 \cdot \sin^2(\theta_k) + 4,53 \cdot \sin^2(\theta_k) + 0,065 \quad (13)$$

onde, θ [°] é o valor de S_f .

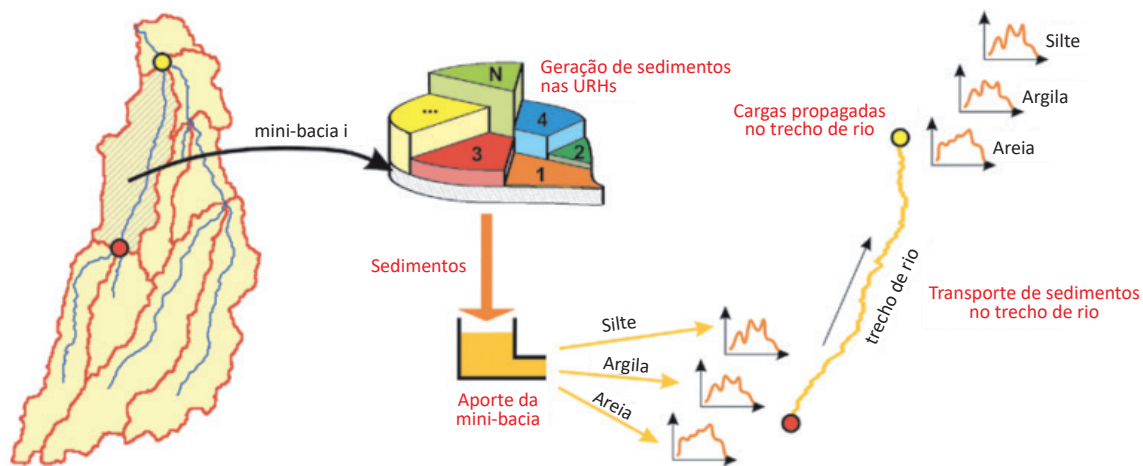
O fator de fragmentação grosseira esparsa (FG) é utilizado para considerar se há possibilidade da existência de rochas na camada superior do solo, que afetariam a erosão. Segundo Buarque (2015), é calculado pela Equação 14:

$$FG = \exp(-0,053 \cdot \text{frocha}) \quad (14)$$

em que, frocha [%] é a porcentagem de rocha na camada superior do solo.

Os sedimentos que chegam à rede de drenagem não acompanham o intervalo de tempo de geração do sedimento, isto é, em cada passo de tempo é gerada uma quantidade estimada de sedimentos, contudo eles sofrem um retardo do escoamento superficial até chegarem à rede de drenagem (BUARQUE, 2015). Dessa forma, para considerar esse retardo, o modelo utiliza um reservatório linear, semelhante ao modelo hidrológico, como pode ser observado na Figura 45.

Figura 45 – Aporte de sedimentos gerados na bacia até a rede de drenagem.



Fonte: Buarque (2015, p. 151).

Assim, o volume total de sedimentos gerados ($VSED$) em cada URH de cada minibacia e armazenado no reservatório é calculado a partir da Equação 15, enquanto a descarga sólida total (QS) de saída do reservatório linear é função da carga armazenada e do tempo de retardo do reservatório superficial (BUARQUE, 2015), expressa pela Equação 16, e representa a quantidade de sedimentos que está sendo liberada para a rede de drenagem.

$$VSED_{i,j}^t = VSED_{i,j}^{t-1} + \sum_{k=1}^{NP_j} SED_{i,j}^{t-1} \quad (15)$$

em que, $VSED$ [t] é o volume de sedimentos no reservatório linear; NP [-] é o número de pixels da URH; i e j [-] são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente; t e $t-1$ [s] indicam os passos de tempo atual e anterior.

$$QSt_{i,j} = \frac{1}{TKS_i} \cdot SED_{i,j}^t \quad (16)$$

em que, QS [t/s] é a descarga sólida total de saída do reservatório linear; $VSED$ [t] é o volume de sedimentos no reservatório linear; TKS [s] é o tempo de retardo do reservatório superficial; i e j [-] são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente.

O modelo calcula o aporte de sedimentos de cada minibacia para argila, silte e areia, de acordo com sua porcentagem na camada de solo superficial. De acordo com Buarque (2015), o aporte pode ser calculado, para cada classe, de acordo com as Equações 17, 18 e 19.

$$SED_{sil_i}^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t \cdot FRAC_{i,j}^t \cdot SIL_j) \cdot \Delta t \quad (17)$$

$$SED_{arg_i}^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t \cdot FRAC_{i,j}^t \cdot ARG_j) \cdot \Delta t \quad (18)$$

$$SED_{san_i}^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t \cdot FRAC_{i,j}^t \cdot SAN_j) \cdot \Delta t \quad (19)$$

onde, SED_{sil} [t], SED_{arg} [t] e SED_{san} [t] são as cargas de silte, argila e areia, respectivamente, que migram do reservatório de sedimentos e chegam à rede de drenagem; Δt [s] é o passo de tempo; SIL , ARG e SAN [%] são as porcentagens de silte, argila e areia, respectivamente, na camada superior do solo; QS [t/s] é a descarga sólida total; $FRAC$ [-] é a fração do volume de sedimentos existente no reservatório; i e j [-] são índices que representam a minibacia e a URH, respectivamente. O modelo calcula a fração do volume ($FRAC$), de acordo com a seguinte equação:

$$FRAC_{i,j}^t = \frac{VSED_{i,j}^t}{\sum_{j=1}^{N_{URH}} VSED_{i,j}^t} \quad (20)$$

2.1.4.5.1.1.2 Módulo rio

O transporte de sedimentos, no rio, do modelo MGB-SED ocorre através da propagação da carga de sedimentos por trecho de rio em cada minibacia. Nas minibacias de cabeceira, não há propagação de sedimentos no trecho de rio, uma vez que a carga do reservatório linear é direcionada diretamente para o exutório da minibacia, enquanto as minibacias de jusante, a propagação de sedimentos é dada a partir do somatório da carga de sedimentos gerada na minibacia com a carga de montante do rio. O modelo apresenta duas formas de transporte: para o material fino (silte e argila), este é transportado em suspensão, de forma contínua ou intermitente, pelo escoamento, sem que haja deposição ou erosão dessas partículas no leito do rio; para o material grosso (areia), este é transportado como carga de fundo, isto é, através da interação entre as partículas de fundo do leito e o escoamento (BUARQUE, 2015).

O transporte em suspensão, de acordo com Buarque (2015), ocorre para as partículas finas, através de um modelo de escoamento não permanente, no qual a velocidade de escoamento e os processos advectivos são predominantes. A equação que simula os processos de transporte de sedimentos em cada trecho de rio é representada pela Equação 21, que é resolvida numericamente para cada classe de partícula em suspensão (argila e silte) em cada trecho, de montante para jusante, seguindo progressivamente no tempo e no espaço. A Equação 22 apresenta essa Resolução numérica. Das variáveis obtidas pela Equação 22, em todas as seções e intervalos de tempos, as vazões Q são conhecidas,

e são provenientes do módulo hidráulico; as áreas molhadas (A) são calculadas para um canal retangular, estimando o h através de Manning ou estimado pelo modelo de propagação de vazões hidrodinâmico; a concentração C é conhecida no tempo inicial em todas as seções e no tempo final apenas na seção de montante. Dessa forma, a concentração, ou seja, a concentração na seção de jusante no tempo final é o único termo desconhecido da equação. Assim, isolando-se a concentração C , como na Equação 23, é possível se obter a Resolução da equação.

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial AUC}{\partial x} = q_{sm} - q_{sfl} \quad (21)$$

em que onde, A [m^2] é a área molhada da seção, que é obtida para um canal retangular multiplicando a largura B do rio por uma profundidade h , estimada pela equação de Manning com raio hidráulico $R_h = h$, nos trechos de rio, aos quais a propagação de vazões é dada pelo modelo hidrodinâmico (PAIVA, 2009), a profundidade média h do escoamento é estimada pelo modelo e a área A pode ser obtida diretamente pela equação de Manning; C [t/m^3] é a concentração média de sedimento; U [m/s] é a velocidade média do escoamento na seção; x [m] é a distância na direção do escoamento; t [s] é o tempo; q_{sm} [$t/(m.s)$] é a contribuição lateral dos sedimentos da minibacia; q_{sfl} [$t/(m.s)$] é a descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação por unidade de comprimento, considerada diferente de zero apenas nos trechos com propagação de vazões pelo modelo hidrodinâmico (PAIVA, 2009), isto é, quando a propagação é dada pelo modelo original de Muskingum-Cunge (COLLISCHONN, 2001), esse parâmetro é igual a zero.

$$\frac{A_i^t \cdot C_i^t - A_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta t} + \theta \cdot \frac{Q_i^t \cdot C_i^t - Q_{i-1}^t \cdot C_{i-1}^t}{\Delta x} + (1-\theta) \cdot \frac{Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta x} = q_{sm}^t - q_{sfl}^t \quad (22)$$

em que, Q [m^3/s] é a vazão líquida; $i-1$ e i [-] são índices que representam as seções transversais do rio a montante e a jusante do trecho, respectivamente; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo; Δt [s] é o intervalo de tempo de cálculo; Δx [m] é o comprimento do trecho de rio da minibacia; θ [-] é o ponderador dos termos temporais, cujo valor varia entre 0 até 1.

$$C_i^t = \frac{\theta \cdot Q_{i-1}^t \cdot C_{i-1}^t - (1-\theta) \cdot (Q_i^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1})}{\frac{Vol_t}{\Delta t} + \theta \cdot Q_i^t} + \frac{\frac{Vol^{t-1}}{\Delta t} \cdot C_{i-1}^{t-1} + QS_m^t - QS_{fl}^t}{\frac{Vol_t}{\Delta t} + \theta \cdot Q_i^t} \quad (23)$$

em que, [t/m^3] é a concentração média de sedimento do rio a jusante no final do intervalo de tempo; Vol [m^3] é o volume médio de água no trecho e é calculado por $Vol = A \cdot \Delta x$; QS_m [t/s] é a descarga sólida (silte ou argila) proveniente da minibacia associada ao trecho de rio, pode se calcular a partir de $QS_m = q_{sm} \cdot \Delta x$; QS_{fl} [t/s] é a descarga sólida entre o rio e a planície de inundação, sendo calculada por $QS_{fl} = q_{sfl} \cdot \Delta x$.

O transporte de carga de fundo, segundo Buarque (2015), é calculado a partir da equação da continuidade dos sedimentos representada pela Equação 24, conhecida como Exner (CHANG, 1992), para as partículas de areia. Com o objetivo de determinar o volume erodido ou depositado no intervalo

de tempo determinado, é necessário isolar a variação da área (ΔA_b) que corresponde a esse volume, como é apresentado na Equação 25. Essa equação é resolvida implicitamente, obtendo-se a Equação 26. A Equação 26 considera que inicialmente, para o intervalo de tempo correspondente (Δt), a concentração (C) de sedimentos de fundo, na seção de jusante, corresponde à capacidade de transporte (CT) do escoamento nessa seção (BUARQUE, 2015), isto é, $C = CT/Q$. A capacidade de transporte (CT) do rio é a capacidade do escoamento de transportar o material; assim, quando a descarga sólida do escoamento é maior do que a capacidade de transporte (CT), o escoamento é limitado e o excedente dos sedimentos tendem a se depositar; quando a descarga sólida é menor do que a capacidade de transporte (CT), há um déficit de sedimentos no escoamento e o leito do rio, conseqüentemente, tende a erodir. Dessa forma, a equação de continuidade dos sedimentos, representado pela Equação 26, compara a capacidade de transporte do escoamento (CT) à carga que chega da seção de montante ($Q_i \cdot C_{i-1}$) em cada passo de tempo. Considerando que a variação da área (ΔA_b) representa a área do volume erodido ou depositado, uma variação positiva da área indica tendência à deposição no trecho, enquanto uma variação negativa da área indica tendência à erosão no trecho (BUARQUE, 2015).

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial QS}{\partial x} - q_{sm} = 0 \quad (24)$$

$$\Delta A_b = - \frac{\Delta t}{1 - \lambda} \cdot \left(\frac{\partial QS}{\partial x} - q_{sm} \right) \quad (25)$$

$$\Delta A_{bi}^t = - \frac{\Delta t}{1 - \lambda} \cdot \left[\theta \cdot \frac{Q_i^t \cdot CT_i^t - Q_{i-1}^t \cdot C_{i-1}^t}{\Delta x} + (1 - \theta) \cdot \frac{Q_i^{t-1} \cdot C_i^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta x} - \frac{QS_m^t + QS_m^{t-1}}{2 \cdot \Delta x} \right] \quad (26)$$

em que, λ [-] é a porosidade do depósito; A_b [m²] é a área transversal de um “reservatório de sedimentos de fundo”, que corresponde ao volume depositado ou erodido no trecho; QS [t/d] é a descarga sólida de sedimento do leito; q_{sm} [t/(m.s)] é a contribuição lateral de sedimentos da minibacia; θ [-] é o ponderador dos termos temporais, variando de 0 a 1; Q [m³/s] é a vazão do trecho; CT [ppm] é a concentração de sedimentos correspondente à capacidade de transporte do escoamento na seção i de interesse; C [ppm] é a concentração de sedimentos no trecho de rio; $i-1$ e i [-] índices que representam a seção do rio, a montante e a jusante, respectivamente; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente.

Além disso, o modelo possui um limitador para deposição e erosão, que impede que todo excesso ou déficit de sedimentos no escoamento seja convertido em erosão ou deposição, isto é, ele representa a porcentagem do excesso de sedimentos no escoamento que consegue depositar (BUARQUE, 2015). Assim, ao considerar que tanto a deposição quanto a erosão ocorrem de forma uniforme no trecho de rio, o volume de sedimentos erodido ou depositado é calculado pelas Equações 27 e 28.

$$DEP^t = (\Delta A_b^t \cdot \alpha_d) \cdot \Delta x = \Delta A_b^t \cdot \Delta x \quad \text{se } \Delta A_b^t > 0 \quad (27)$$

$$EROS^t = -(\Delta A_b^t \cdot \alpha_e) \cdot \Delta x = -\Delta A_b^t \cdot \Delta x \quad \text{se } \Delta A_b^t < 0 \quad (28)$$

em que, b [m²] é a variação real da área transversal do reservatório de sedimentos de fundo, ao final do intervalo de tempo t ; α_d [-] é o coeficiente de eficiência da deposição; α_e [-] é o coeficiente de eficiência para erosão. Ambos os limitadores são formulações empíricas que buscam se aproximar do processo real. Mais detalhes podem ser encontrados em Buarque (2015).

Dessa forma, a concentração de sedimentos efetivamente propagada para jusante, no final do intervalo de tempo, é dada pela Equação 29.

$$C_i^t = \frac{\left(\frac{QS_m^t + QS_m^{t-1}}{\Delta x} \right) + \theta \cdot Q_{i-1}^t \cdot C_{i-1}^t - (1 - \lambda) \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\Delta A_b^t}{\Delta t} \right)}{\theta Q_i^t} - \frac{(1 - \theta) \cdot (Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1})}{\theta Q_i^t} \quad (29)$$

em que, λ [-] é a porosidade do depósito; ΔA_b [m²] é a variação real da área transversal do reservatório de sedimentos de fundo; QS_m [t/(m.s)] é a contribuição lateral de sedimentos da minibacia; θ [-] é o ponderador dos termos temporais, variando de 0 a 1; Q [m³/s] é a vazão do trecho; C [ppm] é a concentração de sedimentos no trecho de rio; $i-1$ e i [-] índices que representam a seção do rio, a montante e a jusante, respectivamente; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente.

A capacidade de transporte é a máxima carga que o escoamento pode transportar de sedimentos. O modelo calcula a capacidade de transporte para cada classe de partícula a partir da Equação 30 de Yang (1973; 1984).

$$\log CT_i^t = M_i^t + N_i^t \cdot \log \left(\frac{U_i^t \cdot S_f}{\omega_s} - \frac{Uc_i^t \cdot S_f^t}{\omega_s} \right) \quad (30)$$

em que, CT [ppm] é a concentração por peso em partes por milhão; U [m/s] é a velocidade média na seção; Uc [m/s] é a velocidade média crítica do escoamento; S_f [-] é a declividade de atrito; ω_s [m/s] é a velocidade de queda da partícula; M e N [-] coeficientes calculados para os sedimentos de acordo com o diâmetro.

Os parâmetros Uc , ω_s , M e N são calculados diretamente a partir das equações do modelo, que podem ser encontradas com mais detalhes em Buarque (2015). Contudo, a determinação dos parâmetros de velocidade de cisalhamento (U^*), raio hidráulico (Rh), profundidade (h) e declividade de atrito (S_f), utilizados direta ou indiretamente para calcular o CT , depende do método adotado para propagação das vazões em cada trecho do rio e suas equações também podem ser encontradas com mais detalhes em Buarque (2015).

2.1.4.5.1.1.3 Módulo planície

O modelo permite a troca de sedimentos entre os rios e as planícies de inundação, nos trechos onde o método de propagação adotado é o hidrodinâmico (PAIVA, 2009), assumindo uma mistura completa de sedimentos nas planícies. Além disso, nas planícies só é permitida a deposição de sedimentos finos, funcionando como área de armazenamento desses sedimentos. A descarga sólida de troca entre o rio e a planície ao final do intervalo de tempo é estimada pela Equação 31 ou Equação 32.

$$QS_{fi}^t = q_{sfi}^t \cdot \Delta x = q_{fi}^t \cdot \left(\frac{C_i^t + C_{i-1}^t}{2} \right) \cdot \Delta x \quad (31)$$

em que, QS_{fi} [t/s] é a descarga sólida de troca entre o rio e a planície de inundação; q_{fi} [m³/s] é a vazão líquida de troca rio-planície positiva, onde haverá fuga de água do rio para a planície; C [t/m³] é a concentração de sedimentos no trecho de rio; $i-1$ e i [-] índices que representam a seção do rio, a montante e a jusante, respectivamente; t [-] é o índice que representa o final do intervalo de tempo.

$$QS_{fi}^t = q_{sfi}^t \cdot \Delta x = q_{fi}^t \cdot C_{fi}^t \cdot \Delta x \quad (32)$$

em que, QS_{fi} [t/s] é a descarga sólida de troca entre o rio e a planície de inundação; q_{fi} [m³/s] é a vazão líquida de troca rio-planície negativa, onde haverá fuga de água da planície para o rio; C_{fi} [t/m³] é a concentração de sedimentos existente na planície; t [-] é o índice que representa o final do intervalo de tempo.

Assim, a concentração de sedimentos na planície é estimada através da Equação 33. Contudo, para cada classe de partícula em cada intervalo de tempo, parte da carga em suspensão pode depositar, reduzindo a concentração. Assim, o volume depositado é determinado pela Equação 34 e a concentração final, no final do intervalo de tempo, é dada pela Equação 35. Mais detalhes podem ser encontrados em Buarque (2015).

$$C_{fi}^{*t} = \frac{C_{fi}^{t-1} \cdot V_{fi}^{t-1} + \left(\frac{q_{fi}^{t-1} + q_{fi}^t}{2} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta t}{V_{fi}^t} \quad (33)$$

em que, C_{fi} [t/m³] é a concentração de sedimentos existente na planície; q_{fi} [m³/s] é a vazão líquida de troca rio-planície; V_{fi} [m³] é o volume d'água existente na planície de inundação; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente.

$$DEP_{fi}^t = C_{fi}^t \cdot V_{fi}^t \cdot \left(\frac{\omega_s \cdot \Delta t}{H_{fi}} \right) \quad (34)$$

em que, DEP_{fi} [m³] é o volume depositado ao final do passo de tempo; C_{fi} [t/m³] é a concentração de sedimentos existente na planície; V_{fi} [m³] é o volume d'água existente na planície de inundação; ω_s [m/s] é a velocidade de queda da partícula; H_{fi} [m] é a profundidade média da planície estimada pelo modelo hidrodinâmico.

$$C_{fi}^t = C_{fi}^{*t} - \frac{DEP_{fi}^t}{V_{fi}^t} \quad (35)$$

Esses equacionamentos do módulo de planície, embora descritos, não foram aplicados nos trabalhos de Fagundes et al. (2017), Fagundes, Paiva e Fan (2017) e Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017), sendo desnecessários para a boa simulação hidrológica, já que a bacia hidrográfica do rio Doce não possui grandes planícies de inundação. O que é comprovado pelos resultados de modelagem hidrológica obtidos pelos autores.

2.1.4.5.1.2 Resultados hidrossedimentológicos

A seguir são apresentados os principais resultados de simulações obtidas por Fagundes et al. (2017), Fagundes, Paiva e Fan (2017), Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017) e Fagundes (2018). Primeiramente são comentados os resultados apenas hidrológicos (que são a base para as simulações de sedimentos) e, posteriormente, **são revisados os resultados hidrossedimentológicos**.

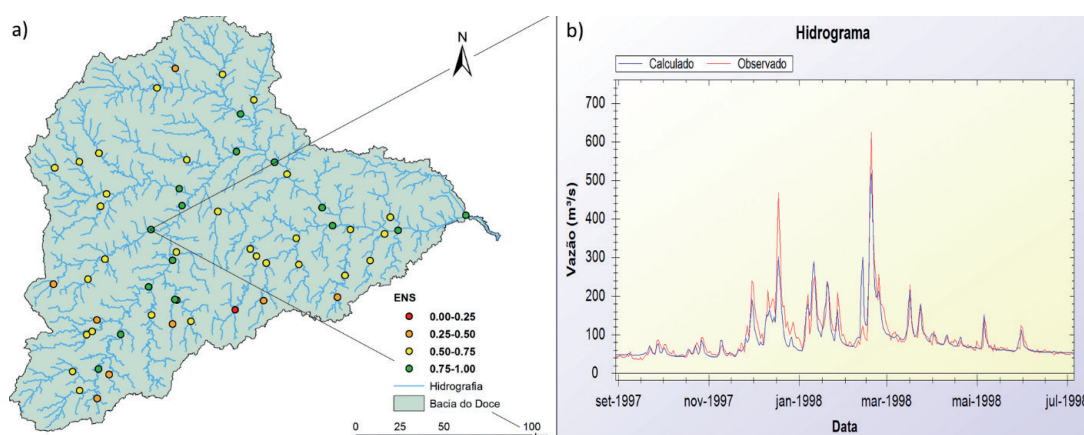
2.1.4.5.1.2.1 Modelagem hidrológica da bacia do rio Doce

Embora a bacia hidrográfica do rio Doce já tenha sido simulada em outras oportunidades na literatura (FAN et al., 2015), os trabalhos de Fagundes et al. (2017), Fagundes, Paiva e Fan (2017), Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017) e Fagundes (2018) propuseram uma versão completamente nova do modelo.

A simulação hidrossedimentológica requer dados observados de chuva e vazão para a calibração e validação do módulo hidrológico e dados relativos aos sedimentos para calibração e validação do módulo de sedimentos. No trabalho de Fagundes, Paiva e Fan (2017) detalha-se que foram utilizados dados de chuva da base *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* – MSWEP (BECK et al., 2016) para o período de simulação (1980-2015). O MSWEP é uma base de dados de precipitação com cobertura global com informações disponíveis desde 1979 até 2015, com Resolução temporal de 3 horas e espacial de 0,25º (25 km) que mescla informações de redes pluviométricas, produtos de satélite e de reanálise.

A calibração e a validação da modelagem hidrológica foram realizadas com base em dados observados de estações fluviométricas existentes na bacia. Dos 55 postos analisados na bacia (**Figura 46** – retirada de FAGUNDES; PAIVA; FAN, 2017), cerca de 84% deles apresentaram valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) superiores a 0,50, considerados por Moriasi et al. (2007) como satisfatórios, e 30% apresentaram resultados muito bons, com valores de ENS acima de 0,75.

Figura 46 – Resultados da simulação hidrológica com o modelo MGB-IPH.



Nota: a) Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe calculado entre as vazões observadas para os postos fluviométricos da ANA e as vazões calculadas; b) Comparação dos hidrogramas calculados e simulados para o posto 56696000, localizado no rio Piracicaba.

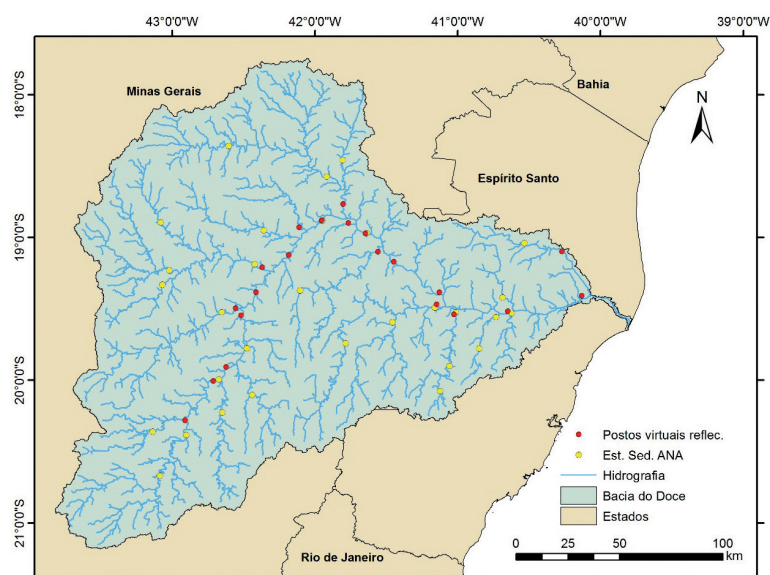
Fonte: Fagundes, Paiva e Fun (2017; página 4).

A boa qualidade dos resultados pode ser notada, graficamente, a partir da comparação dos hidrogramas observados e calculados presentes na **Figura 46**. Os resultados obtidos também evidenciam o bom desempenho do modelo em representar os processos hidrológicos que ocorrem na bacia usando o produto de chuva MSWEP.

2.1.4.5.1.2.2 Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Doce

A modelagem hidrossedimentológica do rio Doce foi realizada para o mesmo período da modelagem hidrológica. Para calibrar e validar o modelo foram usados dados observados de Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para o mesmo período, disponibilizados pela ANA no Sistema de Informações Hidrológicas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>); e dados de Reflectância Espectral de Superfície (RES) na faixa do vermelho (0,64-0,67 mm) extraídos em 21 postos virtuais (pontos selecionados para serem trabalhados na mesma localidade em todas as imagens), abrangendo um período de 2013-2015. A **Figura 47** (extraída de FAGUNDES; PAIVA; FAN, 2017) mostra a localização dos pontos onde o modelo foi calibrado e validado no rio Doce.

Figura 47 – Bacia hidrográfica do rio Doce e localização das estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas e dos postos virtuais de reflectância de superfície.



Fonte: Fagundes, Paiva e Fan (2017; Página 4).

As reflectâncias foram extraídas de imagens do satélite Landsat 8/OLI, que possui Resolução espacial de 30 m. As imagens adquiridas já possuíam correções atmosféricas satisfatórias (VERMOTE et al., 2016) e foram fornecidas pelo *United States Geological Survey* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Foram adquiridas imagens que correspondem a quatro localizações do tipo órbita/ponto: 216/073, 216/074, 217/073 e 217/074. Essas localizações existem para cada família de satélite e são constituintes do sistema de referência destes.

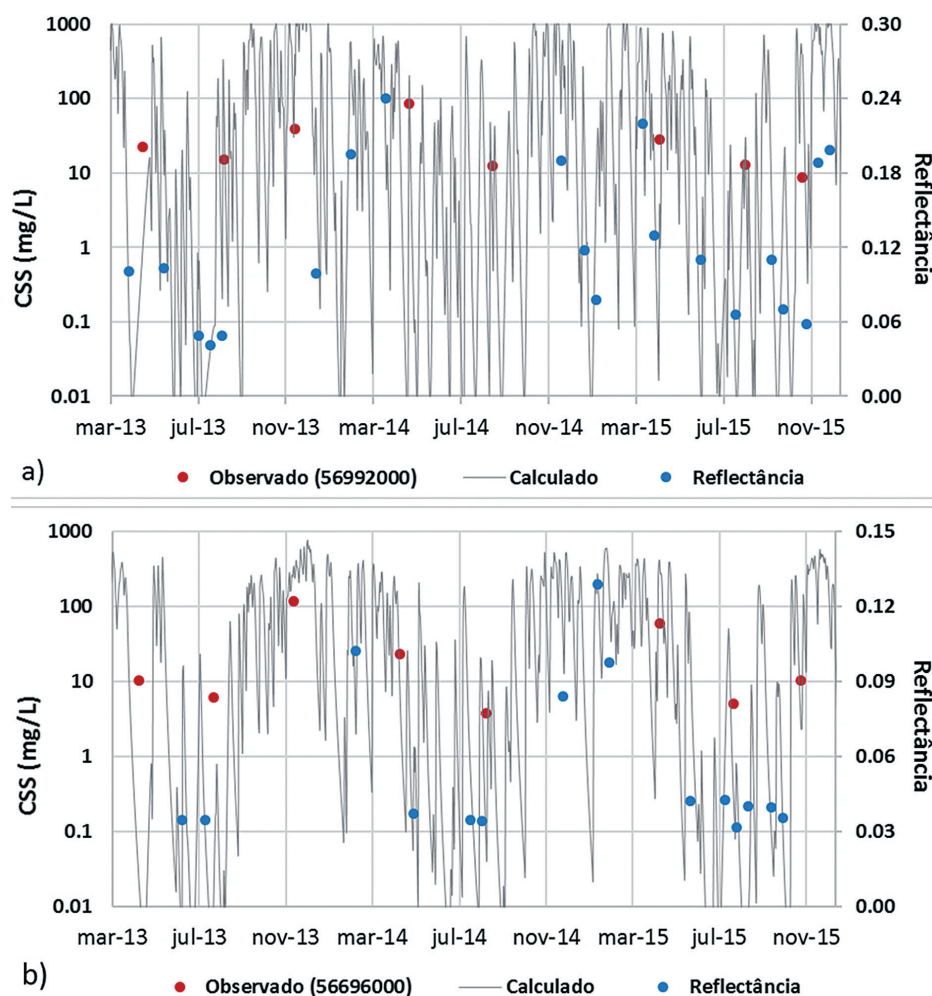
Conforme comentam os autores, a extração da reflectância foi realizada parcialmente de forma manual e automática. Para os seis postos virtuais localizados mais a jusante da bacia, adotou-se a extração manual, selecionando-se os pixels localizados nos locais mais adequados. A extração automática consistiu no uso de um algoritmo que seleciona os pixels dentro de um polígono com largura inferior ao do rio, comprimento de no máximo 20 km e que não fossem identificados como nuvens ou sombra

de nuvens. A partir da amostra de pixels válidos, calculou-se a mediana dos valores encontrados. Isso foi feito para evitar que interferências de *outliers*, como o não reconhecimento de um pixel de nuvem que possui alta refletância, contaminassem o resultado final.

Especialmente em Fagundes, Paiva e Fan (2017), o foco do trabalho foi comparar os resultados calculados pelo modelo, os dados de CSS medidos *in situ* e dados de RES obtidos na faixa do vermelho (RefVer).

Assim, na **Figura 48** são apresentados a comparação dessas variáveis para dois postos sedimentométricos: o posto Baixo Guandu (**Figura 48a**), que apresentou baixo valor do coeficiente de correlação ($r=0.54$) para a refletância e o posto Mário de Carvalho (**Figura 48b**), que apresentou um valor de $r=0,78$. Ressalta-se que, tanto a série de RefVer quanto a série de CSS observada não apresentam dados com alta frequência temporal. Observa-se que os resultados calculados apresentam comportamento semelhante aos dados observados de CSS, tendendo a aumentar no período chuvoso e diminuir no período seco, o que é coerente com a realidade da bacia. Além disso, os resultados observados de RES também apresentam essa tendência, mostrando concordância entre esse tipo de dado e os demais.

Figura 48 – Comparação dos resultados de CSS calculados com dados de CSS observados e RefVer para os postos sedimentométricos da Agência Nacional de Águas.



Nota: a) Tumiritinga (56992000); e b) Mario de Carvalho (56696000).

Fonte: Fagundes, Paiva e Fan (2017; Página 3).

Na **Figura 49** são apresentados os valores observados e simulados de concentração de sedimentos em suspensão (frações de argila e silte) para algumas estações de monitoramento de sedimentos da bacia, buscando representar a variabilidade espacial e temporal das CSS. Em todos os gráficos dessas figuras, observa-se comportamentos com alta variabilidade, com muitos picos e vales. Apesar da baixa quantidade de dados observados, nota-se que os resultados simulados tendem a acompanhar o comportamento dos dados observados em relação à ocorrência dos períodos com baixa e/ou elevada concentração de sedimentos. Mostra-se que o modelo é capaz de representar a variabilidade espacial e temporal da geração de sedimentos na bacia, ao representar a dinâmica em vários locais.

Na **Figura 50** são apresentados os valores calculados de r entre os dados observados e calculados de CSS e os dados observados de RefVer. Esses resultados mostram que as correlações existentes entre os dados de CSS calculados e de RefVer, para todas as estações analisadas, foram superiores às correlações entre os dados observados e calculados de CSS. A maior diferença é observada na estação Naque Velho, em que r aumentou de 0,08 para 0,70, e a menor na estação Baixo Guandu, que aumentou de 0,49 para 0,54.

Analisando os valores de r apenas para os postos virtuais de reflectância, na **Figura 51** se observa que os valores variaram entre 0,38 (Governador Valadares) e 0,83 (Linhares), ambos localizados no rio principal. Quanto aos afluentes, o menor valor encontrado foi de 0,44 (rio Ribeirão Traíra) e o maior, 0,78 (rio Piracicaba).

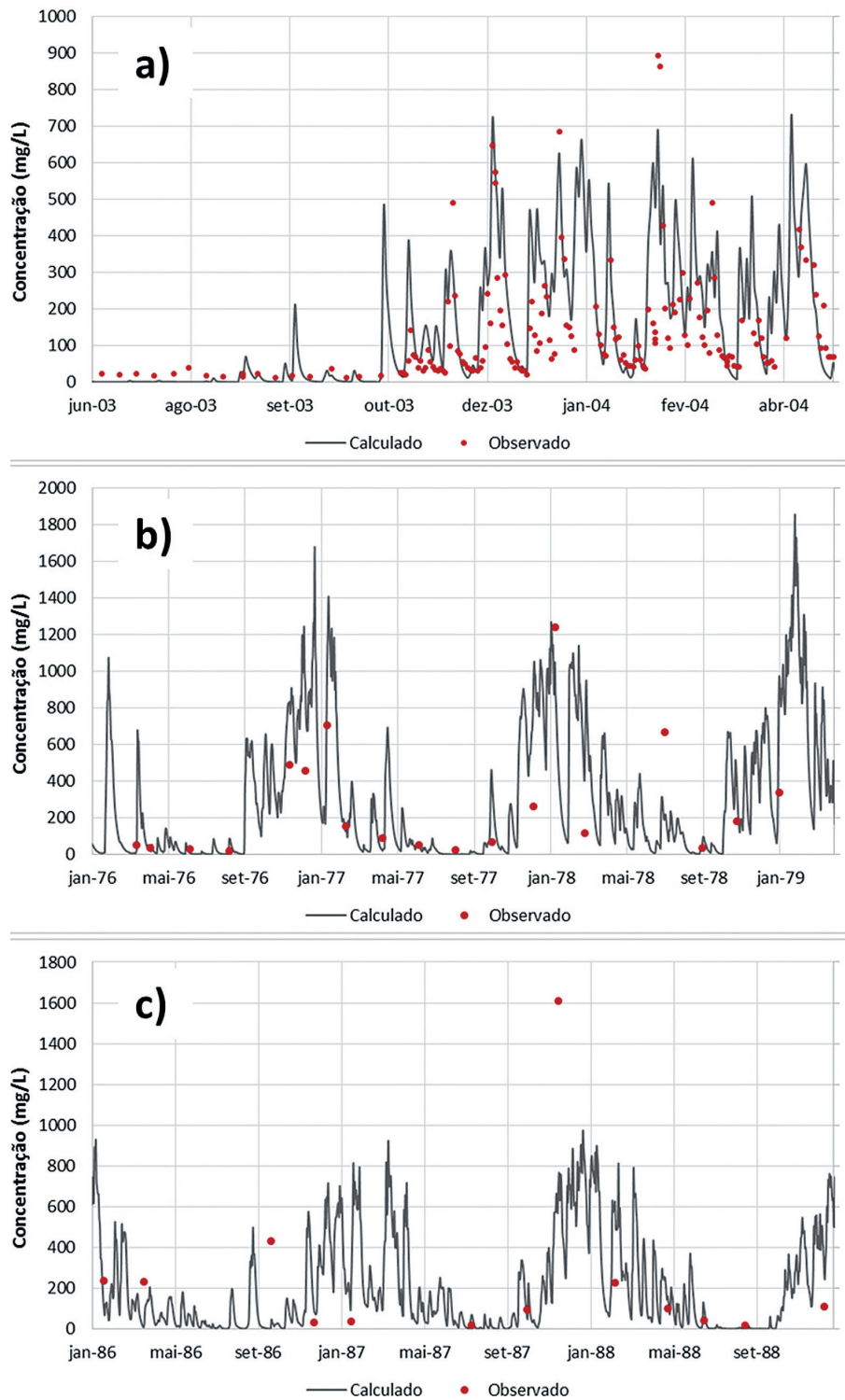
Nota-se, portanto, que os valores de reflectância de superfície na faixa do vermelho, além de apresentaram boa correlação com os dados de CSS, o que tem sido amplamente observado na literatura (MUNDAY JR.; ALFOLDI, 1979; LODHI et al., 1998, LONG; PAVELSKY, 2012; VILLAR et al., 2012), também podem ser utilizados para a melhoria de modelos hidrossedimentológicos de grande escala, como é o caso do MGB-SED. Tal melhoria se dá ao ser possível ter uma nova fonte de dados durante as etapas de calibração e validação desses modelos, visto a baixa disponibilidade de dados de CSS medidos *in situ* (PANDEY et al., 2016).

Como principais conclusões das modelagens da representação da bacia pelo modelo usado nos trabalhos de Fagundes et al. (2017), Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017) e Fagundes, Paiva e Fan (2017), é possível dizer que as correlações foram correspondentes entre os dados de CSS medidos e calculados. E que as RESs na faixa do vermelho apresentaram boas correlações ($r > 0,5$) com os dados de CSS calculados pelo modelo MGB-SED, inclusive melhores do que em comparação com os dados de CSS.

A partir disso, o modelo MGB-SED preparado para a bacia hidrográfica do rio Doce mostra-se como uma ferramenta potencial para a representação de processos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica em condições naturais.

Apesar dos bons resultados, é importante ressaltar que, como todo modelo, o MGB-SED aplicado possui incertezas e simplificações nessa aplicação.

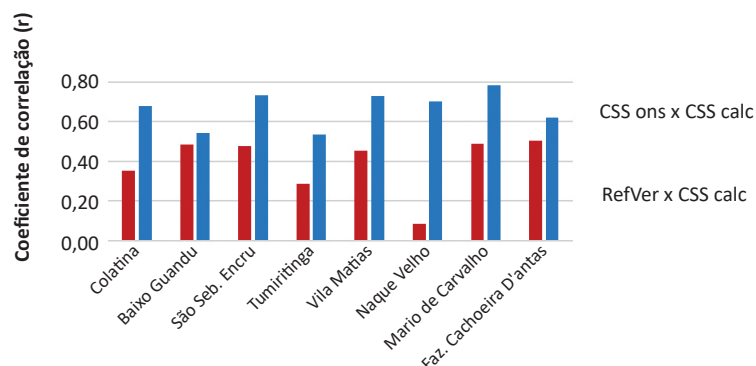
Figura 49 – Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) simulada e observada nas estações.



Nota: a) Fazenda Ouro Fino, rio Santo Antônio; b) Vila Matias (56891900), rio Suaçuí Grande; e c) Colatina (56994500), rio Doce.

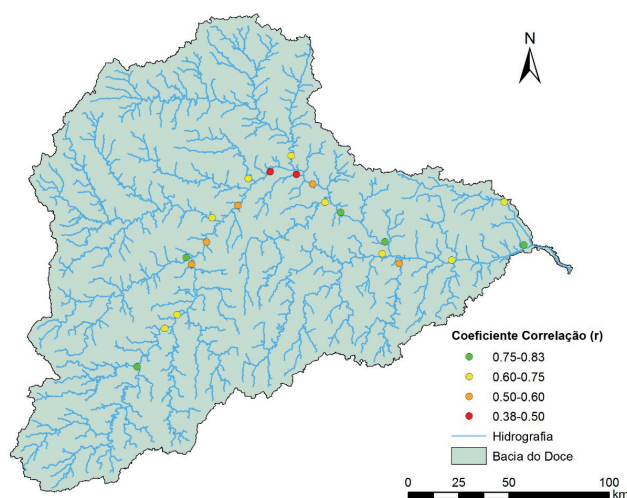
Fonte: Fagundes, Paiva e Fun (2017a; Página 7).

Figura 50 – Coeficiente de correlação (r) calculado entre os dados observados e calculados de CSS e entre os dados observados de RefVer para as estações: Colatina (56994500), Baixo Guandu (56992000), São Sebastião da Encruzilhada (56990000), Tumiritinga (56920000), Vila Matias (56891900), Naque Velho (56825000), Mario de Carvalho (56696000) e Fazenda Cachoeira D'Antas (56425000)



Fonte: Fagundes, Paiva e Fun (2017; Página 6).

Figura 51 – Coeficiente de correlação entre os valores de CSS calculados com o modelo MGB-SED e dados observados de RefVer para todos os postos virtuais de reflectância).



Fonte: Fagundes, Paiva e Fun (2017c; Página 6).

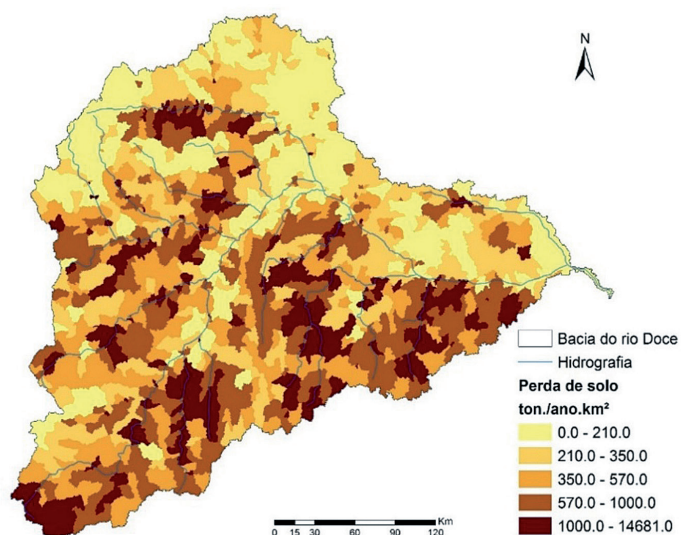
2.1.4.5.1.2.3 Informações sobre a bacia a partir da modelagem e dos dados observados

Dados os resultados de aplicação e avaliação do modelo MGB-SED para a bacia do rio Doce, a modelagem permitiu a estimativa aproximada de diversas informações da bacia, como as regiões que mais produzem sedimentos (a partir de estimativas usando a MUSLE), carga de sedimentos transportada em suspensão (silte e argila) e de fundo (areia) para cada trecho de rio, concentração de sedimentos em suspensão, entre outros. Alguns desses resultados são apresentados no trabalho de Fagundes et al. (2017) e a seguir são reproduzidos.

Primeiramente são apresentados os valores da carga total de sedimentos (toneladas por dia) gerada pela MUSLE para cada minibacia que depois são propagados e aportados nos trechos de rio. Esses resultados são apresentados na **Figura 52** por unidade de área. Observa-se a partir da Figura alta variabilidade na quantidade média de sedimentos produzida na bacia ao longo dos anos (1970-2010),

podendo variar de valores inferiores a 10,0 t/ano.km² a valores próximos de 14.680,0. Nota-se ainda maiores valores de perda de solo predominantemente nas regiões ao sul do rio Doce. O padrão espacial de produção apresentado na Figura 26 parece estar diretamente relacionado com o relevo da bacia.

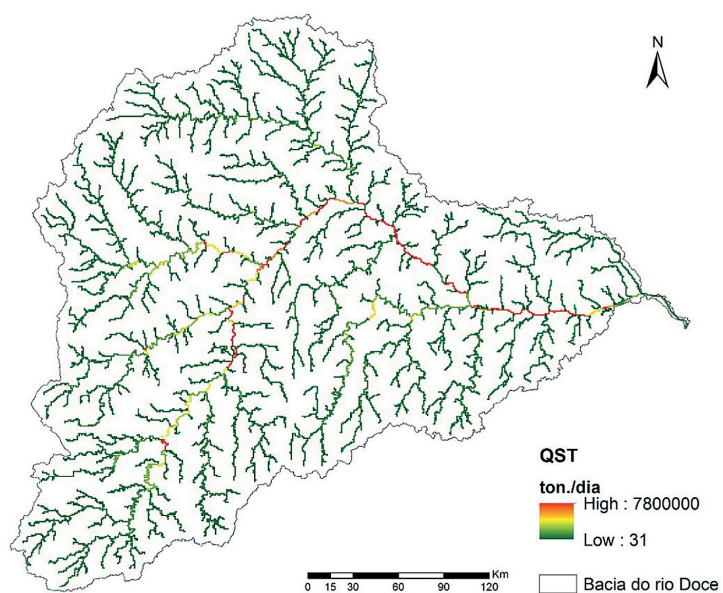
Figura 52 – Perda de solo específica média (1970-2010), por minibacia, para a bacia do rio Doce calculada a partir da MUSLE.



Fonte: Fagundes, Paiva e Fun (2017a; Página 6).

Por fim, apresenta-se a descarga sólida total (silte + argila + areia), em termos de valores médios diários, para cada trecho de rio (Figura 53).

Figura 53 – Descarga sólida média diária total para cada trecho de rio de cada minibacia.



Fonte: Fagundes, Paiva e Fun (2017a; Página 8).

Na **Figura 53**, observa-se que a descarga sólida tende a aumentar conforme aumenta a área de drenagem da bacia, pois maior é a vazão do rio. Nessa aplicação, destacam-se os valores elevados de descarga encontrados nos rios Piracicaba, Santo Antônio e Manhuaçu.

Além dos resultados de modelagem, apenas com os resultados de reflectância a partir do sensoriamento remoto o trabalho de Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017) observou alguns padrões no rio Doce.

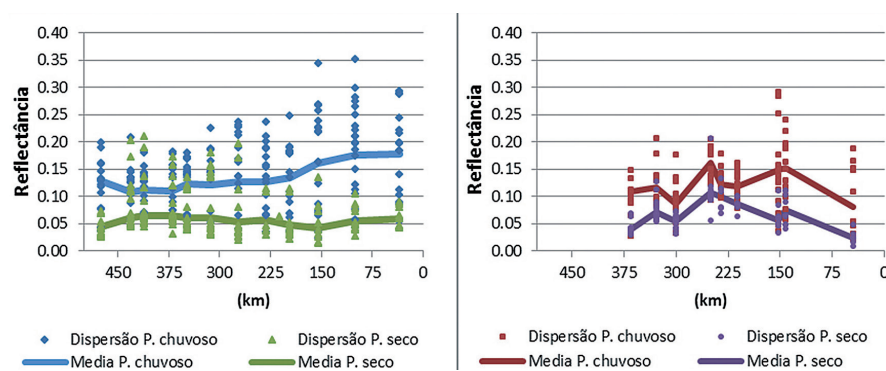
As respostas da reflectância encontradas nos diversos locais da bacia foram diferentes, mostrando grande heterogeneidade na produção de sedimentos em suspensão. A **Figura 54** mostra os perfis da reflectância para o rio principal e para os afluentes em termos dos valores médios. Para essa análise, desconsideraram-se os dados obtidos após o rompimento da barragem de Fundão (nov./2015).

Observa-se que no período seco o rio principal tende a apresentar um valor de reflectância próximo a 0,05 ao longo da bacia, aumentando inicialmente após a confluência do rio do Carmo com o Doce (460 km), diminuindo próximo ao Reservatório de Aimorés (150 km) e aumentando novamente após esse local. No período chuvoso, ocorre uma diminuição da reflectância do primeiro para o segundo local de análise e a partir daí a tendência é que os valores cresçam até o ponto mais a jusante.

Os trabalhos de Villar et al. (2012), que utilizaram imagens do satélite MODIS, e Fleiflea (2013), que usou imagens do satélite Landsat TM e ETM+, observaram padrões diferentes para as bacias dos rios Madeira e Mekong, respectivamente, onde, a partir de um perfil longitudinal do rio principal, os valores de CSS, estimados a partir de valores de reflectância, diminuía de montante para jusante, não necessariamente de forma linear. Já o trabalho de Silva et al. (2016) mostrou que os valores de sólidos totais, estimados a partir da reflectância do infravermelho do sensor MODIS, em sete estações virtuais localizadas no rio principal, não apresentaram comportamento único, ou seja, só acréscimo ou decréscimo, de montante para jusante.

Já para os afluentes, os comportamentos destes no período seco e chuvoso são bem similares em sua forma (perfil das reflectâncias média), mas com intensidades diferentes. As principais distinções dos perfis ocorrem nas distâncias de 212 km (rio Caratinga) e 153 km (rio Manhuaçu). O rio Manhuaçu, que apresentou baixa reflectância média (0,056) no período seco, quase triplicou seu valor no período chuvoso (0,148), mostrando que esse afluente contribui de forma significativa para o rio principal durante a estação chuvosa.

Figura 54 – Comparação das reflectâncias ao longo da bacia entre os períodos seco e chuvoso, com média e valores das reflectâncias de superfície para: a) o rio principal; e b) os afluentes.



Fonte: Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017b; Página 5).

A análise comparativa entre o rio Doce e os afluentes nos mostra que no período seco a maioria dos afluentes apresenta valores médios de reflectância superiores ao rio principal e que no período chuvoso os que se sobressaem em relação ao rio Doce são os rios Suaçuí Grande (250 km), Manhuaçu (153 km) e Guandu (143 km). Destaca-se que tanto no período seco quanto chuvoso a reflectância após o rio Manhuaçu cresce.

2.1.4.5.2 *Estudos de comparação de modelagens de turbidez*

A bacia hidrográfica do rio Doce historicamente é uma bacia reconhecida pela elevada produção de sedimentos. Todavia, logo após o evento de rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, em novembro de 2015, mais atenção ainda foi dada para a questão da turbidez no rio Doce em termos de desenvolvimento de modelos de turbidez.

Isso aconteceu porque o evento aumentou durante a propagação da pluma de sedimentos os níveis de turbidez da bacia, impossibilitando a captação de sua água para abastecimento em municípios da região.

Nessa linha de trabalho, modelos de previsão de turbidez foram desenvolvidos, a fim de poder estimar a turbidez em pontos de interesse antes e/ou depois do evento. Citam-se especialmente os modelos de Tucci (2016) e Castilho et al. (2016).

A pesquisa realizada por Goulart (2017) teve por objetivo comparar quantitativamente e qualitativamente esses dois modelos. Além disso, a autora também processou os dados do modelo de Fagundes, Paiva e Fan (2017) para estimar a turbidez do rio, e incluiu essa versão processada dos dados de Fagundes, Paiva e Fan (2017) na comparação.

Assim, o trabalho de Goulart (2017) teve por objetivo analisar e comparar o desempenho de três modelos prognósticos no rio Doce e em seus principais afluentes: Tucci (2016), Fagundes, Paiva e Fan (2017) e Castilho et al. (2016).

A seguir, são dados alguns detalhes sobre esses modelos. E, posteriormente, os resultados de comparação de Goulart (2017) são explicitados.

2.1.4.5.2.1 O modelo de Tucci (2016)

Tucci (2016) desenvolveu um modelo prognóstico de turbidez para o rio Doce. Utilizou-se a relação entre vazão e turbidez para desenvolver um modelo empírico de previsão, uma vez que a vazão influencia diretamente o transporte de sedimentos e, em consequência, a turbidez. Considerando, também, que dados de vazão podem ser obtidos de postos fluviométricos e modelos que transformam precipitação em vazão.

No desenvolvimento do modelo, foram analisados quatro postos de monitoramento selecionados, dividindo-se os dados em dois períodos: período chuvoso (dezembro de 2015 a fevereiro de 2016) e o período após fevereiro de 2016. A metodologia de análise é descrita abaixo:

- classificam-se as vazões em 10 intervalos de vazões, obtidas em 10 intervalos iguais, em escala logarítmica;
- determina-se a média da turbidez, para cada classe, dos dias com as vazões nessa classe;

- ajusta-se uma função que relaciona turbidez e vazão para os valores dos intervalos de classe e verifica-se a correlação;
- com base nas vazões, determinam-se os valores calculados de turbidez.
- Devido a possíveis incertezas do modelo, citadas a seguir, é aceita uma margem de 30% acima ou abaixo do valor obtido:
- são desprezadas outras variáveis explicativas para turbidez;
- na amostragem da turbidez, a coleta é realizada como uma amostragem da seção do rio, podendo ter grande variabilidade;
- erros de amostragem podem ocorrer;
- muitas vezes, os pontos de dados de vazão e turbidez não estão exatamente no mesmo local, podendo afetar os resultados;
- efeito dos reservatórios.

Para os postos analisados, distribuídos ao longo do rio Doce, os resultados obtidos por Tucci (2016) foram considerados satisfatórios, apontando a conveniência de se usar essa relação como preditor de turbidez. Em todos os postos, a regressão apresentou coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,8 (TUCCI, 2016).

2.1.4.5.2.2 O modelo de Castilho et al. (2017)

Após a ruptura da barragem de Fundão, a CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) deu início à operação de um sistema de alerta, monitorando a passagem da onda de cheia devido ao desastre e informando as comunidades. A ruptura ocorreu no final do período de estiagem, de modo que, após a passagem da onda de cheia, os valores de turbidez e de concentração de sólidos em suspensão aumentaram novamente, pois o aumento da vazão nos cursos d'água movimentou os sedimentos presentes no leito e nas margens.

Segundo Castilho et al. (2016) muitas cidades e comunidades ribeirinhas tinham no rio Doce a sua fonte de captação de água para abastecimento, que ficou comprometida devido aos elevados índices de turbidez apresentados. Por esse motivo, a CPRM desenvolveu um modelo prognóstico de turbidez, a fim de alertar os usuários caso fosse necessária a interrupção do abastecimento (CASTILHO et al., 2016).

O modelo desenvolvido tem por base o conceito de diluição e de retenção de sedimentos em reservatórios. Assim, a turbidez é calculada por uma equação similar à da mistura (36), apresentada a seguir.

$$T_m = \frac{T_1 Q_1 + T_2 Q_2 + \dots + T_n Q_n}{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)} \quad (36)$$

em que T_1 , T_2 e T_n são valores de turbidez nos pontos a montante; Q_1 , Q_2 e Q_n são as vazões nos pontos a montante; T_m é a turbidez no ponto a jusante.

A retenção de sedimentos nos reservatórios é calculada por meio das curvas de Churchill e Brune, apresentadas em Carvalho (2008), e adota-se como premissa que o percentual de retenção de sedimentos é equivalente à diminuição da turbidez nos reservatórios (CASTILHO et al., 2016).

Os dados necessários para a utilização do modelo são:

- volume dos reservatórios selecionados;
- vazão do rio Doce e dos principais afluentes;
- distância, velocidade e tempo de viagem entre os pontos de interesse;
- turbidez nos principais afluentes;
- turbidez nos pontos de monitoramento após a ruptura.

Este modelo foi aplicado por Castilho et al. (2016), utilizando postos de monitoramento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e da CPRM, tendo sido calibrado logo após a ruptura da barragem de rejeitos. Os resultados obtidos foram satisfatórios para faixas de turbidez de até 10.000 NTU.

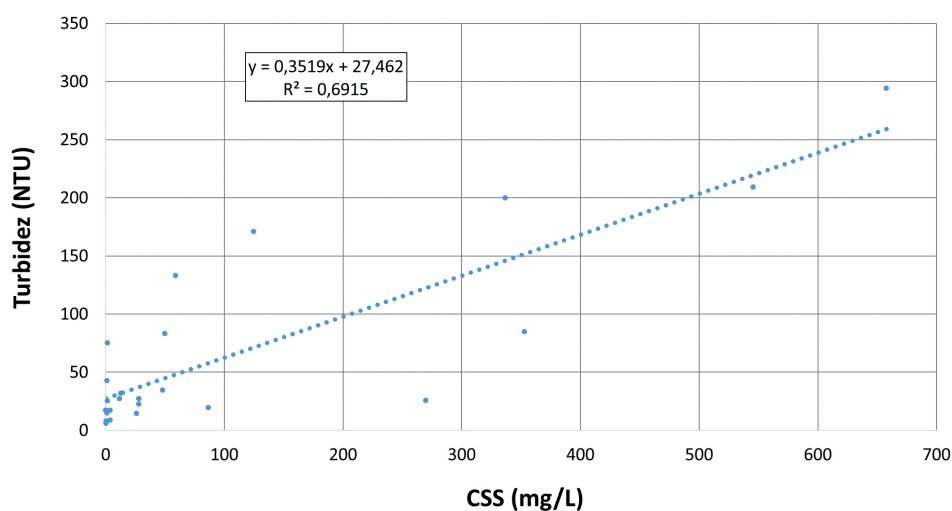
2.1.4.5.2.3 Adaptações realizadas no modelo de Fagundes, Paiva e Fun (2017)

Para comparar o modelo de Fagundes, Paiva e Fun (2017) com os demais modelos, foi necessário fazer algum tipo de relação que permita extrair a informação de turbidez dos rios a partir dos resultados do modelo MGB-SED.

A partir da aplicação realizada por Fagundes, Paiva e Fun (2017), foram obtidas correlações entre turbidez e concentração de sólidos suspensos (CSS) para a bacia do rio Doce. Dos dados gerados pelo MGB-SED, somaram-se as concentrações de argila e silte diárias das minibacias e, com essas concentrações, foram feitas as correlações com a turbidez observada nas estações mais próximas, para o período entre os anos 1997 a 2000.

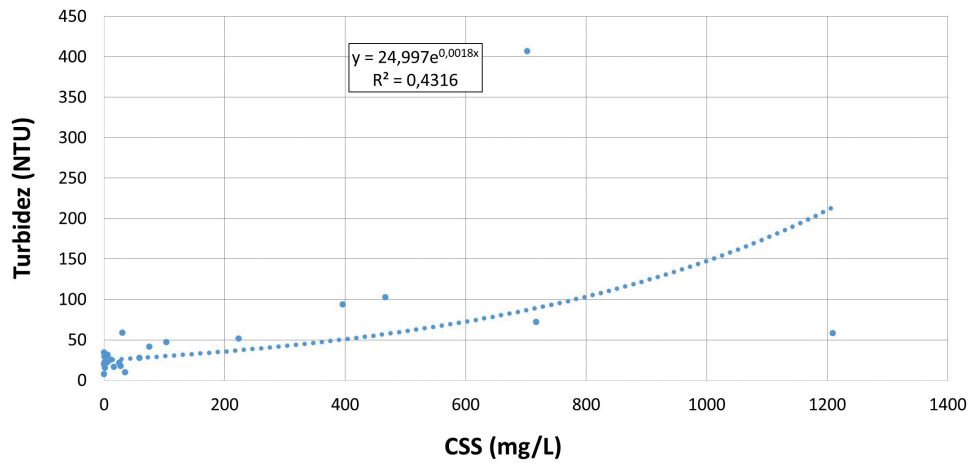
Nessa aplicação, 22 dos 30 postos analisados obtiveram fator R^2 superior a 0,5, indicando correlações consideradas satisfatórias entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão. Na **Figura 55** até a **Figura 58** estão apresentadas as correlações obtidas para alguns postos ao longo da bacia, no período de calibração.

Figura 55 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca/MG.



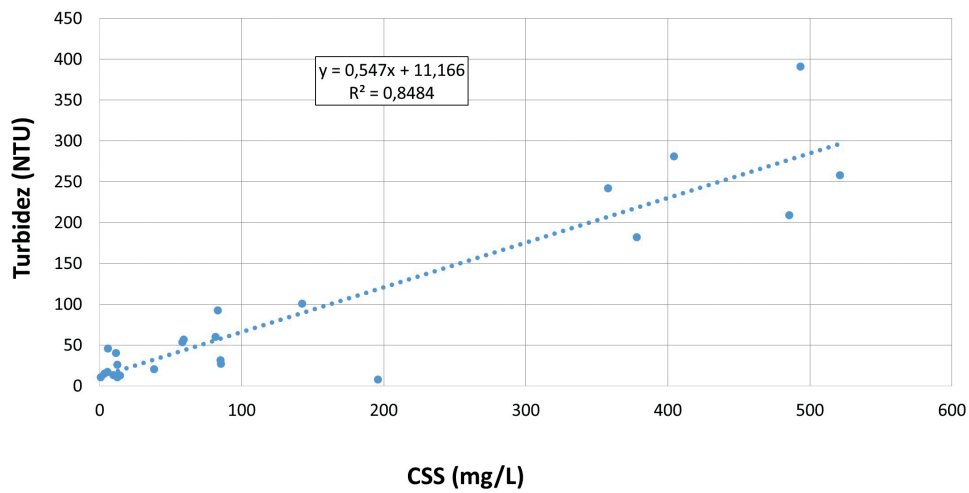
Fonte: Goulart (2017; Página 59).

Figura 56 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito/MG.



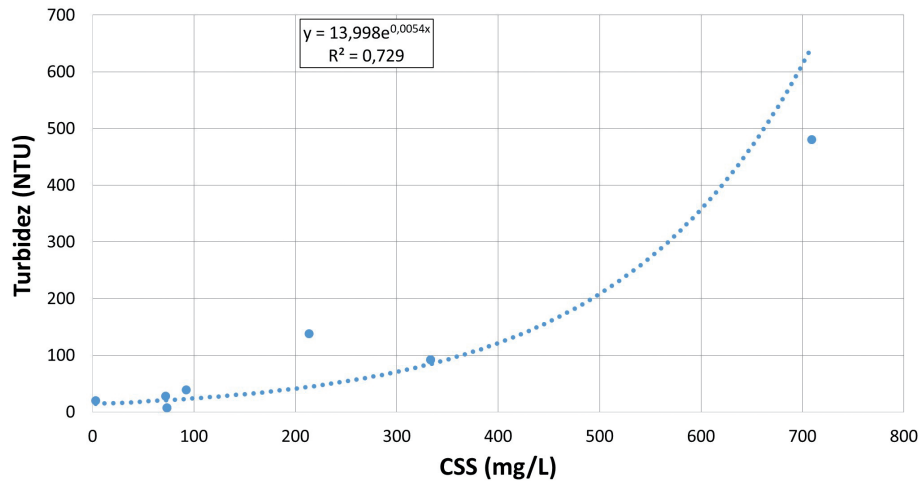
Fonte: Goulart (2017; Página 59).

Figura 57 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena/MG.



Fonte: Goulart (2017; Página 60).

Figura 58 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares/ES.



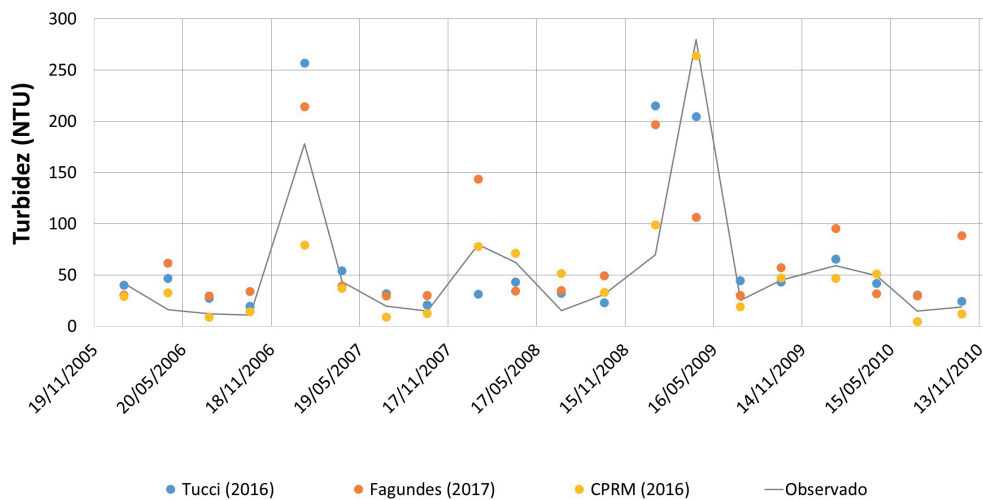
Fonte: Goulart (2017; Página 60).

2.1.4.5.2.4 Resultados da comparação dos modelos

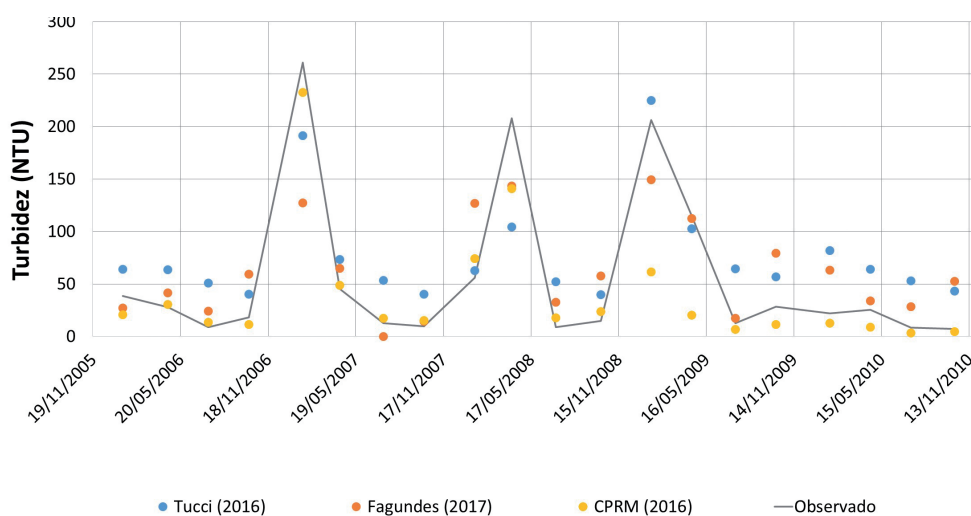
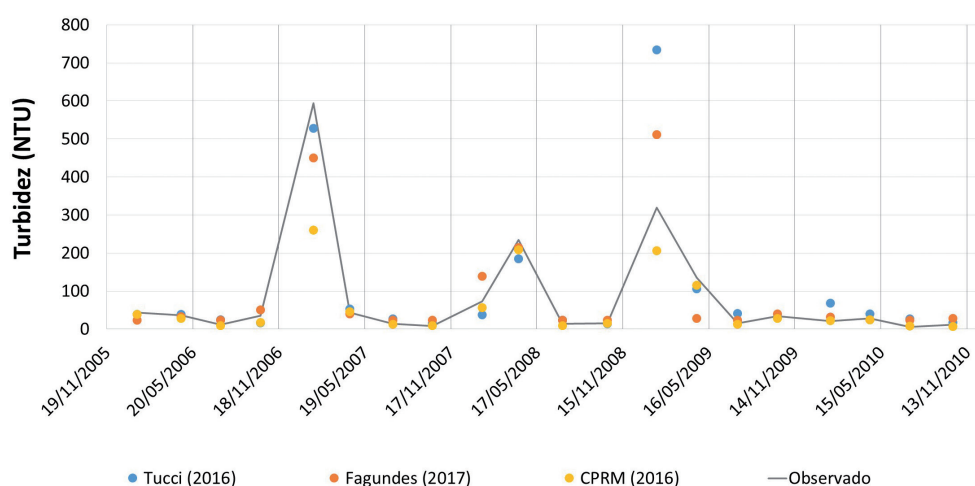
Para a comparação foram selecionados dados de turbidez em estações de medição ao longo da bacia, no período entre 1997 e 2010, abrangendo o período de calibração e o de validação para os modelos. Goulart (2017) fez a aplicação dos modelos, e depois empreendeu uma análise comparativa, com base em estatísticas de erro, para avaliar o desempenho dos modelos na simulação de turbidez no rio Doce.

A **Figura 59** até a **Figura 61** mostram exemplos de comparações feitas entre os modelos para a simulação de turbidez no rio Doce. Em geral, os modelos apresentaram resultados ligeiramente desiguais entre diferentes locais. Com um ou outro modelo tendo melhor desempenho dependendo do local, mas sempre com valores de correlação com as observações na mesma ordem de grandeza.

Figura 59 – Resultados comparados para a estação RD023 (rio Doce).



Fonte: Goulart (2017; Págia 63).

Figura 60 – Resultados comparados para a estação RD044 (rio Doce).**Figura 61** – Resultados comparados para a estação RD045 (rio Doce).

As tabelas abaixo mostram, na ótica de Goulart (2017), um sumário da comparação entre os modelos. A **Tabela 13** mostra um resumo das estatísticas de erro resultantes da aplicação dos modelos de forma geral, enquanto a **Tabela 14** mostra as estatísticas por região da bacia. A **Tabela 15** apresenta uma relação de vantagens e desvantagens de cada modelo prognóstico.

Tabela 13 – Resumo das estatísticas de erro.

PARÂMETRO	TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	CPRM (2016)
Correlação linear média (r)	0,76	0,78	0,79
Amplitude de erro média (NTU)	97	97	48
Viés	Subestima	Superestima	Subestima
Região da bacia com melhor desempenho	Alto Doce	Médio e Baixo Doce	Alto e Médio Doce

Fonte: Goulart (2017).

Tabela 14 – Resumo das estatísticas de erro por região da bacia hidrográfica.

Região da bacia	Parâmetro	Modelos prognósticos		
		TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	CPRM (2016)
Alto Doce	Correlação linear média (r)	0,80	0,73	0,84
	Amplitude de erro média	44,6	60,5	42,8
	Viés	SUBESTIMA	SUPERESTIMA	SUBESTIMA
Médio Doce	Correlação linear média (r)	0,81	0,86	0,95
	Amplitude de erro média	153,5	138,6	43,8
	Viés	SUPERESTIMA	SUPERESTIMA	SUBESTIMA
Baixo Doce	Correlação linear média (r)	0,60	0,70	0,47
	Amplitude de erro média	87,5	85,5	62,2
	Viés	SUBESTIMA	SUPERESTIMA	SUBESTIMA

Fonte: Goulart (2017).

Tabela 15 – Tabela comparativa entre os modelos aplicados.

MODELO		PRECISÃO DOS RESULTADOS	APLICAÇÃO DO MODELO
FAGUNDES (2017)	VANTAGEM	Boa precisão para valores baixos	Necessita de poucos dados, em geral de fácil obtenção; gera dados em qualquer ponto da bacia
	DESvantagem	Baixa precisão nos picos	Necessário o conhecimento do software (MGB-SED)
TUCCI (2016)	VANTAGEM	Boa precisão para valores baixos	Modelo empírico de fácil aplicação
	DESvantagem	Baixa precisão nos picos	Necessidade de dados de turbidez, que são de difícil obtenção
CPRM MODIFICADO (2016)	VANTAGEM	Boa precisão para quaisquer faixas de turbidez; menor amplitude de erro que os demais modelos	Fácil aplicação, utiliza apenas o princípio de diluição e retenção de reservatórios
	DESvantagem	Pequena quantidade de dados afeta o modelo, como no Baixo rio Doce	Necessidade de dados de turbidez, que são de difícil obtenção

Fonte: Goulart (2017).

Assim, concluiu-se que os três modelos possuem desempenho adequado em toda a bacia, cada qual destacando-se em relação aos demais conforme a região de aplicação (Alto, Médio e Baixo rio Doce). A definição de sua utilização dependerá da possibilidade de aquisição de dados, bem como da área de interesse dentro da bacia.

Existem algumas aplicações de modelagens hidrossedimentológicas na bacia do rio Doce, que foram os trabalhos aqui apresentados, cujos resultados podem ser utilizados como condições de contorno para estudos de prognóstico do rio Doce após o rompimento. Espera-se usar essas informações conforme a necessidade, em etapas futuras do projeto.

2.2 QUALIDADE DA ÁGUA

As condições prévias que os corpos hídricos atingidos pela lama de rejeitos apresentavam, em termos de qualidade da água, foram levantadas a partir de diversas variáveis, abrangendo seus aspectos físicos, químicos e bacteriológico. Quando contempladas pela Resolução CONAMA nº 357/2005 ou pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008, as variáveis tiveram seus valores avaliados de acordo com os padrões de referência das legislações citadas. Também foi o objetivo deste trabalho levantar quais variáveis já apresentavam não conformidades mais relevantes na região em estudo mesmo antes do desastre e, quando tangível, identificar as causas dessas alterações.

2.2.1 ÁREA DE ABRANGÊNCIA

Em relação à área de abrangência relacionada aos estudos de qualidade da água, buscou-se levantar as condições que o rio Doce, em especial, apresentava previamente ao rompimento da barragem de rejeitos minerários de Fundão. Antes de chegar ao rio Doce, a lama atingiu primeiramente o córrego Santarém e então os rios Gualaxo do Norte e do Carmo. Desse modo, tais ambientes também fizeram parte da presente avaliação. Foram analisados ainda outros tributários, com o intuito de se investigar possíveis aportes de poluição originalmente provenientes desses ambientes.

2.2.2 METODOLOGIA

Para o levantamento das condições que o rio Doce e tributários apresentavam antes da ruptura da barragem de Fundão, em termos de qualidade de água, foram utilizados principalmente dados oriundos de “programas de monitoramento contínuos” de órgãos ambientais do estado de Minas Gerais e do Espírito Santo. Isso porque o monitoramento contínuo gera um número maior de observações das variáveis de qualidade de água avaliadas, provendo medidas estatísticas mais representativas. Além disso, a manutenção das estações de amostragem nos mesmos locais torna mais precisa a comparação temporal de dados.

De modo geral, os referidos programas de monitoramento apresentaram-se satisfatórios também no que diz respeito à abrangência espacial e temporal.

Contudo, no estado de Minas Gerais, o córrego Santarém e o rio Gualaxo do Norte não faziam parte do escopo de monitoramento contínuo do órgão ambiental antes do desastre. Tendo sido os referidos corpos hídricos trajeto da lama de rejeitos, foram realizadas buscas de dados referentes às suas condições pré-desastre.

Adicionalmente, no estado do Espírito Santo, antes do evento de rompimento as variáveis de qualidade de água monitoradas pelo órgão ambiental eram aquelas necessárias para o cálculo do Índice de Qualidade das Águas (IQA), de modo que não eram contempladas avaliações quanto à concentração de metais na água.

Desse modo, tais questões buscaram ser supridas por meio de outras fontes de referências, sendo que esse conjunto de informações foi denominado no presente relatório por “Estudos complementares”. Cabe ressaltar que tais referências foram utilizadas mais a título de caracterização dos ambientes supracitados, nem sempre sendo possível a obtenção de medidas estatísticas representativas tendo em conta o limitado número de observações.

2.2.2.1 Programas de Monitoramento de Qualidade de Água (IGAM e IEMA)

No estado de Minas Gerais, a qualidade das águas na bacia hidrográfica do rio Doce é monitorada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), por meio do Programa Águas de Minas, desde o ano de 1997. Esse monitoramento contempla, atualmente, 64 estações de amostragem de água, onde são realizadas coletas e análises laboratoriais com periodicidade trimestral e avaliação de aproximadamente 50 parâmetros físico-químicos e hidrobiológicos.

No estado do Espírito Santo, a bacia do rio Doce teve seu monitoramento de qualidade de água iniciado em 1999 pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), sendo os parâmetros avaliados aqueles necessários para o cálculo do IQA da *National Sanitation Foundation*. Ressalta-se que o monitoramento não apresentava uma frequência regular.

Os dados do IGAM foram obtidos em seu próprio *site* (<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica>), enquanto os dados do IEMA foram obtidos a partir da base de dados *on-line* Hidroweb, da ANA, no seguinte endereço: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>.

Das estações de monitoramento localizadas na bacia do rio Doce, foram selecionadas 23 estações de monitoramento do IGAM e 7 estações de monitoramento do IEMA (Tabela 16 e Tabela 17), totalizando 30 estações ao longo da área de estudo. Dessas 30 estações, 17 localizam-se no rio Doce e 13 em tributários. Com exceção da estação RDC1C005, do IEMA, foram utilizadas todas as estações situadas no rio Doce. Esse descarte ocorreu em virtude de a estação RDC1C005 estar localizada em região muito próximo à estação RD067, do IGAM, a qual possui período amostral maior, bem como quantidade de parâmetros de qualidade de água monitorados. Para as estações localizadas em afluentes, a seleção priorizou aquelas situadas em locais próximo ao encontro com o rio Doce e com séries de dados mais extensas.

Na Tabela 16 e na Tabela 17, estão listadas as estações de monitoramento situadas no rio Doce e seus afluentes, respectivamente. É possível observar o período em que se iniciaram os eventos de monitoramento em cada uma das estações. Na coluna “Fim do monitoramento”, consideraram-se as últimas campanhas realizadas antes do evento de rompimento (5 de novembro de 2015). Convém destacar que o número de eventos monitorados pelo IGAM antes do rompimento da barragem de Fundão foi superior ao do IEMA, uma vez que o monitoramento realizado pelo órgão de Minas Gerais ocorreu de modo mais frequente no período estudado. Além disso, algumas estações de monitoramento foram estabelecidas mais tardiamente: RD072, RD083, RD071, RD073 e RD089, o que também implicou um número inferior de campanhas.

Tabela 16 – Estações de monitoramento de qualidade de água localizadas no rio Doce.

Estação	Órgão	Início do monitoramento	Fim do monitoramento	Município	Distância até a barragem de Fundão (km)	Nº de eventos monitorados
RD072	IGAM	01/10/08	07/10/15	Rio Doce, Santa Cruz do Escalvado	111	48
RD019	IGAM	02/09/97	07/10/15	Rio Casca, São Domingos do Prata	167	92
RD023	IGAM	16/09/97	09/10/15	Marliéria, Pingo-d'Água	217	92
RD035	IGAM	05/08/97	09/10/15	Santana do Paraíso	262	85
RD033	IGAM	30/07/97	14/10/15	Belo Oriente, Bugre	291	92
RD083	IGAM	08/07/08	14/10/15	Fernandes Tourinho, Periquito	335	49
RD044	IGAM	21/02/00	14/10/15	Governador Valadares	374	84
RD045	IGAM	30/07/97	14/10/15	Governador Valadares	388	92
RD053	IGAM	04/09/97	19/10/15	Galileia, Tumiritinga	415	91
RD058	IGAM	22/02/00	19/10/15	Conselheiro Pena	450	83
RD059	IGAM	04/09/97	16/10/15	Resplendor	486	92
RD067	IGAM	25/03/98	16/10/15	Aimorés (MG), Baixo Guandu (ES)	522	90
RDC1E010	IEMA	18/05/99	09/11/10	Colatina	546	27
RDC1E015	IEMA	18/05/99	12/05/09	Colatina	568	19
RDC1D020	IEMA	18/05/99	09/11/10	Colatina	560	27
RDC1D025	IEMA	18/05/99	21/10/10	Linhares	609	25
RDC1E030	IEMA	12/05/91	21/10/10	Linhares	623	25

Tabela 17 – Estações de monitoramento de qualidade de água em afluentes do rio Doce.

Estação	Órgão	Início do monitoramento	Fim do monitoramento	Município	Afluente	Nº de eventos monitorados
RD009	IGAM	23/07/97	13/01/15	Mariana	Rio do Carmo	66
RD071	IGAM	01/10/08	13/01/15	Barra Longa	Rio do Carmo	29
RD013	IGAM	23/07/97	14/01/15	Ponte Nova	Rio Piranga	89
RD018	IGAM	15/02/00	14/01/15	Rio Casca, São Pedro dos Ferros	Rio Casca	64
RD073	IGAM	17/10/08	16/01/15	Bom Jesus do Galho, Pingo-d'Água	Ribeirão Sacramento	29
RD034	IGAM	17/02/00	16/01/15	Coronel Fabriciano, Timóteo	Rio Piracicaba	64
RD039	IGAM	30/07/97	21/01/15	Naque	Rio Santo Antônio	73
RD040	IGAM	18/02/00	21/01/15	Governador Valadares, Periquito	Rio Corrente Grande	64
RD089	IGAM	10/07/08	23/01/15	Governador Valadares	Rio Suaçuí Grande	30
RD057	IGAM	04/09/97	26/01/15	Conselheiro Pena	Rio Caratinga	73
RD065	IGAM	27/08/97	23/01/15	Aimorés	Rio Manhuaçu	73
RDC2C007	IEMA	18/05/99	09/11/10	Afonso Cláudio	Rio Guandu	27
RDC2C012	IEMA	25/06/99	09/11/10	Baixo Guandu	Rio Santa Joana	27

A localização dos pontos de monitoramento avaliados ao longo do rio Doce e seus afluentes é apresentada na Figura 62. Na Tabela 18, constam as coordenadas geográficas das referidas estações (Datum SIRGAS 2000), no sentido montante-jusante do rio Doce.

Figura 62 – Localização das estações de monitoramento de qualidade de água na região de estudo.

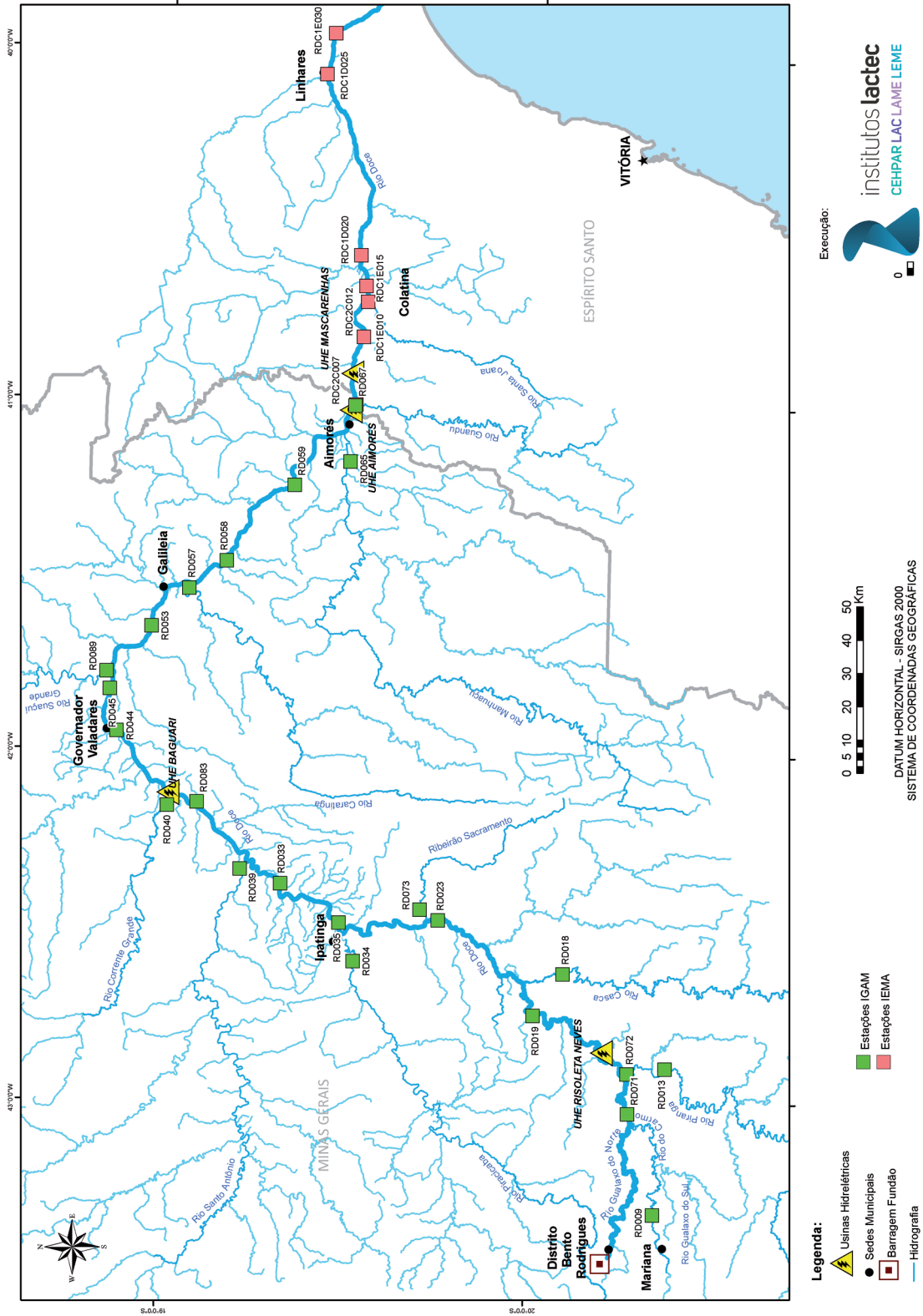


Tabela 18 – Coordenadas geográficas das estações de monitoramento de qualidade de água na área de estudo.

Ponto	Órgão	Rio	Latitude	Longitude
RD009	IGAM	Rio do Carmo	-20,35	-43,32
RD071	IGAM	Rio do Carmo	-20,28	-43,03
RD072	IGAM	Rio Doce	-20,27	-42,92
RD013	IGAM	Rio Piranga	-20,38	-42,9
RD018	IGAM	Rio Casca	-20,1	-42,63
RD019	IGAM	Rio Doce	-20,02	-42,75
RD023	IGAM	Rio Doce	-19,76	-42,48
RD073	IGAM	Ribeirão Sacramento	-19,71	-42,45
RD034	IGAM	Rio Piracicaba	-19,53	-42,6
RD035	IGAM	Rio Doce	-19,49	-42,49
RD033	IGAM	Rio Doce	-19,33	-42,38
RD039	IGAM	Rio Santo Antônio	-19,22	-42,34
RD083	IGAM	Rio Doce	-19,1	-42,15
RD040	IGAM	Rio Corrente Grande	-19,02	-42,16
RD044	IGAM	Rio Doce	-18,88	-41,95
RD045	IGAM	Rio Doce	-18,86	-41,83
RD089	IGAM	Rio Suaçuí Grande	-18,85	-41,78
RD053	IGAM	Rio Doce	-18,97	-41,65
RD057	IGAM	Rio Caratinga	-19,07	-41,54
RD058	IGAM	Rio Doce	-19,17	-41,46
RD059	IGAM	Rio Doce	-19,35	-41,24
RD065	IGAM	Rio Manhuaçu	-19,5	-41,17
RD067	IGAM	Rio Doce	-19,51	-41,01
RDC2C007	IEMA	Rio Guandu	-19,51194	-41,00667
RDC1E010	IEMA	Rio Doce	-19,52806	-40,81278
RDC2C012	IEMA	Rio Santa Joana	-19,53722	-40,71222
RDC1E015	IEMA	Rio Doce	-19,53194	-40,6675
RDC1D020	IEMA	Rio Doce	-19,51639	-40,58
RDC1D025	IEMA	Rio Doce	-19,41056	-40,065
RDC1E030	IEMA	Rio Doce	-19,43167	-39,9475

2.2.2.1.1 Parâmetros de qualidade de água e base legal

Em relação aos programas de monitoramento de qualidade de água, foi avaliado um total de 46 parâmetros de qualidade de água, incluindo parâmetros físicos, químicos e bacteriológicos. Ressalta-se, contudo, que o IEMA antes do desastre avaliava somente os parâmetros necessários ao cálculo do IQA, de modo que foi possível avaliar somente 8 dos 46 parâmetros de qualidade de água do IGAM na porção capixaba, conforme apresentado na Tabela 19.

Para a avaliação dos parâmetros, em termos de desacordos ambientais, utilizaram-se como referências os padrões de qualidade de água dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de Classe 2 (BRASIL, 2005) (Tabela 19). O rio Doce, assim como a grande maioria de seus afluentes, não possui enquadramento aprovado no âmbito do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Dessa forma, conforme orientação da Resolução CNRH nº 91/2008 (art. 15, parágrafo 2º) (BRASIL, 2008), até que se estabeleça o enquadramento do corpo hídrico, poderá ser adotada a Classe 2 para as águas doces superficiais.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, águas doces de Classe 2 podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, que inclui as etapas de coagulação, floculação e desinfecção;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274/2000;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais venha a ter contato direto;
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Convém destacar que, no estado de Minas Gerais, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 (MINAS GERAIS, 2008a), assim como a Resolução CONAMA nº 357/2005, também dispõe sobre a classificação dos corpos d'água superficiais e impõe as diretrizes ambientais de enquadramento. Contudo, não há diferenças entre a Deliberação Normativa Conjunta e a referida Resolução no que diz respeito aos limites para águas de Classe 2. Exceção se faz para o parâmetro "sólidos suspensos totais", que apresenta valor de referência somente na Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008.

Desse modo, por ter o rio Doce suas nascentes no estado de Minas Gerais e sua foz no estado do Espírito Santo – sendo considerado rio de domínio da União –, optou-se por utilizar os valores de referência (limites) dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Para a avaliação dos resultados de "sólidos suspensos totais", entretanto, foi utilizado o valor de referência da COPAM/CERH-MG nº 01/2008.

Tabela 19 – Variáveis de qualidade de água avaliadas e respectivos limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de Classe 2.

Variáveis físicas			
Variável de qualidade de água	IGAM	IEMA	Limite para rios de Classe 2
Cor verdadeira	X		≤ 75 UC
Sólidos totais	X	X	-
Sólidos dissolvidos totais	X		≤ 500 mg.L ⁻¹
Sólidos em suspensão totais	X		≤ 100 mg.L ^{-1*}
Turbidez	X	X	≤ 100 UNT
Variáveis químicas			
Variável de qualidade de água	IGAM	IEMA	Limite para rios de Classe 2
Alcalinidade de bicarbonato	X		-
Alcalinidade total	X		-
Cianeto livre	X		≤ 0,005 mg.L ⁻¹
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	X		-
Cloreto total	X		≤ 250 mg.L ⁻¹
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	X	X	≤ 5 mg.L ⁻¹
Dureza total	X		-
Fenóis totais	X		≤ 0,003 mg.L ⁻¹
Fósforo total	X	X	≤ 0,1 mg.L ⁻¹
Nitrato	X		≤ 10 mg.L ⁻¹
Nitrito	X		≤ 1 mg.L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	X		3,7 mg/L N, para pH ≤ 7,5 2,0 mg/L N, para 7,5 < pH ≤ 8,0 1,0 mg/L N, para 8,0 < pH ≤ 8,5 0,5 mg/L N, para pH > 8,5
Nitrogênio orgânico	X		-
Nitrogênio total	X	X	Ambientes lóticos: < 2,18 mg.L ⁻¹ ; quando o nitrogênio for fator limitante para a eutrofização.
Oxigênio dissolvido (OD)	X	X	≥ 5,00 mg.L ⁻¹
pH <i>in loco</i>	X	X	6,0 a 9,0
Selênio total	X		≤ 0,01 mg.L ⁻¹
Sulfato total	X		≤ 250 mg.L ⁻¹
Variáveis químicas (metais e semimetais)			
Variável de qualidade de água	IGAM	IEMA	Limite para rios de Classe 2
Alumínio dissolvido	X		≤ 0,1 mg.L ⁻¹
Alumínio total	X		-
Arsênio total	X		≤ 0,01 mg.L ⁻¹
Bário total	X		≤ 0,7 mg.L ⁻¹
Boro dissolvido	X		-
Boro total	X		≤ 0,5 mg.L ⁻¹
Cádmio total	X		≤ 0,001 mg.L ⁻¹
Cálcio total	X		-
Chumbo total	X		≤ 0,01 mg.L ⁻¹

Cobre dissolvido	X		$\leq 0,009 \text{ mg.L}^{-1}$
Cobre total	X		-
Cromo hexavalente	X		-
Cromo trivalente	X		-
Cromo total	X		$\leq 0,05 \text{ mg.L}^{-1}$
Ferro dissolvido	X		$\leq 0,3 \text{ mg.L}^{-1}$
Magnésio total	X		-
Manganês total	X		$\leq 0,1 \text{ mg.L}^{-1}$
Mercúrio total	X		$\leq 0,0002 \text{ mg.L}^{-1}$
Níquel total	X		$\leq 0,025 \text{ mg.L}^{-1}$
Potássio dissolvido	X		-
Sódio dissolvido	X		-
Zinco total	X		$\leq 0,18 \text{ mg.L}^{-1}$
Variáveis microbiológicas			
Variável de qualidade de água	IGAM	IEMA	Limite para rios de Classe 2
Coliformes termotolerantes	X	X	$\leq 1.000 \text{ NMP.100mL}^{-1}$

Nota: * Limite da Classe 2 da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG 01/2008.

Observa-se na Tabela 19 que nem todas as variáveis listadas são abrangidas pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Nesse caso, foram utilizados alternativamente, para efeitos de avaliação dos resultados, mas não em termos de não conformidade, valores de referência da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), que apresenta padrões para água potável, bem como valores dispostos na literatura consultada.

O presente relatório também contemplou a avaliação dos ensaios ecotoxicológicos com o microcrustáceo *Ceriodaphnia dubia*, realizados pelo IGAM antes do evento do rompimento da barragem de Fundão.

2.2.2.1.2 Avaliação dos dados físicos, químicos e bacteriológicos da água

Inicialmente, procedeu-se à organização e análise exploratória da base de dados preexistente ao rompimento da barragem de rejeitos minerários de Fundão. Foram reunidos os dados referentes a todas as campanhas realizadas antes do evento do rompimento da barragem de Fundão (5 de novembro de 2015), considerando-se as estações de monitoramento descritas no item 2.2.2.1 e os parâmetros de qualidade de água listados na Tabela 19.

Calcularam-se medidas estatísticas para cada série de dados (mínimo, máximo, média e mediana), além do número de observações. Tais informações encontram-se no Apêndice D. Ressalta-se que, nos casos em que os resultados das análises dos parâmetros de qualidade de água resultaram em valor inferior ao Limite de Quantificação do método (LQ), utilizou-se o próprio valor do LQ para fins de cálculo.

Complementarmente, visando à avaliação da distribuição das séries de dados de cada um dos parâmetros de qualidade de água, para cada uma das estações de monitoramento, foram elaborados gráficos de caixa (*box plot*). Esse tipo de gráfico é formado por cinco medidas: limite inferior, primeiro quartil, mediana (ou segundo quartil), terceiro quartil e limite superior. Quartis são valores que

dividem uma amostra de dados em quatro partes iguais (Tabela 20), cada uma possuindo o mesmo número de observações.

Tabela 20 – Definição de quartis.

Quartil	Descrição
1º quartil (Q1)	25% dos dados são menores que ou iguais a este valor.
2º quartil (Q2) ou mediana	50% dos dados são menores que ou iguais a este valor.
3º quartil (Q3)	75% dos dados são menores que ou iguais a este valor.
Amplitude interquartilica (AIQ)	A distância entre o 1º e o 3º quartil (Q3-Q1).

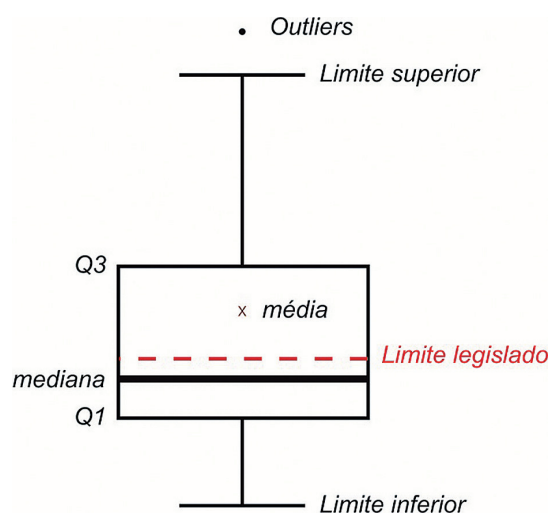
Os limites inferior e superior são os valores mínimo e máximo do conjunto em questão, descontando-se os valores discrepantes ou *outliers*. Estes foram calculados do seguinte modo:

- *Outlier* superior = $Q3 + (1,5 \times AIQ)$;
- *Outlier* inferior = $Q1 - (1,5 \times AIQ)$.

Na presente avaliação, foram ainda adicionados à configuração original do gráfico o valor da média do conjunto (representada por um “x” na cor vermelha) e o limite da Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005.

A Figura 63 mostra a representação esquemática do gráfico *box plot* adotada no presente trabalho.

Figura 63 – Representação esquemática do gráfico *box plot*.



Os gráficos de distribuição (*box plot*) serão apresentados no Apêndice D. Quando necessário, foi apresentado detalhamento dos gráficos, buscando uma melhor visualização dos resultados.

2.2.2.1.3 Avaliação do período seco e chuvoso

Com vistas à avaliação da influência da sazonalidade nos resultados dos parâmetros de qualidade de água, os conjuntos de dados – quando pertinente – foram divididos em “período seco” e “período chuvoso”. Na região, o período chuvoso ocorre, normalmente, entre outubro e março, e o período seco, entre abril e setembro (IGAM, 2016).

2.2.2.1.4 *Avaliação de não conformidade dos parâmetros de qualidade de água*

Para a determinação dos parâmetros de qualidade de água que já mostravam alterações mais relevantes antes do desastre, foram calculados para os três períodos (total, chuvoso e seco) os percentuais de desacordos em relação aos limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (item 2.2.2.1.1). Percentuais de desacordos acima de 20% foram destacados em vermelho. Esse foi o mesmo critério utilizado no Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no âmbito da Bacia do Rio Doce (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a) para a definição de parâmetros prioritários. Ou seja, os parâmetros de qualidade de água com desacordos em relação ao limite legislado em mais de 20% dos eventos de monitoramento foram considerados mais relevantes no sentido da gestão da bacia do rio Doce no referido Plano Integrado de Recursos Hídricos.

Para os parâmetros de qualidade de água não contemplados pela Resolução CONAMA nº 357/2005, não foram calculados percentuais de desacordos.

2.2.2.1.5 *Avaliação espacial dos dados de monitoramento de qualidade de água*

Para a avaliação espacial dos dados, ou seja, de variações ao longo do rio Doce e dos seus tributários, foram gerados gráficos de medianas. A mediana é uma medida estatística de posição, dividindo a série de dados (ordenada em modo crescente) em partes iguais. Assim, sabe-se que 50% das observações da série têm valor superior à mediana, enquanto a outra metade das observações possui valor inferior à mediana. Dessa forma, quando a mediana é superior ao limite legislado, tem-se como resposta imediata que, em pelo menos 50% das observações (eventos) do monitoramento, o parâmetro de qualidade de água encontrou-se em desacordo com a legislação. Além disso, a mediana não é tão sensível a valores discrepantes, como a média. A média, ao contrário da mediana, é uma medida muito influenciada por valores “muito altos” ou “muito baixos”, mesmo que esses valores surjam em baixa frequência na amostra. Desse modo, a média pode não representar adequadamente o conjunto dos dados. Nos gráficos de mediana, foram plotados os valores de mediana dos períodos total, seco e chuvoso de determinada variável de qualidade de água nas estações monitoradas, sendo possível observar o comportamento da variável em questão ao longo da área de estudo.

2.2.2.1.6 *Avaliação temporal dos dados de monitoramento de qualidade de água*

Visando avaliar as possíveis alterações dos parâmetros de qualidade de água ao longo do tempo, foram utilizados gráficos de dispersão para cada uma das variáveis de qualidade de água, colocando-se na forma gráfica os dados do período seco e chuvoso em comparação ao limite legislado adotado, considerando toda a série de dados da referida variável.

2.2.2.1.7 *Avaliação dos ensaios de ecotoxicidade com *Ceriodaphnia dubia**

Os ensaios de ecotoxicidade consistem na determinação do potencial tóxico de um agente químico ou de uma mistura complexa, sendo os efeitos desses poluentes detectados a partir da resposta de organismos vivos (IGAM, 2014).

O IGAM utilizou o microcrustáceo *Ceriodaphnia dubia* como organismo indicador para descrever os eventuais efeitos deletérios sobre os organismos aquáticos. Esse método consiste na exposição de

indivíduos jovens desse organismo, a várias concentrações da água bruta, por um período de sete dias nas condições prescritas na norma ABNT NBR 13373.

O teste apresenta as seguintes respostas: Efeito Agudo, Efeito Crônico e Não Tóxico. O Efeito Agudo é caracterizado por uma resposta severa e rápida a um estímulo, a qual se manifesta nos organismos aquáticos em tempos relativamente curtos (0 a 48h), sendo o efeito morte o mais observado, podendo-se também notar letargia nas espécies amostradas. O Efeito Crônico caracteriza-se pela resposta a um estímulo que continua por longos períodos de exposição do organismo ao poluente (1/10 do ciclo vital até a totalidade da vida), que pode ser expressa a partir de mudanças comportamentais, alterações fisiológicas, genéticas, reprodução etc. (IGAM, 2014).

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, entre as condições de qualidade de água, está a “não verificação de efeito tóxico crônico a organismos, de acordo com os critérios estabelecidos pelo órgão ambiental competente...” Ainda nesse contexto, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 também ressalta que, para as condições de qualidade de água, deve ser observada a “não verificação de efeito tóxico agudo e crônico a organismos em amostras de água e/ou sedimento, de acordo com os critérios a serem estabelecidos pelo COPAM”. Sendo assim, todas as respostas Efeito Agudo e Efeito Crônico foram consideradas como não conformidades.

Foram avaliadas nove estações de monitoramento da bacia hidrográfica do rio Doce, no estado de Minas Gérias (Tabela 21), destas, seis estações estão localizadas no rio Doce e três em afluentes.

Assim como para os parâmetros de qualidade de água, as observações foram separadas entre os períodos seco e chuvoso. Ressalta-se que nem sempre o número de eventos realizados, bem como o período amostrado, foi igual para todas as estações de monitoramento. Os dados avaliados estão compreendidos entre os anos de 2011 até a data do desastre (5 de novembro de 2015), com exceção das estações RD083, cujo monitoramento foi realizado desde 2008 e possui, então, uma série maior de dados, e as estações RD034 e RD045, com dados avaliados entre os anos de 2001 e 2003.

Tabela 21 – Estações de monitoramento de qualidade de água com avaliação de ensaios de ecotoxicidade.

Estação	Órgão	Início do monitoramento	Fim do monitoramento	Rio	Número de eventos ecotoxicológicos monitorados
RD023	IGAM	07/10/11	09/10/15	Rio Doce	17
RD034	IGAM	16/08/01	02/05/03	Rio Piracicaba	8
RD035	IGAM	07/10/11	09/10/15	Rio Doce	17
RD039	IGAM	13/10/11	21/01/15	Rio Santo Antônio	17
RD083	IGAM	08/07/08	14/10/15	Rio Doce	30
RD045	IGAM	19/08/01	06/05/03	Rio Doce	8
RD058	IGAM	17/10/11	19/10/15	Rio Doce	17
RD065	IGAM	17/10/11	23/01/15	Rio Manhuaçu	17
RD067	IGAM	16/10/11	16/10/15	Rio Doce	17

2.2.2.2 Estudos complementares

Conforme mencionado anteriormente, fez-se necessária a busca de outras referências com a finalidade de suprir informações não contempladas pelas avaliações realizadas pelo IGAM e pelo IEMA, em seus monitoramentos periódicos.

Foram realizadas buscas de publicações acadêmicas, bem como de documentos de órgãos públicos, de modo geral.

Na sequência, listam-se as referências utilizadas na caracterização do córrego Santarém, rio Gualaxo do Norte e rio Doce (em sua porção capixaba) conforme as lacunas levantadas na metodologia (item 2.2.2):

- Avaliação e estudo das emissões de metais pesados pela barragem de Santarém (Samarco Mineração S.A.) no sistema hídrico da região de Ouro Preto e Mariana. Um estudo da qualidade das águas (MATSUMURA, 1999).
- 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 atividades de extração mineral (COSTA, 2001).
- Atlas Geoquímico da Bacia do Rio Doce (CPRM, 2016).
- Qualidade das águas nos rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo, afluentes do alto rio Doce (Watu): metais, metaloides e índice de qualidade das águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundão da Samarco/Cale/BHP Billiton, em Mariana, Minas Gerais (FERNANDES, 2017).
- Dados de duas campanhas de monitoramento realizadas pelo IEMA no rio Doce, em novembro/2015, antes da chegada da lama de rejeitos, disponibilizadas via *e-mail* pelo IEMA ao Lactec.
- Dados físicos, químicos e biológicos de três pontos de captação no rio Doce, no município de Colatina/ES, fornecidos pelo Serviço Colatinense de Saneamento Ambiental (SANEAR Colatina) via *e-mail*.

Convém destacar que foram solicitados os dados de qualidade de água dos pontos de captação do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Baixo Guandu (SAAE Baixo Guandu), que antes do desastre também captava água no rio Doce, porém estes não foram recebidos pelo Lactec.

A seguir, apresentam-se detalhes de cada uma das referências citadas. Ressalta-se que os resultados das referências utilizadas (item 2.2.3) foram compilados por corpo hídrico, a saber: córrego Santarém/MG, rio Gualaxo do Norte/MG, rio Guandu/ES, rio Santa Joana/ES e rio Doce/ES.

Avaliação e estudo das emissões de metais pesados pela barragem de Santarém (Samarco Mineração S.A.) no sistema hídrico da região de Ouro Preto e Mariana. Um estudo da qualidade das águas (MATSUMURA, 1999)

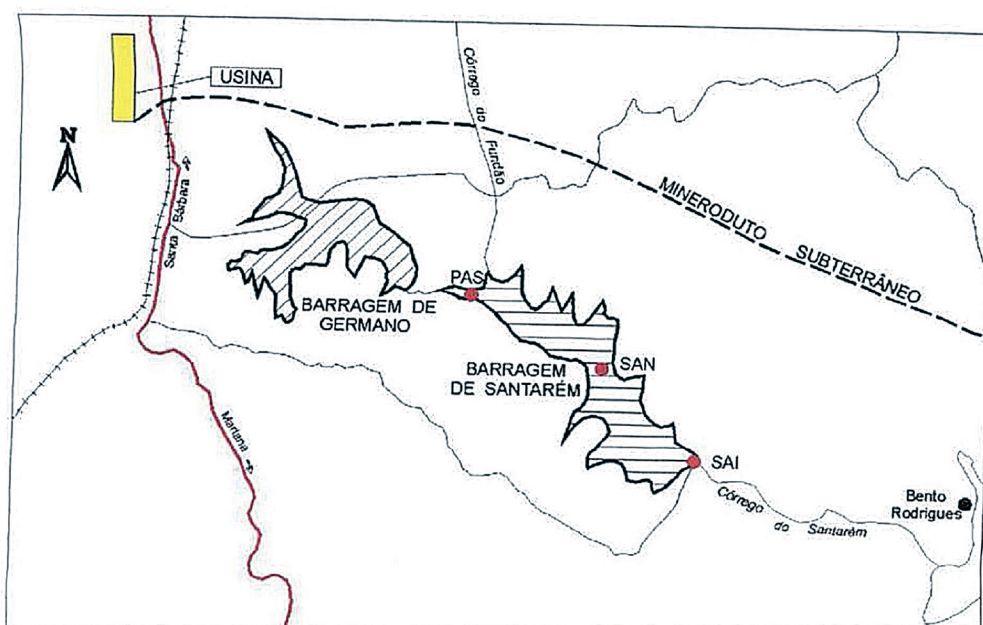
O trabalho em questão teve por principal objetivo analisar a qualidade da água na extensão da barragem de Santarém da Samarco, localizada no município de Mariana/MG (ressalta-se que, com

o rompimento da barragem de Fundão, houve o galgamento da barragem de Santarém). Entre as variáveis estudadas por Matsumura (1999), foram avaliadas no presente relatório: manganês, ferro, cromo, níquel, cobre, condutividade, sólidos totais dissolvidos, pH, turbidez, cor, alcalinidade, oxigênio dissolvido e DBO.

O autor realizou as coletas em três localidades, sendo a primeira denominada PAS, a montante da barragem de Santarém; a segunda nomeada como SAN, localizada no ponto médio da barragem de Santarém; e, por fim, o ponto SAI, fixado após o vertedouro da barragem (Figura 64). A fim de caracterizar o córrego Santarém, escolheu-se a última localidade para avaliação. As coordenadas geográficas não foram informadas pelo autor.

No total, foram realizadas quatro campanhas de amostragem no ano de 1998, sendo duas no período de seca (junho e julho) e as outras duas no período chuvoso (novembro e dezembro).

Figura 64 – Localização do ponto SAI, no vertedouro da barragem de Santarém.



Fonte: Matsumura (1999).

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 atividades de extração mineral (COSTA, 2001)

Conforme a autora, o estudo foi conduzido no intuito de elucidar o comportamento físico-químico das águas e dos sedimentos frente às inúmeras interferências antrópicas relacionadas aos quase três séculos de mineração na bacia do rio Gualaxo do Norte. Foram realizadas amostragens em janeiro/2000 e junho/2000, no rio Gualaxo do Norte e no córrego Santarém, conforme Tabela 22.

Tabela 22 – Locais e períodos amostrados por Costa (2001).

NASCENTES			
Referência	Localização	Janeiro (2000)	Junho (2000)
RG4N	nascente do rio Gualaxo do Norte		X
RG6N	nascente do rio Gualaxo do Norte		X
RSN1	nascente do córrego Santarém	X	X
ÁREAS DE GARIMPO			
Referência	Localização	Janeiro (2000)	Junho (2000)
RG13	Rio Gualaxo do Norte - Antônio Pereira	X	X
RG14	Rio Gualaxo do Norte - Antônio Pereira	X	X
RSN2	Córrego Santarém (jusante mina de ouro)	X	X
RG5	Rio Gualaxo do Norte - Paracatu de Cima	X	X
ALTO CURSO DO RIO GUALAXO DO NORTE			
Referência	Localização	Janeiro (2000)	Junho (2000)
RG12	Rio Gualaxo do Norte - estrada Bento Rodrigues	X	X
RG11	Rio Gualaxo do Norte - ponte fazenda Gualaxo	X	X
RG10	Rio Gualaxo do Norte - Bento Rodrigues	X	X
CÓRREGO SANTARÉM			
Referência	Localização	Janeiro (2000)	Junho (2000)
RS1	Vertedouro da barragem Santarém	X	
RS2	Córrego Santarém - Bento Rodrigues	X	X
RS3	Córrego Santarém - Bento Rodrigues	X	X
MÉDIO E BAIXO CURSO DO RIO GUALAXO DO NORTE			
Referência	Localização	Janeiro (2000)	Junho (2000)
RG9	Rio Gualaxo do Norte - Bento Rodrigues	X	X
RG6	Rio Gualaxo do Norte - Paracatu de Baixo	X	X
RG4	Rio Gualaxo do Norte - Gesteira	X	X
RG3	Rio Gualaxo do Norte - montante Barra Longa	X	X

Entre as variáveis estudadas pela autora, foram selecionadas as seguintes variáveis para a presente avaliação: condutividade, sólidos dissolvidos totais, pH, ferro, manganês, alumínio, cromo, níquel, cobalto, cádmio, chumbo e zinco.

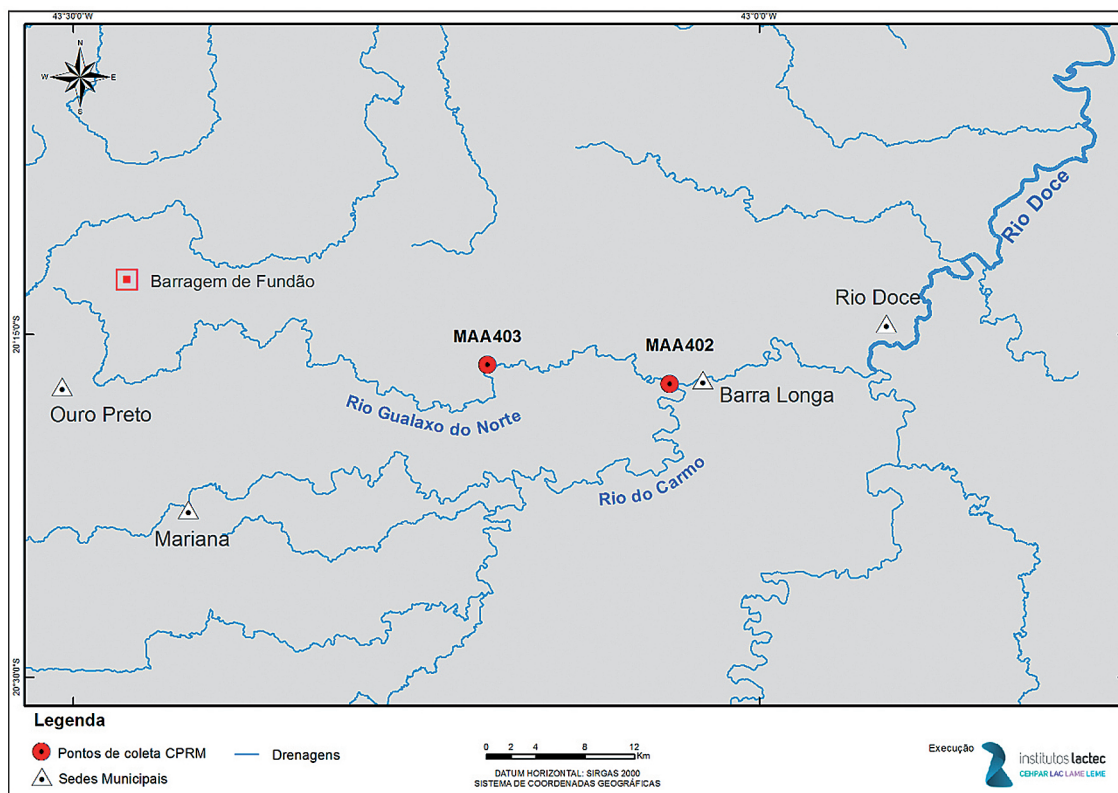
Atlas Geoquímico da Bacia do Rio Doce (CPRM, 2016)

Com vistas a preencher algumas lacunas de dados referentes ao monitoramento de qualidade de água realizado pelo IGAM e pelo IEMA, foram avaliados dados químicos de águas superficiais gerados no âmbito do Atlas Geoquímico da Bacia do Rio Doce (CPRM, 2016).

Apesar de o atlas abranger toda a bacia do rio Doce, sua utilização se deu no sentido de complementar os dados disponibilizados pelo IGAM e pelo IEMA, dessa forma foram selecionados corpos hídricos específicos para avaliação.

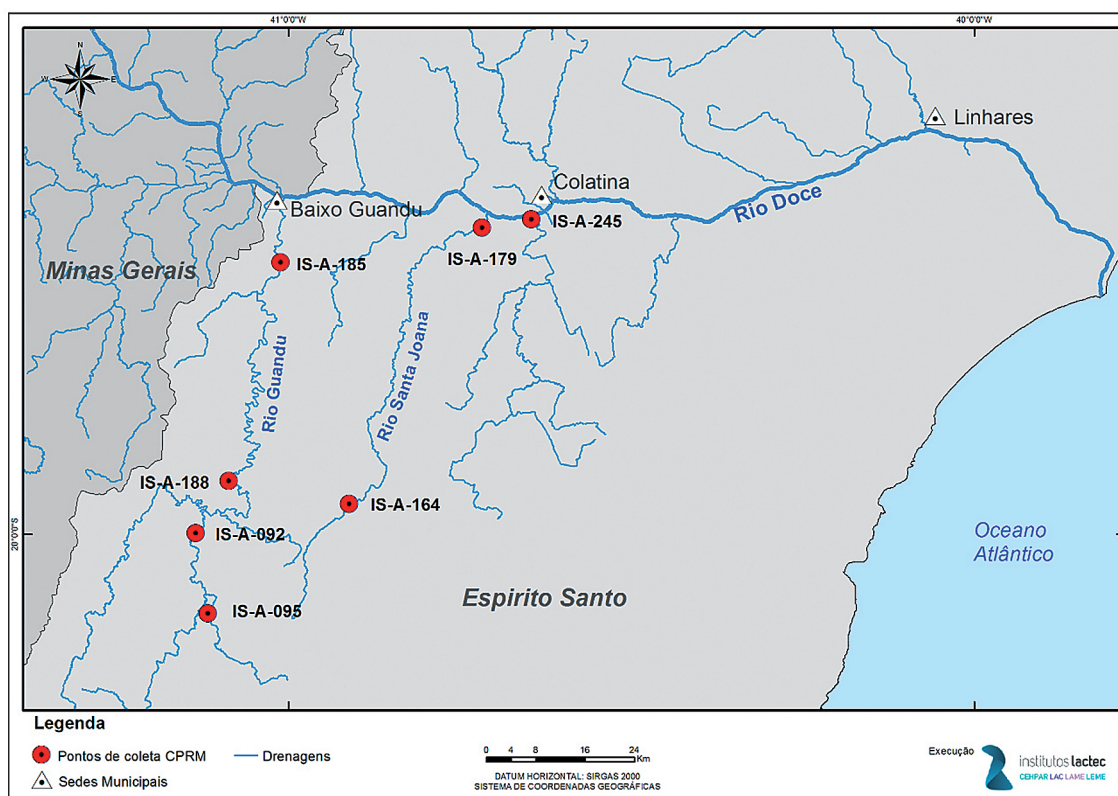
No estado de Minas Gerais, visto que antes do desastre o IGAM não monitorava o rio Gualaxo do Norte, foram avaliados os dados químicos de águas superficiais do referido corpo hídrico em duas localidades (Figura 65). No estado do Espírito Santo (Figura 66), estudaram-se os dados de águas superficiais dos rios Doce, Santa Joana e Guandu, visto que o monitoramento do IEMA se restringia, antes do desastre, às variáveis que compõem o IQA e não tinha por objetivo a avaliação de metais. Ressalta-se que cada local foi alvo de uma amostragem.

Figura 65 – Locais avaliados no rio Gualaxo do Norte, em Minas Gerais.



Fonte: CPRM (2016).

Figura 66 – Locais avaliados nos rios Guandu, Santa Joana e Doce, no Espírito Santo.



Fonte: CPRM (2016).

As variáveis de qualidade de água selecionadas para análise no presente estudo constam na Tabela 23.

Tabela 23 – Variáveis avaliadas no Atlas Geoquímico da bacia do rio Doce.

Variável	Unidade	Limite de Detecção
pH	unidades de pH	-
OD	mg/L	-
condutividade	μS/cm	-
Alumínio dissolvido	mg/L	0,003
Arsênio dissolvido	mg/L	0,002
Boro dissolvido	mg/L	0,007
Bário dissolvido	mg/L	0,003
Cádmio dissolvido	mg/L	0,001
Cobalto dissolvido	mg/L	0,003
Cromo dissolvido	mg/L	0,003
Cobre dissolvido	mg/L	0,002
Ferro dissolvido	mg/L	0,002
Mercúrio dissolvido	mg/L	0,0003
Manganês dissolvido	mg/L	0,007
Níquel dissolvido	mg/L	0,007
Chumbo dissolvido	mg/L	0,002
Silício dissolvido	mg/L	0,002
Titânio dissolvido	mg/L	0,005
Zinco dissolvido	mg/L	0,01

Fonte: CPRM (2016).



Qualidade das águas nos rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo, afluentes do alto rio Doce (Watu): metais, metaloides e índice de qualidade das águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundão da Samarco/Cale/BHP Billiton, em Mariana, MG (FERNANDES, 2017)

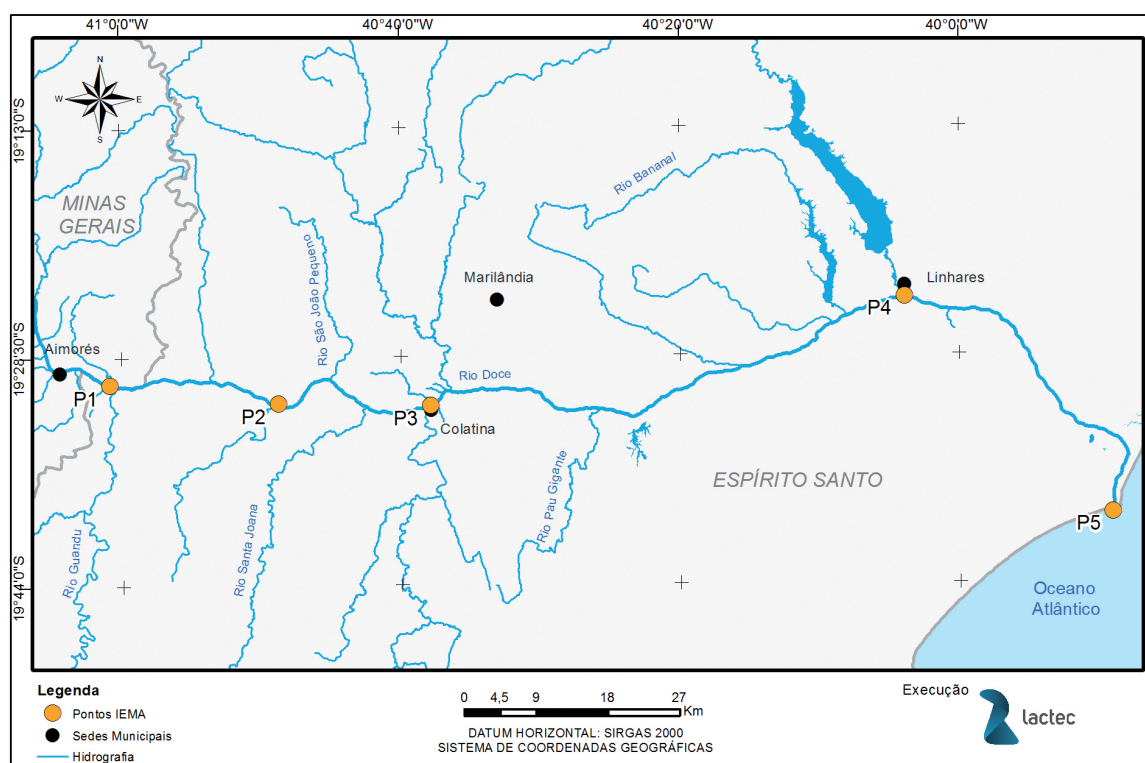
O estudo de Fernandes (2017) foi utilizado visando à caracterização do rio Gualaxo do Norte antes da ruptura da barragem em termos de qualidade de água. A autora realizou uma campanha no referido corpo hídrico em agosto/2015 ao longo de três pontos, os quais denominou KFRC04, KFRC08 e KFRC015, sendo o primeiro a montante do encontro do rio Gualaxo do Norte com o córrego Santarém e os dois últimos pontos antes do encontro do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo. Não foram informadas as coordenadas geográficas dos pontos no documento.

Entre as variáveis de qualidade de água avaliadas pela autora, foram selecionadas para o presente estudo principalmente metais e metaloides, sendo: alumínio, arsênio, bário, berílio, cobre, ferro, cádmio, cobalto, cromo, manganês, níquel, chumbo, silício, estrôncio, titânio e zinco. Não foram informados no documento os limites de quantificação utilizados. Além desses elementos, foram avaliados também os valores de oxigênio dissolvido, pH e sólidos totais.

Monitoramento da qualidade da água do rio Doce realizado pelo IEMA dias antes da passagem da lama de rejeitos

Segundo o IEMA (2018), após a ocorrência do rompimento da barragem de rejeitos minerários de Fundão, em 5 de novembro de 2015, o instituto iniciou o monitoramento do rio Doce em 9 de novembro do mesmo ano, antes da onda de lama chegar ao Espírito Santo, com o objetivo de caracterizar a água antes da contaminação com a lama de rejeito advinda da barragem de Fundão.

Foram realizados dois eventos de coleta de água em cinco locais do rio Doce (P1, P2, P3, P4 e P5), conforme a Figura 67. Cabe ressaltar que nem todos os locais monitorados coincidiram com as estações de monitoramento contínuo do IEMA (Tabela 24). Na Tabela 25, são indicadas as datas das amostragens em cada um dos cinco pontos.

Figura 67 – Locais monitorados pelo IEMA dias antes da passagem da lama de rejeitos.**Tabela 24** – Locais monitorados dias antes da chegada da lama de rejeitos pelo IEMA.

Município	Locais avaliados dias antes da passagem de lama	Estação de monitoramento contínuo
Baixo Guandu	P1	Próximo à estação RD067 do IGAM
Colatina	P2	RDC1E010
Colatina	-	RDC1E015
Colatina	P3	-
Colatina	-	RDC1D020
Linhares	P4	RDC1D025
Linhares	-	RDC1D030
Linhares	P5	-

Tabela 25 – Data das coletas de amostras de água antes da chegada da lama de rejeitos.

Locais amostrados	Data da coleta
P1	09/11/2015 e 11/11/2015
P2	10/11/2015 e 18/11/2015
P3	10/11/2015 e 18/11/2015
P4	10/11/2015 e 17/11/2015
P5	10/11/2015 e 17/11/2015

Convém destacar que, embora a lama de rejeitos não tivesse atingido as localidades mencionadas segundo o IEMA, de acordo com CPRM (2015), a onda de cheia (água) já havia passado nos municípios de Colatina e Linhares no dia 10/11/2015. A onda de rejeitos chegou no dia 19/11/2015 em Colatina, no dia 20/11/2015 em Linhares e no dia 21/11/2015 na foz do rio Doce (CPRM, 2015).

Entre as variáveis avaliadas pelo IEMA, nos dois eventos de coleta de água dias antes da chegada da pluma de rejeitos, estavam: alumínio dissolvido, antimônio total, arsênio total, bário total, berílio total, boro total, cádmio total, chumbo total, cianeto livre, cloreto total, clorofila-a, cobalto total, cobre dissolvido, coliformes termotolerantes, condutividade, cor verdadeira, cromo total, demanda bioquímica de oxigênio, densidade de cianobactérias, fenóis totais, ferro dissolvido, fósforo total, lítio total, manganês total, mercúrio total, níquel total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido, pH, prata total, selênio total, sólidos dissolvidos totais, turbidez, urânio, vanádio total e zinco total.

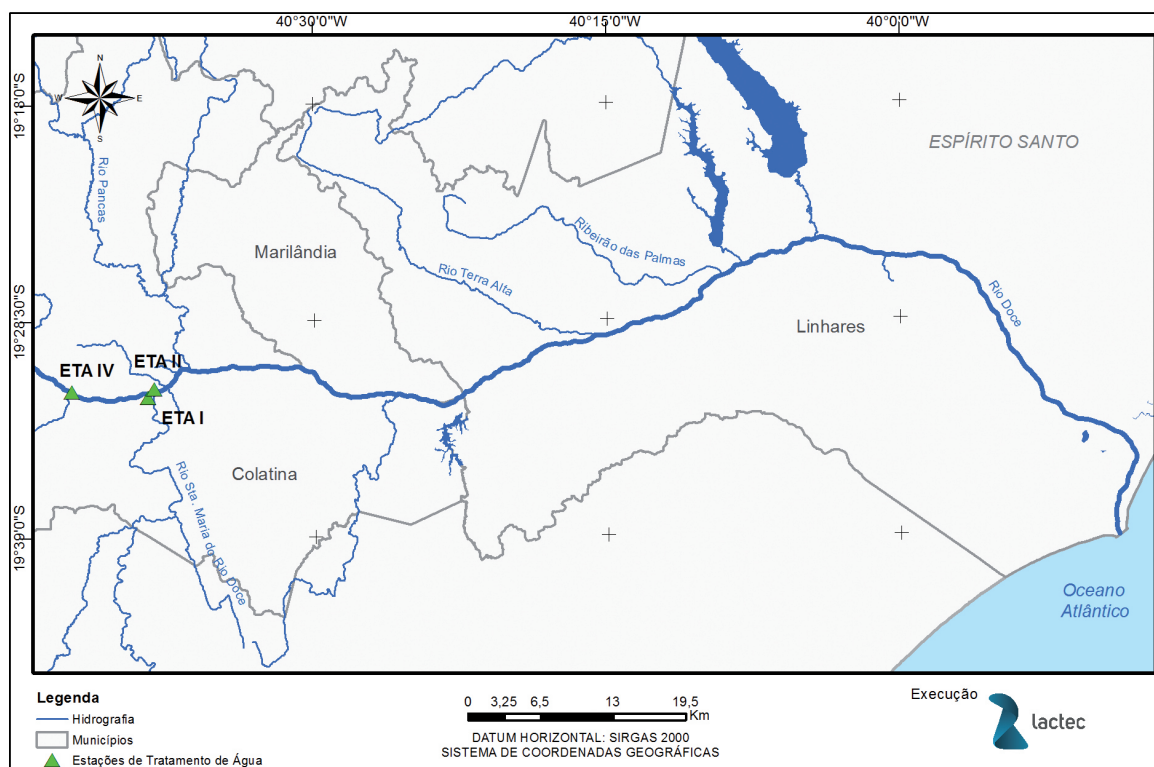
Dados físicos, químicos e biológicos de pontos de captação do SANEAR Colatina

Foram fornecidos pelo Serviço Colatinense de Saneamento Ambiental (SANEAR Colatina) dados físicos, químicos e biológicos entre os anos de 2012 e 2015 (pré-rompimento) referentes à captação de água bruta em três pontos do rio Doce, no município de Colatina/ES, conforme Tabela 26 e Figura 68.

Tabela 26 – Locais dos pontos de captação no rio Doce do SANEAR Colatina

Estação de Tratamento de Água	Local da captação	Coordenadas UTM
ETA I (Sede)	Bairro Marista	24 K 327694.00 m E - 7838914.00 m S
ETA II (Sede)	Bairro São Braz	24 K 328271.00 m E - 7839692.00 m S
ETA IV (Sede)	Bairro Columbia	24 K 320912.00 m E - 7839436.00 m S

Figura 68 – Localização dos pontos de captação no rio Doce do SANEAR Colatina.



A Tabela 27 apresenta os parâmetros constantes nos laudos selecionados para avaliação no presente estudo e o número de laudos por ano recebidos pelo Lactec.

Tabela 27 – Parâmetros e períodos monitorados referentes aos laudos recebidos do SANEAR Colatina.

Ano	Número de laudos recebidos	Meses em que foram realizadas as coletas	Parâmetros
2012	09	Junho	Arsênio Total; Cianeto Total; Clorofila-a; Cobre Total; Cor verdadeira; Cromo total; DBO5; DQO; Densidade de Cianobactérias; Níquel Total; Nitrato (como N); Nitrito (como N); óleos e graxas visíveis; Oxigênio Dissolvido; sólidos dissolvidos totais; Sulfato Total; Sulfeto (H ₂ S não dissociado); Sulfeto dissolvido; Zinco Total; Bário Total; Cádmio Total; Chumbo Total; Mercúrio Total; Prata Total; Selênio Total
2013	14	Abril; maio; junho; agosto; dezembro	Arsênio Total; Cianeto Total; Clorofila-a; Cobre Total; Cor verdadeira; Cromo total; DBO5; DQO; Densidade de Cianobactérias; Níquel Total; Nitrato (como N); Nitrito (como N); óleos e graxas visíveis; Oxigênio Dissolvido; sólidos dissolvidos totais; Sulfato Total; Sulfeto (H ₂ S não dissociado); Sulfeto dissolvido; Zinco Total; Nitrogênio Amoniacal Total; Fenóis; Cloreto Total; Surfactantes; Bário Total; Cádmio Total; Boro Total; Chumbo total; Ferro Dissolvido; Mercúrio Total; Prata Total; Selênio Total; Antimônio Total; Cobalto Total; Manganês Total; Vanádio Total; Urânio Total; Fósforo Total; Lítio Total; Berílio Total; Alumínio Dissolvido
2014	36	Janeiro; fevereiro; março; abril; maio; junho; julho; agosto; outubro; dezembro	Arsênio Total; Cianeto Total; Clorofila-a; Cobre Total; Cor verdadeira; Cromo total; DBO5; DQO; Densidade de Cianobactérias; Níquel Total; Nitrato (como N); Nitrito (como N); óleos e graxas visíveis; Oxigênio Dissolvido; sólidos dissolvidos totais; Sulfato Total; Sulfeto (H ₂ S não dissociado); Sulfeto dissolvido; Zinco Total; Nitrogênio Amoniacal Total; Fenóis; Cloreto Total; Surfactantes; Bário Total; Cádmio Total; Boro Total; Chumbo total; Ferro Dissolvido; Mercúrio Total; Prata Total; Selênio Total; Antimônio Total; Cobalto Total; Manganês Total; Vanádio Total; Urânio Total; Fósforo Total; Lítio Total; Berílio Total; Alumínio Dissolvido
2015	33	Janeiro; fevereiro; março; abril; maio; junho; julho; agosto; setembro; outubro	Arsênio Total; Cianeto Total; Clorofila-a; Cobre Total; Cor verdadeira; Cromo total; DBO5; DQO; Densidade de Cianobactérias; Níquel Total; Nitrato (como N); Nitrito (como N); óleos e graxas visíveis; Oxigênio Dissolvido; sólidos dissolvidos totais; Sulfato Total; Sulfeto (H ₂ S não dissociado); Sulfeto dissolvido; Zinco Total; Nitrogênio Amoniacal Total; Fenóis; Cloreto Total; Surfactantes; Bário Total; Cádmio Total; Boro Total; Chumbo total; Ferro Dissolvido; Mercúrio Total; Prata Total; Selênio Total; Antimônio Total; Cobalto Total; Manganês Total; Vanádio Total; Urânio Total; Fósforo Total; Lítio Total; Berílio Total; Alumínio Dissolvido

2.2.3 RESULTADOS – PROGRAMAS DE MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA (IGAM E IEMA)

Neste item, serão apresentados os resultados por variável de qualidade de água considerando a base de dados do IGAM e do IEMA, de acordo com a metodologia apresentada no item 2.2.2.1.

Os resultados foram agrupados em variáveis físicas (item 2.2.3.1), químicas (itens 2.2.3.2 e 2.2.3.3) e bacteriológicas (item 2.2.3.4). No item 2.2.3.5, foram identificadas as variáveis de qualidade de água com maior número de não conformidades em relação aos padrões da Resolução CONAMA nº 357/2005.

Os resultados referentes aos ensaios de ecotoxicidade foram apresentados no item 2.2.3.6.

2.2.3.1 Resultados das variáveis físicas da água

2.2.3.1.1 *Cor verdadeira*

Segundo a CETESB (2016), a cor de uma amostra de água está relacionada à redução da intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, sendo esse processo associado à concentração de sólidos dissolvidos. Alterações na cor da água podem ter origem natural, advindas da decomposição da matéria orgânica. Também de origem natural e que conferem cor à água podem ser citados os colóides orgânicos, como os ácidos fúlvicos e húmicos, e os óxidos de ferro e manganês, estes últimos advindos

do solo. Já as alterações de origem antropogênica são oriundas, geralmente, de resíduos industriais (contendo taninos ou anilinas, por exemplo) e esgotos domésticos (SPERLING, 2005; CETESB, 2016).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar valores de cor verdadeira de até 75 Unidades de Cor (UCs). Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado (item 2.2.2.1.1). Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 28) e seus afluentes (Tabela 29), de montante para jusante.

Tabela 28 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cor verdadeira no rio Doce.

		Rio Doce					
		Cor verdadeira					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	
MG	RD072	14	14%	7	0%	7	29%
	RD019	37	24%	19	5%	18	44%
	RD023	46	17%	23	0%	23	35%
	RD035	43	14%	21	0%	22	27%
	RD033	37	24%	19	0%	18	50%
	RD083	15	13%	8	0%	7	29%
	RD044	32	25%	16	0%	16	50%
	RD045	37	24%	19	0%	18	50%
	RD053	37	22%	19	0%	18	44%
	RD058	41	22%	20	0%	21	43%
	RD059	37	24%	19	0%	18	50%
	RD067	44	20%	22	0%	22	41%

Nota: n: número de observações.

De acordo com a Tabela 28, no período seco, não foram registrados desacordos em relação à cor verdadeira nas estações do rio Doce com o limite legislado. Exceção se fez na estação RD019 (entre os municípios de Rio Casca e São Domingos do Prata), onde se registrou 5% de desacordos, em um total de 19 eventos. No período chuvoso, em contrapartida, observaram-se percentuais de desacordos superiores a 20% (mínimo: 27% e máximo: 50%) em todas as estações do rio Doce. Os maiores percentuais de desacordos foram relativos às estações RD033 (entre os municípios de Belo Oriente e Bugre), RD044 e RD045 (no município de Governador Valadares), e RD059 (no município de Resplendor), nas quais em 50% do tempo monitorado foram registrados valores não conformes com a legislação.

Tabela 29 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cor verdadeira em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Cor verdadeira							
Estações de monitoramento	Total		Seco		Chuvoso		
	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	
	RD009	34	12%	17	0%	17	24%
	RD071	14	7%	7	0%	7	14%
	RD013	37	24%	19	11%	18	39%
	RD018	32	28%	16	13%	16	44%
	RD073	14	21%	7	0%	7	43%
MG	RD034	32	16%	16	0%	16	31%
	RD039	46	17%	23	0%	23	35%
	RD040	32	31%	16	13%	16	50%
	RD089	16	19%	8	13%	8	25%
	RD057	37	24%	19	0%	18	50%
	RD065	46	17%	23	0%	23	35%

Nota: n: número de observações.

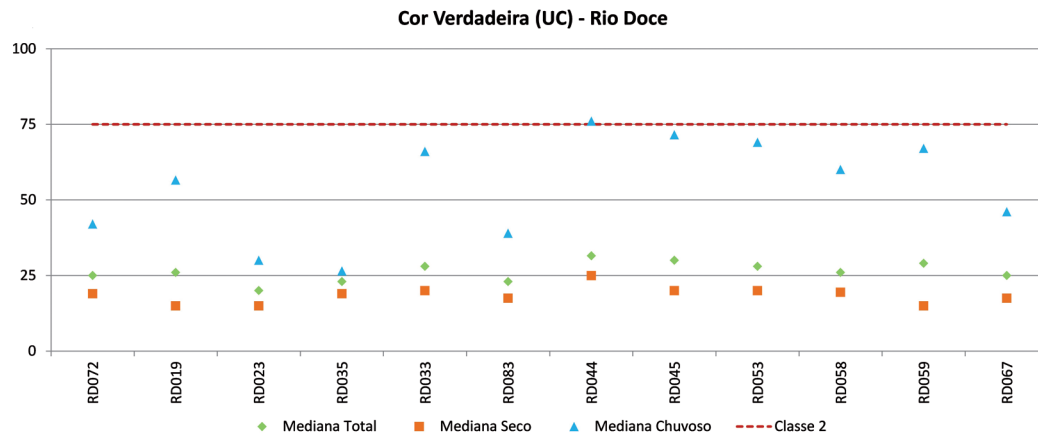
Em relação aos afluentes do rio Doce (Tabela 29), no período seco, para a maioria das estações não foram observados desacordos com o limite legislado. Exceções ocorreram nas estações RD013 (rio Piranga), RD018 (rio Casca), RD040 (rio Corrente Grande) e RD089 (rio Suaçuí Grande), com percentuais de desacordos entre 11 e 13%. No período chuvoso, os percentuais de desacordos aumentaram, variando de 14 a 50%, sendo que em 90% das estações os desacordos foram superiores a 20%. Os maiores percentuais de desacordos foram observados nas estações RD040 (rio Corrente Grande) e RD057 (rio Caratinga), sendo iguais a 50%.

Avaliação espacial

A Figura 69 apresenta as medianas dos valores de cor verdadeira para cada uma das estações de monitoramento localizadas ao longo do rio Doce, de montante para jusante, para os períodos total, seco e chuvoso. Para o período seco, os valores de mediana mostraram-se mais uniformes ao longo das estações. No período chuvoso, contudo, observou-se maior heterogeneidade entre as estações, bem como valores mais elevados. De modo geral, a partir da estação RD044 (no município de Governador Valadares), observaram-se valores mais elevados em termos de mediana.

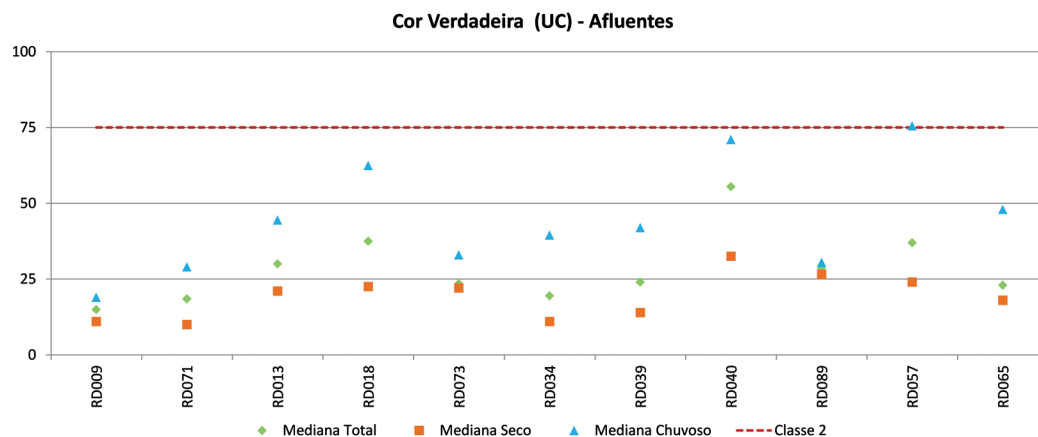
Considerando as medianas do período total, observa-se, para a estação RD023, na região do PERD, uma redução no valor da cor verdadeira em relação às estações de montante. A partir da estação RD035, a jusante de Ipatinga/MG, as concentrações voltam a se elevar, com pico na estação RD044, no município de Governador Valadares/MG. Ressalta-se que Ipatinga e Governador Valadares são os municípios mais populosos da região de estudo.

Figura 69 – Medianas dos valores de cor verdadeira para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Em relação aos afluentes, os valores das medianas apresentaram-se mais heterogêneos ao longo das estações (Figura 70). As estações do rio do Carmo (RD009 e RD071), mais a montante, apresentaram valores menores, quando considerada a mediana dos dados. As estações RD013 (rio Piranga), RD018 (rio Casca) e RD040 (rio Corrente Grande) apresentaram valores mais elevados. Em certas estações, houve diferenças significativas entre os resultados do período seco e do período chuvoso: RD018 (rio Casca), RD040 (rio Corrente Grande) e RD057 (rio Caratinga).

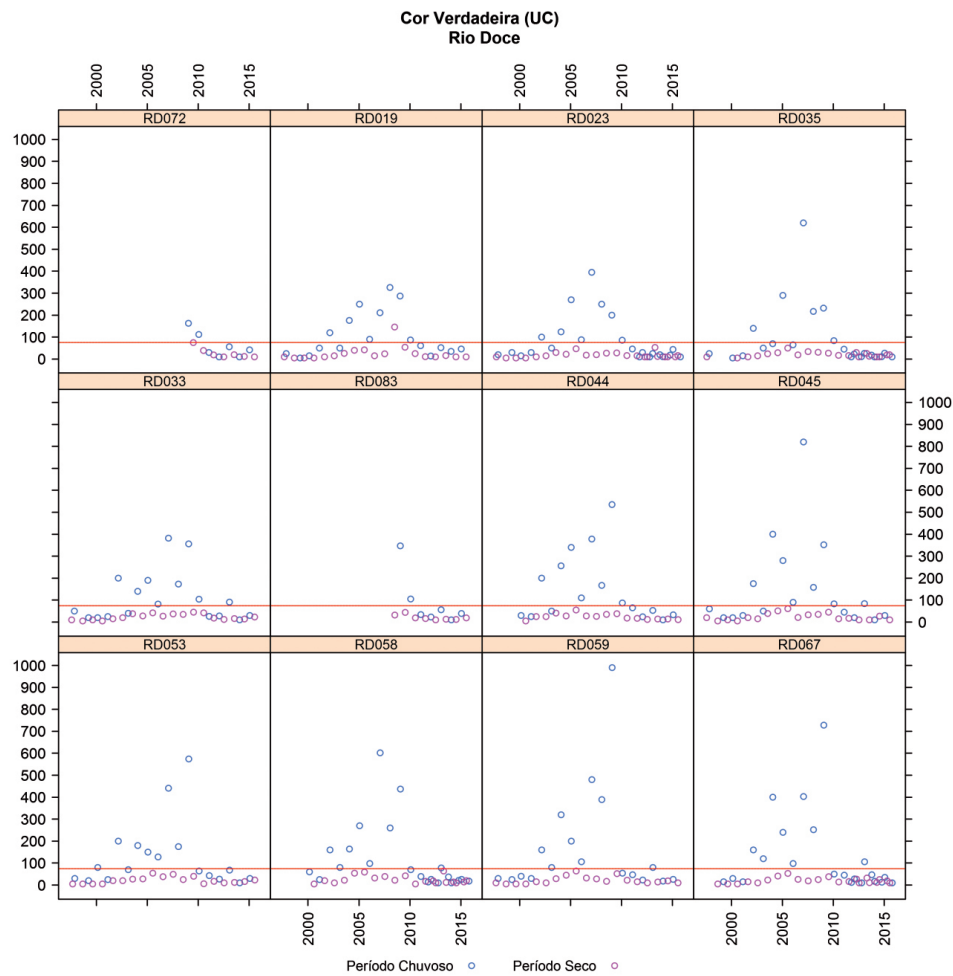
Figura 70 – Medianas dos valores de cor verdadeira para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

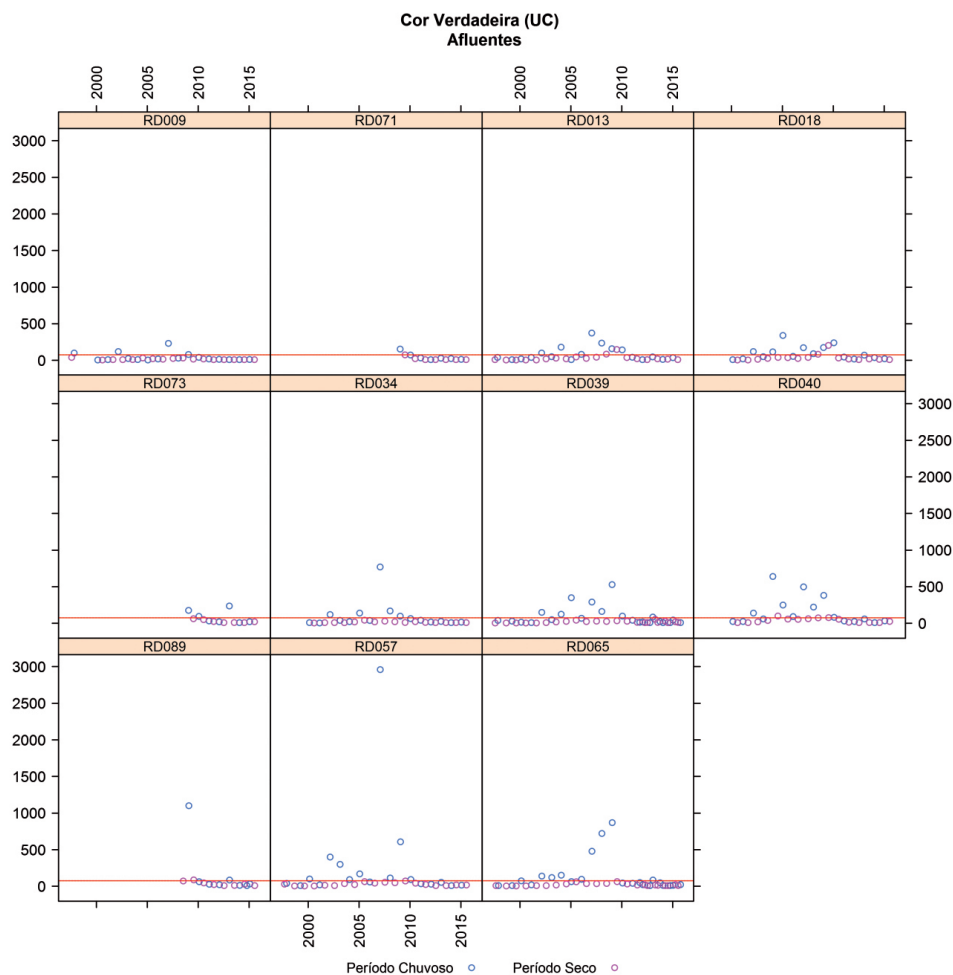
Em relação à Figura 71, que mostra a evolução temporal dos dados de cor verdadeira para cada uma das estações do IGAM no rio Doce, observou-se que os desacordos em relação ao limite legislado ocorreram majoritariamente no período chuvoso. Além disso, os picos de desacordos ocorreram entre 2005 e 2010. Nos eventos de monitoramento mais recentes, notou-se uma tendência à redução dos valores de cor verdadeira.

Figura 71 – Gráficos de dispersão dos dados de cor verdadeira ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



No que diz respeito às estações localizadas em afluentes do rio Doce (Figura 72), assim como observado para as estações de monitoramento do rio Doce, os desacordos ocorreram em sua grande maioria no período chuvoso, entre os anos de 2005 e 2010 e com tendência à redução de valores em eventos de monitoramento mais recentes. Nas estações RD009 e RD071 (no rio do Carmo), RD073 (ribeirão do Sacramento) e RD089 (rio Suaçuí Grande), o número de desacordos foi mínimo em relação às demais estações. Na estação RD057 (rio Caratinga), observou-se valor excepcionalmente elevado, próximo a 3.000 UCs, em janeiro de 2007.

Figura 72 – Gráficos de dispersão dos dados de cor verdadeira ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.1.2 Sólidos totais

De forma geral, sólidos em águas correspondem a toda a matéria que permanece como um resíduo, após a evaporação. Estes são classificados de acordo com o tamanho (sólidos em suspensão e dissolvidos) e com relação à natureza (fixos ou minerais e voláteis ou orgânicos), sendo o procedimento selecionado para o ensaio analítico que define qual dessas frações será obtida (CETESB, 2016).

Em ambientes naturais, o excesso de sólidos na água pode causar danos aos peixes e à vida aquática, pois, uma vez sedimentados no leito dos rios, podem alterar as características do fundo (substrato), influenciando negativamente os ambientes de desova ou, ainda, alterar a biota bentônica que serve de alimento aos peixes. É importante salientar que sólidos retêm bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, propiciando um ambiente adequado à decomposição anaeróbia (CETESB, 2016).

Para a variável sólidos totais, foram avaliadas as séries de dados do IGAM e do IEMA. Em relação ao número de observações, registrou-se um maior número de dados disponíveis na base do IGAM, sendo que o IEMA descontinuou a avaliação da referida variável no ano de 2010. Conforme mencionado no item 2.2.2.1.1, não há valor máximo de referência disposto na Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos totais, dessa forma, não foram calculados os percentuais de desacordos.

Avaliação espacial

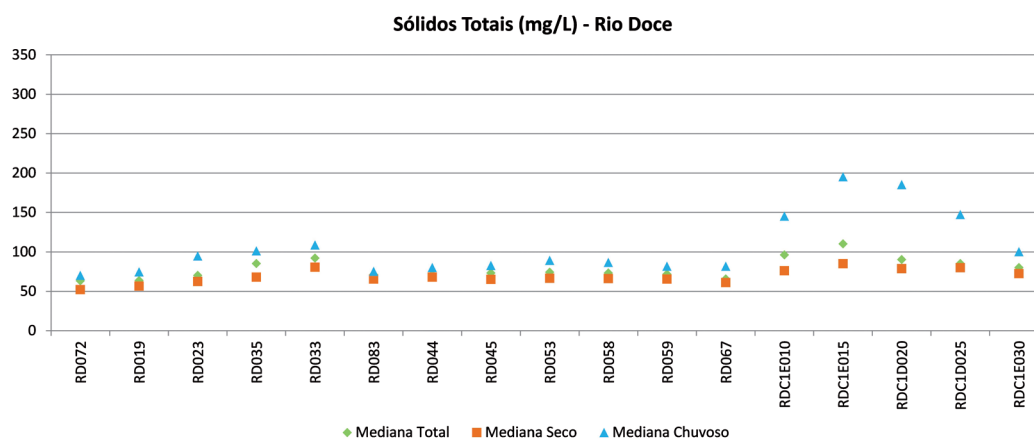
A Figura 73 e a Figura 74 apresentam os valores de mediana das séries de sólidos totais em cada uma das estações de monitoramento do rio Doce e seus afluentes, respectivamente.

Para as estações de monitoramento do rio Doce, no estado de Minas Gerais (RD072 a RD067), as medianas do período chuvoso foram levemente superiores àsquelas do período seco. Já para as estações do rio Doce localizadas no Espírito Santo, a diferença entre as medianas do período seco e chuvoso foi mais evidente. Destaca-se, todavia, que o número de observações do período chuvoso foi inferior ao do período seco na rede operada pelo IEMA (vide Apêndice D), o que pode ter influenciado nas diferenças entre as medianas.

Para o período seco, observou-se maior homogeneidade entre as medianas das estações do rio Doce (MG e ES). Já no período chuvoso, foram registrados valores mais elevados na porção capixaba em relação à porção mineira.

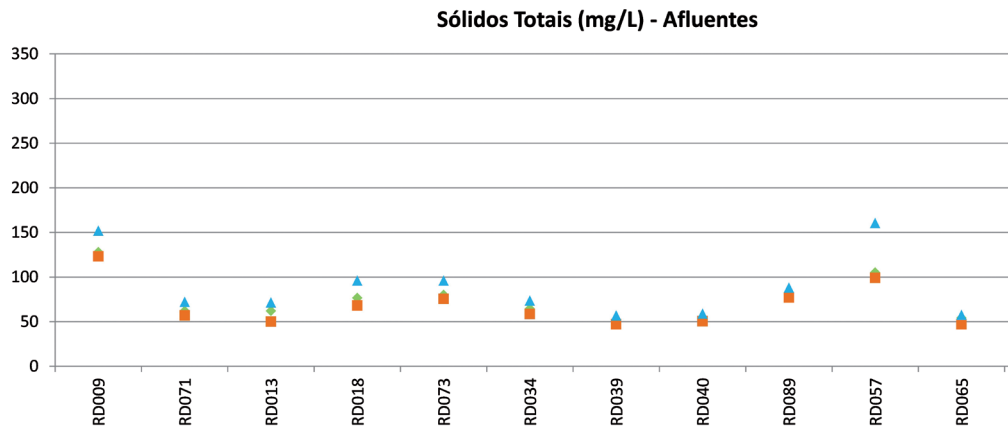
Considerando as medianas do período total, observou-se incremento de valores até a estação RD033, a jusante de Ipatinga/MG. Na estação RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho/MG e Periquito/MG, pouco populosos, houve uma redução na concentração de sólidos totais. Tal situação persistiu até a estação RD067, entre Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES. Na sequência, já no estado do Espírito Santo, os valores sofreram aumento nas estações mais a montante e voltaram a diminuir a jusante.

Figura 73 – Medianas dos valores de sólidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Para os afluentes (Figura 74), diferenças mais significativas entre as medianas do período seco e chuvoso foram observadas nas estações RD057 (rio Caratinga, MG) e RDC2007 (rio Guandu, ES). Em termos de valores mais elevados de medianas, estes ocorreram nas estações RD009 (rio do Carmo, MG), RD057 (rio Caratinga, MG), RDC2007 (rio Guandu, ES) e RDC20012 (rio Santa Joana, ES).

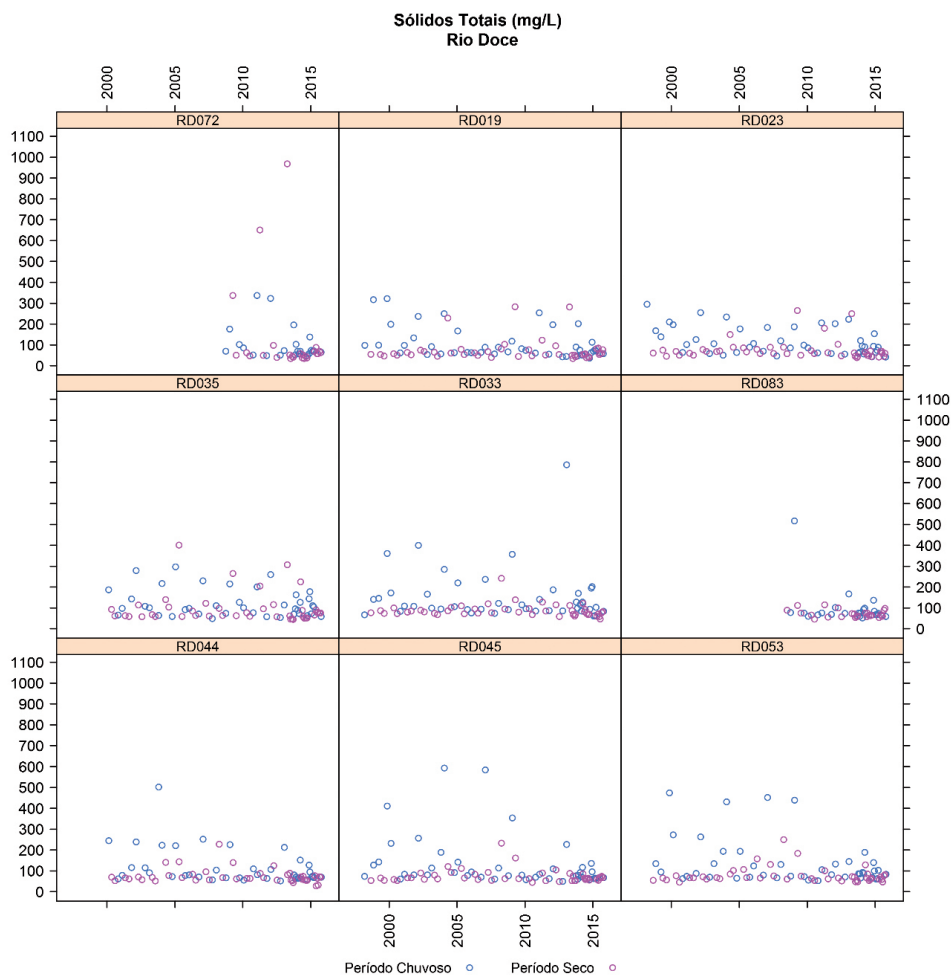
Figura 74 – Medianas dos valores de sólidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante. Em virtude de o número de estações ser elevado, os gráficos foram divididos em parte I (Figura 75) e parte II (Figura 76).

Figura 75 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).

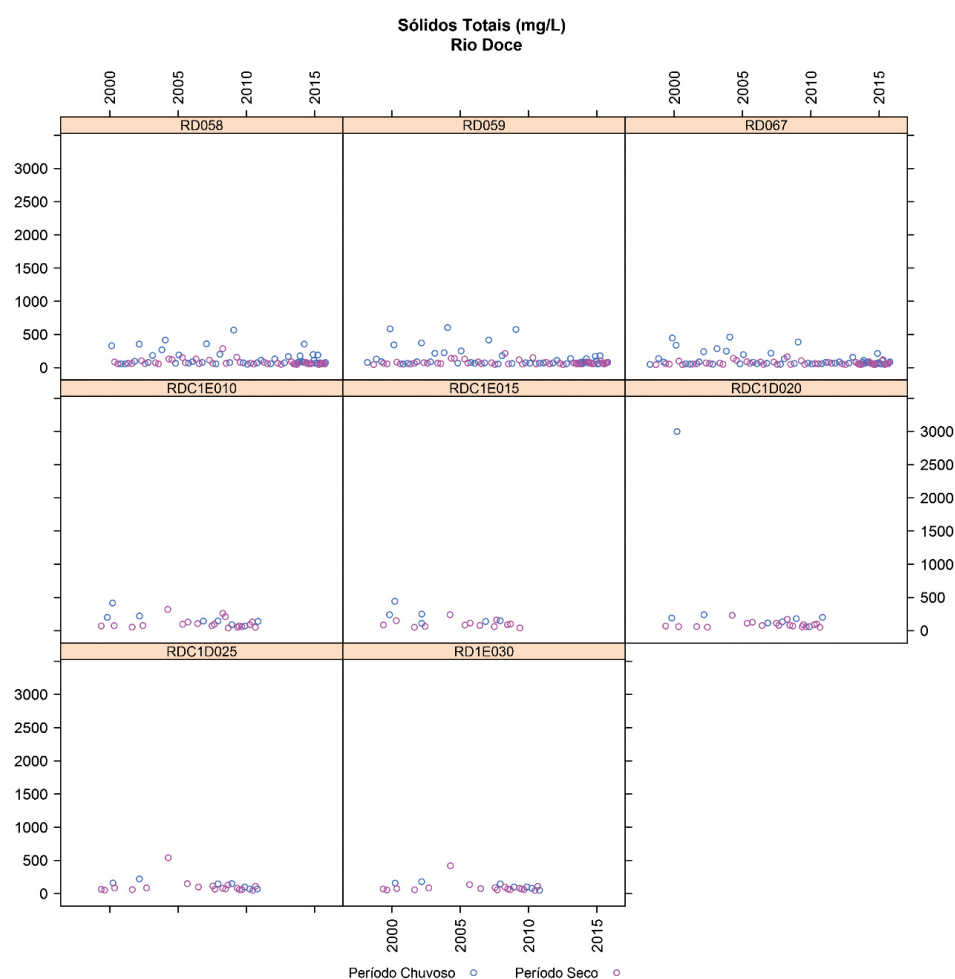


Em 53% das estações do rio Doce (IGAM e IEMA), os valores dos sólidos totais não ultrapassaram 500 mg/L e em 41% delas não passaram de 1.000 mg/L. Na estação RDC1D020 (em Colatina, ES), o valor máximo registrado foi de 2.999 mg/L (março/2003), sendo este o maior valor registrado entre as estações e o único superior a 1.000 mg/L. Deve-se ressaltar, contudo, que a mediana dos dados de sólidos totais na referida estação – em relação ao período total – foi igual a 90 mg/L, indicando que aquele valor foi uma singularidade.

A média das concentrações de sólidos totais, considerando todas as estações no rio Doce, foi de 115 mg/L.

Não foi observada tendência de aumento ou redução de valores ao longo do tempo.

Figura 76 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



Para os afluentes (Figura 77 e Figura 78), em aproximadamente 40% das estações, os dados de sólidos totais não ultrapassaram 500 mg/L e em 30% delas não passaram de 1.000 mg/L. Nas estações RD071 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca), RD073 (ribeirão do Sacramento) e RD057 (rio Caratinga), os valores ultrapassaram 1.000 mg/L.

A média das concentrações de sólidos totais, considerando todas as estações situadas em afluentes do rio Doce, foi de 134 mg/L. Valores de média mais elevados foram registrados nas estações do rio do Carmo (RD009 e RD071) e rio Casca (RD018).

Assim como para as estações do rio Doce, não foi observada tendência clara de aumento ou redução de valores ao longo do tempo.

Figura 77 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).

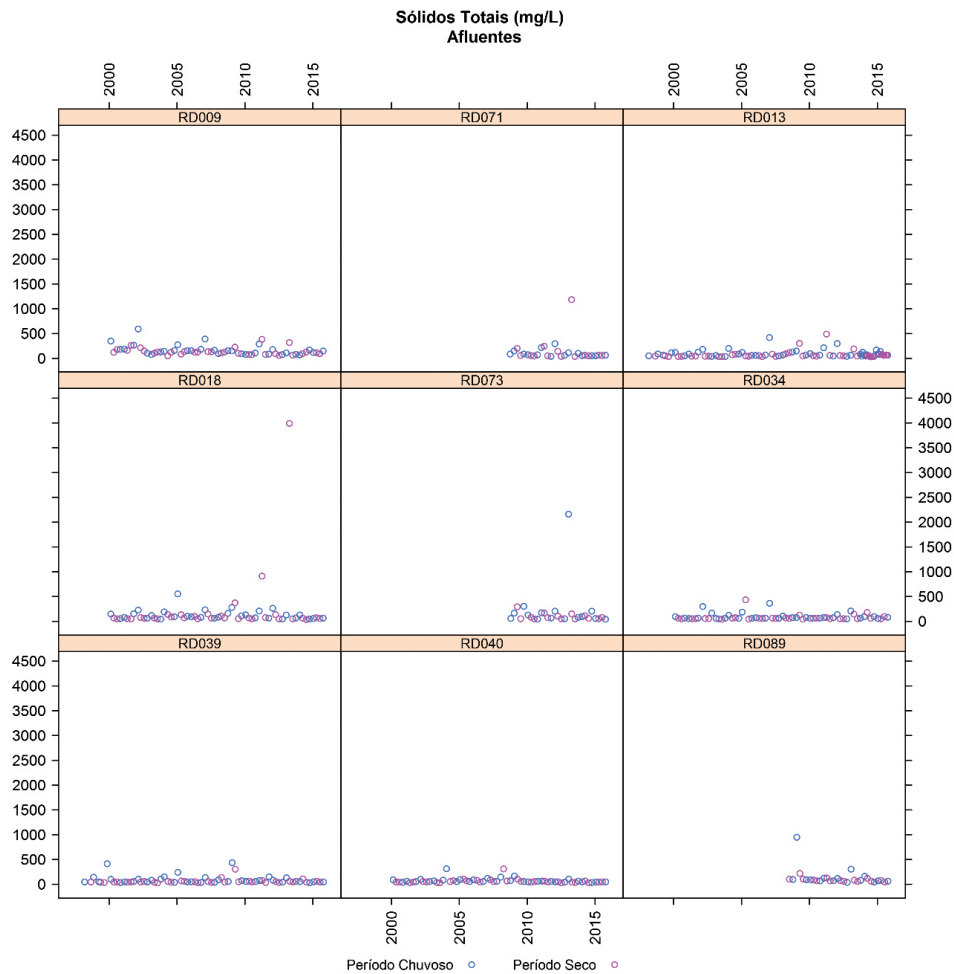
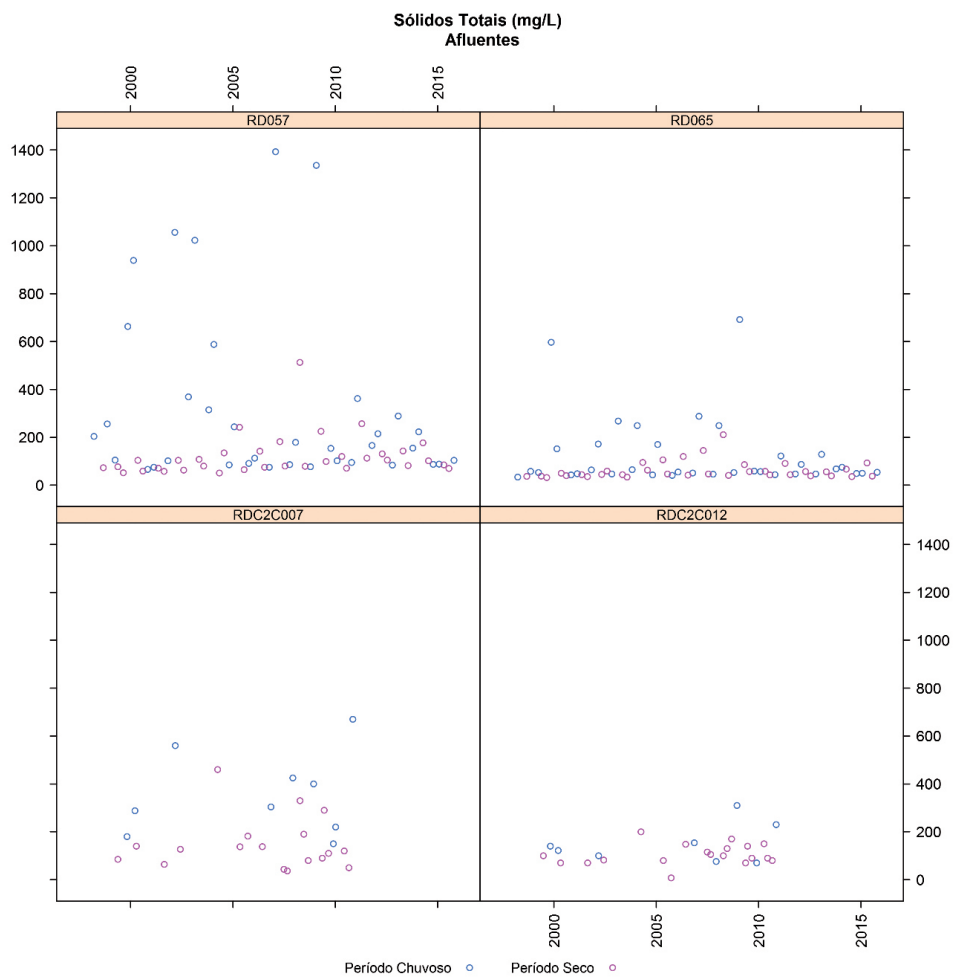


Figura 78 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).



2.2.3.1.3 Sólidos dissolvidos totais

Entre os sólidos em água, é principalmente a parcela dissolvida que confere cor verdadeira às águas naturais (LIBÂNIO, 2005). Sólidos dissolvidos incluem matéria ionizada e não ionizada, mas a primeira reflete em sua condutividade. Além disso, águas com excesso de sólidos dissolvidos podem, caso sejam utilizadas para irrigação, promover a salinização do solo (EPA, 2001; PIVELI; KATO, 2005).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar concentrações de sólidos dissolvidos totais de até 500 mg/L. Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado. Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 30) e seus afluentes (Tabela 31), de montante para jusante.

Observa-se que, tanto para as estações de monitoramento do rio Doce (Tabela 30) quanto para aquelas localizadas em seus afluentes (Tabela 31), não foram registrados desacordos em relação ao limite legislado em todo o período avaliado.

Tabela 30 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos dissolvidos totais no rio Doce.

Rio Doce							
Sólidos Dissolvidos Totais							
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD072	48	0%	25	0%	23	0%
	RD019	82	0%	42	0%	40	0%
	RD023	83	0%	42	0%	41	0%
	RD035	76	0%	39	0%	37	0%
	RD033	82	0%	42	0%	40	0%
	RD083	49	0%	26	0%	23	0%
	RD044	75	0%	39	0%	36	0%
	RD045	82	0%	42	0%	40	0%
	RD053	81	0%	42	0%	39	0%
	RD058	76	0%	39	0%	37	0%
	RD059	82	0%	42	0%	40	0%
	RD067	83	0%	42	0%	41	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 31 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos dissolvidos totais em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Sólidos Dissolvidos Totais							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	
MG	RD009	56	0%	28	0%	28	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	79	0%	39	0%	40	0%
	RD018	56	0%	28	0%	28	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	56	0%	28	0%	28	0%
	RD039	64	0%	31	0%	33	0%
	RD040	56	0%	28	0%	28	0%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	63	0%	31	0%	32	0%
	RD065	64	0%	31	0%	33	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 79 e a Figura 80 apresentam os valores de mediana das séries de sólidos dissolvidos totais em cada uma das estações de monitoramento do rio Doce e seus afluentes, respectivamente. Observa-se, de modo geral, que os valores das medianas apresentaram-se mais homogêneos e abaixo do estabelecido pela legislação. Além disso, não houve variação considerável quando comparadas as medianas do período chuvoso e seco.

Figura 79 – Medianas dos valores de sólidos dissolvidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

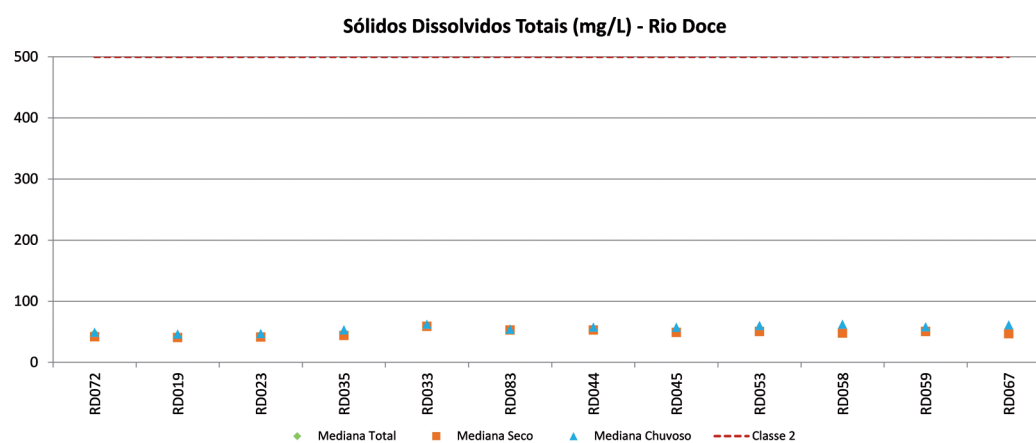
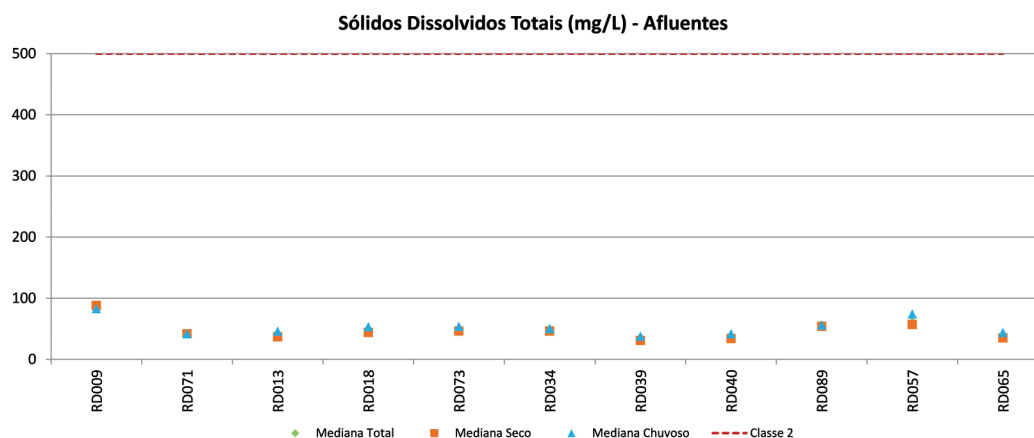


Figura 80 – Medianas dos valores de sólidos dissolvidos totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.

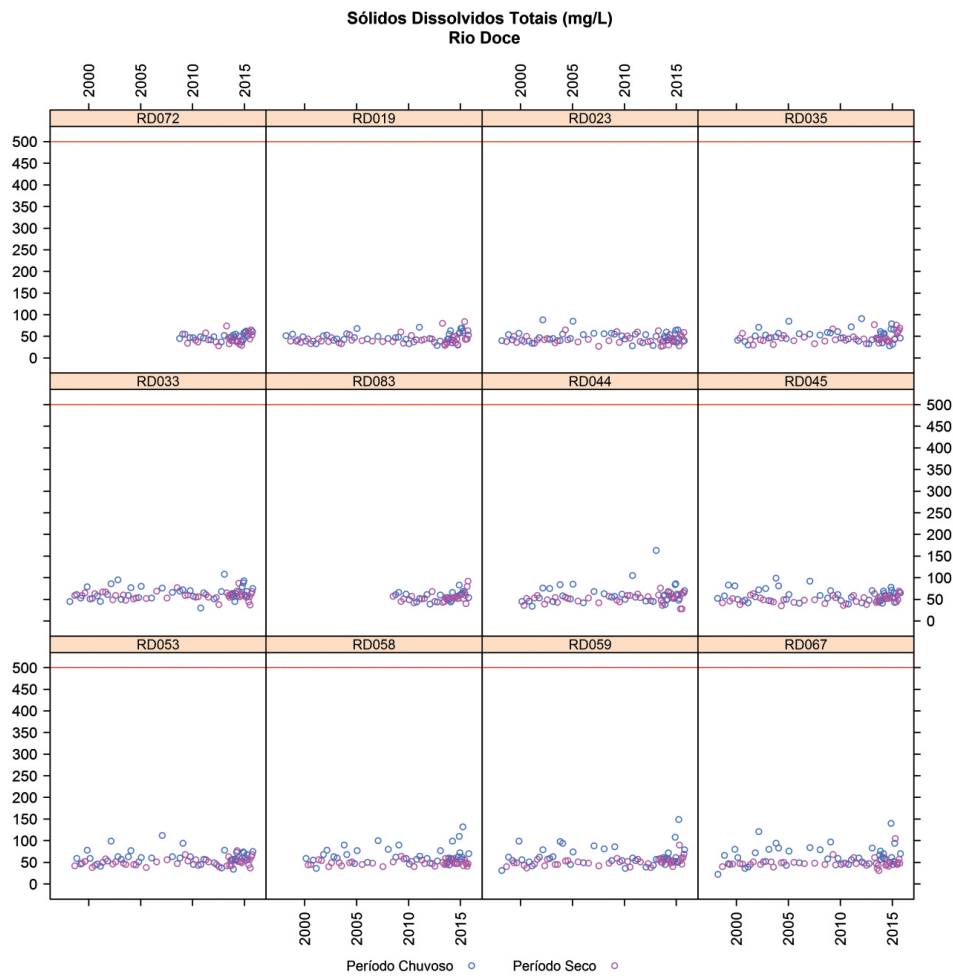


Para as estações no rio Doce (Figura 79), as medianas variaram de 43,00 a 59,50 mg/L, quando considerado o período total. Para aquelas localizadas em afluentes (Figura 80), no período total, as medianas variaram de 35,00 a 84,50 mg/L, sendo mais elevadas na estação RD009, no rio do Carmo.

Avaliação temporal

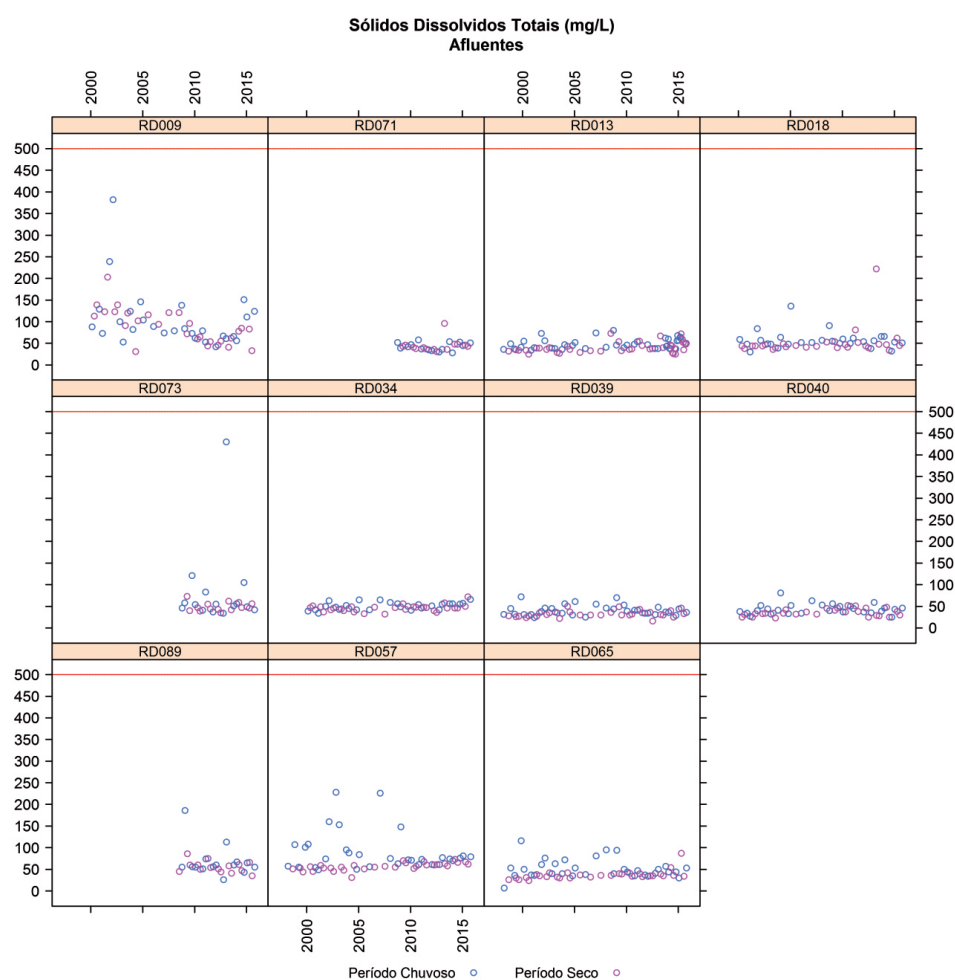
Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de sólidos dissolvidos totais distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante (Figura 81). Observa-se, de modo geral, que as concentrações ocorreram na faixa de 20 a 100 mg/L. Valores superiores a estes foram observados nas estações RD044, RD053, RD058, RD059, RD067, localizadas entre os municípios de Governador Valadares/MG e Baixo Guandu/ES.

Figura 81 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos dissolvidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Para os afluentes do rio Doce (Figura 82), maior variação das concentrações de sólidos dissolvidos totais entre as estações monitoradas foi observada. Embora todos os valores tenham sido inferiores ao limite da Resolução (500 mg/L), foram registrados valores mais elevados, em algum momento do período avaliado, nas estações RD009 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca), RD073 (ribeirão do Sacramento), RD089 (rio Suaçuí Grande) e RD057 (rio Caratinga). Nas demais estações, as concentrações variaram de 7 a 100 mg/L, de modo geral.

Figura 82 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos dissolvidos totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.1.4 Sólidos em suspensão totais

Toda a matéria que fica suspensa na água e que pode causar efeito de turbidez é considerada como sólidos totais em suspensão. Na água corrente, os sólidos mantidos em suspensão pela turbulência podem vir a sedimentar quando a água estiver em repouso (FERNANDES, 1997). Segundo Wetzel (2001 apud SILVA et al. 2009), valores elevados de sólidos em suspensão relacionam-se a altas concentrações de matéria orgânica e inorgânica, valores elevados de turbidez, à baixa transparência da água e concentrações elevadas de nutrientes advindos da decomposição da matéria citada anteriormente. Dessa forma, a elevação na concentração de sólidos suspensos pode afetar o metabolismo do ecossistema, influenciando a vida das plantas aquáticas e peixes, em especial por reduzir a entrada de luz para a biota (EPA, 2001).

Avaliação de não conformidades

Para a avaliação dos sólidos em suspensão totais, foi utilizado o limite da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008, de 100 mg/L, para rios de Classe 2. Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite aplicado (item 2.2.2.1.1). Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o

período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 32) e seus afluentes (Tabela 33), de montante para jusante.

Conforme mostrado na Tabela 32, os percentuais de desacordos superiores a 20% ocorreram somente no período chuvoso, em cinco das 12 estações avaliadas no rio Doce, variando de 21 a 28%. Além disso, três estações atingiram 20% de desacordos. No período seco, em contrapartida, os percentuais de desacordos não passaram de 12%.

Tabela 32 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos em suspensão totais no rio Doce.

Rio Doce							
Sólidos em Suspensão Totais							
Estações de monitoramento	Total		Seco		Chuvoso		
	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	
MG	RD072	48	15%	25	12%	23	17%
	RD019	92	13%	47	6%	45	20%
	RD023	92	15%	47	6%	45	24%
	RD035	85	16%	44	11%	41	22%
	RD033	92	14%	47	2%	45	27%
	RD083	49	4%	26	0%	23	9%
	RD044	83	11%	43	5%	40	18%
	RD045	92	10%	47	4%	45	16%
	RD053	91	13%	47	6%	44	20%
	RD058	83	16%	43	5%	40	28%
	RD059	92	11%	47	2%	45	20%
	RD067	89	10%	46	0%	43	21%

Nota: n: número de observações.

Para os afluentes (Tabela 33), desacordos superiores a 20% do limite legislado foram observados principalmente no período chuvoso, em cinco das 11 estações avaliadas, variando de 22 a 46%. No período seco, os percentuais de desacordos tenderam a ser menores e não ultrapassaram 20%. Exceção foi observada para a estação RD071 (rio do Carmo), no período seco, quando o percentual de desacordo foi de 29%.

Tabela 33 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sólidos em suspensão totais em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Sólidos em Suspensão Totais							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD009	66	17%	33	9%	33	24%
	RD071	29	24%	14	29%	15	20%
	RD013	88	10%	44	7%	44	14%
	RD018	64	16%	32	9%	32	22%
	RD073	29	21%	14	14%	15	27%
	RD034	64	11%	32	6%	32	16%
	RD039	73	7%	36	3%	37	11%
	RD040	64	5%	32	3%	32	6%
	RD089	30	10%	15	7%	15	13%
	RD057	73	32%	36	17%	37	46%
	RD065	73	12%	36	3%	37	22%

Nota: n: número de observações.

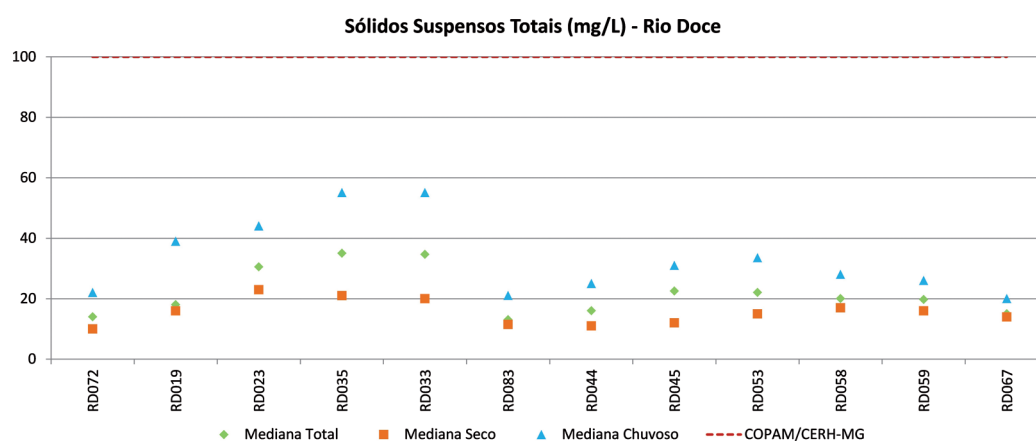
Avaliação espacial

A Figura 83 e a Figura 84 apresentam os valores de mediana das séries de sólidos suspensos totais em cada uma das estações de monitoramento do rio Doce e seus afluentes, respectivamente.

De um modo geral, os valores de mediana para o período chuvoso foram superiores aqueles relativos ao período seco para as estações do rio Doce (Figura 83). A partir da estação RD083, notou-se que a diferença entre os valores do período seco e do período chuvoso decresceu.

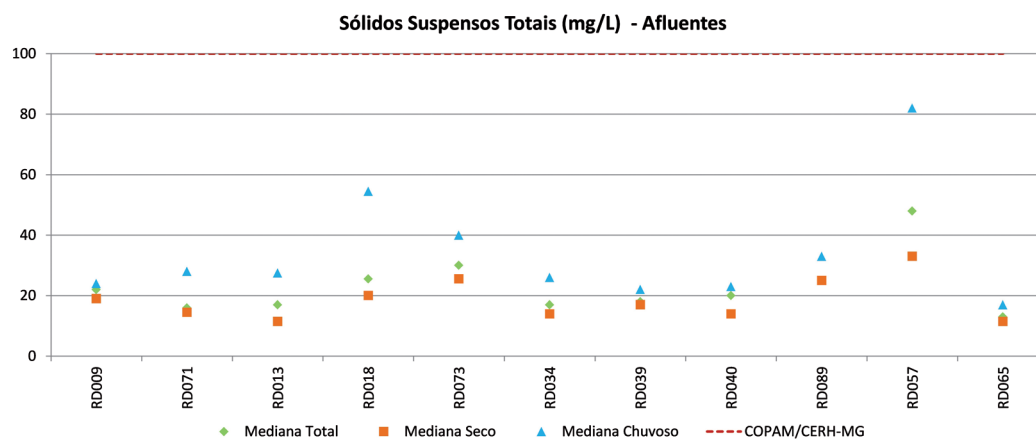
Considerando as medianas do período total, observou-se incremento de valores até a estação RD033, a jusante de Ipatinga/MG. Na estação RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho/MG e Periquito/MG, pouco populosos, houve uma redução na concentração de sólidos suspensos totais. Na sequência, os valores aumentaram e tornaram-se mais homogêneos. Na última estação monitorada em Minas Gerais, RD067, notou-se uma redução de valor de sólidos suspensos totais.

Figura 83 – Medianas dos valores de sólidos em suspensão totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações localizadas em afluentes (Figura 84), também se observou que, para o período chuvoso, os valores das medianas tenderam a aumentar. Nas estações RD018 (rio Casca) e RD057 (rio Caratinga), a diferença entre as medianas do período seco e chuvoso foi mais pronunciada. No período seco, pode-se dizer que não houve variações significativas entre as estações, no período chuvoso, entretanto, as variações foram mais visíveis.

Figura 84 – Medianas dos valores de sólidos em suspensão totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.

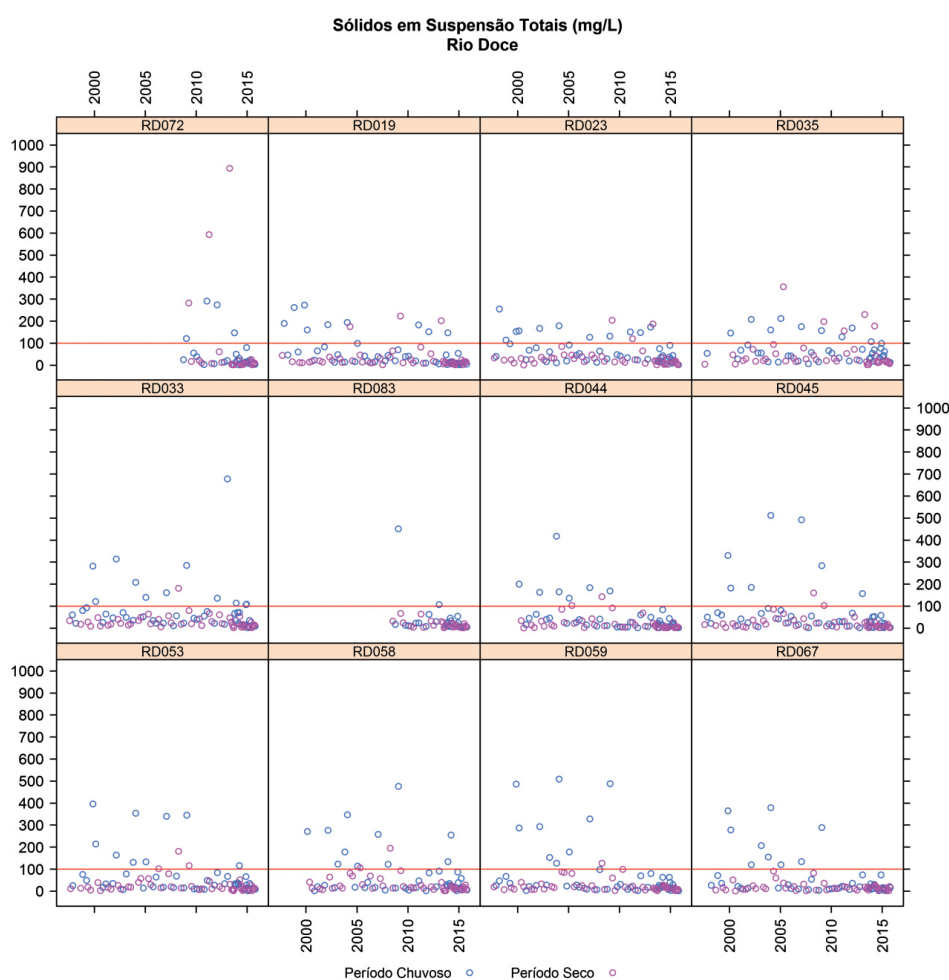


Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de sólidos em suspensão totais distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 85) e em seus afluentes (Figura 86), de montante para jusante.

É possível observar que, para todas as estações do rio Doce (Figura 85), em diversos momentos do período avaliado ocorreram desacordos com o limite aplicado (100 mg/L).

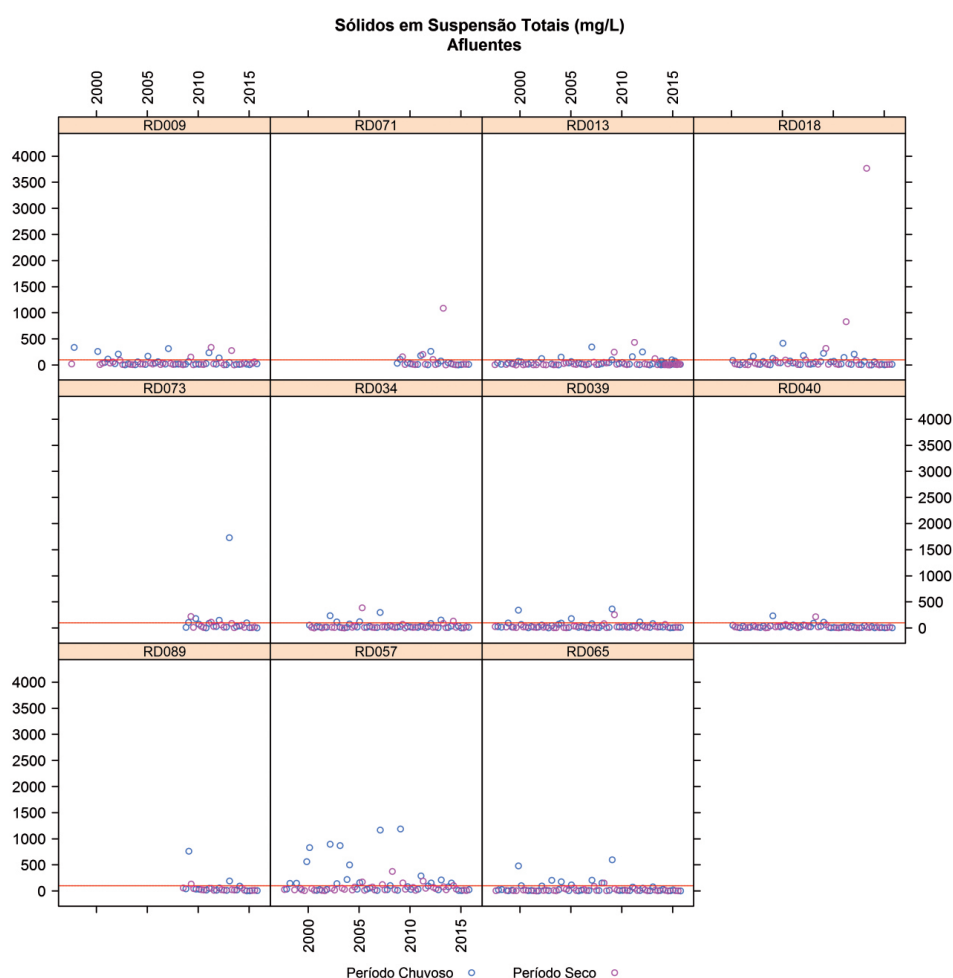
Figura 85 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos em suspensão totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Além disso, a maioria desses desacordos foi registrada no período chuvoso. Convém destacar que a estação RD083 (entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito), com monitoramento iniciado no ano de 2008, foi aquela com menor número de desacordos. Nas estações RD072 (entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado) e RD033 (entre os municípios de Belo Oriente e Bugre), observaram-se as maiores concentrações de sólidos suspensos totais: 894 mg/L (abril/2013) e 678 mg/L (janeiro/2013), respectivamente.

Para as estações situadas em afluentes (Figura 86), observaram-se desacordos em algum momento do monitoramento. Nas estações RD034 (rio Piracicaba), RD039 (rio Santo Antônio), RD040 (rio Corrente Grande) e RD089 (rio Suaçuí Grande), os desacordos ocorreram em menor número. Nas estações RD018 (rio Casca), RD073 (ribeirão Sacramento) e RD057 (rio Caratinga), foram registrados os desacordos mais elevados.

Figura 86 – Gráficos de dispersão dos dados de sólidos em suspensão totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.1.5 Turbidez

A turbidez é uma das características físicas da água, e indica o grau de redução da passagem do feixe de luz ao atravessá-la. Essa redução, causada pela absorção ou pelo espalhamento dos feixes de luz, ocorre em função da presença de sólidos em suspensão e detritos de origem orgânica, além dos elementos do plâncton aquático. Entre os fatores que mais contribuem com a turbidez das águas, estão a erosão do solo, os aportes de esgotos ou ainda atividades industriais (efluentes) e minerárias. Esta última contribui para a formação de bancos de lodo e alterações no ecossistema aquático (PIVELI; KATO, 2005).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar turbidez de até 100 UNT. Nesse contexto, foram avaliadas as séries históricas de dados do IGAM e do IEMA, no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado (item 2.2.2.1.1). Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 34) e seus afluentes (Tabela 35), de montante para jusante.

De acordo com a Tabela 34, para as estações monitoradas no rio Doce, em sua porção mineira, não foram registrados desacordos superiores a 20%, quando considerado o período total. O mesmo ocorreu para o período seco. No entanto, no período chuvoso, em mais de 60% das estações monitoradas pelo IGAM foram registrados problemas com a turbidez.

Já nas estações do rio Doce, em sua porção capixaba (Tabela 35), foram registrados desacordos superiores a 20% em três de cinco estações de monitoramento para o período total. Para o período seco, o número de desacordos foi inferior a 20% para todas as estações. No entanto, no período chuvoso, todas as estações se destacaram por não conformidades relacionadas à turbidez superiores a 20%.

Tanto nas estações do IGAM quanto nas estações do IEMA, observa-se que a turbidez é uma variável de maior interesse no período chuvoso. De acordo com Piveli e Kato (2005), um fator relevante para a elevação da turbidez em períodos chuvosos é a erosão das margens dos rios. Essa situação é mais expressiva em locais de uso de solo inadequado ou, ainda, em situações de ausência de vegetação ciliar.

Tabela 34 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para a turbidez rio Doce.

Rio Doce							
Turbidez							
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD072	48	10%	25	12%	23	9%
	RD019	92	12%	47	6%	45	18%
	RD023	92	15%	47	9%	45	22%
	RD035	85	15%	44	9%	41	22%
	RD033	92	15%	47	4%	45	27%
	RD083	49	6%	26	0%	23	13%
	RD044	83	13%	43	7%	40	20%
	RD045	92	14%	47	4%	45	24%
	RD053	91	13%	47	4%	44	23%
	RD058	83	17%	43	7%	40	28%
	RD059	92	16%	47	6%	45	27%
	RD067	90	14%	46	2%	44	27%
ES	RDC1E010	27	30%	19	11%	8	75%
	RDC1E015	19	32%	13	8%	6	83%
	RDC1D020	27	30%	19	11%	8	75%
	RDC1D025	25	16%	18	6%	7	43%
	RDC1E030	25	16%	18	11%	7	29%

Nota: n: número de observações.

Assim como nas estações localizadas no rio Doce, os pontos avaliados nos afluentes (Tabela 35) também apresentaram desacordos em 20% ou mais das amostras coletadas, tanto no período total (em menor proporção) quanto no período chuvoso (em maior proporção). Da mesma forma do que o avaliado para o rio Doce, também em seus afluentes a chuva contribuiu na elevação da turbidez da água.

Tabela 35 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para a turbidez em afluentes do rio Doce.

		Afluentes					
		Turbidez					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	
MG	RD009	66	17%	33	12%	33	21%
	RD071	29	14%	14	21%	15	7%
	RD013	89	11%	44	7%	45	16%
	RD018	64	20%	32	9%	32	31%
	RD073	29	17%	14	14%	15	20%
	RD034	64	13%	32	9%	32	16%
	RD039	73	14%	36	6%	37	22%
	RD040	64	11%	32	3%	32	19%
	RD089	30	10%	15	7%	15	13%
	RD057	73	25%	36	11%	37	38%
	RD065	73	16%	36	6%	37	27%
ES	RDC2C007	27	41%	18	17%	9	89%
	RDC2C012	27	15%	19	11%	8	25%

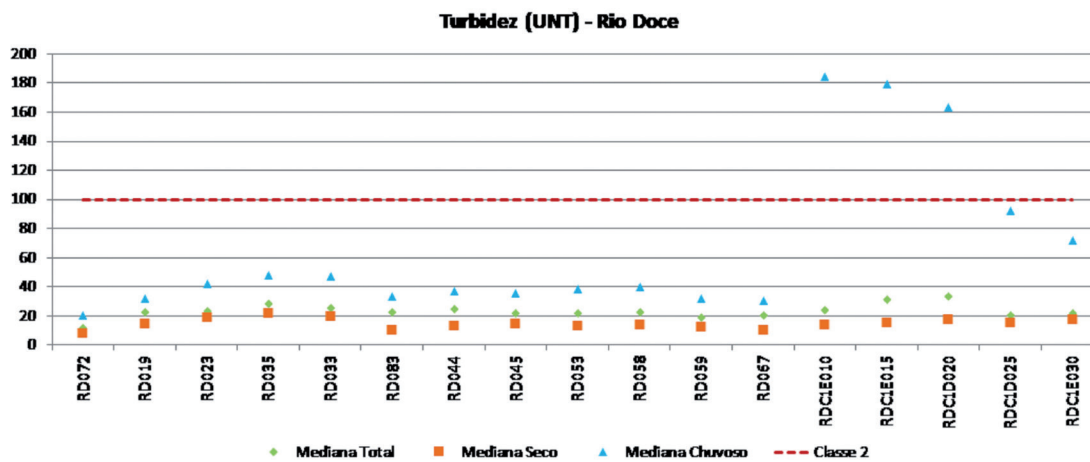
Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

Na Figura 87, apresentam-se as medianas de turbidez para as estações monitoradas no rio Doce considerando o período total dos dados, o período seco e o chuvoso. Observa-se que as estações com medianas mais elevadas, em relação ao período chuvoso, localizaram-se na porção capixaba do rio Doce: RDC1E010, RDC1E015 e RDC1D020 (no município de Colatina).

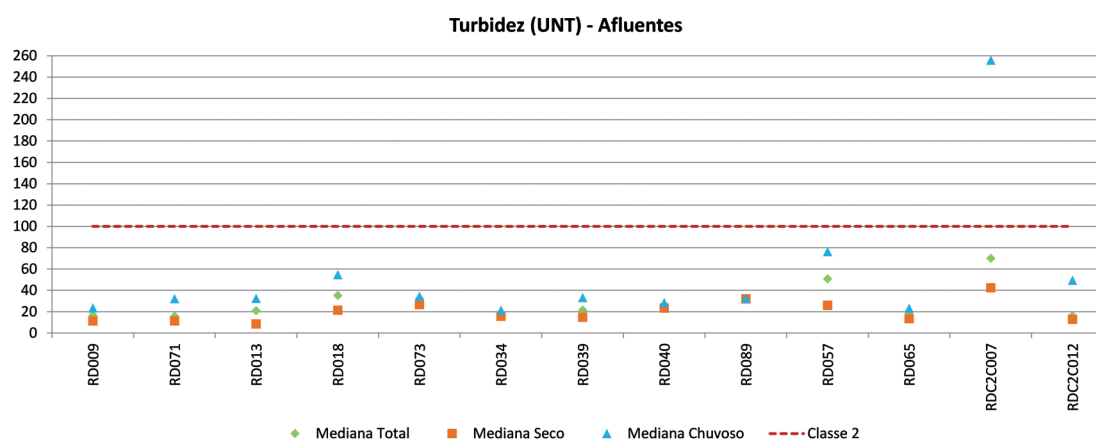
Considerando as medianas do período total, observou-se incremento de valores até a estação RD033, a jusante de Ipatinga (MG). Entre as estações RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho/MG e Periquito/MG, e RD067, entre Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES, os valores sofreram diminuição e mantiveram-se homogêneos. No estado do Espírito Santo, os valores sofreram aumento nas estações mais a montante e voltaram a diminuir a jusante.

Figura 87 – Medianas de turbidez para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Em relação aos afluentes do rio Doce, os valores medianos de turbidez estão apresentados na Figura 88, sendo a estação do tributário rio Guandu (RDC2C007), no município de Afonso Cláudio, a que apresentou valores medianos mais de duas vezes superiores ao limite legislado, em períodos de chuva.

Figura 88 – Medianas de turbidez para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Ainda que não ultrapassando o limite legislado, em termos medianos, ainda merece atenção a estação RD057 (rio Caratinga), que apresentou valores mais elevados (Figura 88). Considerando-se que a mediana representa a posição central dos dados, uma vez ordenados do menor para o maior, e, assim, que 50% dos dados da série apresentam valor superior à mediana, pode-se inferir que, em ambas as estações, valores superiores ao limite podem ter ocorrido em algum momento do tempo.

Ao se avaliar o mapa de susceptibilidade à erosão (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010b), observou-se que as estações destacadas se localizam em áreas de forte susceptibilidade à erosão (estações do rio Doce) ou, ainda, possuem susceptibilidade muito forte à erosão (rio Guandu). Ressalta-se que um dos fatores que influenciam a turbidez das águas é a presença de sólidos suspensos, muitas vezes advindos do processo de erosão do solo.

Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de turbidez distribuídos ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante. Em virtude de o número de estações ser elevado, os gráficos foram divididos em parte I (Figura 89) e parte II (Figura 90).

Conforme pode ser observado na Figura 89, nas estações localizadas no rio Doce, os valores de turbidez estiveram, em maior parte, dentro do limite de 100 UNT, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco. Ainda assim, observou-se que a maior parte dos valores em desacordo foi registrada em períodos de chuva, com exceção da estação RD072, em que três dos cinco desacordos registrados foram observados em períodos secos.

Registra-se que, para as estações RD072 e RD083, do IGAM, o início do monitoramento se deu no ano de 2008 (Figura 89) e, para as estações RDC1E10 a RDCE030, do IEMA, só existem dados disponíveis até o ano de 2010 (Figura 90).

Figura 89 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).

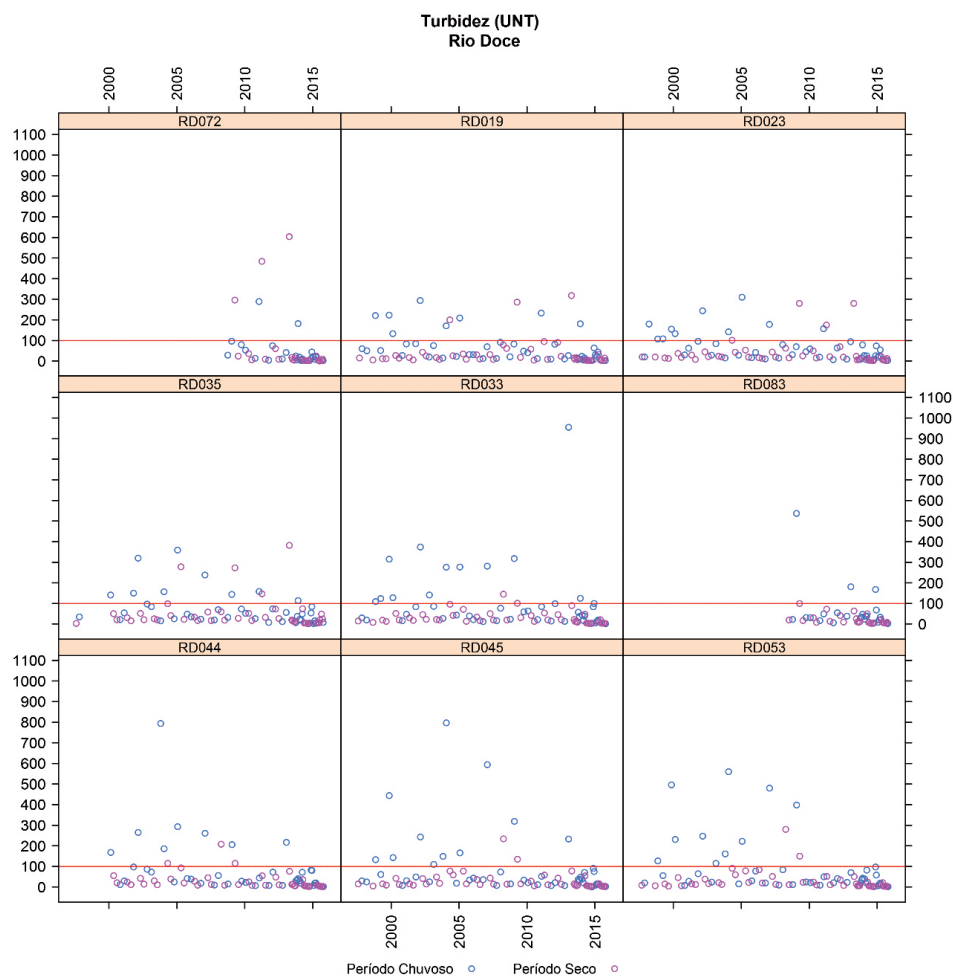
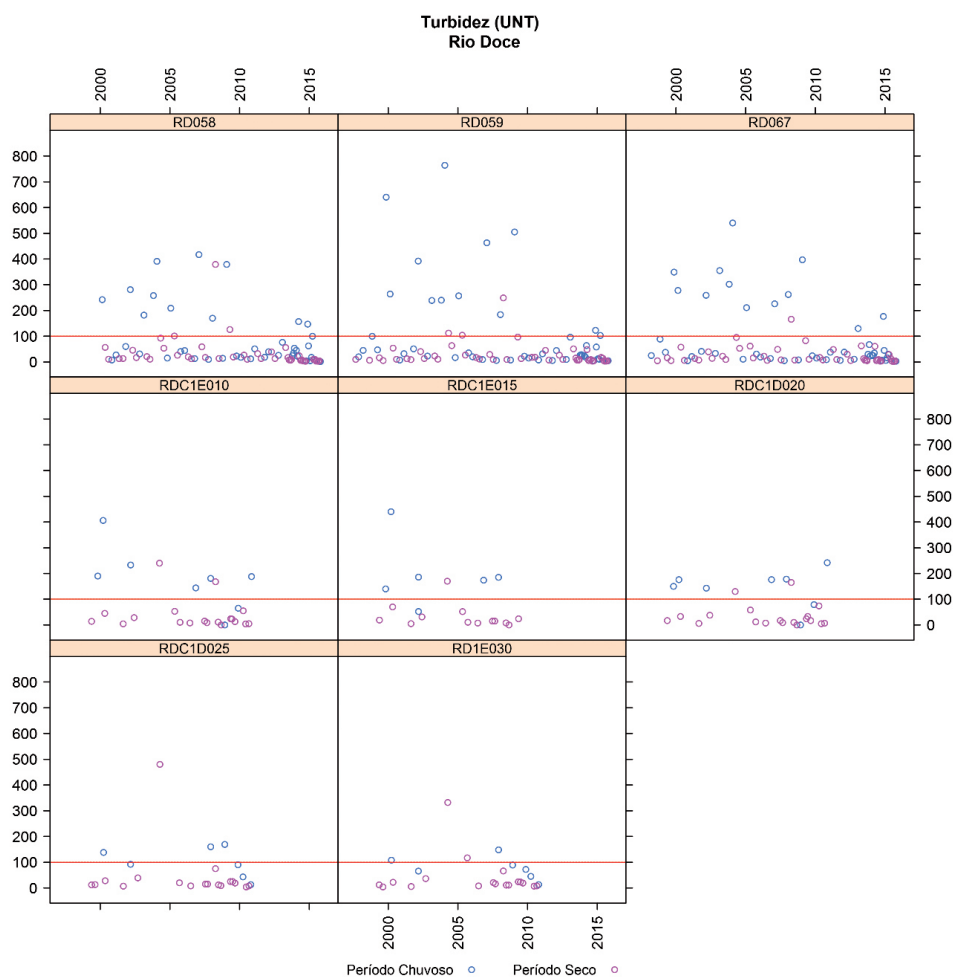


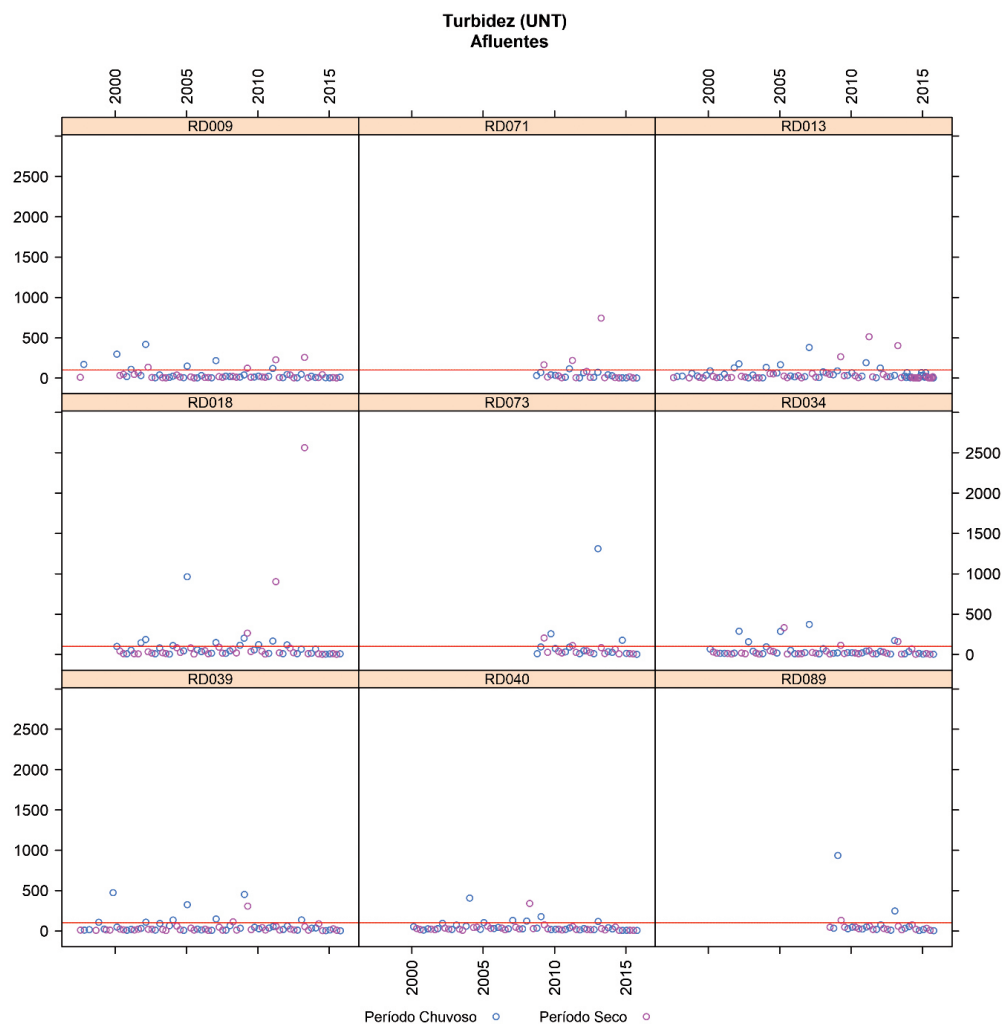
Figura 90 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



Na Figura 91 e na Figura 92, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de turbidez para os afluentes do rio Doce, de montante para jusante.

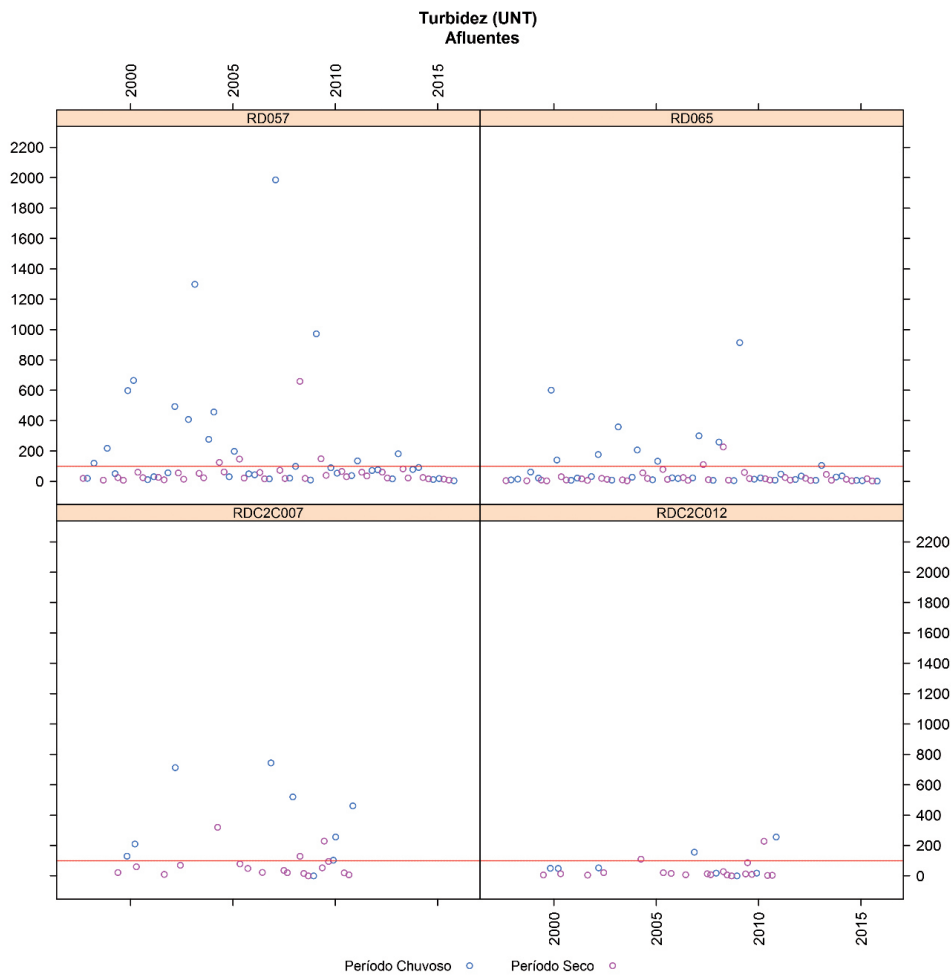
Nos afluentes, os valores de desacordos foram registrados em menor número do que se observa no rio Doce, no entanto, o comportamento da variável é o mesmo, com a maior parte dos valores de turbidez dentro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco, com registros de maiores desacordos no período chuvoso. Exceção se fez para a estação RD018, na qual os maiores desacordos ocorreram em períodos secos.

Figura 91 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte I).



Com relação às séries de dados, tanto nas estações do IGAM quanto nas do IEMA, os períodos avaliados não estão completos para todo o conjunto de estações analisado, o que ocorre para estações de monitoramento mais recentes ou para aquelas que tiveram seu monitoramento interrompido em algum momento.

Figura 92 – Gráficos de dispersão dos dados de turbidez ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte II).



A análise física dos dados relativos à constituição dos Sólidos Dissolvidos Totais (SDTs) e Sólidos Suspensos Totais (SSTs) pode ser verificada em função de sua influência direta nos parâmetros turbidez e cor da água, conforme apresentado na Figura 93 e Figura 94. Os parâmetros turbidez e cor se mostraram correlacionados, com os SSTs e com os SDTs, com a mesma tendência gráfica, respectivamente. No caso específico do ponto RD057, houve, possivelmente, a influência de processos erosivos, ações antropogênicas e/ou assoreamentos locais, como já comentado, com a presença de material particulado em suspensão.

Figura 93 – Comparação entre os dados médios de turbidez e sólidos suspensos totais ao longo das estações de monitoramento.

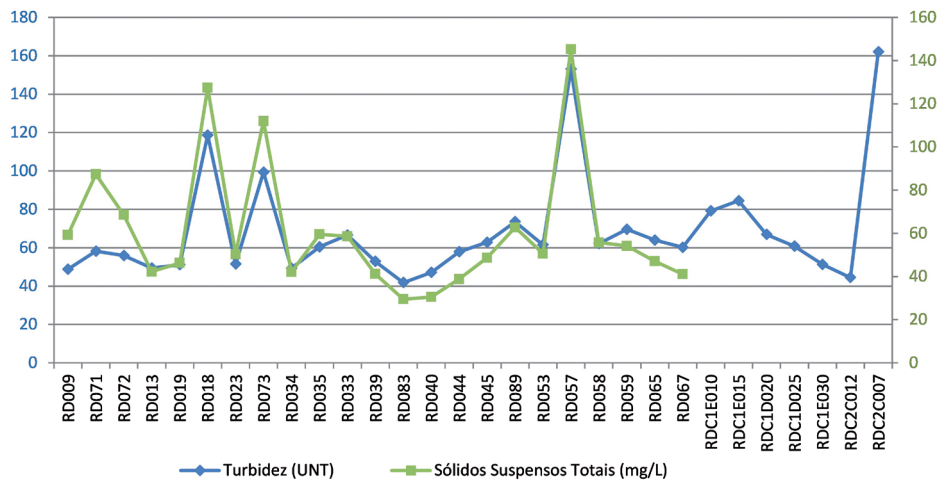
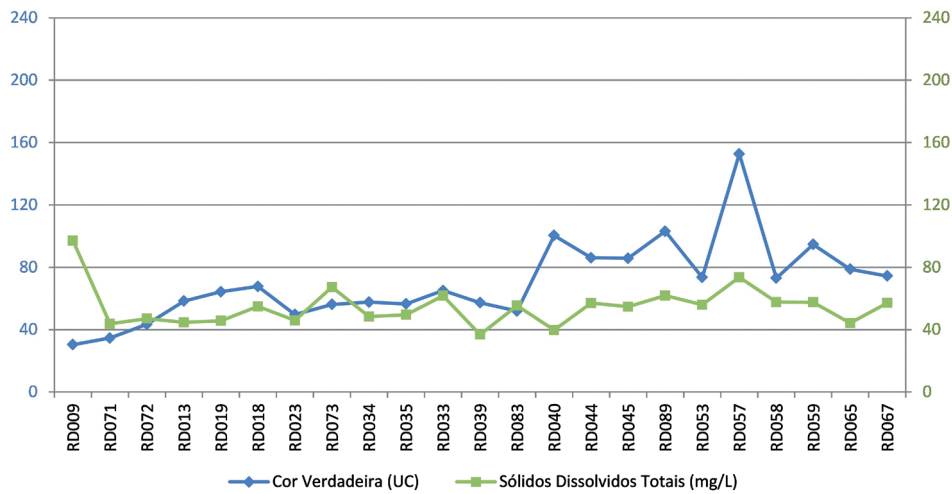


Figura 94 – Comparação entre os dados médios de cor verdadeira e sólidos dissolvidos totais ao longo das estações de monitoramento.



2.2.3.2 Resultados das variáveis químicas da água (exceto metais e semimetais)

2.2.3.2.1 Alcalinidade total

A alcalinidade das águas naturais pode ser explicada pela capacidade de neutralizar ácidos ou a capacidade de tamponamento. Esta se constitui principalmente de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos. Essas três formas de alcalinidade manifestam-se em função do valor do pH da água, a saber:

- águas de pH entre 4,4 e 8,3: alcalinidade apenas devido a bicarbonatos;
- águas de pH entre 8,3 e 9,4: alcalinidade devido a carbonatos e bicarbonatos;
- águas de pH superior a 9,4: alcalinidade devido a carbonatos e hidróxidos (LIBÂNIO, 2005).

Ainda segundo Libânio (2005), águas naturais de origem superficial no Brasil apresentam alcalinidade comumente inferior a 100 mg/L de CaCO_3 . Valores mais elevados de alcalinidade nos corpos d'água estão associados aos processos de decomposição da matéria orgânica, à atividade respiratória de microrganismos, com liberação e dissolução do gás carbônico (CO_2) na água, e ao lançamento de efluentes industriais.

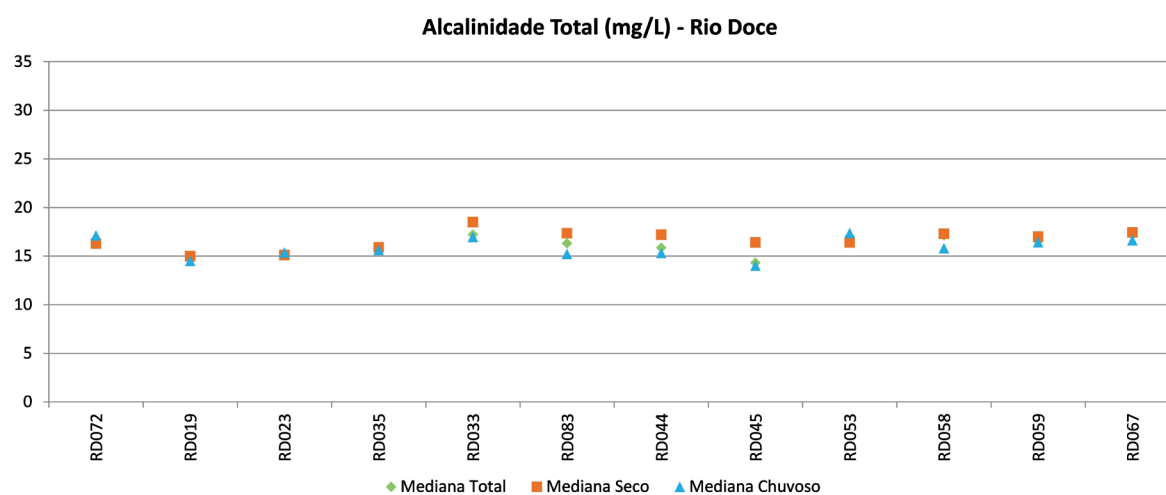
Para a alcalinidade total, foram avaliados os dados disponíveis na base do IGAM. No período anterior ao desastre, o IEMA não realizou avaliações da água em relação a essa variável. Ressalta-se que não há valor máximo de referência disposto na Resolução CONAMA nº 357/2005 para a alcalinidade total, dessa forma, não foram calculados percentuais de desacordos.

Avaliação espacial

Na Figura 95, apresentam-se os valores de mediana das concentrações de alcalinidade total para as estações monitoradas no rio Doce, considerando os períodos total, seco e o chuvoso. De modo geral, não se observou aumento de concentrações no período chuvoso, com registro de valores mais elevados no período seco, em algumas estações. Não houve variações bruscas de valores ao longo do rio Doce, com medianas variando de 14,3 a 17,2 mg/L, no período total.

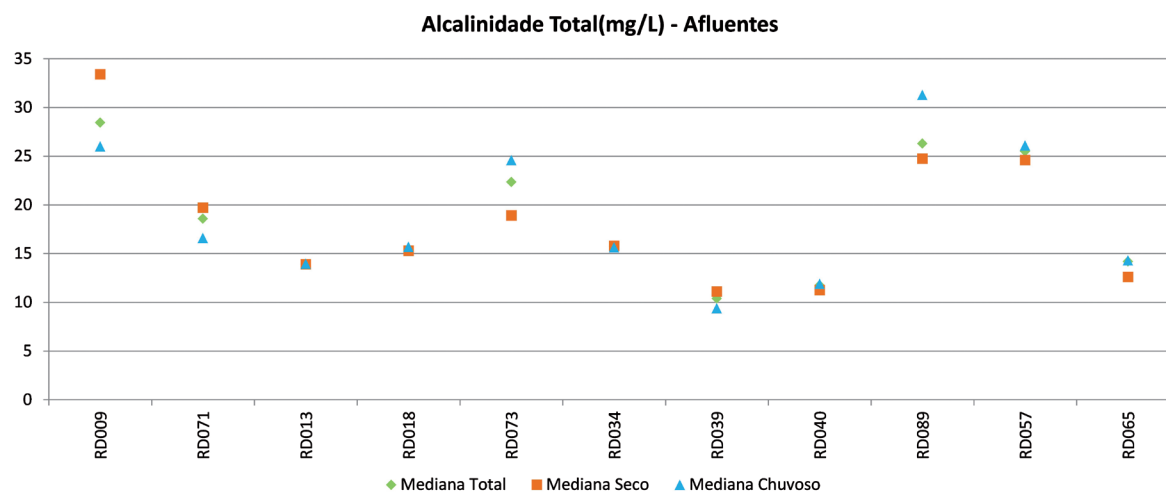
Em relação às medianas do período total, observou-se para a estação RD019, situada a jusante da UHE Risoleta Neves, uma redução de valores de alcalinidade total. Na estação RD023, na região do PERD, os valores mantiveram-se mais baixos. A partir da estação RD035, a jusante de Ipatinga/MG, um dos municípios mais populosos da região de estudo, as concentrações voltaram a se elevar. Na estação RD045, a jusante das contribuições do município de Governador Valadares, novamente observou-se redução de valores. A partir daí os valores voltaram a se elevar e a ficarem mais homogêneos.

Figura 95 – Medianas dos valores de alcalinidade total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações localizadas em afluentes (Figura 96), em contrapartida, os valores de mediana entre as estações apresentaram maior variação. Nas estações RD009 (rio do Carmo), RD089 (rio Suaçuí Grande) e RD057 (rio Caratinga), observaram-se valores mais elevados, assim como registrado para a variável alcalinidade de bicarbonato.

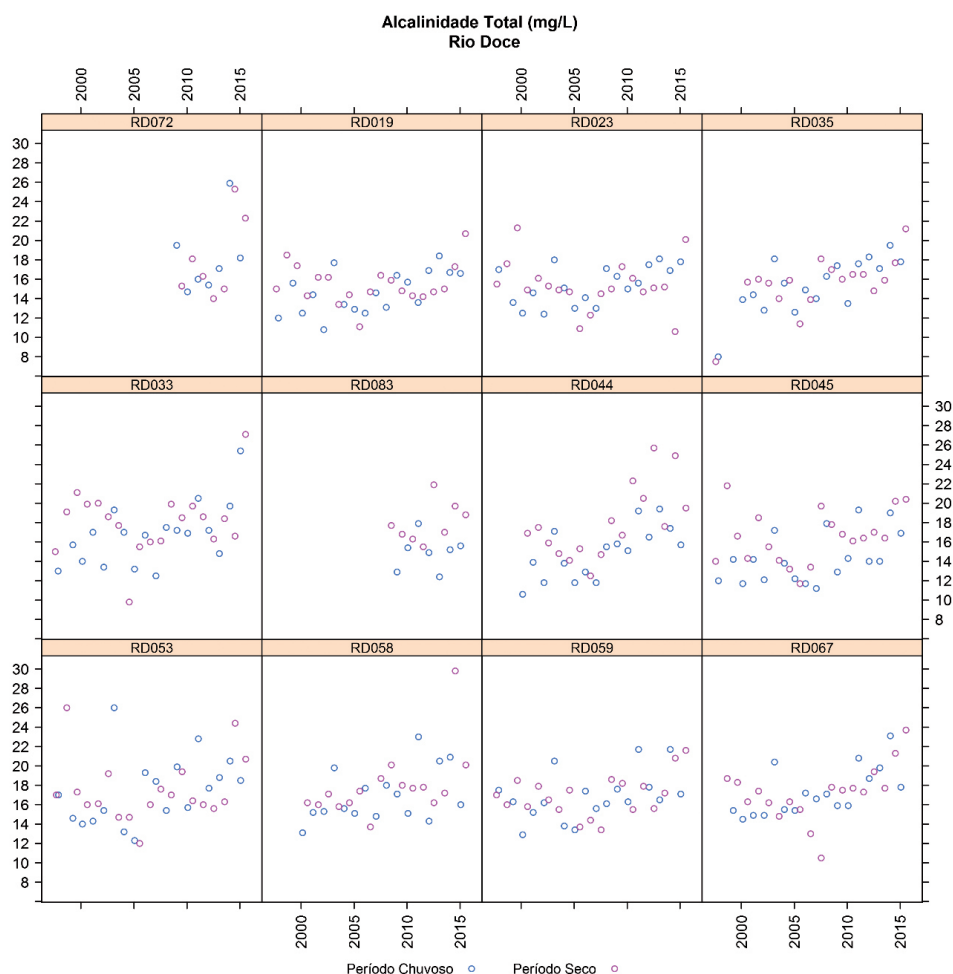
Figura 96 – Medianas dos valores de alcalinidade total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de alcalinidade total ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 97) e afluentes (Figura 98), de montante para jusante.

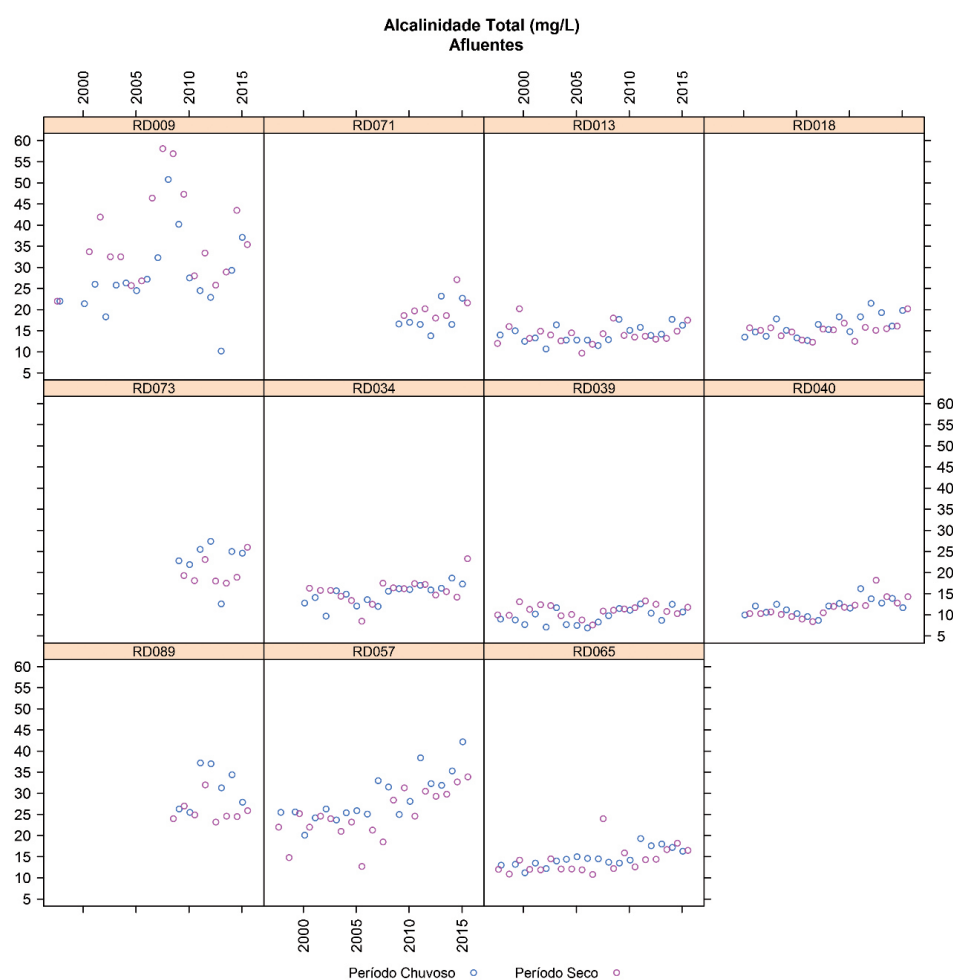
Figura 97 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações do rio Doce (Figura 97), considerando todo o período de dados, os valores de alcalinidade de bicarbonato estiveram entre 7,5 e 29,8 mg/L, com média de 16,6 mg/L e mediana de 16,4 mg/L, indicando valores normais em relação ao esperado para águas naturais de origem superficial no Brasil (LIBÂNIO, 2005).

Para as estações situadas em afluentes do rio Doce (Figura 98), as concentrações de alcalinidade de bicarbonato não passaram de 30 mg/L, durante o período avaliado. Exceções foram observadas para as estações RD009 (rio do Carmo), RD089 (rio Suaçuí Grande) e RD057 (rio Caratinga), com valores máximos de 58,1, 37,2 e 42,2 mg/L, respectivamente.

Figura 98 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.2 Alcalinidade de bicarbonato

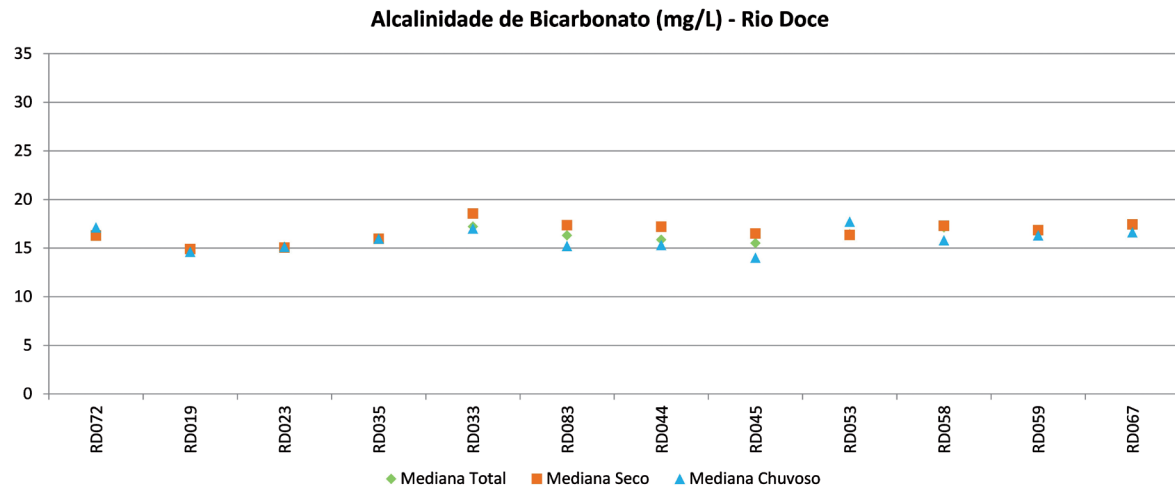
Para mais informações sobre este parâmetro, vide Alcalinidade Total.

Para a alcalinidade de bicarbonato, foram avaliados os dados disponíveis na base do IGAM. No período anterior ao desastre, o IEMA não realizou avaliações da água em relação a essa variável. Ressalta-se que não há valor máximo de referência disposto na Resolução CONAMA nº 357/2005 para a alcalinidade de bicarbonato, dessa forma, não foram calculados percentuais de desacordos.

Avaliação espacial

Na Figura 99, apresentam-se os valores de mediana das concentrações de alcalinidade de bicarbonato para as estações monitoradas no rio Doce, considerando os períodos total, seco e o chuvoso. Não se observou aumento de concentração no período chuvoso. Inclusive, em algumas estações registraram-se valores superiores na estação seca. De modo geral, os valores das medianas foram similares, sem grandes alterações ao longo do rio Doce, variando de 14,8 a 17,2 mg/L, no período total. Os resultados foram semelhantes aos obtidos para a alcalinidade de bicarbonato. Em águas com pH entre 4,4 e 8,3, a alcalinidade total será devida apenas por íons de bicarbonato (LIBÂNIO, 2005), o que pode explicar essa semelhança.

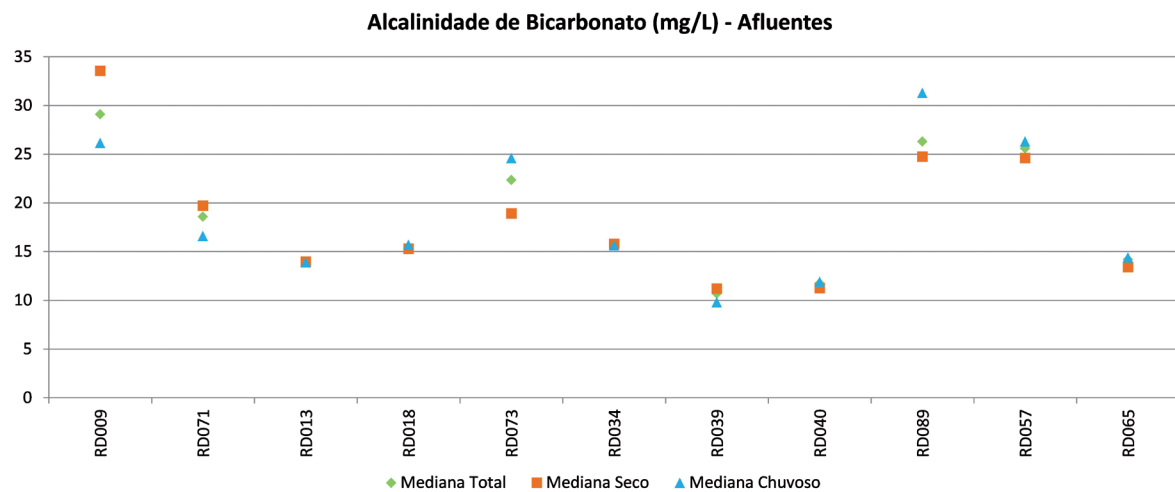
Figura 99 – Medianas dos valores de alcalinidade de bicarbonato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Ainda em relação às medianas do período total, observou-se que, na estação RD019, situada após a UHE Risoleta Neves (Candonga), houve uma redução de valores da referida variável. Na estação RD023, na região do PERD, os valores mantiveram-se mais baixos. A partir da estação RD035, a jusante de Ipatinga/MG, um dos municípios mais populosos da região de estudo, as concentrações voltaram a se elevar. Na estação RD045, a jusante das contribuições do município de Governador Valadares, novamente observou-se redução de valores. A partir disso, os valores voltaram a se elevar e a ficar mais homogêneos.

Para as estações localizadas em afluentes (Figura 100), em contrapartida, os valores de mediana entre as estações mostraram-se mais heterogêneos. Nas estações RD009 (rio do Carmo), RD089 (rio Suaçuí Grande) e RD057 (rio Caratinga), observaram-se valores mais elevados.

Figura 100 – Medianas dos valores de alcalinidade de bicarbonato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de alcalinidade de bicarbonato ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 101) e afluentes (Figura 102), de montante para jusante.

Para as estações do rio Doce (Figura 101), considerando todo o período de dados, os valores de alcalinidade de bicarbonato estiveram entre 9,8 e 29,8 mg/L, com média de 16,7 mg/L e mediana de 16,4 mg/L. Quando os valores da média e da mediana são similares, presume-se que não existiram valores extremos na série que possam ter influenciado no cálculo da média. É possível observar também que o comportamento da variável em questão foi semelhante ao longo do rio Doce.

Para as estações situadas em afluentes do rio Doce (Figura 102), as concentrações de alcalinidade de bicarbonato não passaram de 30 mg/L durante o período avaliado. Exceções foram observadas para as estações RD009 (rio do Carmo), RD089 (rio Suaçuí Grande) e RD057 (rio Caratinga), com valores máximos de 58,1, 37,2 e 42,2 mg/L, respectivamente.

Figura 101 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade de bicarbonato ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.

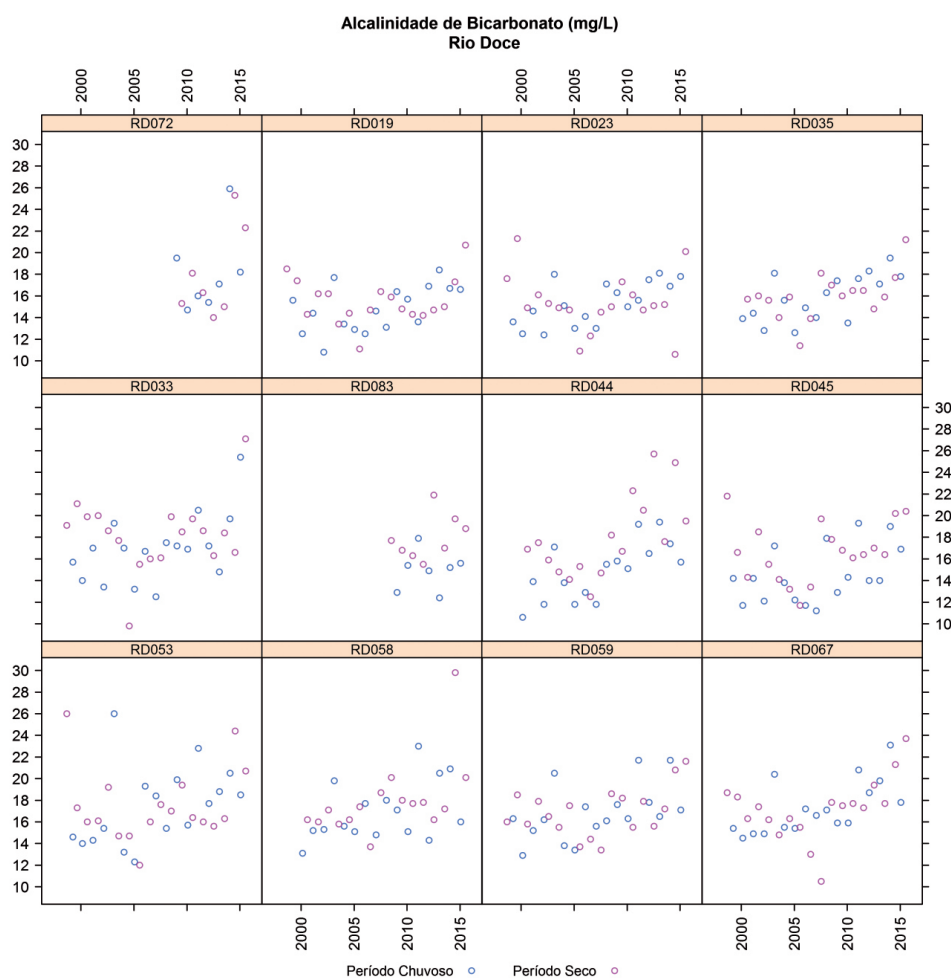
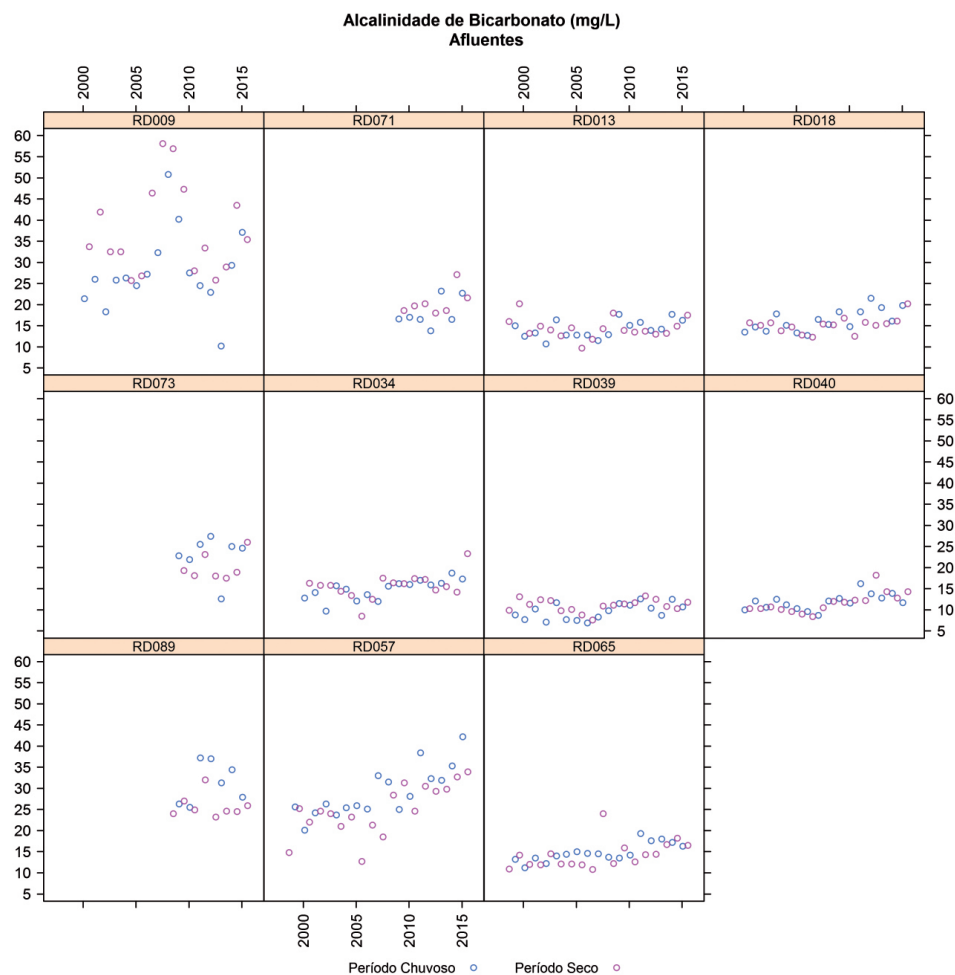


Figura 102 – Gráficos de dispersão dos dados de alcalinidade de bicarbonato ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.3 *Cianeto livre*

Cianetos livres (CN^- e HCN) são considerados tóxicos, estando essa característica ligada à possibilidade de dissociação do íon complexo para a solução na qual se encontra. Esses compostos podem ser absorvidos rapidamente pela pele, bem como por inalação ou, ainda, ingestão, sendo transportados através do plasma sanguíneo e afetando diversos constituintes essenciais ao processo vital. Em especial, podem bloquear o transporte de oxigênio no metabolismo, apesar de não apresentarem efeito cumulativo no organismo.

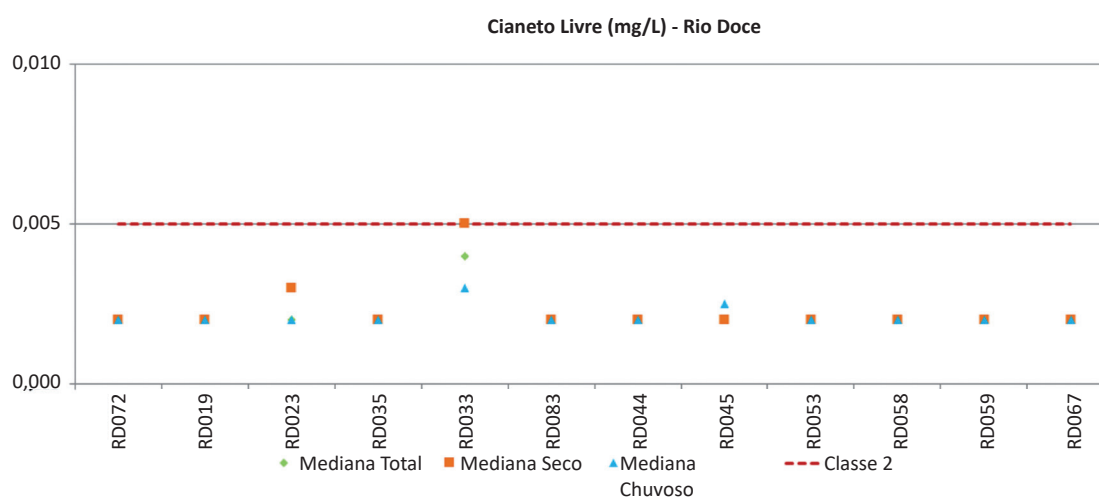
Avaliação de não conformidades

Optou-se por não realizar a análise de não conformidades para essa variável, uma vez que até o ano de 2010 o limite de quantificação (0,01 mg/L) era superior ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, de 0,005 mg/L. De qualquer forma, avaliando-se exclusivamente o período em que o limite de detecção foi inferior ao limite da Resolução, não foram observados desacordos superiores a 20% do total de eventos avaliados. Além disso, destaca-se também que os dados avaliados são oriundos somente do IGAM.

Avaliação espacial

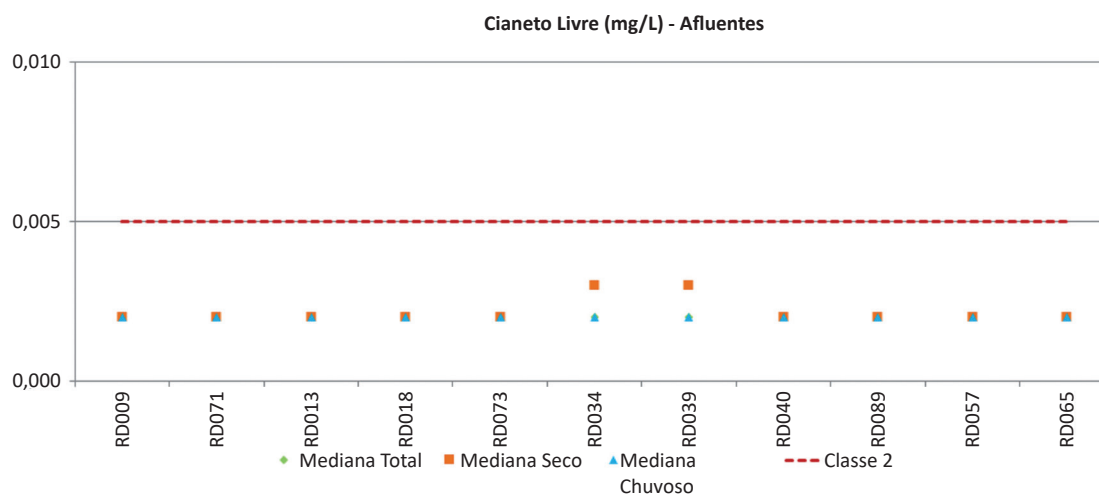
Na Figura 103, apresentam-se os valores de mediana das concentrações de cianeto livre para as estações monitoradas no rio Doce, considerando os períodos total, seco e o chuvoso. Não foram observadas grandes variações nas concentrações de cianeto livre entre os períodos seco e chuvoso, quando comparados com o período total, com medianas variando entre 0,002 e 0,005 mg/L. No entanto, observa-se valor mediano mais elevado na estação RD033, instalada no rio Doce, entre os municípios de Ipaba e Naque, quando a mediana do período seco chegou ao valor limite da Resolução CONAMA nº 357/2005, de 0,005 mg/L.

Figura 103 – Medianas dos valores de cianeto livre para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Na Figura 104, são apresentados os valores medianos de cianeto livre para os afluentes do rio Doce, na região de estudo, nos períodos seco, chuvoso e total. Conforme se observou, não houve distinção significativa entre os valores medianos calculados para os três períodos. Destacaram-se valores medianos mais elevados nas estações RD034 (rio Piracicaba) e RD039 (rio Santo Antônio), no período seco.

Figura 104 – Medianas dos valores de cianeto livre para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão da concentração de cianeto livre, distribuída ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 105) e em seus afluentes (Figura 106), de montante para jusante.

Tanto para os dados advindos de estações no rio Doce quanto dos tributários, observou-se que concentrações mais elevadas foram registradas em 2010 e anos anteriores. Essa situação esteve relacionada ao limite de quantificação do método, que nesse período era de 0,010 mg/L, ou seja, o dobro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (0,005 mg/L). No ano de 2011, o limite de quantificação passou a ser de 0,002 mg/L e, dessa forma, a partir desse período foram observadas flutuações nas concentrações medidas, mas ainda assim, normalmente, abaixo do limite legislado. Não foram observadas diferenças quantitativas entre desacordos ocorridos no período de chuva ou seca.

Figura 105 – Gráficos de dispersão dos dados de cianeto livre ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.

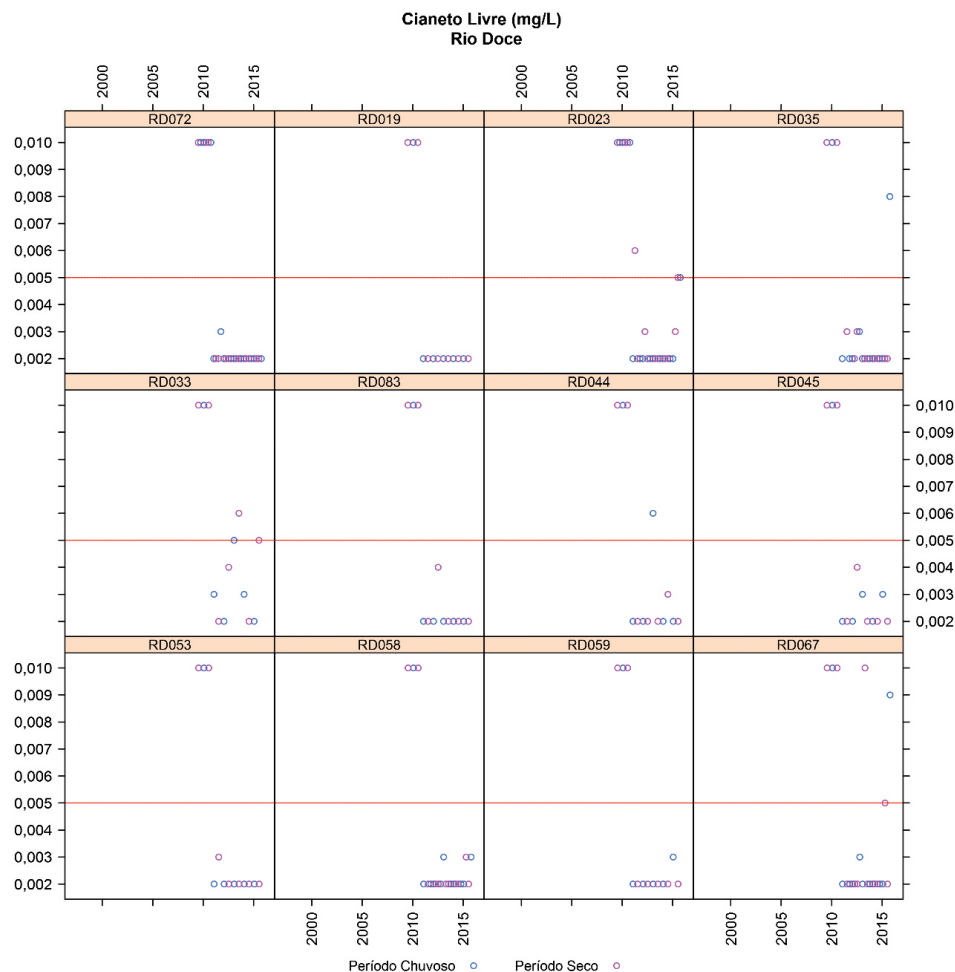
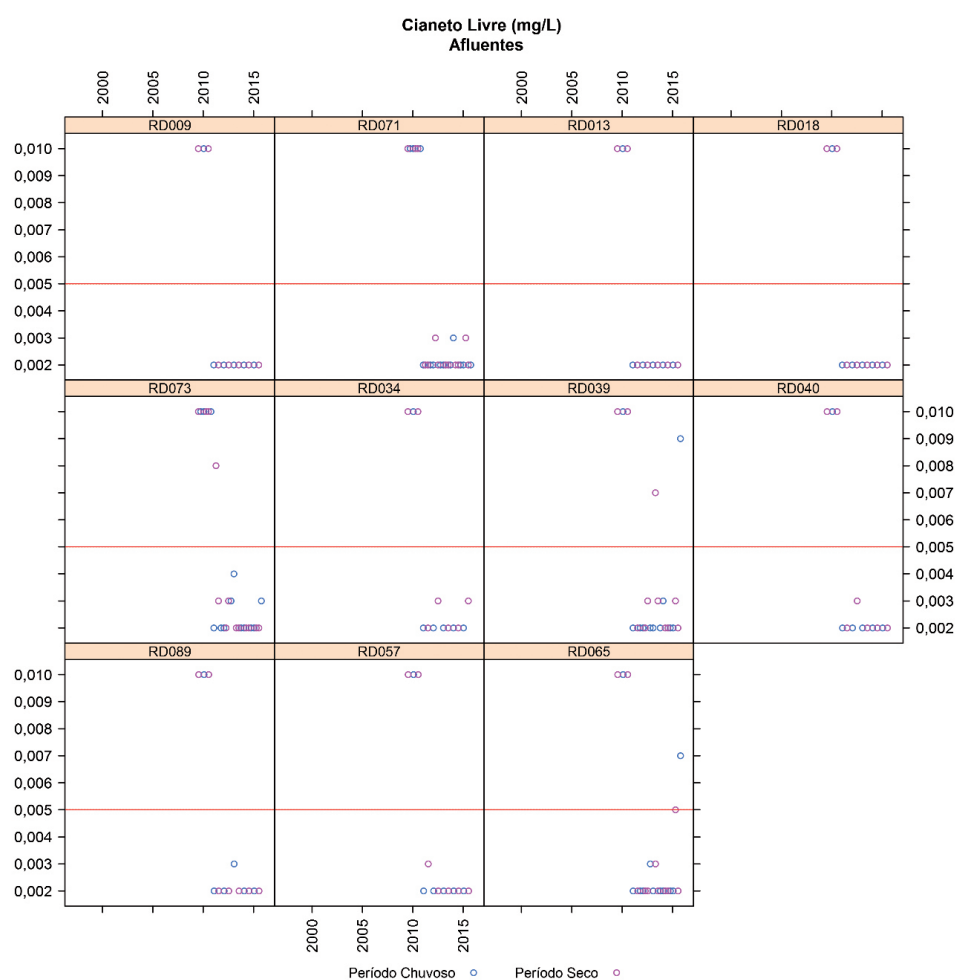


Figura 106 – Gráficos de dispersão dos dados de cianeto livre ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.4 Cloreto total

De acordo com a CETESB (2016), o cloreto (ânion Cl⁻) nas águas superficiais tem sua origem em fontes como as descargas de esgotos sanitários, que apresentam elevada concentração do ânion, composto relevante da urina humana. Além disso, outros tipos de efluente industrial também podem contribuir com cloreto para a água superficial, como as indústrias de petróleo, farmacêutica e de curtumes. Com relação à saúde humana, com exceção de casos de deficiência do metabolismo de cloreto de sódio, como situações de insuficiência cardíaca congestiva, o cloreto não apresenta toxicidade.

Tanto a Resolução CONAMA nº 357/2005 quanto a Portaria de Consolidação nº 5/2017 estabelecem o valor máximo de 250 mg/L de cloreto na água.

Avaliação de não conformidades

A avaliação do conjunto total de dados de cloreto total demonstrou que não foram registrados desacordos em nenhum dos períodos avaliados (seco, chuvoso e total), tanto para as estações de monitoramento instaladas no rio Doce (Tabela 36) quanto para as instaladas em seus afluentes (Tabela 37).

Tabela 36 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cloreto total no rio Doce.

Rio Doce							
Cloreto Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	
MG	RD072	48	0%	25	0%	23	0%
	RD019	92	0%	47	0%	45	0%
	RD023	92	0%	47	0%	45	0%
	RD035	85	0%	44	0%	41	0%
	RD033	92	0%	47	0%	45	0%
	RD083	49	0%	26	0%	23	0%
	RD044	83	0%	43	0%	40	0%
	RD045	92	0%	47	0%	45	0%
	RD053	91	0%	47	0%	44	0%
	RD058	83	0%	43	0%	40	0%
	RD059	92	0%	47	0%	45	0%
	RD067	90	0%	46	0%	44	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 37 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para cloreto total em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Cloreto Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	
MG	RD009	66	0%	33	0%	33	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	89	0%	44	0%	45	0%
	RD018	64	0%	32	0%	32	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	64	0%	32	0%	32	0%
	RD039	73	0%	36	0%	37	0%
	RD040	64	0%	32	0%	32	0%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	73	0%	36	0%	37	0%
	RD065	73	0%	36	0%	37	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

Conforme pode ser observado pela análise da Figura 107 e da Figura 108, os valores medianos de cloreto, avaliados para o período chuvoso, seco e total, não apresentaram distinção ou variação entre si, tanto nas estações monitoradas no rio Doce quanto em seus afluentes. Também não foram observadas variações espaciais significativas nas concentrações medianas de cloretos, para os três períodos estudados, tanto para o rio Doce quanto para seus afluentes. No rio Doce, os valores medianos variaram entre 1,7 e 4,9 mg/L e para os afluentes a variação das medianas esteve entre 1,2 e 3,9 mg/L.

Figura 107 – Medianas dos valores de cloreto total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

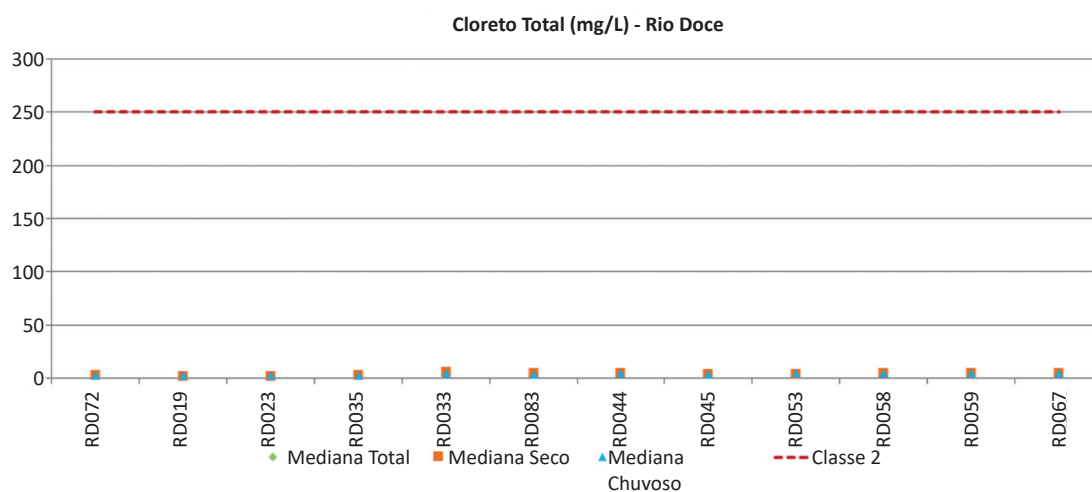
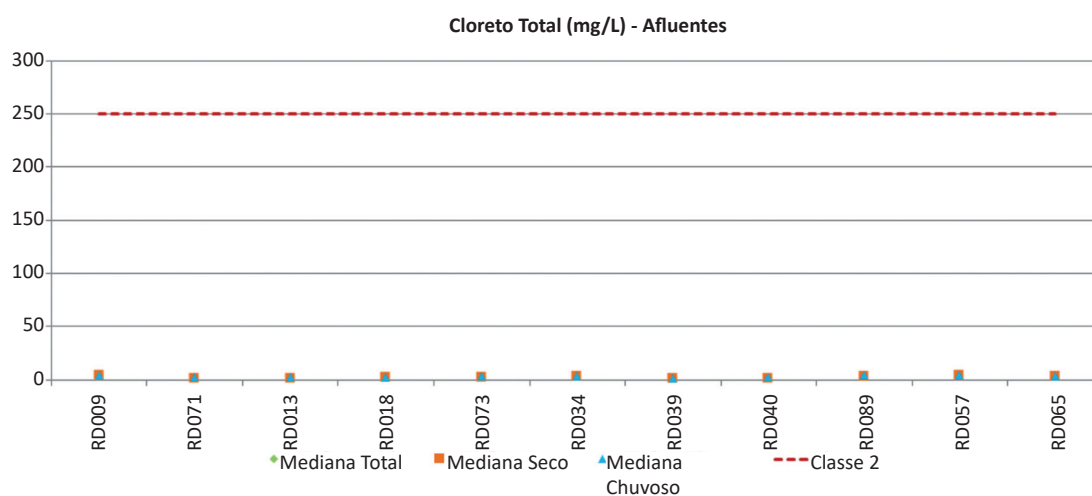


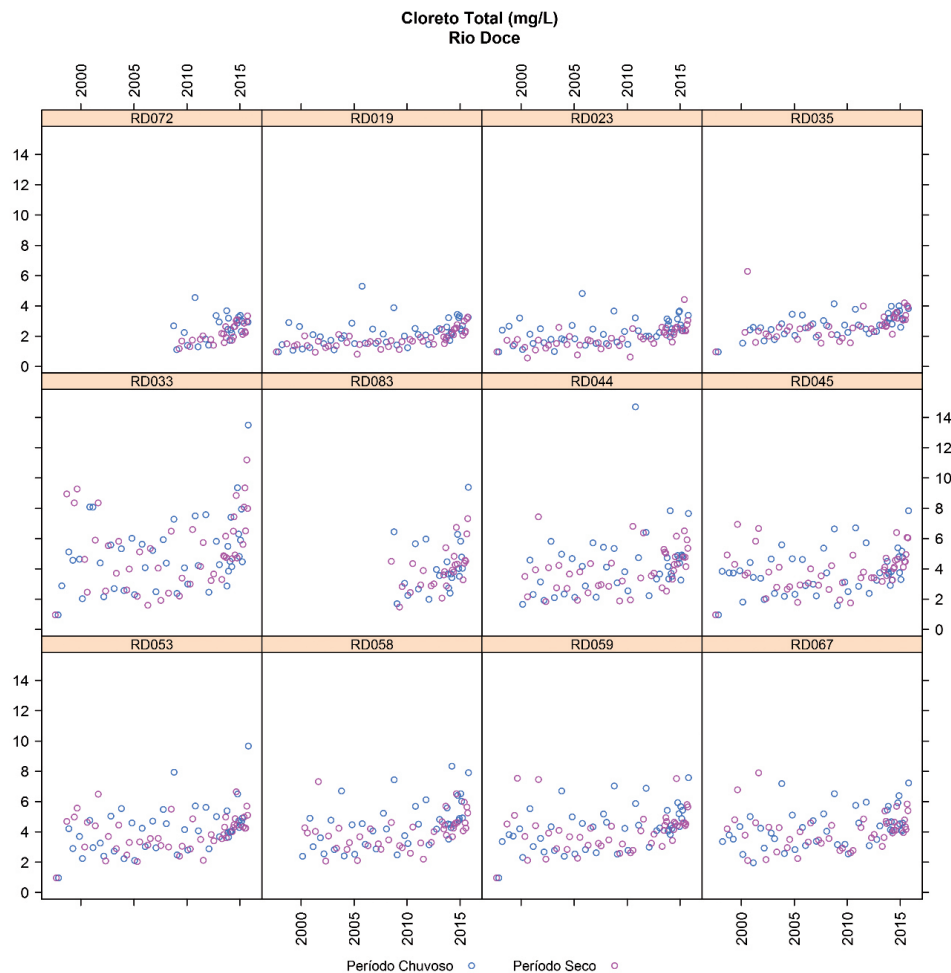
Figura 108 – Medianas dos valores de cloreto total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de cloreto total, distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 109) e em seus afluentes (Figura 110), de montante para jusante.

Figura 109 – Gráficos de dispersão dos dados de cloreto total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.

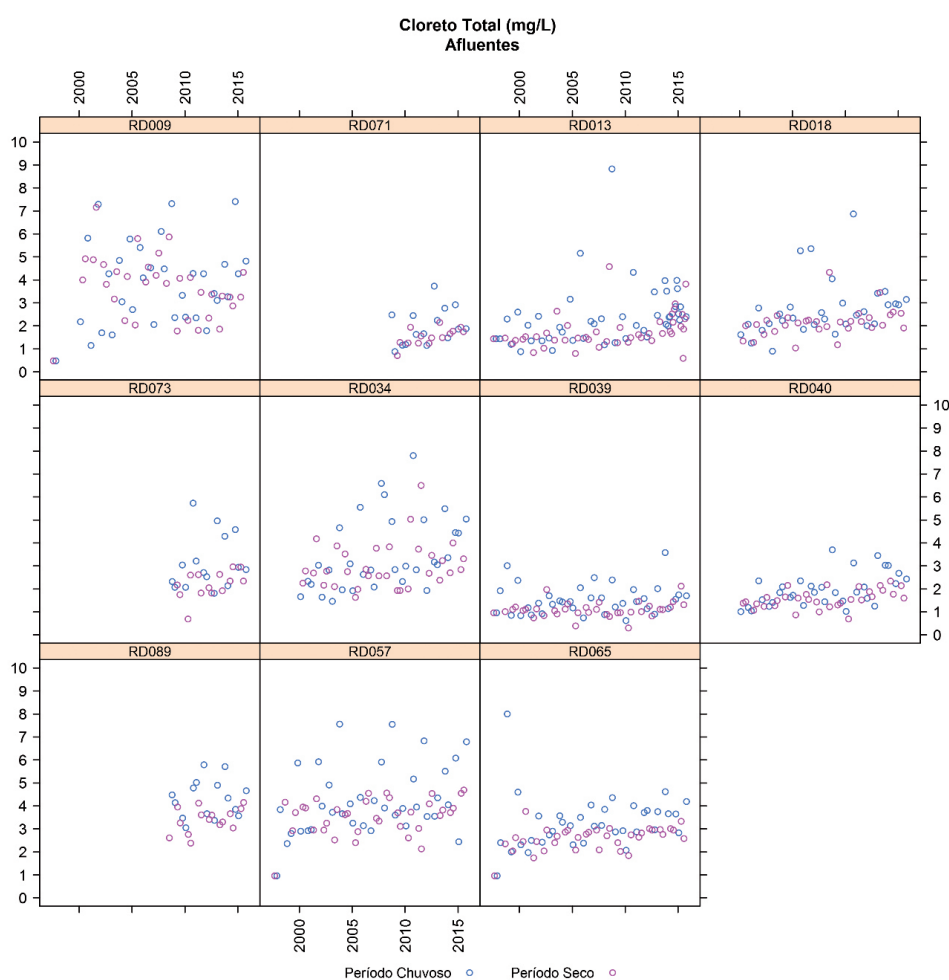


Com relação aos resultados obtidos a partir das estações de monitoramento do rio Doce, em termos espaciais, assim como observado para a condutividade elétrica, nas estações RD072, RD019, RD023 e RD035, localizadas mais a montante, a variação dos valores de cloretos totais foi menor do que o observado em estações mais a jusante. Também nas quatro estações citadas, foram registrados valores menores, quando comparados com os demais. Ainda assim, as concentrações de cloretos totais não ultrapassaram 14,7 mg/L nas estações do rio Doce. Em termos sazonais, ao longo do período monitorado observaram-se valores levemente superiores para o período de chuva.

Quanto ao monitoramento dos afluentes, a estação RD009, localizada no rio do Carmo, no município de Mariana, apresentou grande variação de valores, mas sempre inferiores a 8,8 mg/L, que foi o valor máximo observado no conjunto dos afluentes.

Destaca-se que os valores registrados são bem inferiores ao limite indicado na Resolução CONAMA nº 357/2005, de 250 mg/L. Este também é o motivo pelo qual a linha indicativa do limite da Resolução não está marcada nas figuras apresentadas na sequência.

Figura 110 – Gráficos de dispersão dos dados de cloreto total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.5 Condutividade elétrica in loco

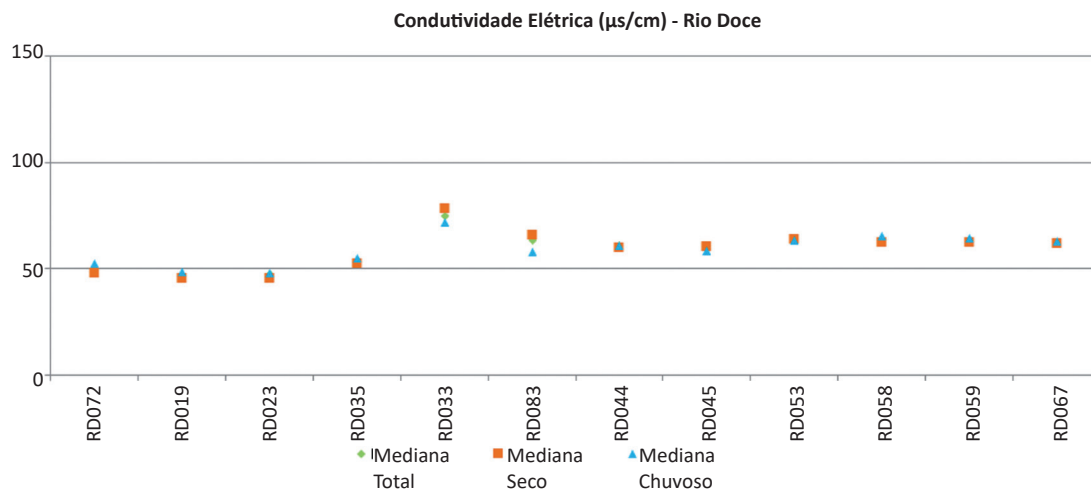
Substâncias dissolvidas na água, que se dissociam em ânions e cátions, são responsáveis pela capacidade de as águas naturais transmitirem corrente elétrica, parâmetro conhecido como condutividade elétrica. Esse parâmetro é importante para a detecção de lançamentos de efluentes, por relacionar-se à concentração de sólidos dissolvidos. A princípio, águas naturais apresentam condutividade, normalmente, inferior a $100 \mu\text{S}/\text{cm}$, podendo chegar a valores de $1.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, em águas com altas cargas de efluentes (LIBÂNIO, 2005).

Esse parâmetro não apresenta limite legislado pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e, dessa forma, não foram calculados percentuais de desacordos.

Avaliação espacial

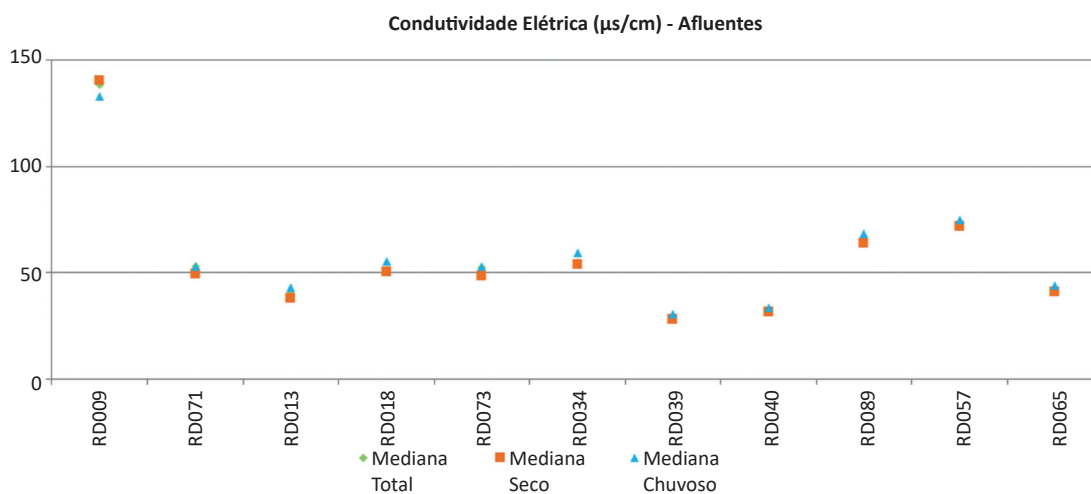
Na Figura 111, são apresentados os valores medianos de condutividade elétrica para as estações de monitoramento do rio Doce, nos períodos seco, chuvoso e total. Não foram observadas diferenças relevantes entre as medianas dos três períodos. Com relação à variação entre as estações, valores mais elevados de medianas foram observados a partir da estação RD033, localizada entre os municípios de Bugre e Belo Oriente. De forma geral, os valores medianos variaram entre 45 e $78 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 111 – Medianas dos valores de condutividade elétrica *in loco* para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Na Figura 112, são apresentados os valores medianos de condutividade elétrica para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce, nos períodos seco, chuvoso e total. Assim como para as estações do rio Doce, não foram observadas diferenças relevantes entre as medianas dos três períodos. No entanto, com relação à variação entre as estações, valores elevados de medianas foram observados na estação RD009, localizada no rio do Carmo, no município de Mariana. Nessa estação, o valor mediano atingiu 140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no período seco, valor que pode ser considerado alto, quando comparado com os demais registrados. Conforme observado anteriormente, valores de condutividade de até 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ podem ser considerados normais. Nas demais estações, os valores medianos variaram entre 28 e 74 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Figura 112 – Medianas dos valores de condutividade elétrica *in loco* para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de condutividade elétrica distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 113) e em seus afluentes (Figura 114), de montante para jusante.

Com relação aos resultados obtidos a partir das estações de monitoramento do rio Doce, observou-se uma menor variação de valores de condutividade elétrica, em termos espaciais, nas estações RD072, RD019, RD023 e RD035, localizadas mais a montante. Registra-se que maior variação nos valores de condutividade foi observada a partir da estação RD033.

Em termos temporais, ao longo do período monitorado entre os anos de 2000 e 2014, as concentrações registradas variaram entre 40 e 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aproximadamente. No entanto, também se observou uma elevação nessas concentrações, com valores mais elevados no ano de 2015, sendo este um padrão verificado para os períodos de seca e cheia, em todas as estações de monitoramento.

No tocante ao monitoramento dos afluentes, a estação RD009, localizada no rio do Carmo, no município de Mariana, apresentou valores mais elevados que as demais, com grande variação e valores sempre superiores a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (até 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, aproximadamente). Nas demais estações de monitoramento, os valores foram relativamente menores, normalmente ao redor de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nas estações RD071 (rio do Carmo), RD013 (rio Piranga), RD034 (rio Piracicaba) e RD057 (rio Caratinga), observou-se, mesmo que de forma mais sutil, a mesma tendência temporal registrada para o rio Doce, com a ocorrência de valores mais elevados a partir de 2015.

Figura 113 – Gráficos de dispersão dos dados de condutividade elétrica *in loco* ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.

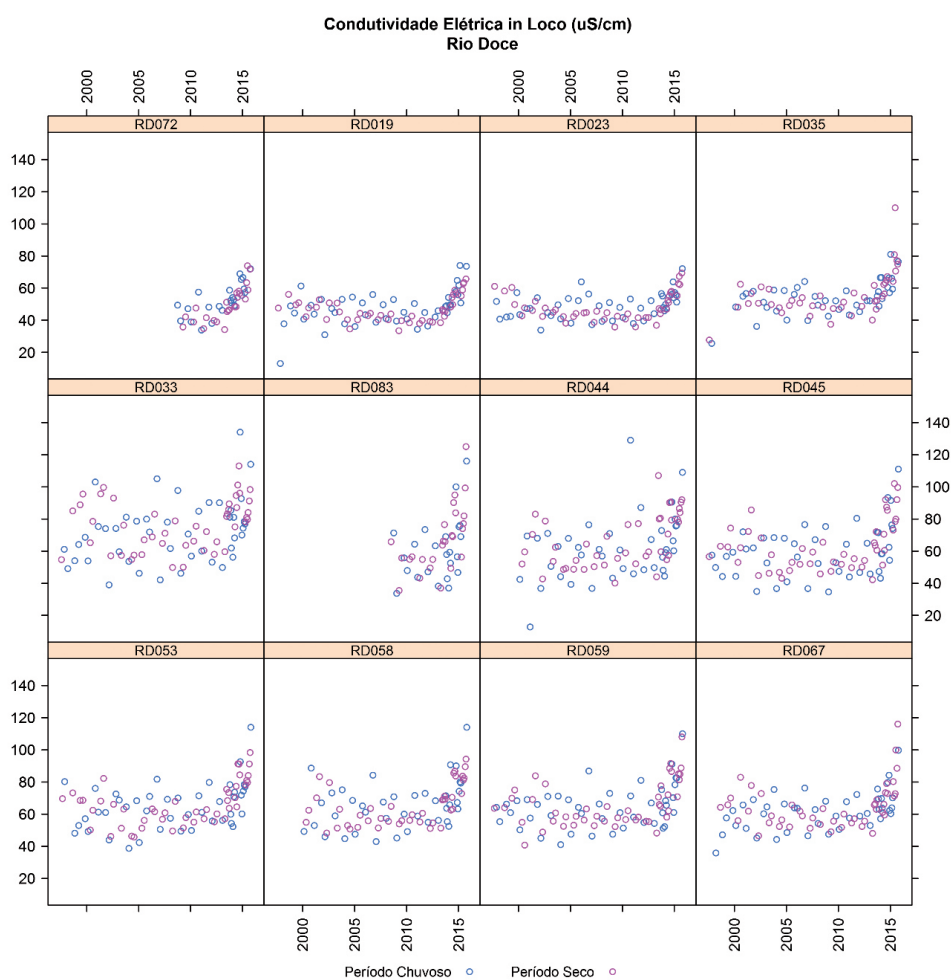
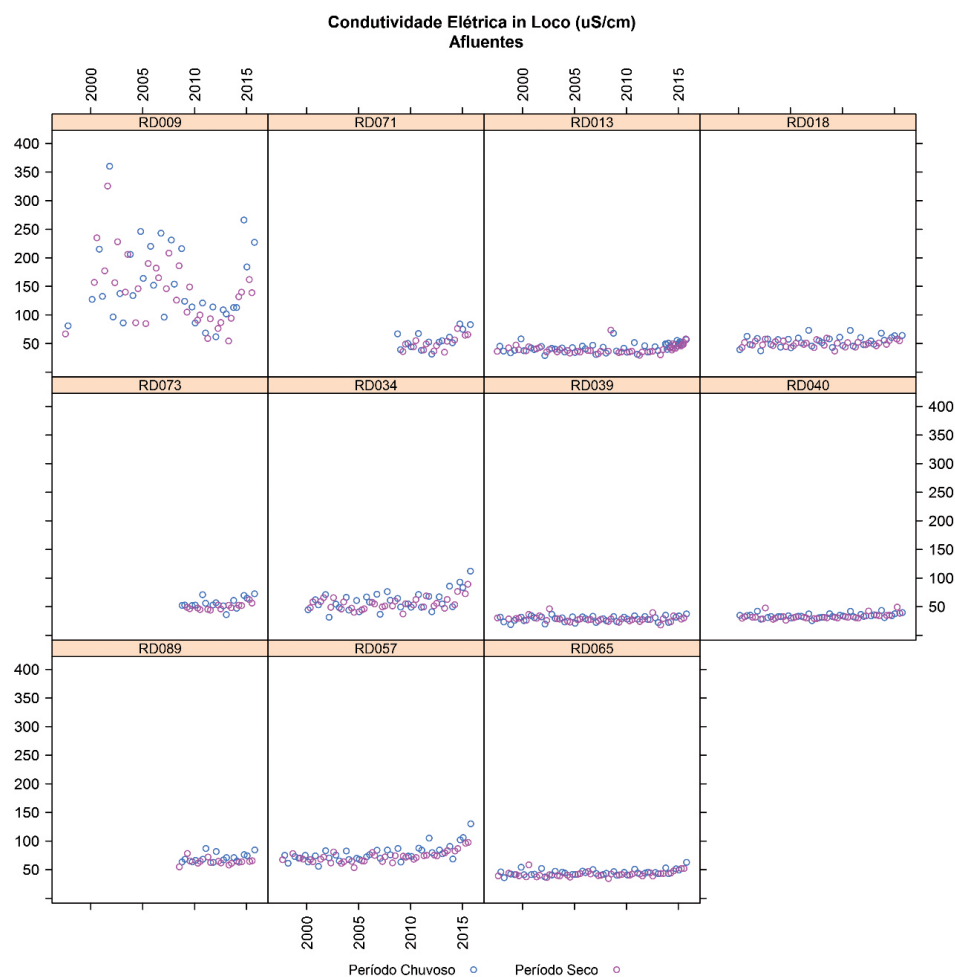
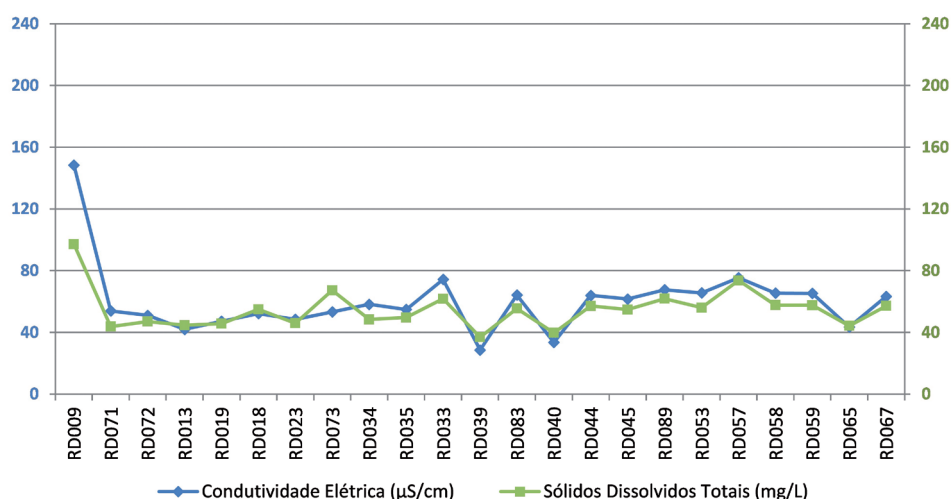


Figura 114 – Gráficos de dispersão dos dados de condutividade elétrica *in loco* ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



A análise física dos dados relativos à constituição dos SDTs e SSTs pode ser verificada em função de sua influência direta nos parâmetros de condutividade elétrica da água, conforme apresentado na Figura 115. Observou-se no presente caso que a condutividade elétrica esteve diretamente relacionada aos SDTs, podendo, nesse caso, inferir que estes podem estar constituídos na sua maioria por sais ou íons dissolvidos. Parra et al. (2007) identificaram comportamentos similares nas análises da água do rio Conceição, na região do Quadrilátero Ferrífero (QF).

Figura 115 – Comparação entre os dados médios de condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais ao longo das estações de monitoramento.



2.2.3.2.6 Demanda bioquímica de oxigênio

O parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um indicador indireto da presença de matéria orgânica em águas naturais, pois avalia o consumo de Oxigênio Dissolvido (OD) por bactérias que consomem a matéria orgânica na água, transformando-a em uma forma inorgânica estável (LIBÂNIO, 2005; CETESB, 2016).

Uma vez que a DBO se baseia na demanda de OD para a decomposição de matéria orgânica, águas com alto teor de DBO podem ter deplecionamento severo de OD, causando danos à biota aquática (CETESB, 2016).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2, como os incluídos na bacia do rio Doce, devem apresentar DBO inferior a 5,0 mg/L, no intuito de manter os usos múltiplos da água (BRASIL, 2005).

Para a DBO foram avaliadas as séries de dados do IGAM e do IEMA. Em relação ao número de observações, registrou-se um maior número de dados disponíveis na base do IGAM, sendo que o IEMA a princípio descontinuou a avaliação da referida variável no ano de 2010, segundo a base de dados do Hidroweb.

Avaliação de não conformidades

A avaliação de não conformidades com relação ao parâmetro DBO, com base em dados advindos das estações de monitoramento situadas no rio Doce (Tabela 38), indicou que somente a estação RDC1E030, localizada no município de Linhares, no Espírito Santo, apresentou desacordos na ordem de 29%, quando avaliado exclusivamente o período chuvoso. Todas as demais estações de monitoramento, independentemente do período avaliado (seco, chuvoso ou total), ou não apresentaram desacordos (0%) ou apresentaram desacordos variando entre 1 e 17%.

Tabela 38 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para demanda bioquímica de oxigênio no rio Doce.

Rio Doce							
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD072	48	0%	25	0%	23	0%
	RD019	92	1%	47	0%	45	2%
	RD023	92	1%	47	0%	45	2%
	RD035	85	1%	44	0%	41	2%
	RD033	92	1%	47	0%	45	2%
	RD083	49	0%	26	0%	23	0%
	RD044	83	0%	43	0%	40	0%
	RD045	92	0%	47	0%	45	0%
	RD053	90	1%	46	0%	44	2%
	RD058	83	0%	43	0%	40	0%
	RD059	92	3%	47	0%	45	7%
	RD067	90	1%	46	0%	44	2%
	ES	RDC1E010	27	11%	19	16%	8
RDC1E015		19	11%	13	8%	6	17%
RDC1D020		27	11%	19	16%	8	0%
RDC1D025		25	12%	18	11%	7	14%
RDC1E030		25	12%	18	6%	7	29%

Nota: n: número de observações.

No tocante à avaliação de não conformidades do parâmetro DBO, a partir de dados de estações de monitoramento localizadas em afluentes (Tabela 39) do rio Doce, na área de interesse, observou-se que somente a estação RDC20C007, localizada no rio Guandu, no município de Afonso Cláudio, no Espírito Santo, apresentou percentual de desacordo superior a 20%, quando avaliado exclusivamente o período chuvoso. Todas as demais estações de monitoramento, independentemente do período avaliado (seco, chuvoso ou total), ou não apresentaram desacordos (0%) ou apresentaram desacordos variando entre 1 e 19%.

Tabela 39 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para demanda bioquímica de oxigênio em afluentes do rio Doce.

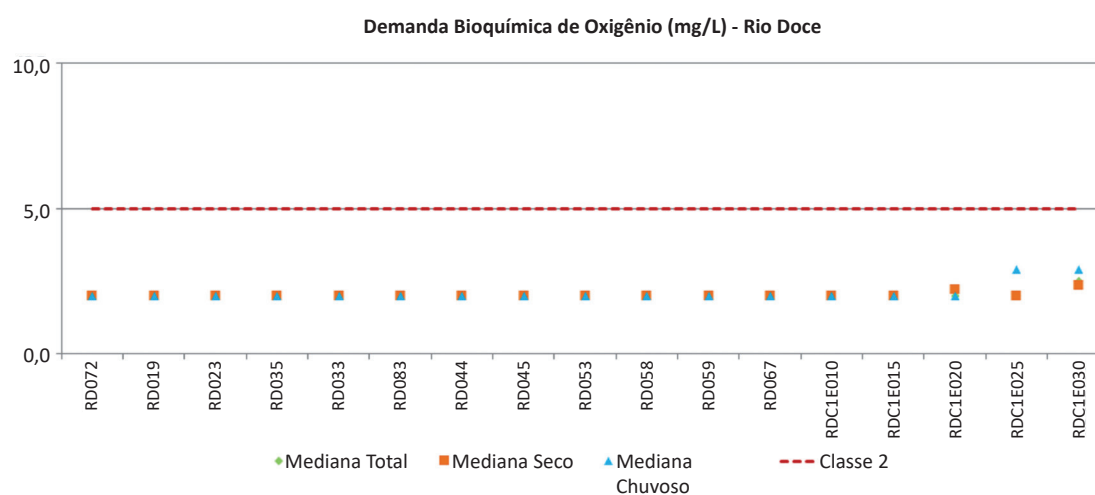
Afluentes							
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO							
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	
MG	RD009	66	2%	33	0%	33	3%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	89	2%	44	2%	45	2%
	RD018	64	0%	32	0%	32	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	64	0%	32	0%	32	0%
	RD039	73	0%	36	0%	37	0%
	RD040	64	0%	32	0%	32	0%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	73	1%	36	0%	37	3%
	RD065	73	0%	36	0%	37	0%
ES	RDC2C007	27	19%	18	17%	9	22%
	RDC2C012	27	11%	19	16%	8	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

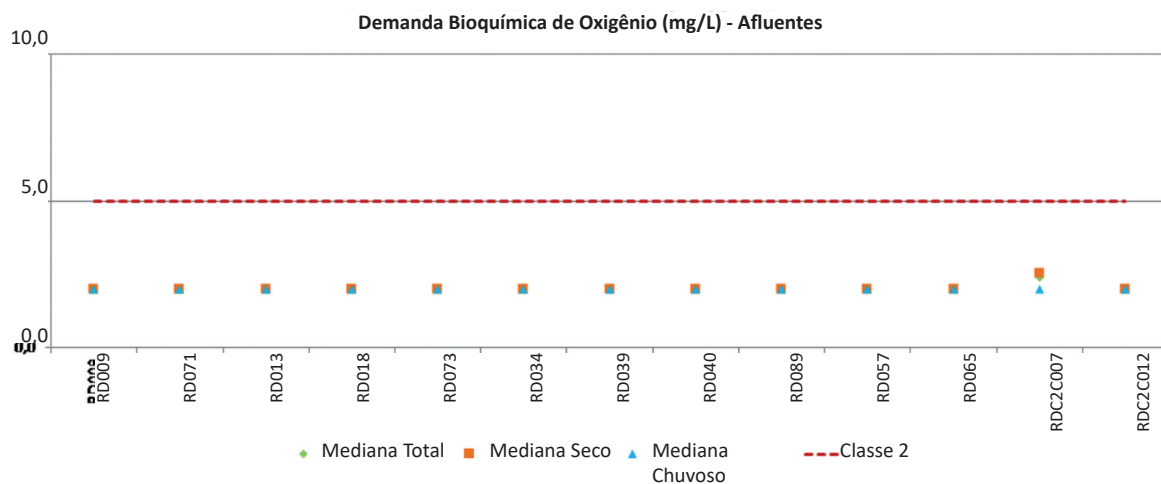
A Figura 116 ilustra o comportamento dos valores medianos de DBO para os períodos seco, chuvoso e total, nas estações de monitoramento do rio Doce. Conforme se observa, não foram registradas variações de valores significativas entre os períodos. Apenas nas estações de monitoramento RDC1D025 e RDC1E030, ambas no município de Linhares, foram registrados valores distintos, mais elevados, na estação chuvosa. Os valores medianos estiveram sempre abaixo do limite máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

Figura 116 – Medianas dos valores de demanda bioquímica de oxigênio para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



A Figura 117 ilustra o comportamento dos valores medianos de DBO para os períodos seco, chuvoso e total, nas estações de monitoramento em afluentes do rio Doce. Assim como se observou anteriormente, o comportamento do parâmetro nos afluentes foi o mesmo observado para o rio Doce, sem variações que merecem menção entre os períodos seco, chuvoso e total. Os valores medianos estiveram sempre abaixo do limite máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

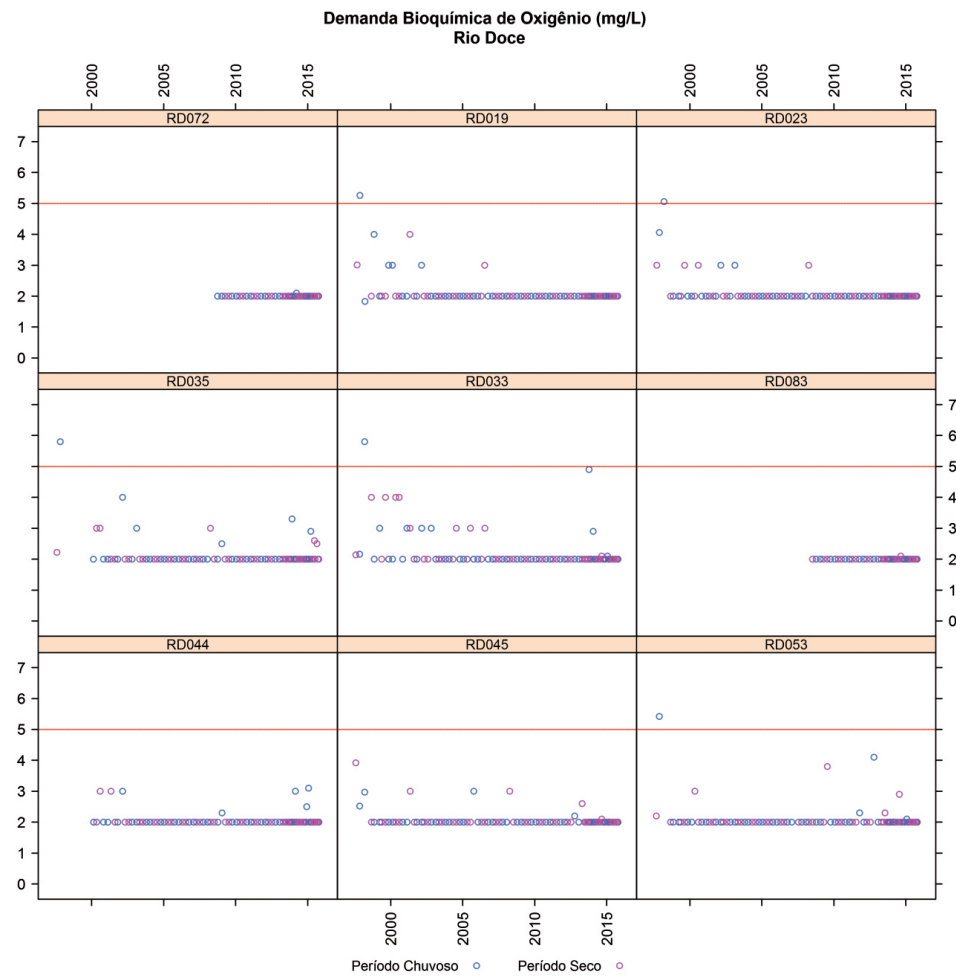
Figura 117 – Medianas dos valores de demanda bioquímica de oxigênio para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

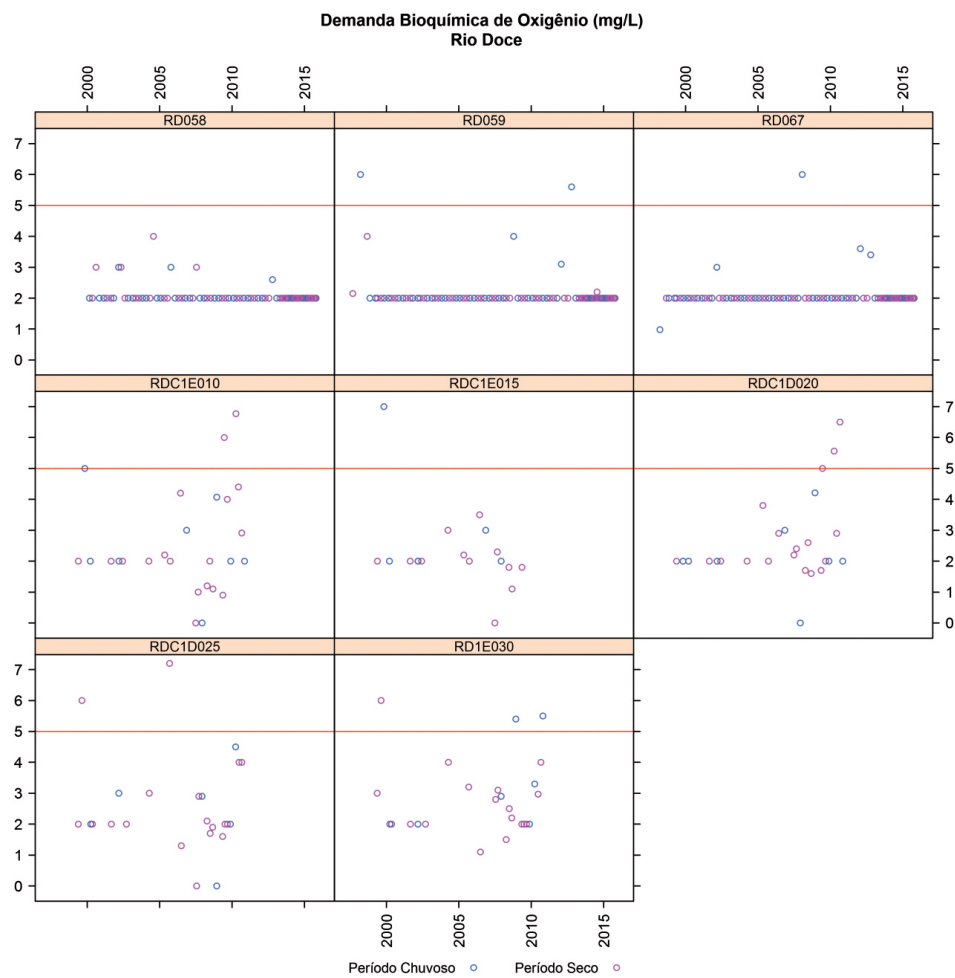
Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de DBO, distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 118 e Figura 119) e em seus afluentes (Figura 120 e Figura 121), de montante para jusante.

Figura 118 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).



Com relação aos dados advindos de estações do IGAM no rio Doce (Figura 118), observa-se que os poucos desacordos com a Resolução CONAMA nº 357/2005 foram registrados somente no período chuvoso. Tal situação relaciona-se à lavagem do solo em períodos de chuva, que contribui para o carreamento de matéria orgânica para os corpos hídricos. A maior parte das observações registrou concentrações de 2,0 mg/L, que é o limite de quantificação do método de análise. Para as estações do IEMA (Figura 119), os dados apresentaram maior dispersão ao longo do tempo, sem tendência temporal observável. O valor de mediana da DBO ficou em torno de 2,0 mg/L, considerando as cinco estações de monitoramento. Convém destacar que o monitoramento da DBO foi encerrado no final do ano de 2010, na porção capixaba.

Figura 119 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



No caso dos tributários do rio Doce na porção mineira (Figura 120), dos quatro desacordos observados, três foram registrados também no período chuvoso. Ressalta-se que o número de desacordos foi pequeno em função do número de observações realizadas e que a maior parte dos registros esteve perto de 2,0 mg/L, que é o limite de quantificação do método. Para as estações do IEMA (Figura 121), os dados apresentaram maior dispersão ao longo do tempo, sem tendência temporal observável, assim como observado para o rio Doce, na porção capixaba. O valor de mediana da DBO para os afluentes também ficou em torno de 2,0 mg/L.

Figura 120 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).

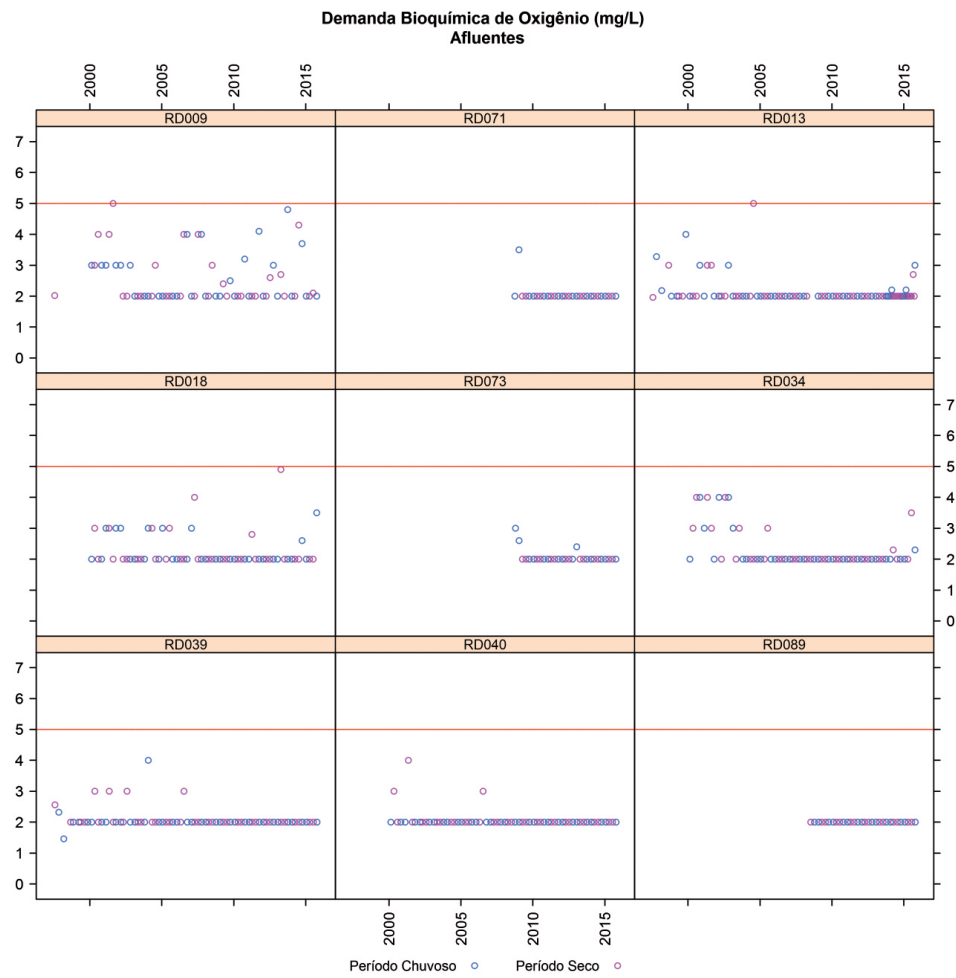
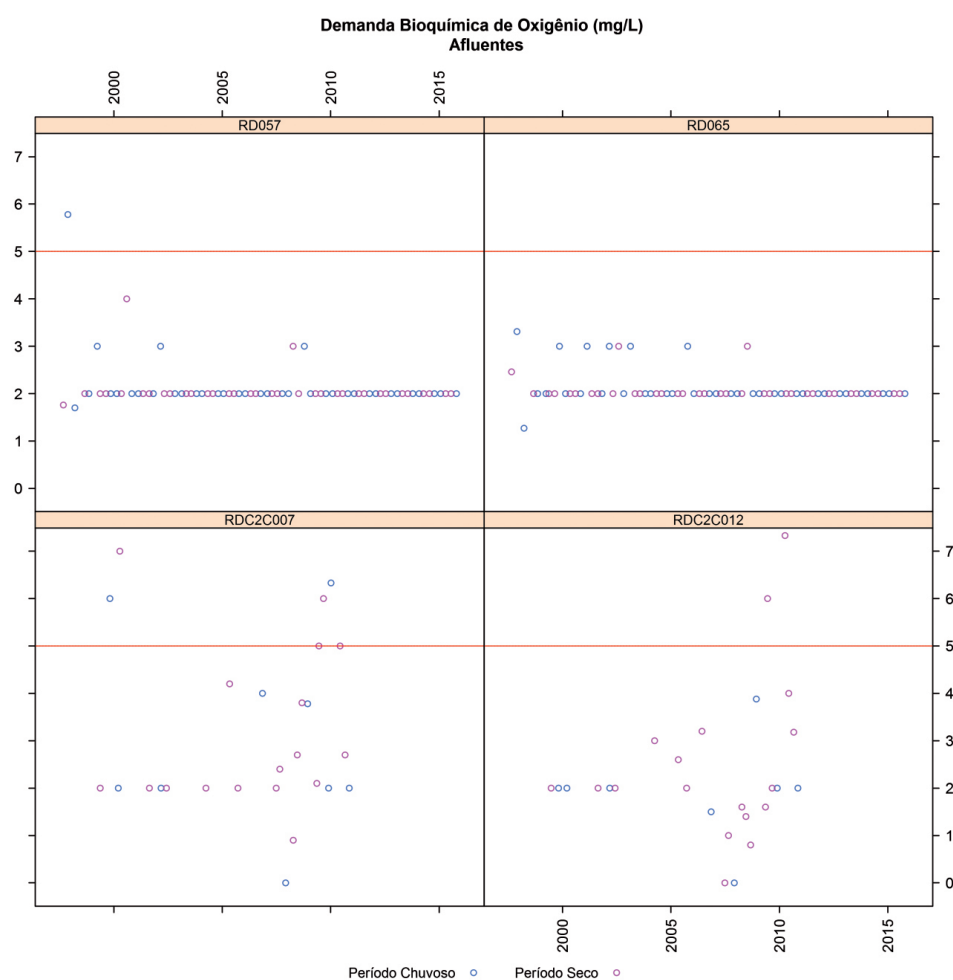


Figura 121 – Gráficos de dispersão dos dados de demanda bioquímica de oxigênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).



2.2.3.2.7 Dureza total

A fonte principal de dureza nas águas é a dissolução da rocha calcária pelo gás carbônico da água, normalmente associada à passagem da água pelo solo. Essa característica da água relaciona-se à sua capacidade de precipitar sabão, em função, principalmente, da presença de cátions como cálcio e magnésio, além de outros cátions, como ferro, manganês, estrôncio, zinco, alumínio, hidrogênio, associados a ânions carbonato e sulfato. São quatro os principais compostos que conferem dureza às águas: bicarbonato de cálcio, bicarbonato de magnésio, sulfato de cálcio e sulfato de magnésio (CETESB, 2016).

Segundo Piveli e Kato (2005), os graus de dureza da água a classificam como: branda (0 a 75 mg CaCO₃/L); moderadamente dura (75 a 150 mg CaCO₃/L); dura (150 a 300 mg CaCO₃/L) e muito dura (> 300 mg CaCO₃/L).

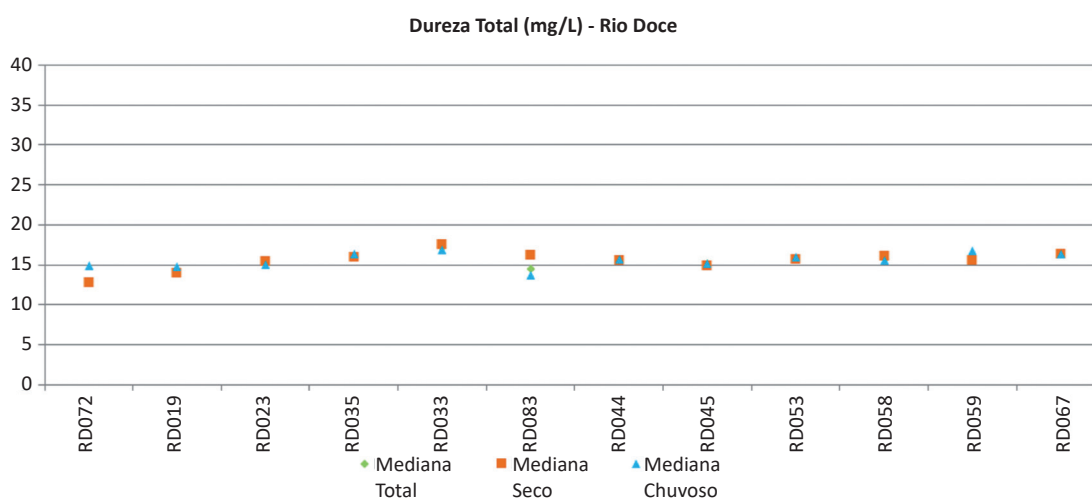
Esse parâmetro não apresenta limite legislado pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e, dessa forma, não foram calculados percentuais de desacordos. Como valor de referência, pode ser citado o Valor Máximo Permitido (VMP) de 500 mg/L, indicado na Portaria de Consolidação nº 5/2017, que dispõe sobre padrões de potabilidade.

Os resultados aqui apresentados referem-se somente às estações de monitoramento do IGAM.

Avaliação espacial

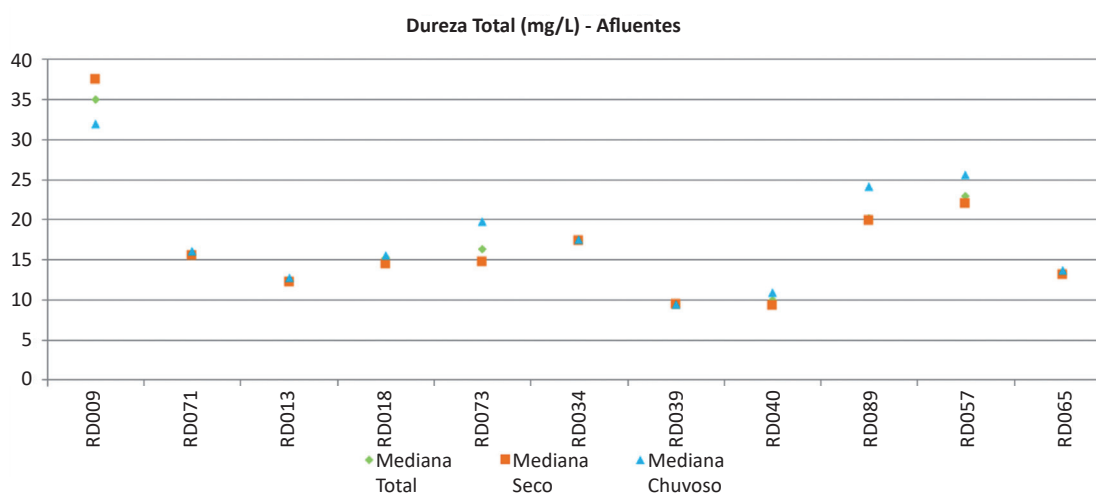
A Figura 122 ilustra o comportamento dos valores medianos de dureza total para os períodos seco, chuvoso e total, nas estações de monitoramento do rio Doce. Observou-se que os valores medianos, independentemente do período analisado, ficaram em torno de 15 mg/L (variando entre 12,7 e 17,6 mg/L), classificando a partir dessa medida as águas avaliadas como águas brandas.

Figura 122 – Medianas dos valores de dureza total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



A Figura 123 ilustra o comportamento dos valores medianos de dureza total para os períodos seco, chuvoso e total, nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce. Valor mediano mais elevado foi registrado na estação RD009, localizada no rio do Carmo, no município de Mariana. Nessa estação, a mediana mais elevada foi a do período seco (37,7 mg/L). Valores medianos mais elevados para o período chuvoso destacaram-se nas estações RD089 (rio Suaçuí Grande, em Governador Valadares) e RD057 (rio Caratinga, em Conselheiro Pena). Nas demais estações, os valores medianos variaram entre 9,5 e 25,7 mg/L. Mesmo com essas variações, as águas dos afluentes do rio Doce, quando avaliadas em valores medianos de dureza, também puderam ser classificadas como águas brandas.

Figura 123 – Medianas dos valores de dureza total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de dureza total, distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 124) e em seus afluentes (Figura 125), de montante para jusante.

Nas estações de monitoramento do rio Doce, os valores de dureza apresentaram ampla dispersão, variando entre 9,6 e 31,2 mg/L. Esses valores caracterizam águas brandas.

Entre os tributários, a estação RD009 (rio do Carmo) apresentou dados com maior dispersão, com variação entre 21,6 e 55,5 mg/L, bem como os valores mais elevados do monitoramento. Nas demais estações, houve pouca variação de valores, com concentrações variando entre 5,0 e 34,5 mg/L. Esses valores também indicam águas brandas.

Não foi observada sazonalidade definida quanto a esse parâmetro, tanto para os tributários quanto para as estações do rio Doce.

Figura 124 – Gráficos de dispersão dos dados de dureza total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.

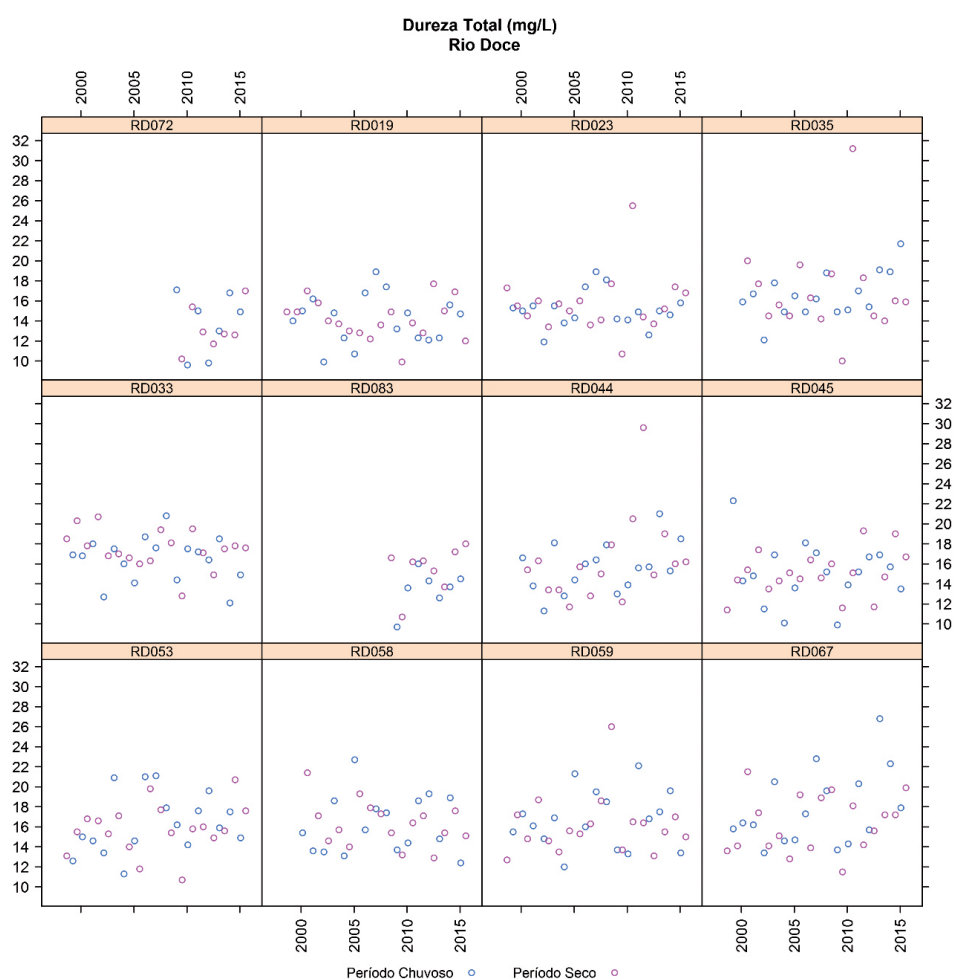
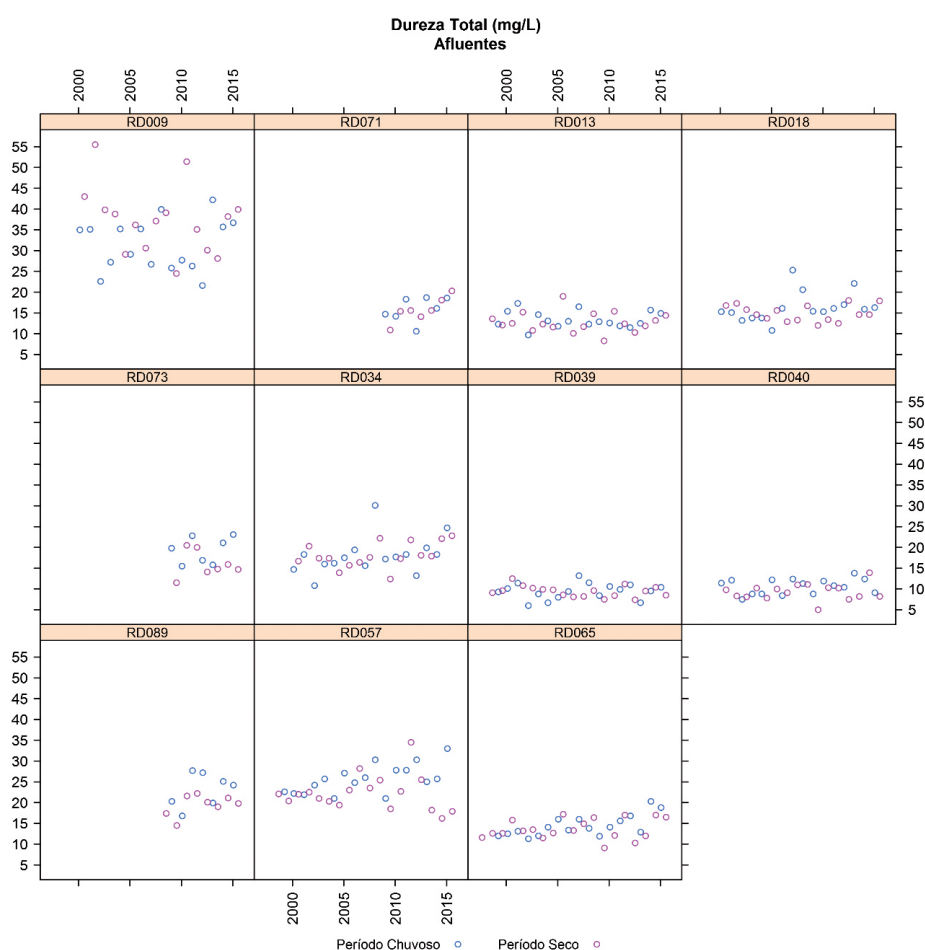


Figura 125 – Gráficos de dispersão dos dados de dureza total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.8 Fenóis totais

Segundo Piveli e Kato (2005), em águas naturais, a ocorrência de fenóis está normalmente relacionada a fontes antrópicas, como descargas de efluentes industriais. A relevância no estudo desse parâmetro baseia-se no fato de que os fenóis são tóxicos ao homem, bem como à biota e à microbiota aquática. Este é um dos motivos pelos quais, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, a concentração máxima permitida dessa substância em águas não tratadas é extremamente restritiva (inferior a 0,003 mg/L). No caso de águas tratadas, os fenóis podem ligar-se ao cloro livre, formando clorofenóis, substâncias que, além de tóxicas, conferem sabor e odor à água.

Destaca-se que, no período pré-desastre, essa variável foi avaliada somente pelo IGAM, no estado de Minas Gerais.

Avaliação de não conformidades

O percentual de desacordos para o parâmetro fenóis totais foi relativamente baixo (Tabela 40). O maior percentual de desacordos foi observado na estação RD072, localizada no rio Doce, no município de Santa Cruz do Escalvado. Mesmo com o maior percentual de desacordos (14%), não foram registradas diferenças de valores entre os percentuais de desacordos para os períodos seco, chuvoso e total. Nas demais estações de monitoramento do rio Doce, o parâmetro fenóis totais ou não apresentou desacordos (0%) ou apresentou desacordos em relação à Resolução CONAMA nº 357/2005, variando entre 1 e 9%.

Tabela 40 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fenóis totais no rio Doce.

		Rio Doce					
		Fenóis Totais					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD072	14	14%	7	14%	7	14%
	RD019	68	3%	34	3%	34	3%
	RD023	67	1%	34	3%	33	0%
	RD035	55	2%	27	4%	28	0%
	RD033	69	6%	34	3%	35	9%
	RD083	15	0%	8	0%	7	0%
	RD044	32	3%	16	0%	16	6%
	RD045	36	3%	18	0%	18	6%
	RD053	35	0%	18	0%	17	0%
	RD058	41	2%	20	0%	21	5%
	RD059	36	3%	18	6%	18	0%
	RD067	45	0%	22	0%	23	0%

Nota: n: número de observações.

Mesma situação se observa na avaliação dos resultados de desacordos das estações de monitoramento instaladas em afluentes do rio Doce, no estado de Minas Gerais. Maior percentual de desacordos (11%) foi registrado no período chuvoso, na estação RD057, no rio Caratinga, no município de Conselheiro Pena. Nas demais, ou não foram registrados desacordos (0%) ou estes variaram entre 2 e 9% (Tabela 41).

Tabela 41 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fenóis totais em afluentes do rio Doce.

		Afluentes					
		Fenóis Totais					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD009	63	2%	32	3%	31	0%
	RD071	29	3%	14	0%	15	7%
	RD013	50	0%	25	0%	25	0%
	RD018	62	0%	31	0%	31	0%
	RD073	14	0%	7	0%	7	0%
	RD034	46	7%	23	4%	23	9%
	RD039	72	4%	36	3%	36	6%
	RD040	32	3%	16	0%	16	6%
	RD089	15	0%	8	0%	7	0%
	RD057	36	6%	18	0%	18	11%
	RD065	68	4%	34	3%	34	6%

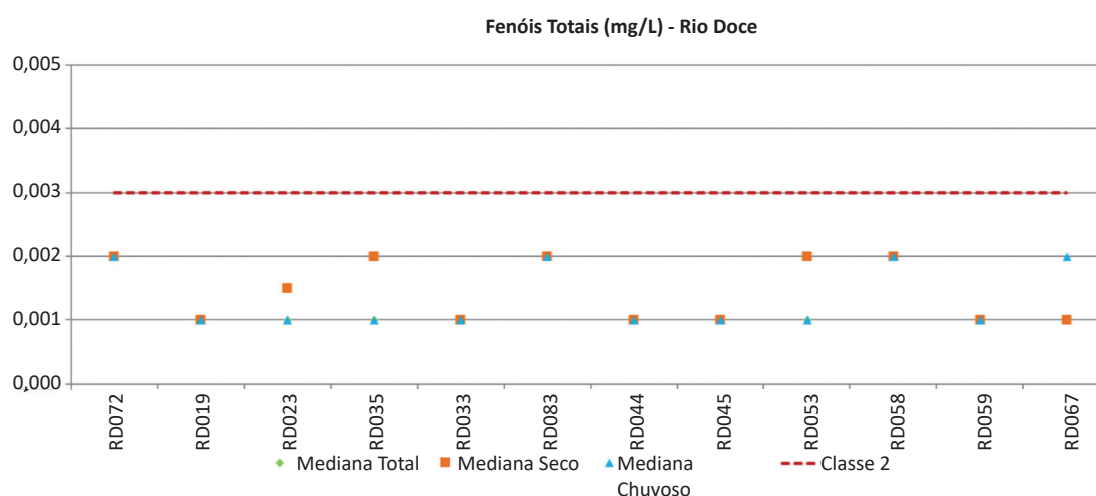
Nota: n: número de observações.

Avaliação temporal

A Figura 126 ilustra o comportamento dos valores medianos de fenóis totais para os períodos seco, chuvoso e total, nas estações de monitoramento do rio Doce. De forma geral, observaram-se valores mais elevados de fenóis no período seco nas estações RD023, RD035 e RD053. Na estação RD067, o valor mediano do período de chuva destacou-se em relação aos demais períodos avaliados. Nas demais estações não houve diferença entre os valores registrados nos três diferentes períodos analisados.

Os valores medianos encontram-se todos abaixo do limite máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de Classe 2, como o rio Doce.

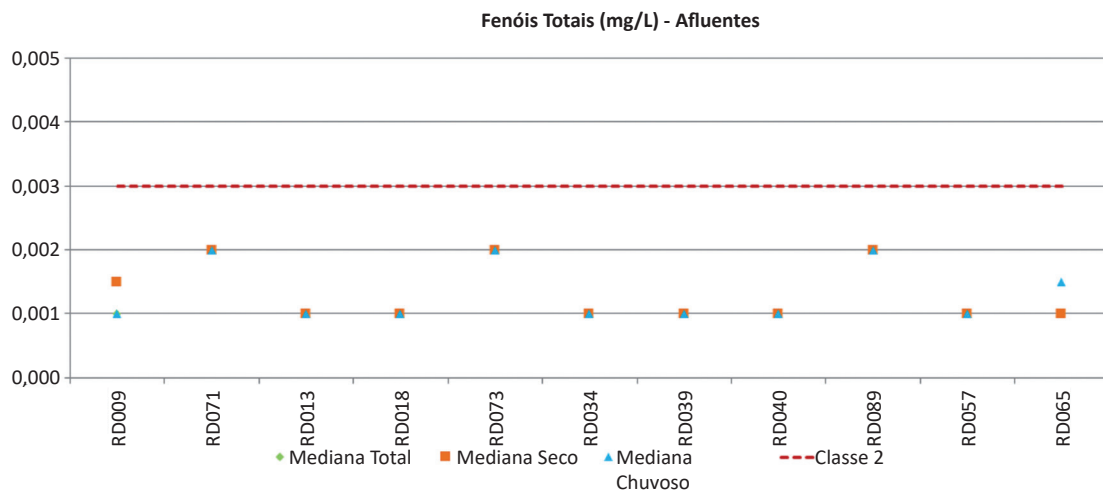
Figura 126 – Medianas dos valores de fenóis totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



A Figura 127 ilustra o comportamento dos valores medianos de fenóis totais para os períodos seco, chuvoso e total, nas estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce. Com relação às diferenças sazonais, na maior parte das estações avaliadas, os valores medianos não se alteraram entre os períodos analisados, com exceção da estação RD009 (rio do Carmo), em que o valor mais elevado foi o do período seco, e da estação RD065 (rio Manhuaçu), em que o valor mediano mais elevado foi o de período chuvoso.

Assim como nas estações de monitoramento do rio Doce, nos afluentes, os valores medianos estiveram abaixo do limite máximo indicado na Resolução CONAMA nº 357/2005.

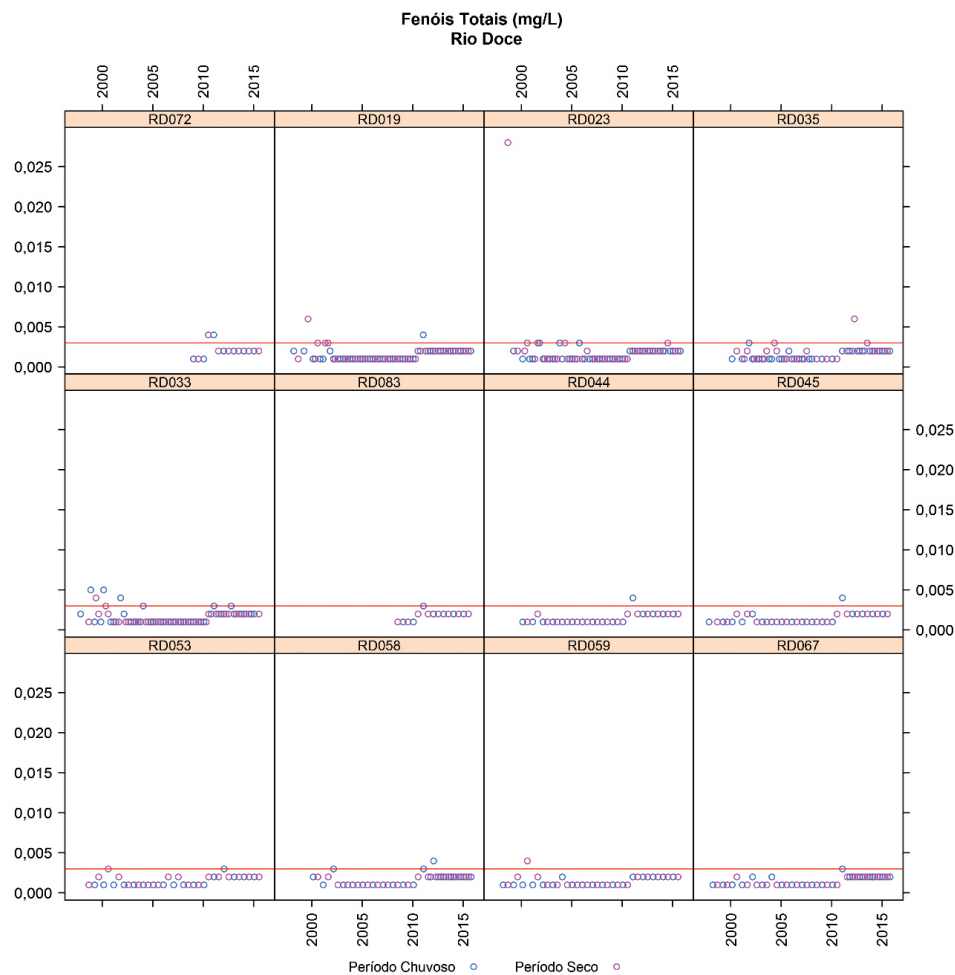
Figura 127 – Medianas dos valores de fenóis totais para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação espacial

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de fenóis totais, distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 128) e em seus afluentes (Figura 129), de montante para jusante.

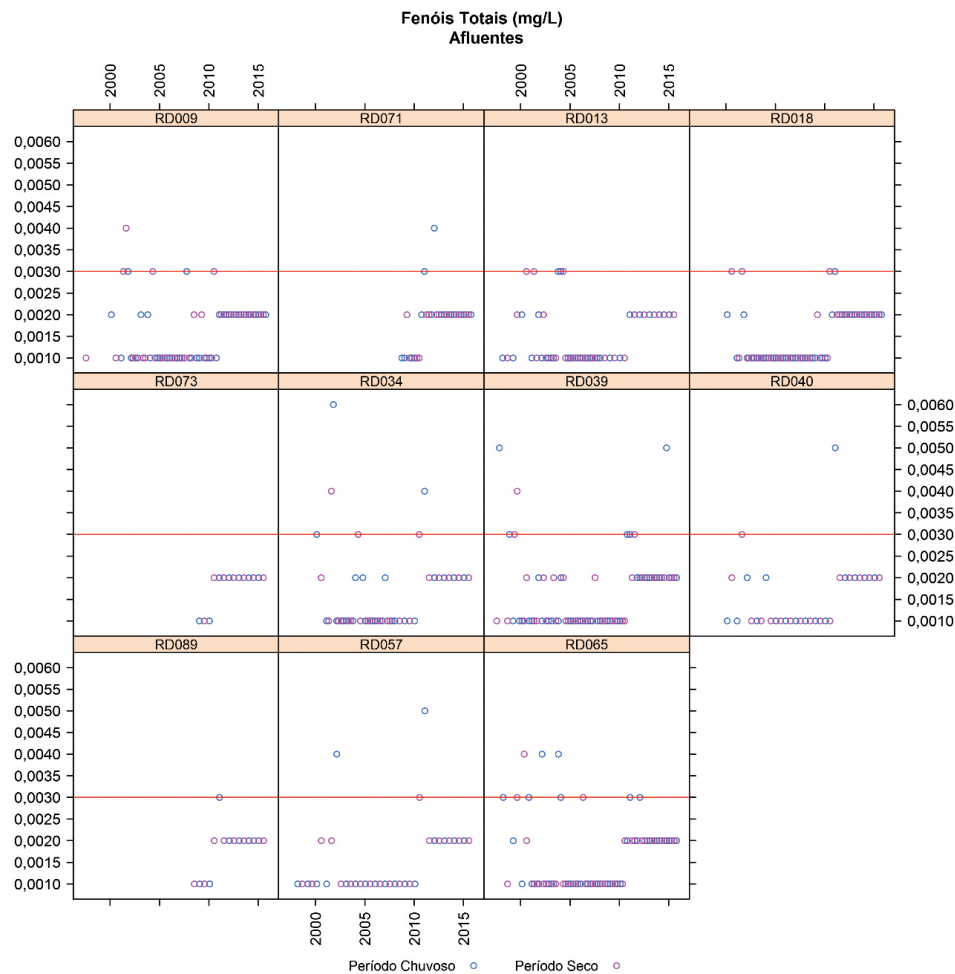
Figura 128 – Gráficos de dispersão dos dados de fenóis totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Com relação aos resultados obtidos para estações localizadas no rio Doce (Figura 128), a maior parte destes representou valores em conformidade com a legislação. Ainda assim, observaram-se poucos desacordos com o limite legislado (0,003 mg/L). Destaca-se o valor de 0,028 mg/L registrado na estação RD023, localizada entre os municípios de Marliéria e Pingo-d'Água. Esse valor representa uma concentração aproximadamente dez vezes superior ao limite legislado. Nas demais estações, poucos desacordos foram observados, sem definição sazonal para sua ocorrência.

Para os afluentes (Figura 129), desacordos também foram observados em algumas estações, sendo o valor máximo registrado na estação RD034, no rio Piracicaba, quando a concentração registrada foi de 0,006 mg/L, o dobro do limite legislado. Nas demais estações, os valores variaram entre 0,001 e 0,005 mg/L. A maior parte dos resultados representa valores conformes, sendo que a sazonalidade também não foi definida para esse parâmetro.

Figura 129 – Gráficos de dispersão dos dados de fenóis totais ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.9 *Fósforo total*

O fósforo aparece em águas naturais devido, principalmente, às descargas de esgotos sanitários. Nestes, os detergentes superfosfatados empregados em larga escala domesticamente constituem a principal fonte (15,5% de P_2O_5), além da própria matéria fecal, que é rica em proteínas. Alguns efluentes industriais, como os de indústrias de fertilizantes, pesticidas e químicas, em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios, apresentam fósforo em quantidades excessivas. As águas drenadas em áreas agrícolas e urbanas também podem provocar a presença excessiva de fósforo em águas naturais, por conta da aplicação de fertilizante no solo (PIVELI; KATO, 2005).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar concentrações de fósforo total de até 0,1 mg/L. Nesse contexto, foram avaliadas as séries históricas de dados do IGAM e do IEMA no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado. Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 42) e seus afluentes (Tabela 43).

Para as estações no rio Doce (Tabela 42), observou-se aumento dos percentuais de desacordos no período chuvoso, de modo geral. Nas estações localizadas na porção mineira, os percentuais de desacordos não passaram de 16% no período seco. Quando considerado o período chuvoso, quatro estações passaram a ter percentuais de desacordos superior a 20%: RD023 (entre os municípios de Marliéria e Pingo-d'Água), RD033 (entre os municípios de Belo Oriente e Bugre), RD044 e RD045 (em Governador Valadares), variando de 24 a 31%. Na região do estado do Espírito Santo, todas as estações passaram a ter percentuais de desacordos superiores a 20% no período chuvoso, variando de 50 a 75%. Ressalva-se, contudo, que para as estações na porção capixaba houve poucos eventos monitorados no período chuvoso.

Tabela 42 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fósforo total no rio Doce.

		Rio Doce					
		Fósforo Total					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD072	48	13%	25	16%	23	9%
	RD019	91	11%	47	6%	44	16%
	RD023	92	17%	47	6%	45	29%
	RD035	85	16%	44	16%	41	17%
	RD033	91	20%	46	9%	45	31%
	RD083	49	2%	26	0%	23	4%
	RD044	83	14%	43	5%	40	25%
	RD045	91	14%	46	4%	45	24%
	RD053	90	14%	46	11%	44	18%
	RD058	83	10%	43	5%	40	15%
	RD059	91	9%	46	4%	45	13%
	RD067	90	9%	46	2%	44	16%
	ES	RDC1E010	27	30%	19	21%	8
RDC1E015		19	32%	13	15%	6	67%
RDC1D020		27	33%	19	16%	8	75%
RDC1D025		25	28%	18	11%	7	71%
RDC1E030		25	24%	18	11%	7	57%

Nota: n: número de observações.

Para as estações localizadas nos afluentes do rio Doce (Tabela 43), também se observou um aumento do número de desacordos no período chuvoso em relação ao período seco, de modo geral. Algumas estações, contudo, já apresentavam desacordos mais relevantes mesmo no período seco: RD009 (rio Carmo), RD018 (rio Piranga), RDC2C007 (rio Guandu), RDC2C012 (rio Santa Joana), com percentuais de desacordos variando de 26 a 36%.

Tabela 43 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para fósforo total em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Fósforo Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD009	66	38%	33	36%	33	39%
	RD071	29	10%	14	14%	15	7%
	RD013	88	19%	43	14%	45	24%
	RD018	64	41%	32	41%	32	41%
	RD073	29	10%	14	7%	15	13%
	RD034	64	8%	32	6%	32	9%
	RD039	72	7%	35	3%	37	11%
	RD040	64	8%	32	6%	32	9%
	RD089	30	10%	15	7%	15	13%
	RD057	72	14%	35	0%	37	27%
	RD065	72	11%	35	0%	37	22%
ES	RDC2C007	27	41%	18	28%	9	67%
	RDC2C012	27	30%	19	26%	8	38%

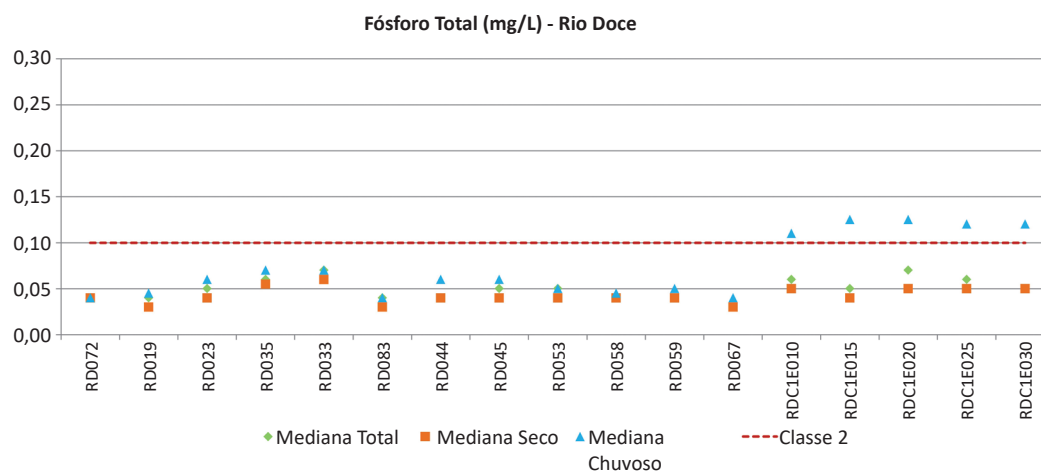
Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 130 e a Figura 131 apresentam os valores de mediana de fósforo total para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. Para a maioria das estações, observaram-se valores de mediana relativos ao período chuvoso superiores aqueles do período seco. Nas estações do IGAM, a diferença foi menos evidente do que a observada para as estações do IEMA. Contudo, o número de observações no período chuvoso para essas estações do IEMA foi inferior à metade do número de eventos no período seco, o que pode ter influenciado o resultado.

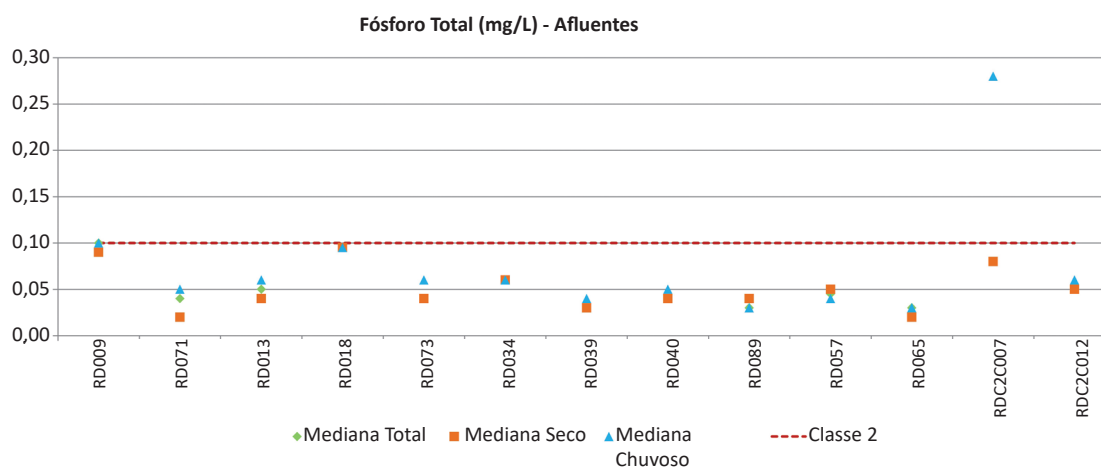
Considerando as medianas do período total, observou-se incremento de valores até a estação RD033, a jusante de Ipatinga/MG. Na estação RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho/MG e Periquito/MG, pouco populosos, houve uma redução na concentração de fósforo total. Os valores aumentaram novamente a partir disso. Exceção se fez na estação RD067, entre os municípios de Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES, onde novamente observou-se redução de valores.

Figura 130 – Medianas dos valores de fósforo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Nos afluentes (Figura 131), uma maior variação foi observada entre as estações de monitoramento. Em relação aos valores de mediana do período total, observaram-se concentrações mais elevadas nas estações RD009 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca) e RDC2007 (rio Guandu), enquanto nas estações RD039 (rio Santo Antônio) e RD065 (rio Manhuaçu) registraram-se os menores valores.

Figura 131 – Medianas dos valores de fósforo total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de fósforo total distribuídos ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante. Em virtude de o número de estações ser elevado, os gráficos foram divididos em parte I (Figura 132) e parte II (Figura 133).

De modo geral, os dados apresentam-se bastante dispersos, sem tendências de comportamento observáveis. Os desacordos não se restringem a períodos únicos, mas sim ocorrem em diversos momentos do período monitorado, em especial no período chuvoso. Para a estação RD083, que teve seu monitoramento iniciado mais tardiamente, no ano de 2008, registrou-se um único desacordo no período avaliado. Para algumas estações, foram observadas concentrações mais elevadas, em algum momento: na RD019 (entre os municípios de Rio Casca e São Domingos do Prata), na RD033 (entre os municípios de Belo Oriente e Bugre), na RD045 (em Governador Valadares), na RD053 (entre os municípios de Galileia e Tumiritinga), na RD059 (em Resplendor), na RD067 (entre os municípios de Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES), e nas estações localizadas no Espírito Santo, nos municípios de Colatina e Linhares, com exceção da estação situada mais a jusante.

Figura 132 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).

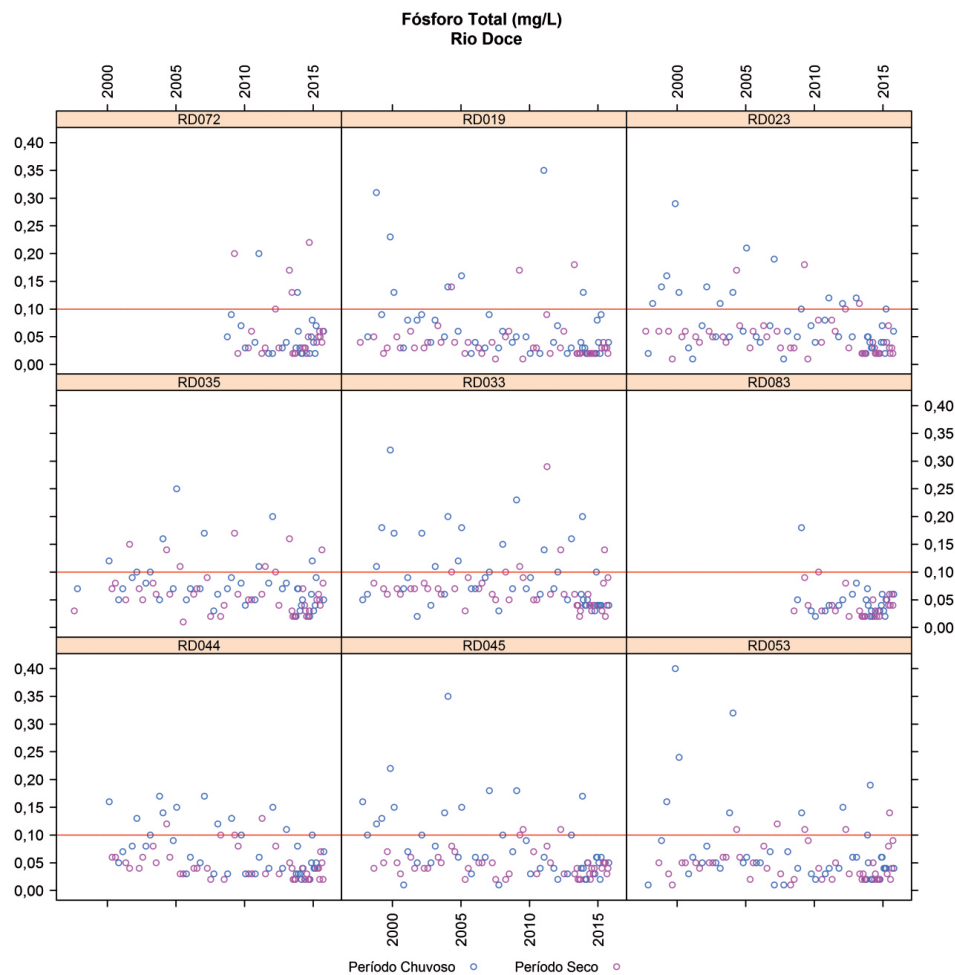
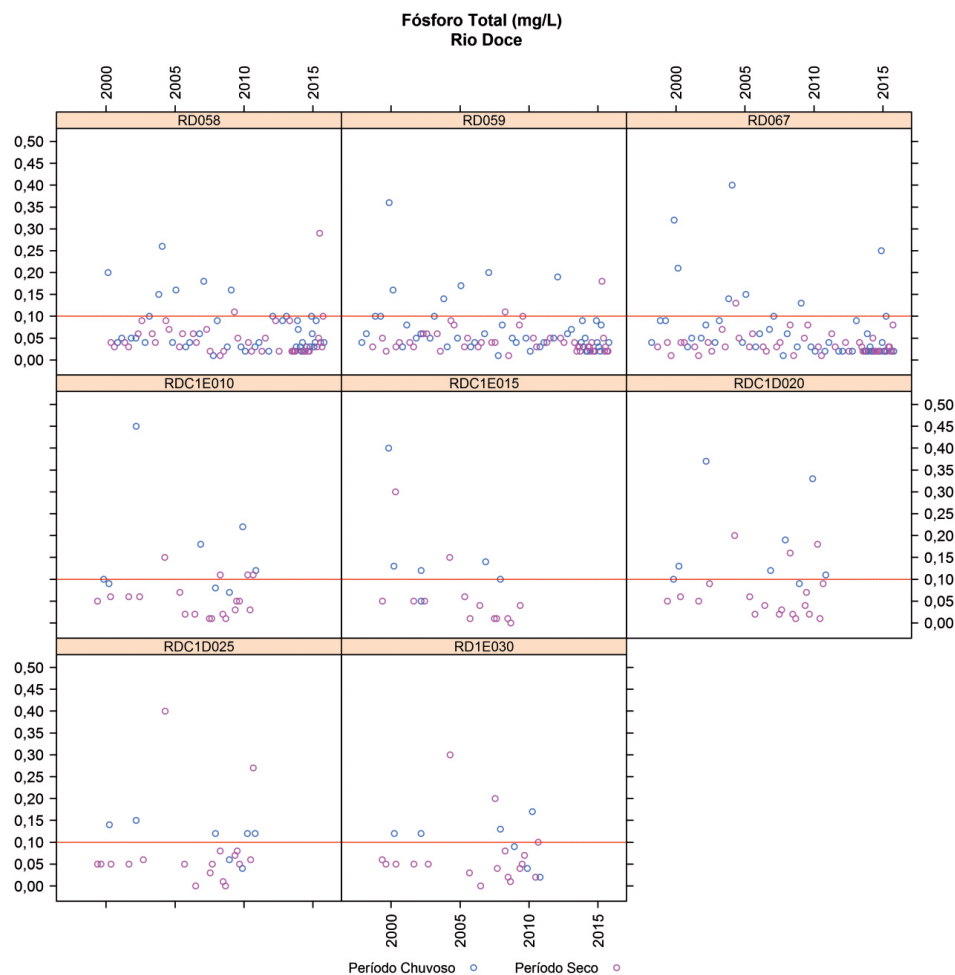


Figura 133 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



Para as estações localizadas em afluentes do rio Doce (Figura 134 e Figura 135), os desacordos também não ocorreram em momentos específicos do monitoramento. Considerando o valor médio e de mediana das concentrações, as estações RD009 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca) e RDC2C007 (rio Guandu) foram as que apresentaram os valores mais elevados. Concentrações superiores a quatro vezes o limite legislado foram observadas nas estações RD013 (rio Piranga), RD018 (rio Casca), RD039 (rio Santo Antônio), RD057 (rio Caratinga), RD065 (rio Manhuaçu), RDC2007 (rio Guandu) e RDC2012 (rio Santa Joana). Nesta última, registrou-se concentração superior a 10 mg/L (100 vezes o limite legislado), contudo, as demais variáveis avaliadas na mesma campanha apresentaram valores normais. Dessa forma, tal resultado deve ser analisado com reserva.

Figura 134 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).

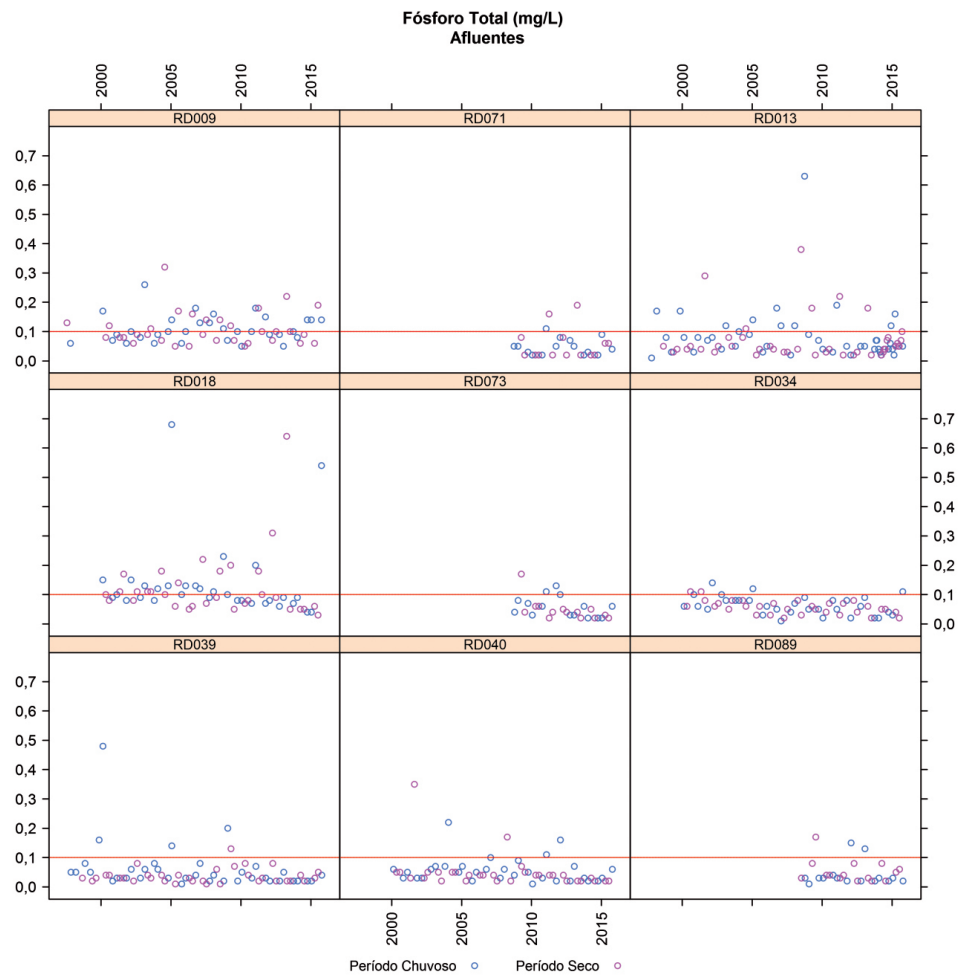
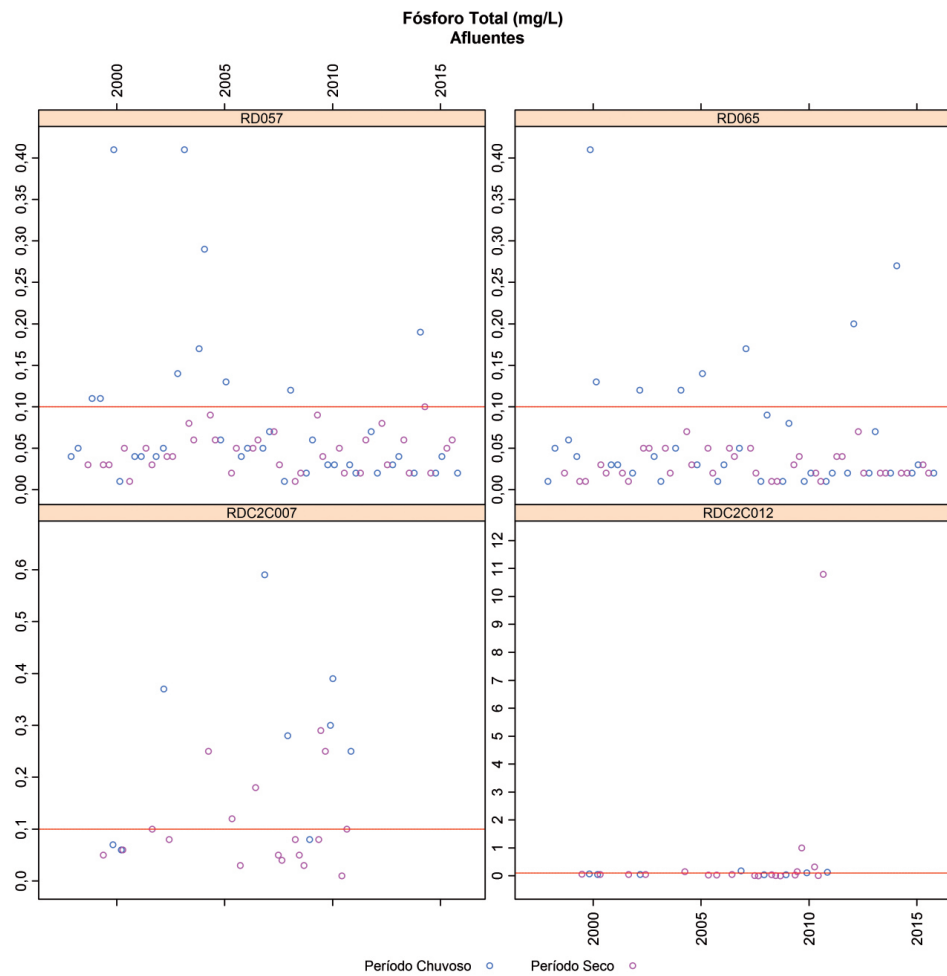


Figura 135 – Gráficos de dispersão dos dados de fósforo total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).



2.2.3.2.10 Nitrogênio total

De acordo com Esteves (1998), o nitrogênio é um dos elementos mais importantes no metabolismo de ecossistemas aquáticos, em especial pela sua participação na formação de proteínas. Assim como o fósforo, pode atuar como fator limitante à produtividade do ecossistema. Ainda de acordo com o autor supracitado, fontes de nitrogênio às águas continentais são: a chuva, o material orgânico e inorgânico de origem alóctone e a fixação de nitrogênio molecular no próprio lago. Segundo ANA (2017), as fontes antrópicas de aporte de nitrogênio ao corpo de água são variadas. As principais seriam os esgotos sanitários, os efluentes industriais e também o escoamento da água da chuva após a passagem por áreas agricultadas adubadas com fertilizantes nitrogenados.

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, para águas doces de Classes 1 e 2, quando o nitrogênio for o fator limitante para a eutrofização, o valor de nitrogênio total não deverá ultrapassar 2,18 mg/L para ambientes lóticos.

Uma vez que o fósforo e o nitrogênio são fixados pelo fitoplâncton, a uma taxa de produção de biomassa de 7,2:1, pode-se calcular a relação N:P para determinar qual é o nutriente limitante, conforme segue (JORGENSEN; VOLLENWEIDER, 1989):

- a) relação N:P > 12, o fósforo é o nutriente limitante;
- b) relação N:P 7 - 12, nenhum dos nutrientes é considerado como fator limitante;
- c) relação N:P < 7, o nitrogênio é o nutriente potencialmente limitante.

Sendo um dos elementos mais abundantes na atmosfera terrestre, o nitrogênio pode ser encontrado na forma molecular (N_2) e em outras formas no ambiente aquático, em função de seu estado de oxidação (formas inorgânicas: nitrito, nitrato e amônio), além das formas orgânicas (LIBÂNIO, 2005).

Formas orgânicas de nitrogênio estão presentes, por exemplo, na ureia, em aminoácidos e em peptídeos. Fontes naturais de nitrogênio orgânico em ambientes aquáticos são a lise celular e a decomposição do fitoplâncton e macrófitas aquáticas (ESTEVES, 2011). Fontes antrópicas relacionam-se especialmente a esgotos sanitários, ricos em ureia e proteínas (PIVELI; KATO, 2005).

Das formas inorgânicas, o nitrato tem origem, em maior parte, em fontes orgânicas (como descargas de esgotos) e inorgânicas (como fertilizantes artificiais), a primeira incluindo as descargas de resíduos e a segunda compreendendo estas (EPA, 2001). Já o nitrito representa uma fase intermediária entre a amônia (forma mais reduzida) e o nitrato (forma mais oxidada) (ESTEVES, 2011). O nitrogênio na forma de amônia, predominante em águas de alcalinidade elevada, é tóxico para a maioria das espécies de peixes (LIBÂNIO, 2005).

Quanto à ocorrência dessas formas de nitrogênio, em especial em rios, observa-se a presença de nitrogênio orgânico na zona de degradação, amoniacal na zona de decomposição ativa, nitrito na zona de recuperação e nitrato na zona de águas limpas (PIVELI; KATO, 2005).

Para o nitrogênio total, foram avaliados os dados disponíveis na base do IGAM e do IEMA. No entanto, para os dados do IGAM, os dados de nitrogênio total foram estimados pela soma das frações de nitrato, nitrito, nitrogênio orgânico e amoniacal, visto que a variável propriamente dita não foi avaliada por aquele Instituto. Quando os valores das frações foram inferiores ao limite de detecção do método analítico empregado em laboratório, utilizou-se o valor do próprio limite de detecção. Nesse caso, ressalta-se que pode ter ocorrido superestimação de valores.

Avaliação de não conformidades

A Tabela 44 e a Tabela 45 apresentam o número de vezes em que o nitrogênio total foi o nutriente limitante (JORGENSEN; VOLLENWEIDER, 1989) em relação ao número total de observações para cada uma das estações de monitoramento. Para as situações em que o nitrogênio total foi o fator limitante, calcularam-se, então, os percentuais de desacordo.

Nesse contexto, não foram observados desacordos para as estações de monitoramento do rio Doce (Tabela 44) e em seus afluentes (Tabela 45).

Tabela 44 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio total no rio Doce.

		Rio Doce			
		Nitrogênio Total			
Estações de monitoramento	Número de observações para o período total	Número de vezes que o nitrogênio total foi limitante	Número de desacordos	% de desacordos	
MG	RD072	31	3	0	0%
	RD019	40	2	0	0%
	RD023	49	3	0	0%
	RD035	45	4	0	0%
	RD033	40	4	0	0%
	RD083	17	1	0	0%
	RD044	36	1	0	0%
	RD045	40	4	0	0%
	RD053	39	4	0	0%
	RD058	45	2	0	0%
	RD059	40	1	0	0%
	RD067	49	2	0	0%
ES	RDC1E010	27	1	0	0%
	RDC1E015	19	1	0	0%
	RDC1D020	27	2	0	0%
	RDC1D025	25	2	0	0%
	RDC1E030	25	1	0	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 45 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio total em afluentes do rio Doce.

		Afluentes				
		Nitrogênio Total				
Estações de monitoramento	Número de observações para o período total	Número de vezes que o nitrogênio total foi limitante	Número de desacordos	% de desacordos		
MG	RD009	34	2	0	0%	
	RD071	29	2	0	0%	
	RD013	38	6	0	0%	
	RD018	34	2	0	0%	
	RD073	29	0	0	0%	
	RD034	34	2	0	0%	
	RD039	47	2	0	0%	
	RD040	34	2	0	0%	
	RD089	15	1	0	0%	
	RD057	38	2	0	0%	
	RD065	47	1	0	0%	
	ES	RDC2C007	27	4	0	0%
		RDC2C012	27	4	0	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 136 e a Figura 137 apresentam os valores de mediana de nitrogênio total para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. Mesmo que o nitrogênio total não tenha sido o fator limitante na maior parte do tempo monitorado, optou-se por deixar o limite para ambientes lóticos disposto no gráfico a título de comparação.

Para as estações do rio Doce (Figura 136), considerando as medianas referentes ao período total, notou-se uma redução de concentração de nitrogênio total na estação RD019, após a UHE Risoleta Neves, voltando a aumentar a partir de então. Nas estações de montante da porção capixaba (RDC1E010 a RDC1E020), observou-se também uma diminuição de valores. Não se observou de modo geral piora na estação chuvosa.

Para as estações situadas em afluentes do rio Doce (Figura 137), observou-se maior heterogeneidade entre elas. As estações RD009 (rio do Carmo) e RD018 (rio Casca) foram as que apresentaram maiores valores de mediana para o período total.

Figura 136 – Medianas dos valores de nitrogênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

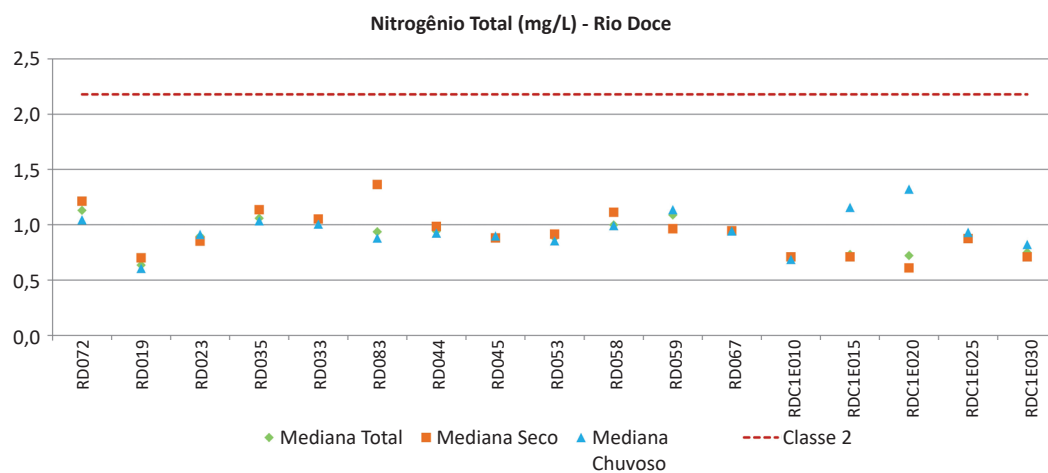
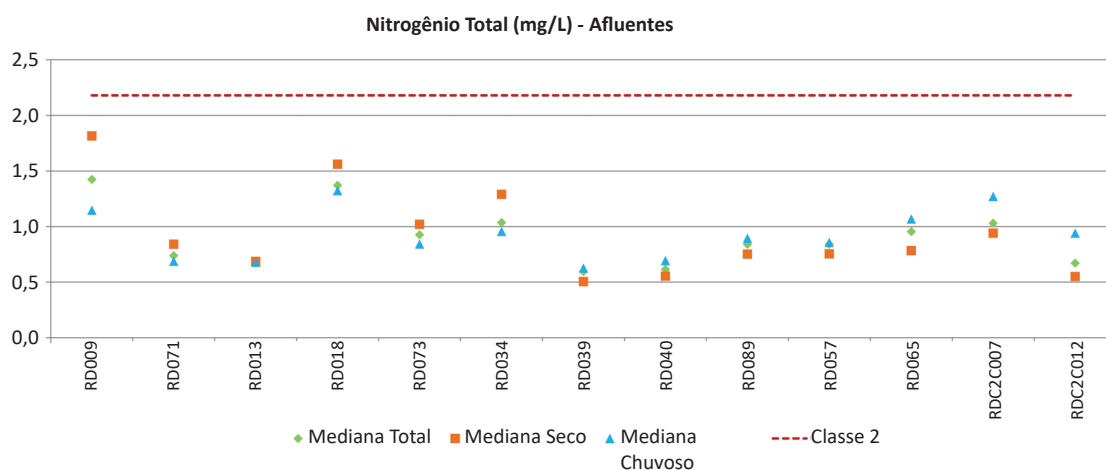


Figura 137 – Medianas dos valores de nitrogênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante. Em virtude de o número de estações ser elevado, os gráficos foram divididos em parte I (Figura 138) e parte II (Figura 139).

Para as estações localizadas na região do estado de Minas Gerais (RD072 à RD067), de modo geral, a tendência foi de valores mais elevados no final da série histórica. Na porção capixaba (RDC1E010 a RDC1E030), houve maior homogeneidade de valores ao longo do tempo.

Com exceção da estação RD019 (após a UHE Risoleta Neves) e da estação RDC1E030 (estação mais a jusante no estado do Espírito Santo, no município de Linhares), que não apresentaram concentrações superiores a 1,80 mg/L, as demais apresentaram valores superiores a 2,18 mg/L, contudo, ocorreram em baixa frequência. Lembrando que o limite de 2,18 mg/L só é válido para as situações em que o nitrogênio total for o fator limitante, mas nesse caso foi utilizado a título de comparação. A média e a mediana das concentrações de nitrogênio total para todos os pontos monitorados no rio Doce foram de 1,02 e 0,90 mg/L, respectivamente.

Figura 138 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).

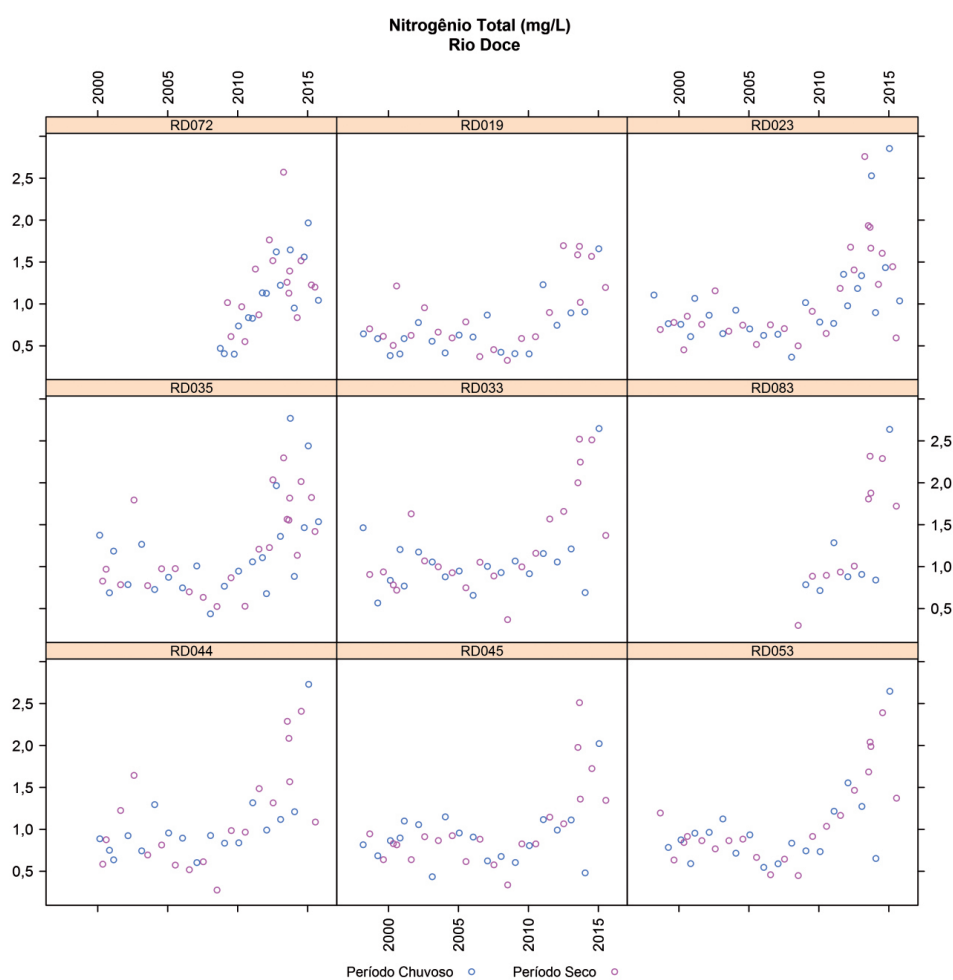
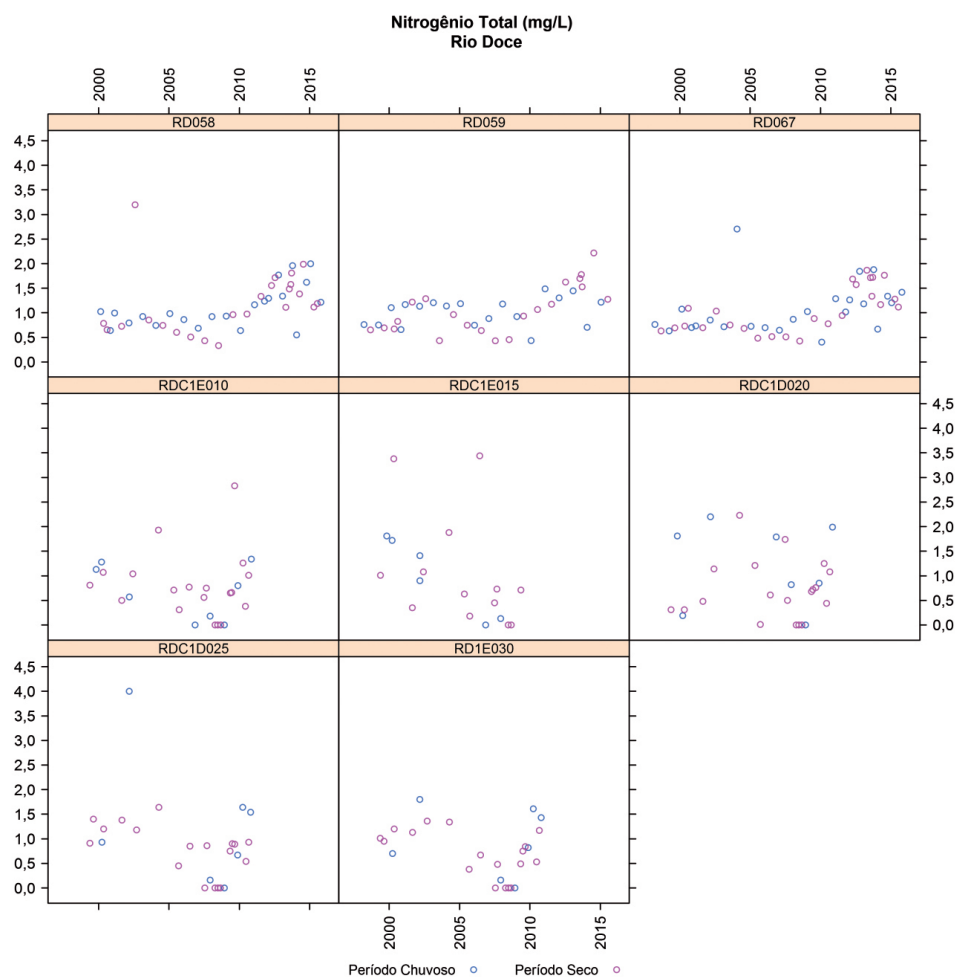


Figura 139 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



Em relação aos afluentes (Figura 140 e Figura 141), para as estações localizadas na porção mineira (RD009 a RD065), de modo geral, também se observou tendência de valores mais elevados no final da série histórica. Para as estações capixabas (RDC2C007 e RDC2C012), não se observou tal tendência.

Nas estações RD013 (rio Piranga), RD039 (rio Santo Antônio), RD040 (rio Corrente Grande), RD089 (rio Suaçuí Grande), RD057 (rio Caratinga) e RD065 (rio Manhuaçu) não foram observados valores superiores a 2,18 mg/L, enquanto nas demais ocorreram valores superiores a este, chegando a 3,52 mg/L na estação RD009 (rio do Carmo). Os valores médios de concentração de nitrogênio total não passaram de 1,63 mg/L e os valores de mediana não passaram de 1,42 mg/L, considerando todas as estações, no período total.

Figura 140 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).

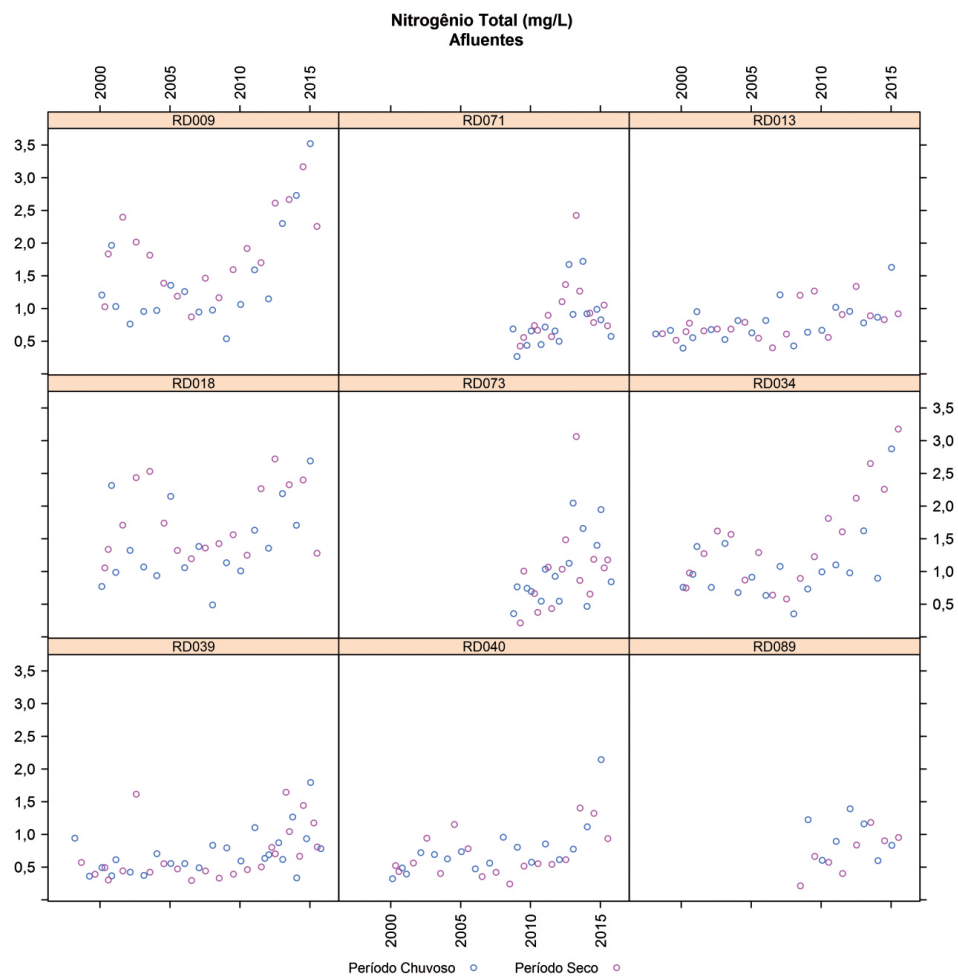
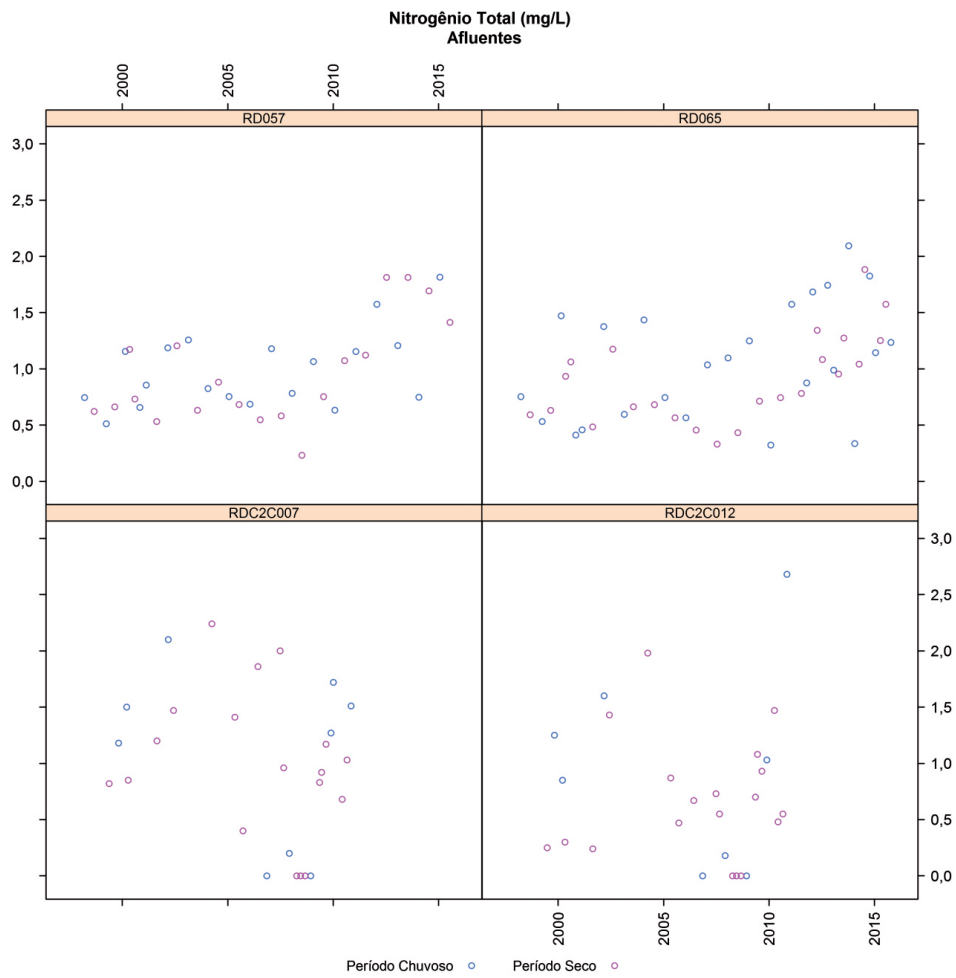


Figura 141 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).



2.2.3.2.11 Nitrato

As informações gerais sobre o parâmetro íon nitrato foram descritas no item sobre o nitrogênio total (item 2.2.3.2.10).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar concentrações de nitrato de até 10 mg/L. Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado. Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 46) e seus afluentes (Tabela 47).

De acordo com a Tabela 46 e a Tabela 47, não foram observados desacordos em relação ao limite legislado nas estações do rio Doce e nem naquelas localizadas em seus afluentes, respectivamente.

Tabela 46 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrato no rio Doce.

Rio Doce							
Nitrato							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	
MG	RD072	48	0%	25	0%	23	0%
	RD019	92	0%	47	0%	45	0%
	RD023	92	0%	47	0%	45	0%
	RD035	85	0%	44	0%	41	0%
	RD033	92	0%	47	0%	45	0%
	RD083	49	0%	26	0%	23	0%
	RD044	83	0%	43	0%	40	0%
	RD045	92	0%	47	0%	45	0%
	RD053	91	0%	47	0%	44	0%
	RD058	83	0%	43	0%	40	0%
	RD059	92	0%	47	0%	45	0%
	RD067	90	0%	46	0%	44	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 47 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrato em afluentes do rio Doce.

		Afluentes					
		Nitrato					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD009	66	0%	33	0%	33	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	89	0%	44	0%	45	0%
	RD018	64	0%	32	0%	32	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	64	0%	32	0%	32	0%
	RD039	73	0%	36	0%	37	0%
	RD040	64	0%	32	0%	32	0%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	73	0%	36	0%	37	0%
	RD065	73	0%	36	0%	37	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 142 e a Figura 143 apresentam os valores de mediana de nitrato para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente.

Para as estações do rio Doce (Figura 142), de acordo com os valores de mediana do período total, observou-se uma diminuição da concentração de nitrato na estação RD019, a jusante da UHE Risoleta Neves (Candongá). A partir daí, observaram-se incrementos na concentração, com valor mais elevado na estação RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito, a montante da UHE Baguari. Após esse empreendimento, inclusive, observou-se novo decréscimo nos valores de nitrato (RD044, no município de Governador Valadares, a jusante da UHE Baguari).

Figura 142 – Medianas dos valores de nitrato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

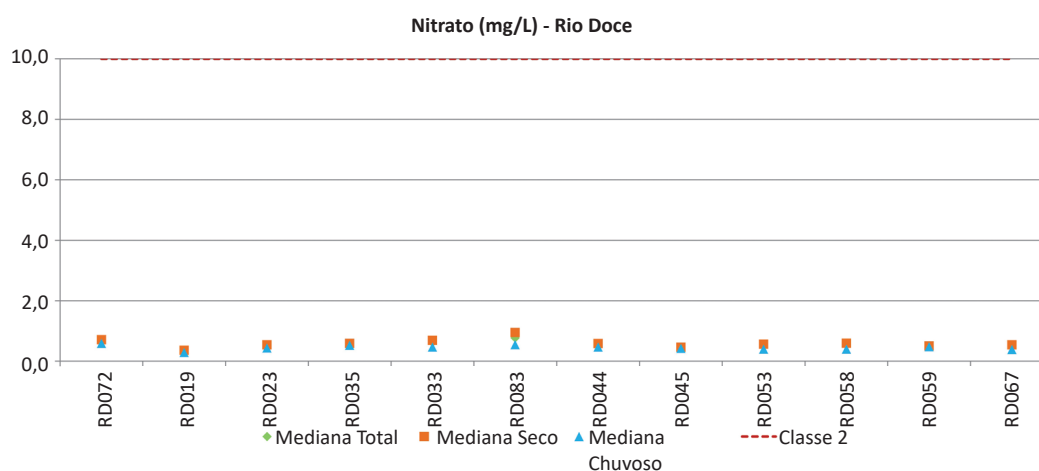
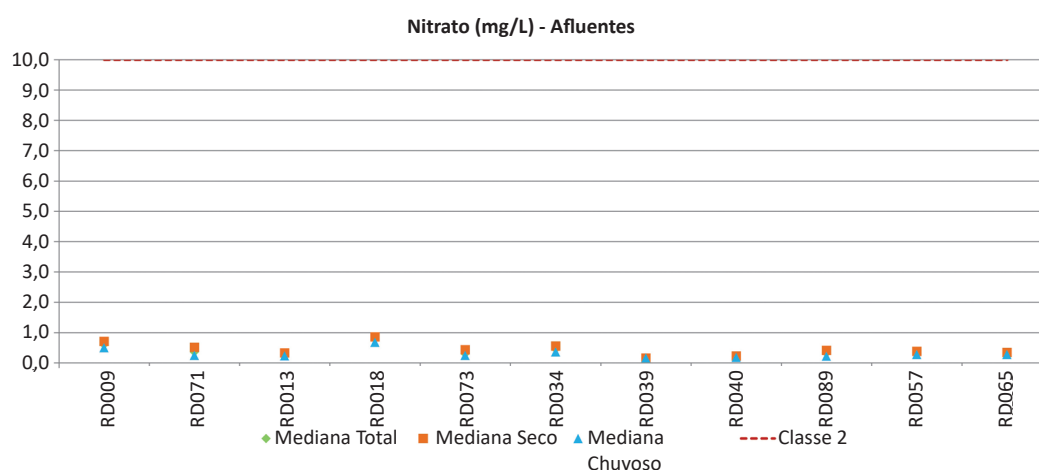


Figura 143 – Medianas dos valores de nitrato para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.

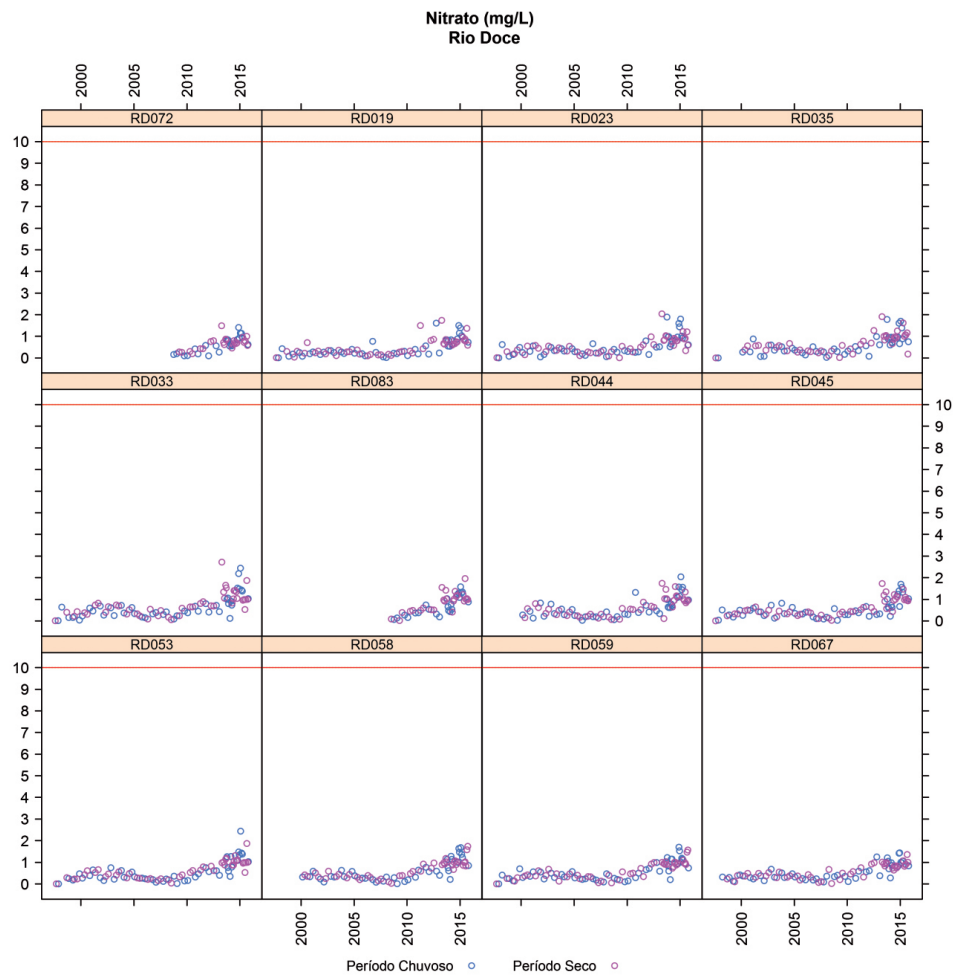


Para as estações situadas nos afluentes (Figura 143), os valores de mediana foram superiores no período seco para a maioria delas. Os valores de mediana mais elevados foram observados nas estações RD009 (rio do Carmo), RD071 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca) e RD034 (rio Piracicaba), contudo, ainda permaneceram inferiores a 1,0 mg/L.

Avaliação temporal

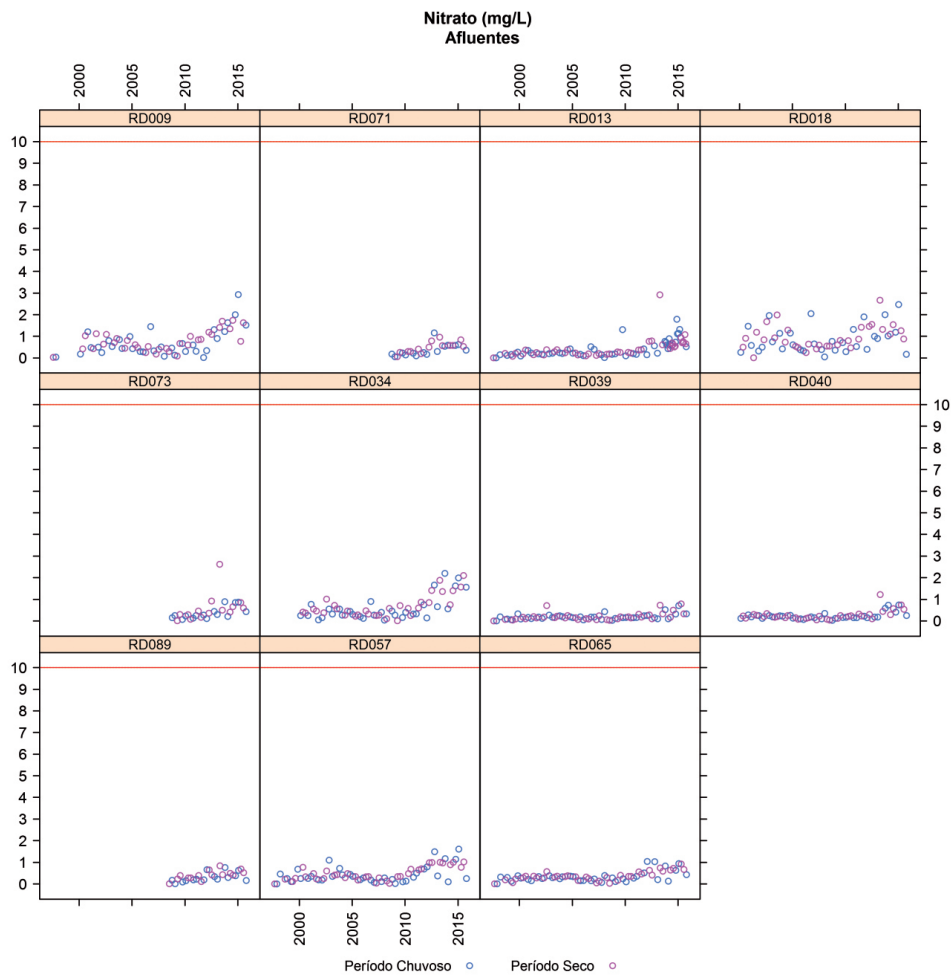
Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de nitrato ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante (Figura 144). Para as referidas estações, as concentrações de nitrato, de modo geral, não ultrapassaram 2 mg/L, sendo que nos últimos eventos monitorados as concentrações tenderam a ser mais elevadas.

Figura 144 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrato ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações localizadas em afluentes do rio Doce (Figura 145), as concentrações também raramente ultrapassaram 2 mg/L. De modo geral, também se observou tendência a valores mais elevados nos últimos eventos monitorados no período avaliado.

Figura 145 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrato ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.12 Nitrito

Para mais informações sobre o parâmetro íon nitrito, vide Nitrogênio Total (item 2.2.3.2.10).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar concentrações de nitrito de até 1,0 mg/L. Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado (item 2.2.2.1.1). Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 48) e seus afluentes (Tabela 49).

Tanto para as estações de monitoramento do rio Doce (Tabela 48) quanto para aquelas situadas em seus afluentes (Tabela 49) não foram observados desacordos com o limite legislado durante todo o período avaliado.

Tabela 48 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrito no rio Doce.

Rio Doce							
Nitrito							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD072	31	0%	16	0%	15	0%
	RD019	48	0%	26	0%	22	0%
	RD023	56	0%	29	0%	27	0%
	RD035	52	0%	27	0%	25	0%
	RD033	48	0%	26	0%	22	0%
	RD083	20	0%	12	0%	8	0%
	RD044	42	0%	23	0%	19	0%
	RD045	48	0%	26	0%	22	0%
	RD053	47	0%	26	0%	21	0%
	RD058	50	0%	26	0%	24	0%
	RD059	48	0%	26	0%	22	0%
	RD067	55	0%	28	0%	27	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 49 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrito em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Nitrito							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD009	42	0%	22	0%	20	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	46	0%	24	0%	22	0%
	RD018	40	0%	21	0%	19	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	40	0%	21	0%	19	0%
	RD039	54	0%	27	0%	27	0%
	RD040	40	0%	21	0%	19	0%
	RD089	19	0%	10	0%	9	0%
	RD057	46	0%	24	0%	22	0%
	RD065	54	0%	27	0%	27	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 146 e a Figura 147 apresentam os valores de mediana de nitrito para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. Para as estações localizadas no rio Doce (Figura 146), os valores mostraram-se bastante homogêneos ao longo do percurso do rio. Para o período total, as medianas não passaram de 0,010 mg/L.

Figura 146 – Medianas dos valores de nitrito para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

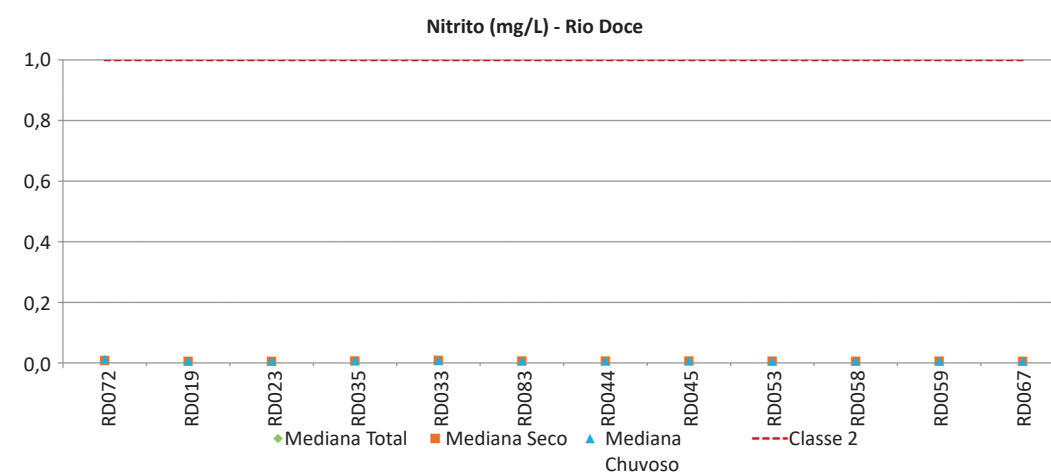
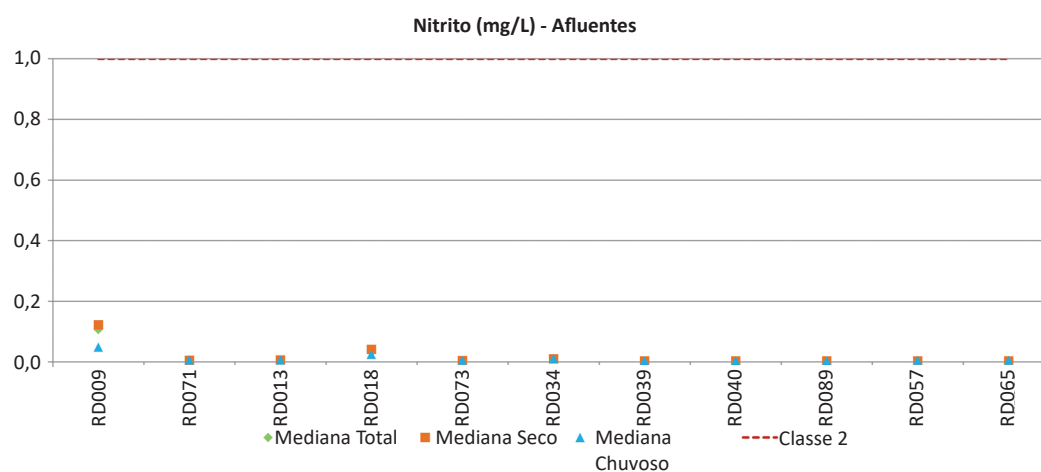


Figura 147 – Medianas dos valores de nitrito para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.

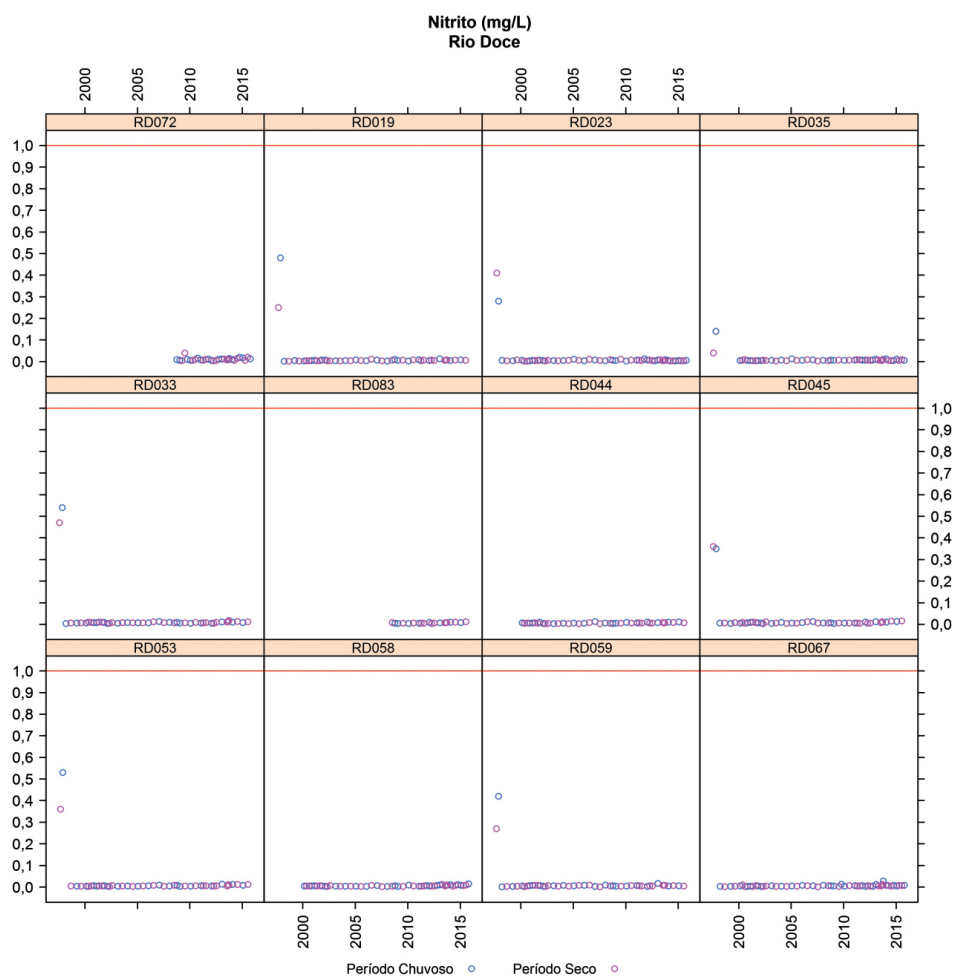


Para as estações em afluentes do rio Doce (Figura 147), observaram-se concentrações mais elevadas, em termos de mediana, nas estações RD009 (rio do Carmo) e RD018 (rio Casca), 0,107 e 0,032 mg/L, respectivamente. Para as demais estações em afluentes, a mediana não passou de 0,011 mg/L.

Avaliação temporal

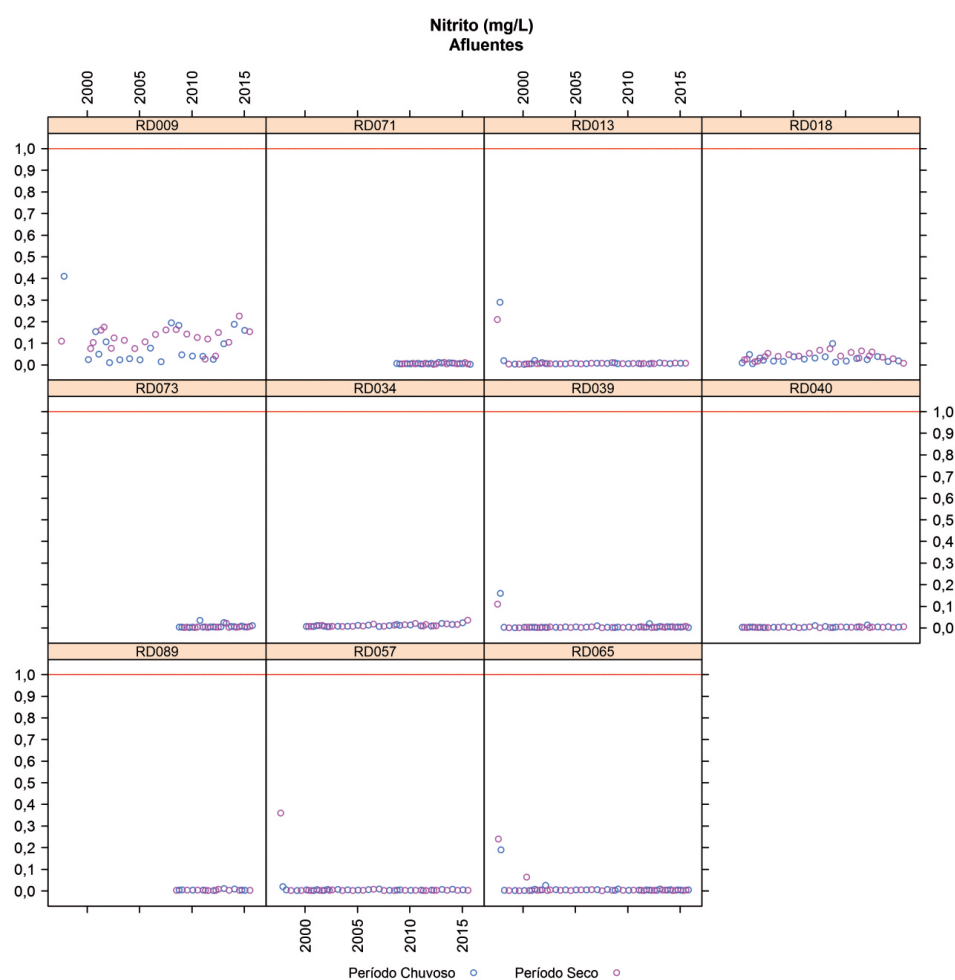
Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de nitrito ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante (Figura 148). Para as referidas estações, as concentrações de nitrito, de modo geral, não ultrapassaram 0,1 mg/L, apresentando-se bastante homogêneas, salvo raras exceções observadas no início do monitoramento para as estações RD019 (entre os municípios de Rio Casca e São Domingos do Prata), RD023 (entre os municípios de Marliéria e Pingo-d'Água), RD033 (entre os municípios de Belo Oriente e Bugre), RD045 (em Governador Valadares), RD053 (entre os municípios de Galileia e Tumiritinga) e RD059 (em Resplendor).

Figura 148 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrito ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações localizadas em afluentes do rio Doce (Figura 149), observou-se maior variação de dados na estação RD009, no rio do Carmo, com valores entre 0,011 e 0,410 mg/L. Nas estações RD013 (rio Piranga), RD039 (rio Santo Antônio), RD057 (rio Caratinga) e RD065 (rio Manhuaçu), as concentrações não passaram de 0,360 mg/L. Nas demais estações, houve pouca variação ao longo do tempo e os valores atingiram no máximo 0,100 mg/L.

Figura 149 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrito ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.13 Nitrogênio amoniacal

Para mais informações sobre o nitrogênio amoniacal, vide Nitrogênio Total (item 2.2.3.2.10).

Avaliação de não conformidades

Na Resolução CONAMA nº 357/2005, existem quatro valores de referência para o nitrogênio amoniacal para rios de Classe 2, os quais estão relacionados a quatro faixas de pH, quais sejam: 3,7 mg/L ($\text{pH} \leq 7,5$); 2,0 mg/L ($7,5 < \text{pH} \leq 8,0$); 1,0 mg/L (para $8,0 < \text{pH} \leq 8,5$) e 0,5 mg/L (para $\text{pH} > 8,5$). Dessa forma, primeiramente foi verificada a faixa de pH da referida amostra de água e, então, calcularam-se possíveis desacordos com os limites supracitados. Tal avaliação foi realizada somente para a base de dados do IGAM, visto que o rol de parâmetros avaliados pelo IEMA não contemplava tal parâmetro.

Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 50) e seus afluentes (Tabela 51). De acordo com as referidas tabelas, não foram observados desacordos para o nitrogênio amoniacal no rio Doce e em seus afluentes, no período avaliado.

Tabela 50 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio amoniacal no rio Doce.

Rio Doce							
Nitrogênio Amoniacal							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD072	48	0%	25	0%	23	0%
	RD019	92	0%	47	0%	45	0%
	RD023	92	0%	47	0%	45	0%
	RD035	85	0%	44	0%	41	0%
	RD033	92	0%	47	0%	45	0%
	RD083	49	0%	26	0%	23	0%
	RD044	83	0%	43	0%	40	0%
	RD045	92	0%	47	0%	45	0%
	RD053	91	0%	47	0%	44	0%
	RD058	83	0%	43	0%	40	0%
	RD059	92	0%	47	0%	45	0%
	RD067	90	0%	46	0%	44	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 51 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio amoniacal em afluentes do rio Doce.

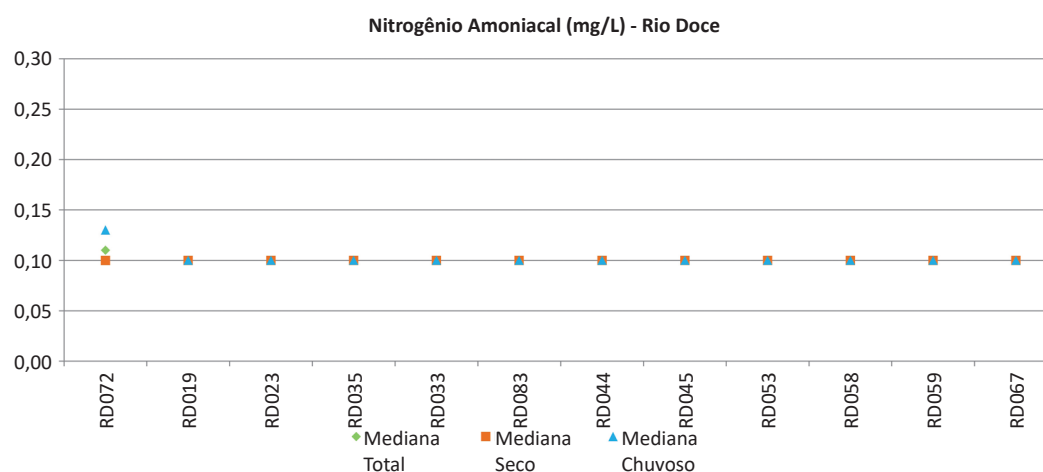
Afluentes							
Nitrogênio Amoniacal							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD009	66	0%	33	0%	33	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	89	0%	44	0%	45	0%
	RD018	64	0%	32	0%	32	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	64	0%	32	0%	32	0%
	RD039	73	0%	36	0%	37	0%
	RD040	64	0%	32	0%	32	0%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	73	0%	36	0%	37	0%
	RD065	73	0%	36	0%	37	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

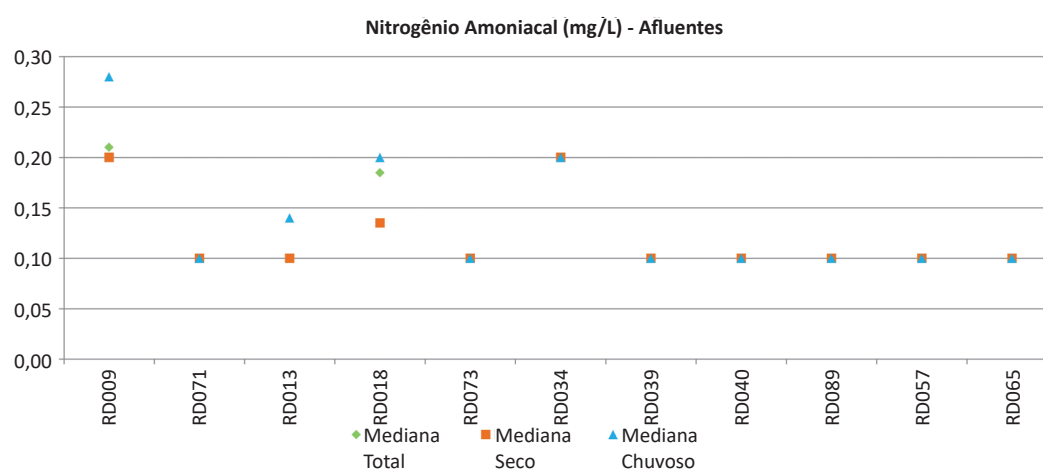
A Figura 150 e a Figura 151 apresentam os valores de mediana de nitrogênio amoniacal para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. Para as estações localizadas no rio Doce (Figura 150), os valores mostraram-se bastante homogêneos ao longo do percurso do rio, com exceção da estação RD072, entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, logo após a confluência dos rios do Carmo e Piranga, que apresentou valores de mediana ligeiramente mais elevados.

Figura 150 – Medianas dos valores de nitrogênio amoniacal para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Nas estações situadas em afluentes do rio Doce (Figura 151), observou-se maior heterogeneidade entre as estações RD009 (rio do Carmo) e RD034 (rio Piracicaba). A partir da estação RD039 (rio Santo Antônio), as medianas apresentaram-se constantes.

Figura 151 – Medianas dos valores de nitrogênio amoniacal para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.

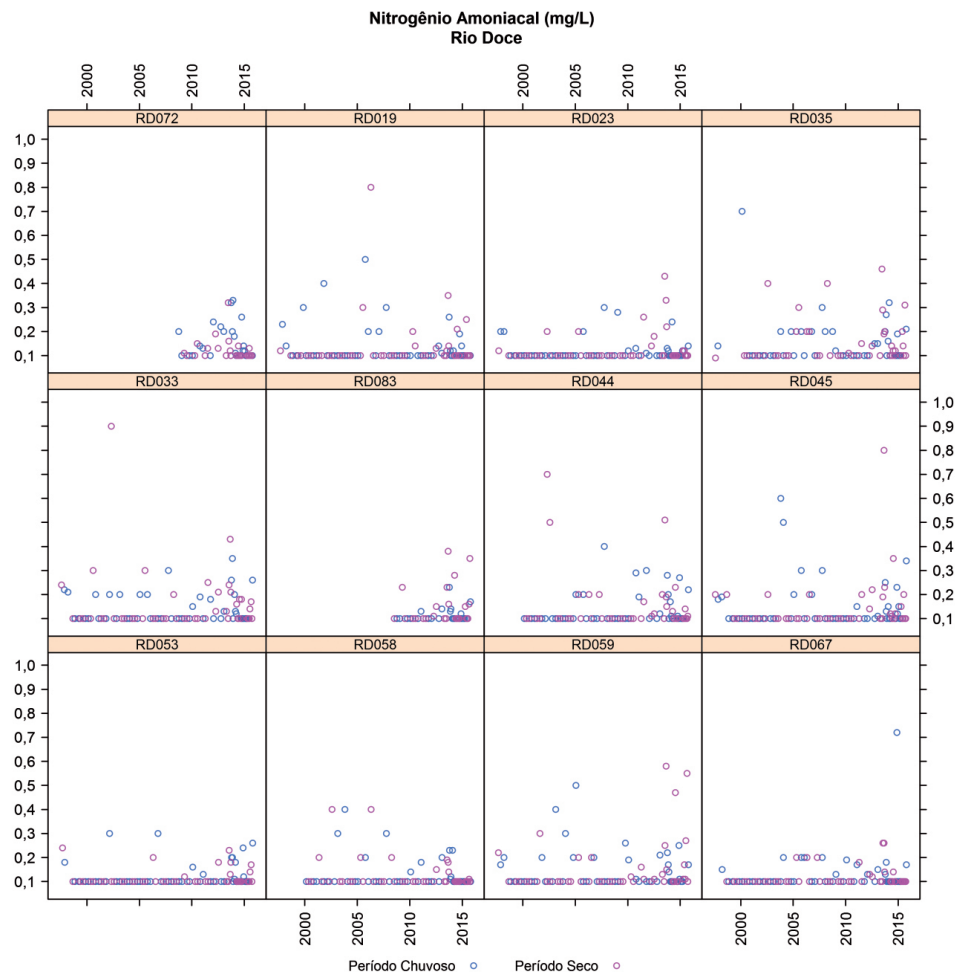


Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de nitrogênio amoniacal ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante (Figura 152).

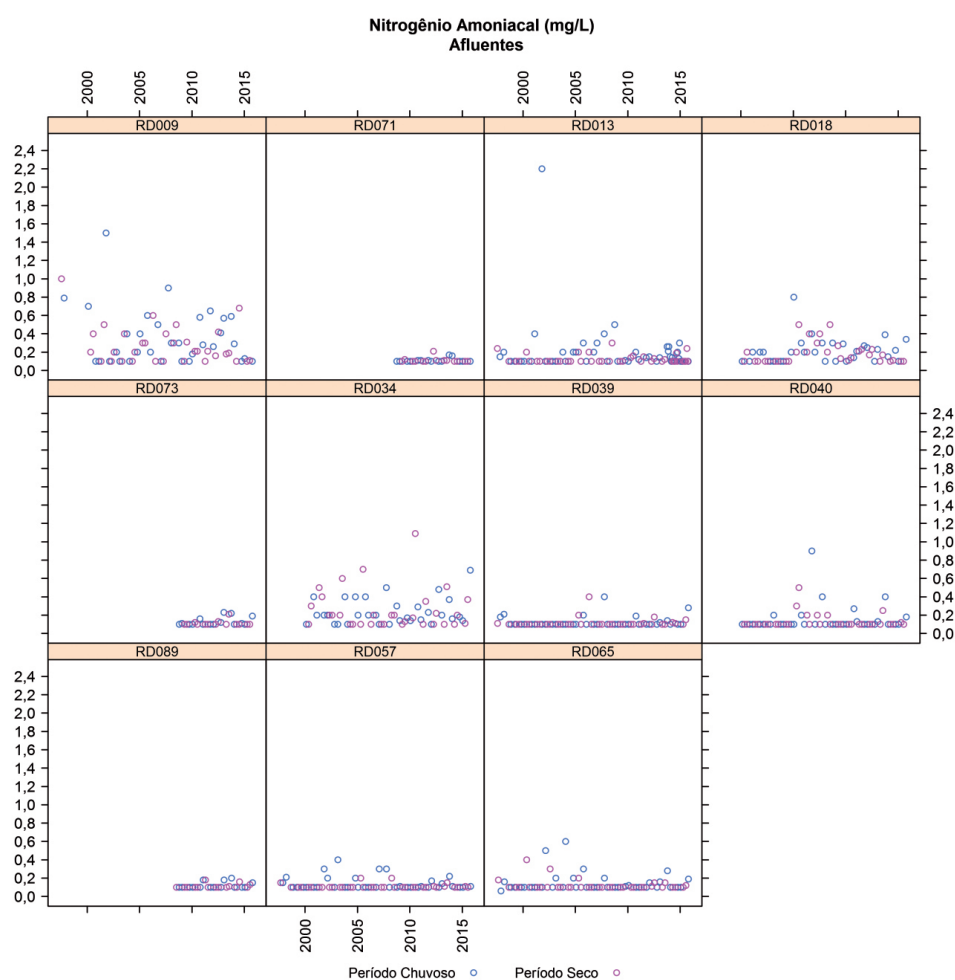
Para as estações de monitoramento no rio Doce, notou-se que a maioria das observações apresentou valor de 0,1 mg/L ao longo do tempo. Contudo, observaram-se valores mais elevados do que este em diferentes momentos do período avaliado. As estações RD019 (entre os municípios de Rio Casca e São Domingos do Prata), RD033 (entre os municípios de Belo Oriente e Bugre) e RD045 (em Governador Valadares) apresentaram os valores máximos observados: 0,8, 0,9 e 0,8, respectivamente.

Figura 152 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio amoniacal ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações localizadas em afluentes (Figura 153), observou-se maior homogeneidade de resultados ao longo do tempo para as estações RD071 (rio do Carmo), RD073 (ribeirão Sacramento) e RD089 (rio Suaçuí Grande). Para as demais, notou-se maior variação dos resultados, sem tendências de comportamento observáveis, em especial para as estações RD009 (rio do Carmo) e RD034 (rio Piracicaba).

Figura 153 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio amoniacal ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.14 Nitrogênio orgânico

Para mais informações sobre o nitrogênio orgânico, vide Nitrogênio Total (item 2.2.3.2.10).

Em relação ao nitrogênio orgânico, foram avaliados os dados disponíveis na base do IGAM. No período anterior ao desastre, o IEMA não realizou avaliações da água em relação a essa variável. Ressalta-se que não há valor máximo de referência disposto na Resolução CONAMA nº 357/2005 para o nitrogênio orgânico, dessa forma, não foram calculados percentuais de desacordos.

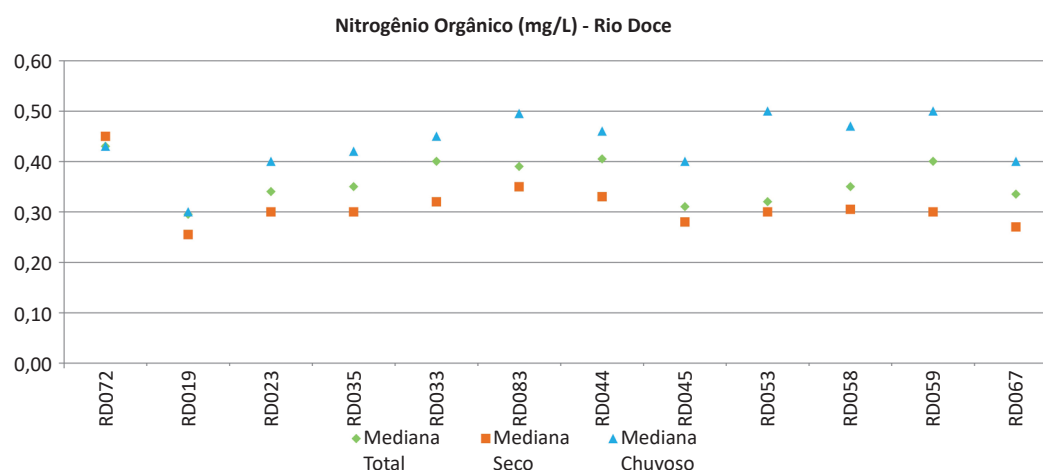
Avaliação espacial

A Figura 154 e a Figura 155 apresentam os valores de mediana de nitrogênio orgânico para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. De modo geral, observaram-se valores mais elevados no período chuvoso, tanto para as estações localizadas no rio Doce quanto naquelas em seus afluentes.

Para o rio Doce (Figura 154), de acordo com os valores de mediana do período total, observou-se redução de valor na estação RD019, a jusante da UHE Risoleta Neves. As concentrações voltaram a se elevar até a estação RD083, entre os municípios de Fernandes Tourinho e Periquito. A partir da estação

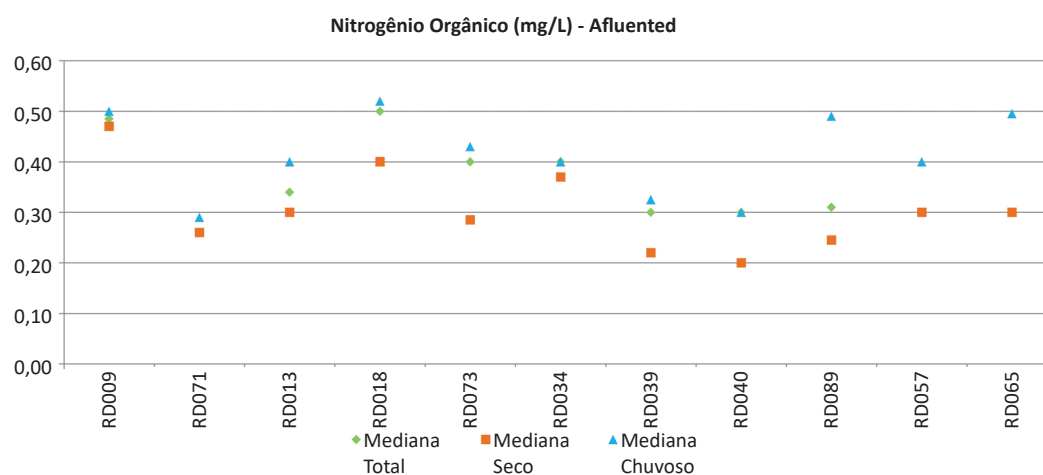
RD045 (em Governador Valadares), as concentrações tenderam a diminuir, com exceção da estação RD059 (no município de Resplendor).

Figura 154 – Medianas dos valores de nitrogênio orgânico para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Para os afluentes do rio Doce (Figura 155), observou-se maior variação de concentrações entre as estações em relação às do rio Doce. Em relação às medianas do período total, as estações RD009 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca), RD073 (ribeirão Sacramento) e RD034 (rio Piracicaba) foram as que apresentaram valores mais elevados.

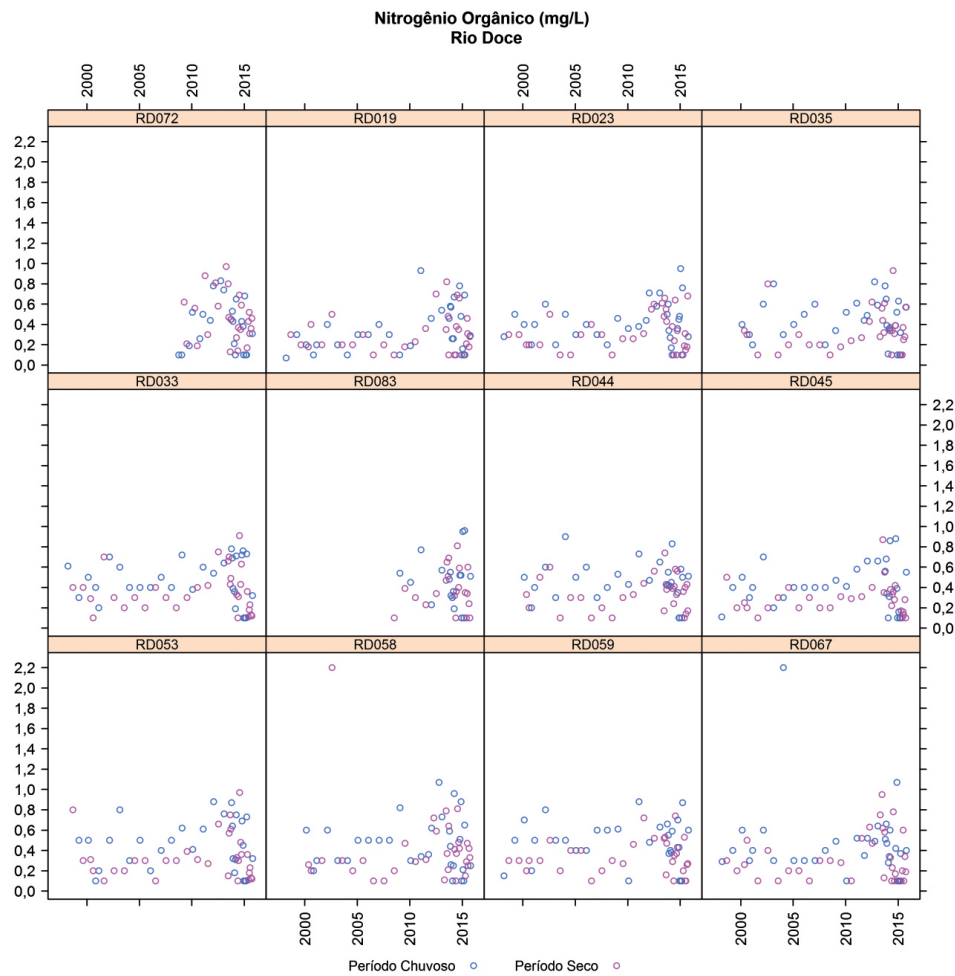
Figura 155 – Medianas dos valores de nitrogênio orgânico para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

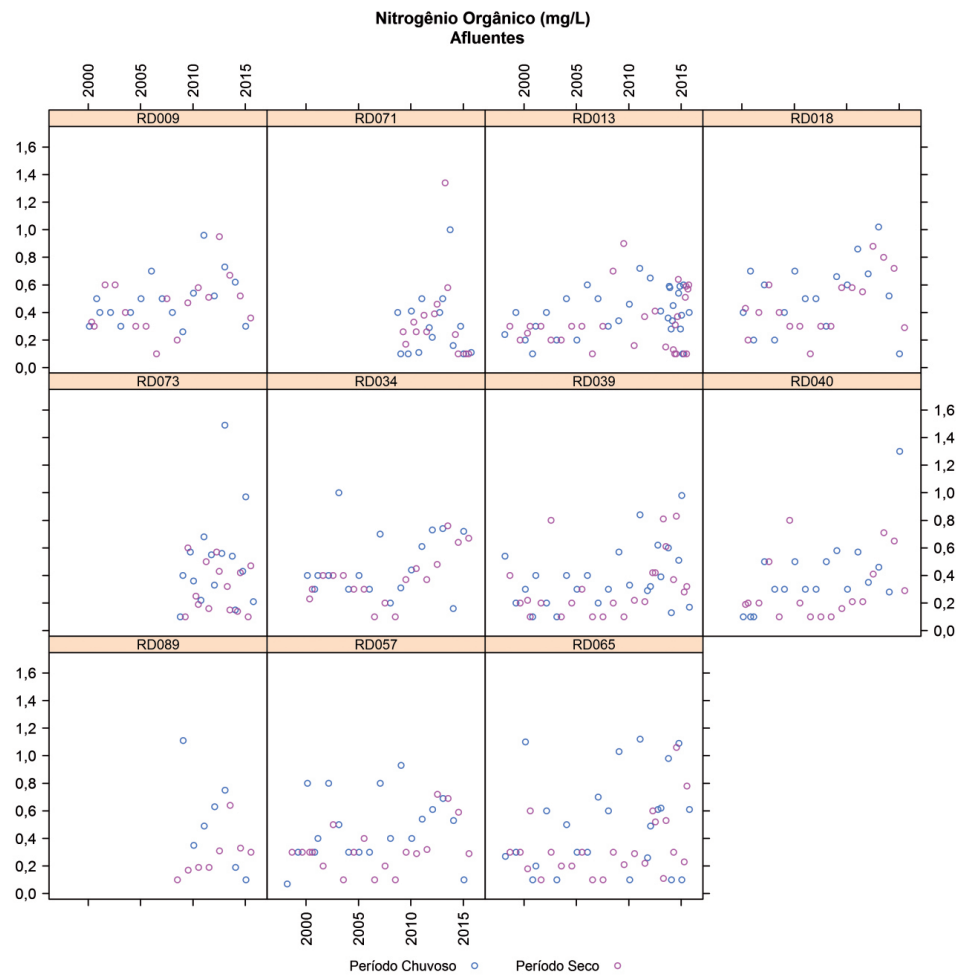
Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de nitrogênio orgânico ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante (Figura 156). De modo geral, as concentrações de nitrogênio orgânico variaram de 0,1 a 1,0 mg/L no período avaliado, sem tendência de diminuição ou aumento de valores com o tempo. Nas estações RD058 (no município de Conselheiro Pena) e RD067 (entre os municípios de Aimorés/MG e Baixo Guandu/ES), observaram-se valores mais elevados, mas de modo pontual.

Figura 156 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio orgânico ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações localizadas em afluentes (Figura 157), também se observou maior variação de concentrações ao longo do tempo. De modo geral, as concentrações de nitrogênio orgânico variaram de 0,1 a 1,0 mg/L. Nas estações RD071 (rio do Carmo), RD018 (rio Casca), RD073 (ribeirão do Sacramento), RD040 (rio Corrente Grande), RD089 (rio Suaçuí Grande), RD065 (rio Manhuaçu), todavia, foram observados valores maiores que 1,0 mg/L. Com exceção da estação RD065, nas demais esses valores foram pontuais.

Figura 157 – Gráficos de dispersão dos dados de nitrogênio orgânico ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.15 Oxigênio dissolvido

O Oxigênio Dissolvido (OD) é uma variável de grande relevância para a avaliação da qualidade de água, pois é um limitador à manutenção da vida aquática e a processos de depuração desses ecossistemas naturais. Como exemplo, pode-se citar sua importância para a comunidade ictíca, uma vez que certas espécies de peixes, como a truta, têm requerimentos elevados de OD, devendo as concentrações serem superiores a 8,0 mg/L para a manutenção de suas populações. Já espécies como a carpa sobrevivem em situações de OD inferior a 3,0 mg/L (CETESB, 2017a).

O comportamento desse gás é influenciado por uma série de outras variáveis, como temperatura, pressão, altitude, salinidade e à própria turbulência das águas. Condições incorporadoras de oxigênio na água são, principalmente, a fotossíntese e o contato da água com a atmosfera. Já a perda de OD da água se dá, em maior parte, em função da respiração dos organismos aquáticos (fauna e flora), do aporte de poluentes e da decomposição da matéria orgânica. Esse último caso relaciona-se a processos depurativos, quando, a partir do consumo de OD, bactérias aeróbias degradam a matéria orgânica disponível em ambientes aquáticos (ESTEVES, 1998; CETESB, 2016).

De forma geral, concentrações iguais ou superiores a 5,0 mg/L são adequadas à manutenção da maioria das populações aquáticas de água doce, sendo situações de concentrações inferiores a 2,0 mg/L (hipóxia) consideradas preocupantes e inadequadas à biota (CETESB, 2017a).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar concentrações de OD não inferiores a 5,0 mg/L. Nesse contexto, foram avaliadas as séries históricas de dados do IGAM e do IEMA no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado. Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 52) e seus afluentes (Tabela 53), de montante para jusante.

Observa-se que, para as estações no rio Doce (Tabela 52), os percentuais de desacordos foram mínimos para os três períodos considerados, sendo na maior parte do tempo iguais a 0%. Percentuais de desacordos mais elevados encontram-se na porção capixaba da região de estudo (estações RDC1D025 e RDC1D030). Desse modo, pode-se dizer que o rio Doce – no período em questão – apresentava bons níveis de oxigenação.

Tabela 52 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o oxigênio dissolvido no rio Doce.

Rio Doce							
Oxigênio Dissolvido							
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD072	48	0%	25	0%	23	0%
	RD019	92	0%	47	0%	45	0%
	RD023	92	0%	47	0%	45	0%
	RD035	85	0%	44	0%	41	0%
	RD033	92	0%	47	0%	45	0%
	RD083	49	0%	26	0%	23	0%
	RD044	83	0%	43	0%	40	0%
	RD045	92	0%	47	0%	45	0%
	RD053	91	0%	47	0%	44	0%
	RD058	83	0%	43	0%	40	0%
	RD059	92	1%	47	0%	45	2%
	RD067	90	0%	46	0%	44	0%
ES	RDC1E010	27	0%	19	0%	8	0%
	RDC1E015	19	0%	13	0%	6	0%
	RDC1D020	27	0%	19	0%	8	0%
	RDC1D025	25	4%	18	6%	7	0%
	RDC1E030	25	8%	18	6%	7	14%

Nota: n: número de observações.

Assim como para as estações localizadas no rio Doce, os pontos avaliados nos afluentes (Tabela 53) também apresentaram percentuais mínimos de desacordos para os três períodos considerados.

Tabela 53 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para o oxigênio dissolvido em afluentes do rio Doce.

		Afluentes					
		Oxigênio Dissolvido					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD009	66	2%	33	3%	33	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	89	1%	44	0%	45	2%
	RD018	64	2%	32	0%	32	3%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	64	0%	32	0%	32	0%
	RD039	73	0%	36	0%	37	0%
	RD040	64	0%	32	0%	32	0%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	73	1%	36	0%	37	3%
	RD065	73	0%	36	0%	37	0%
ES	RDC2C007	27	0%	18	0%	9	0%
	RDC2C012	27	0%	19	0%	8	0%

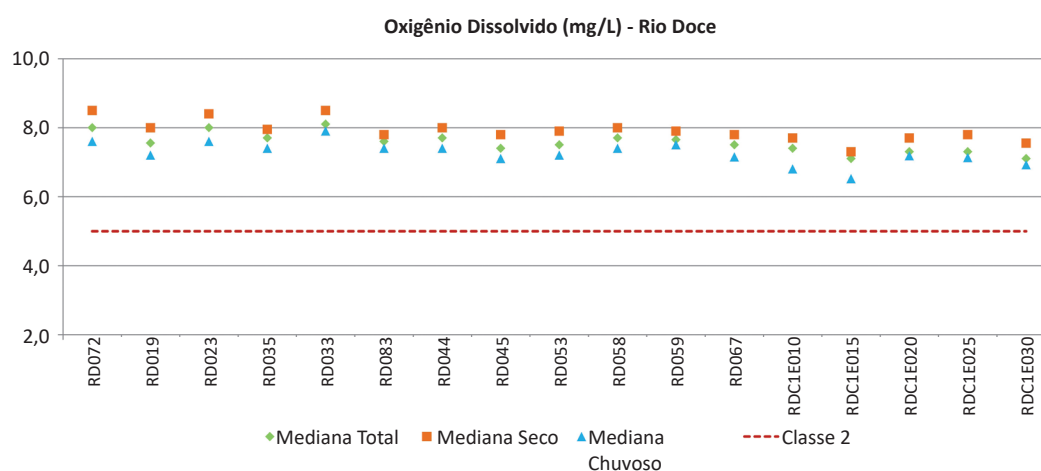
Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 158 e a Figura 159 apresentam os valores de mediana de OD para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente.

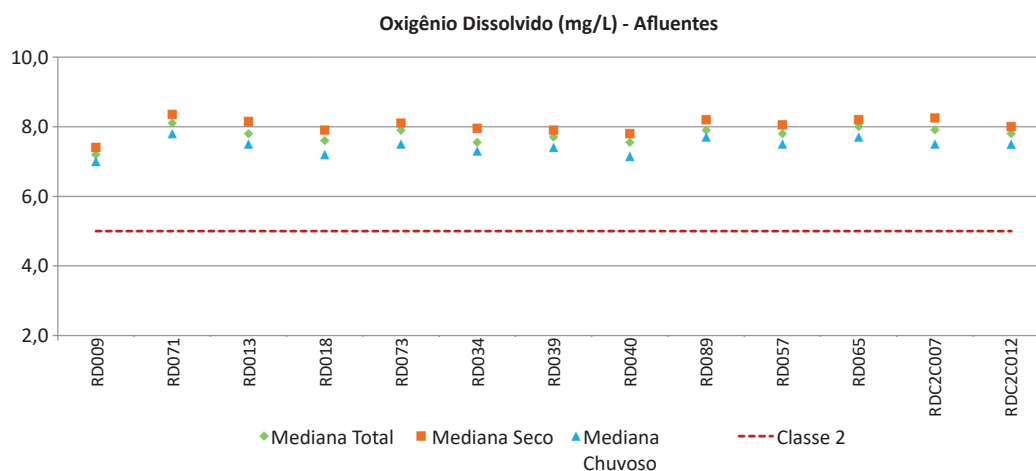
De acordo com a Figura 158, as medianas das concentrações de OD mostraram caráter mais homogêneo ao longo do rio Doce, sendo levemente inferiores no período chuvoso. Valor de mediana mais baixo foi observado na estação RDC1E015 (7,1 mg/L, no período total).

Figura 158 – Medianas das concentrações de oxigênio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Em relação aos afluentes do rio Doce (Figura 159), os valores das medianas não apresentaram grandes variações espaciais, sendo que os menores valores foram observados para a estação RD009, no rio do Carmo (7,2 mg/L, no período total).

Figura 159 – Medianas das concentrações de oxigênio dissolvido para os períodos total, seco e chuvoso nas estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de OD distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante. Em virtude de o número de estações ser elevado, os gráficos foram divididos em parte I (Figura 160) e parte II (Figura 161).

Com exceção das estações RDC1E025 e RDC1E030 (Figura 161), na porção capixaba da bacia, que apresentaram em algum momento valor inferior ao limite legislado, todos os demais valores foram superiores a 5,0 mg/L. De modo geral, não foram observadas alterações bruscas no comportamento da variável ao longo do tempo monitorado nas estações do IGAM. Nas estações do IEMA, observou-se uma tendência a valores mais elevados de OD com o passar do tempo. As concentrações de OD no período seco foram maiores em relação ao período chuvoso, corroborando os resultados das análises anteriores.

Figura 160 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).

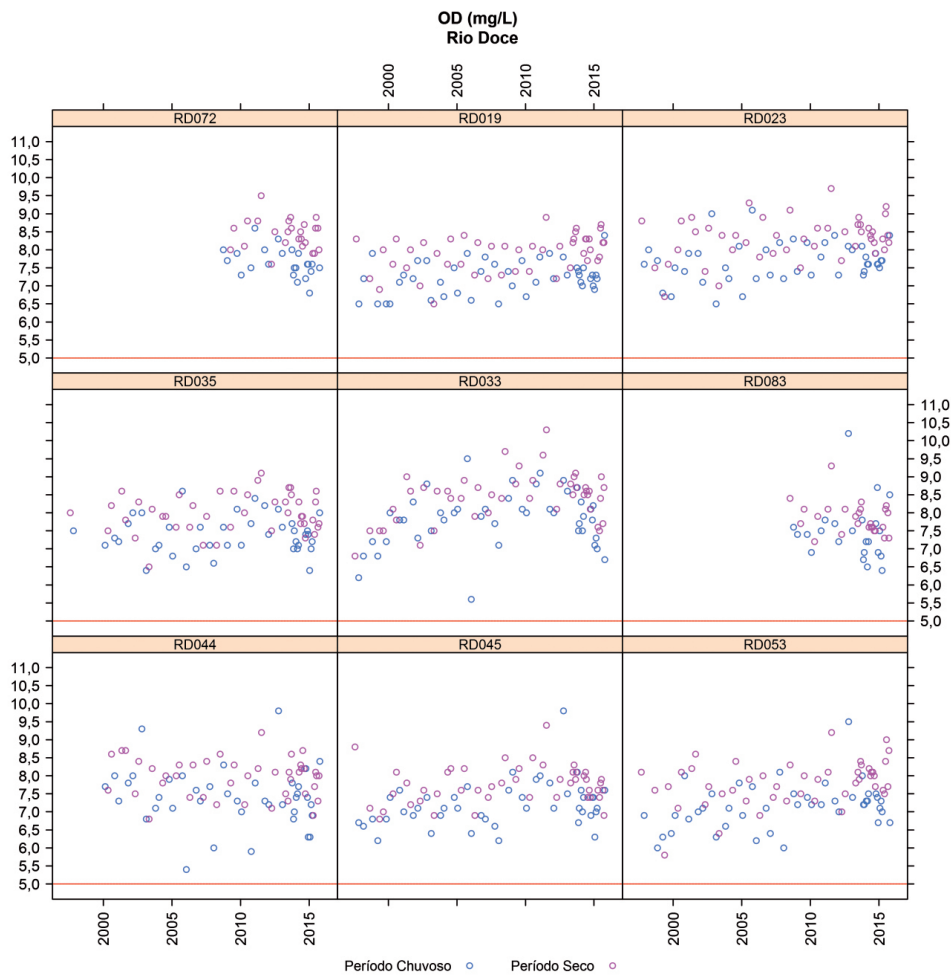
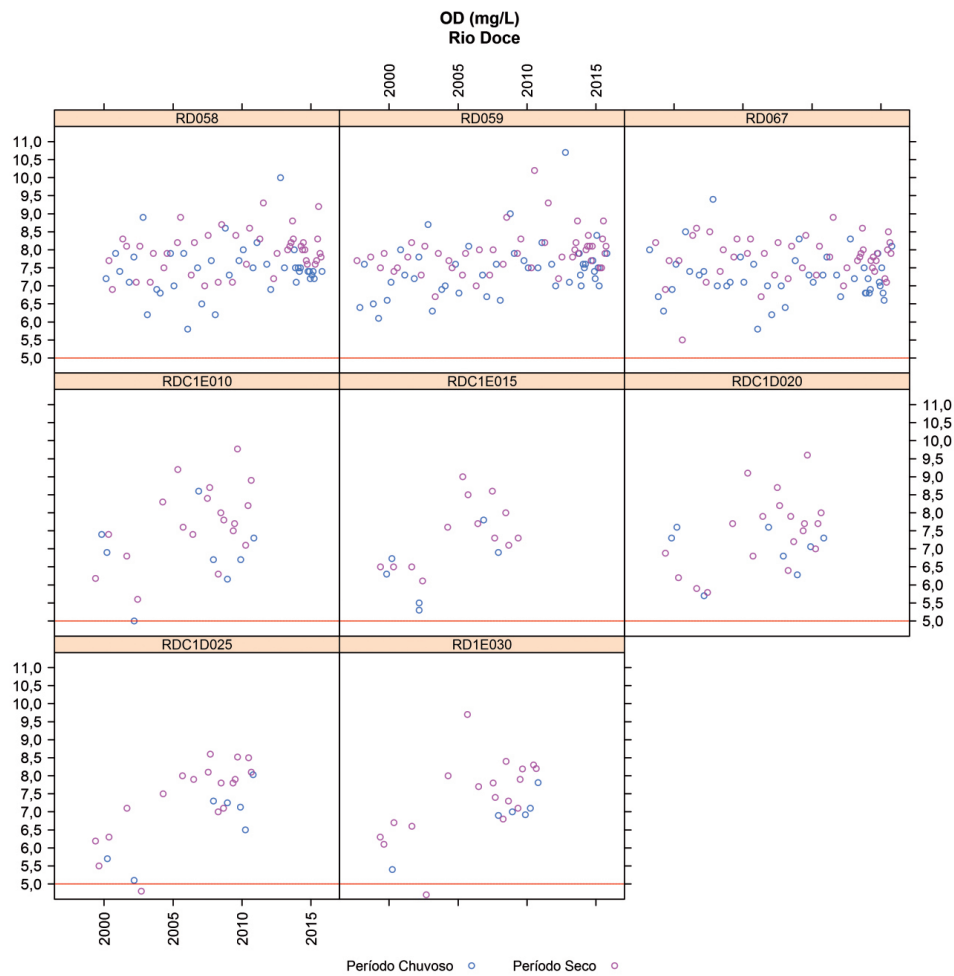


Figura 161 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



Na Figura 162 e na Figura 163 apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de OD distribuídas ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas nos afluentes do rio Doce, de montante para jusante. Em Minas Gerais, não se observaram oscilações consideráveis das concentrações de OD nos afluentes. No Espírito Santo, assim como observado para o rio Doce, a tendência foi de valores mais elevados ao longo do tempo nos afluentes.

Figura 162 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte I).

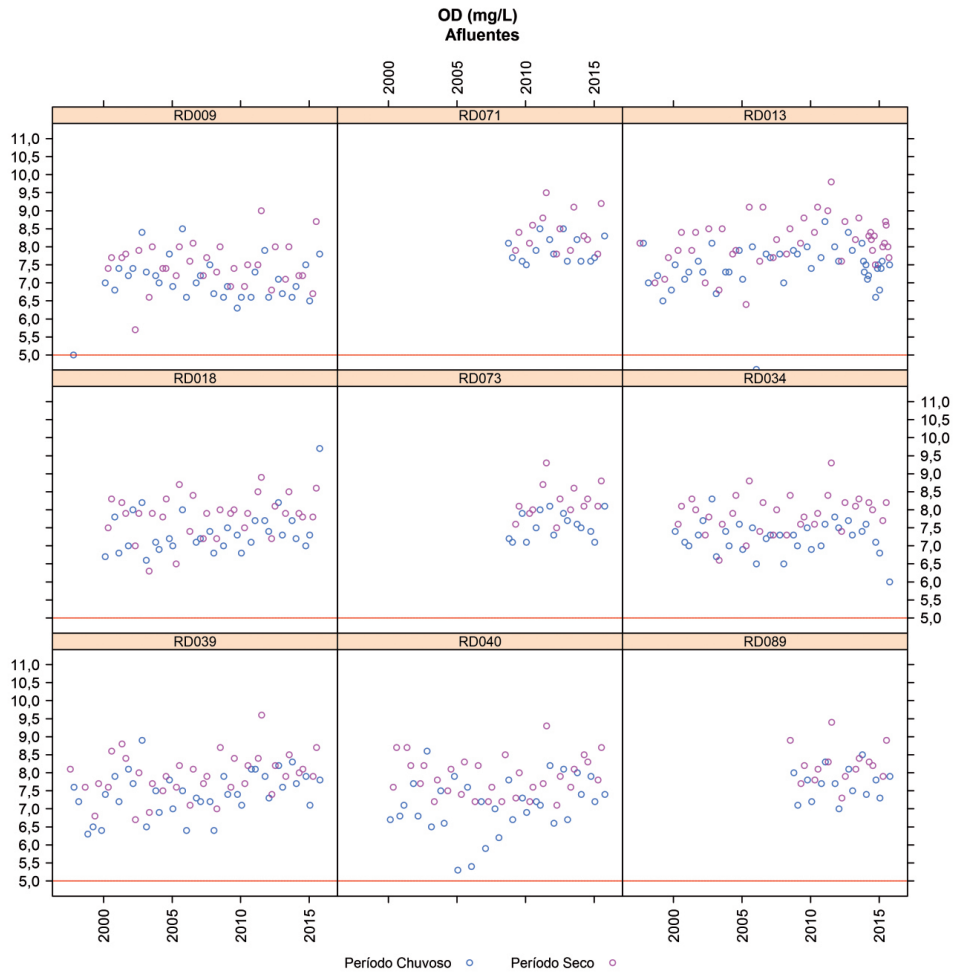
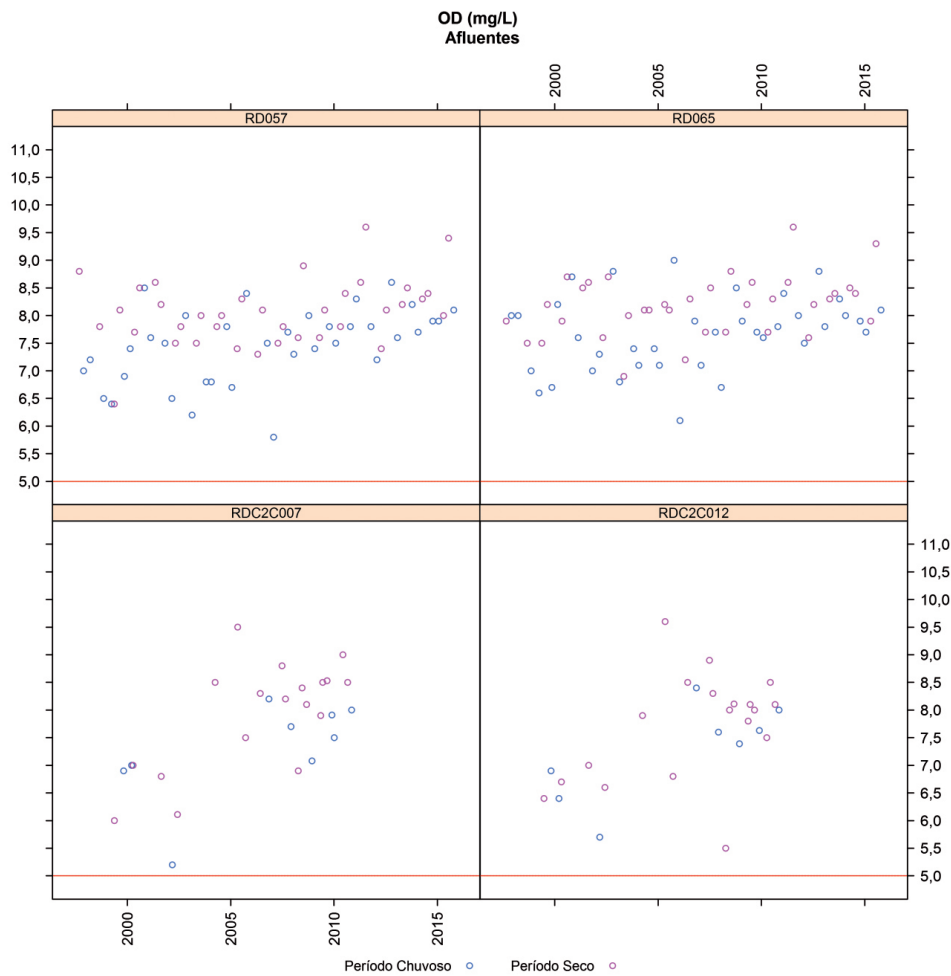


Figura 163 – Gráficos de dispersão dos dados de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para as estações de monitoramento dos afluentes do rio Doce (parte II).



2.2.3.2.16 pH in loco

A influência do pH sobre os ecossistemas aquáticos naturais dá-se diretamente devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. Também o efeito indireto é muito importante, podendo determinadas condições de pH contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados; outras condições podem exercer efeitos sobre as solubilidades de nutrientes. Dessa forma, as restrições de faixas de pH são estabelecidas para as diversas classes de águas naturais, de acordo com a legislação federal (Resolução CONAMA nº 357/2005). Os critérios de proteção à vida aquática fixam o pH entre 6,0 e 9,0 (PIVELI; KATO, 2005). Valores de pH mais alcalinos em águas naturais podem ser resultantes de constituintes à base de íons carbonatos e bicarbonatos de metais alcalinos e de alcalinos terrosos (OLIVEIRA, 2016).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 devem apresentar valor de pH entre 6,0 e 9,0. Nesse contexto, foram avaliadas as séries históricas de dados do IGAM e do IEMA no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado. Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 54) e seus afluentes (Tabela 55), de montante para jusante.

Tabela 54 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para pH *in loco* no rio Doce.

Rio Doce							
pH <i>in loco</i>							
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD072	48	2%	25	0%	23	4%
	RD019	92	0%	47	0%	45	0%
	RD023	92	0%	47	0%	45	0%
	RD035	85	1%	44	0%	41	2%
	RD033	92	0%	47	0%	45	0%
	RD083	49	2%	26	0%	23	4%
	RD044	83	0%	43	0%	40	0%
	RD045	92	0%	47	0%	45	0%
	RD053	91	1%	47	0%	44	2%
	RD058	83	0%	43	0%	40	0%
	RD059	92	0%	47	0%	45	0%
RD067	90	1%	46	2%	44	0%	
ES	RDC1E010	26	0%	19	0%	7	0%
	RDC1E015	19	0%	13	0%	6	0%
	RDC1D020	27	4%	19	5%	8	0%
	RDC1D025	25	4%	18	6%	7	0%
	RDC1E030	25	8%	18	11%	7	0%

Nota: n: número de observações.

Para as estações de monitoramento do rio Doce (Tabela 54), não houve tendência de aumento ou diminuição do número de desacordos quando comparados os períodos seco e chuvoso, sendo que para a maioria delas não se observou desacordo com a faixa de limites legislada. No período seco, desacordos foram observados nas estações de jusante, não passando de 11%. No período chuvoso, desacordos foram registrados nas estações de montante, não passando de 4%.

Para as estações localizadas em afluentes do rio Doce (Tabela 55), assim como para as estações localizadas no rio principal, não se observaram desacordos para a maioria delas. No período seco, os percentuais de desacordos não passaram de 6% e, no período chuvoso, não passaram de 14%.

Tabela 55 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para pH *in loco* em afluentes do rio Doce.

		Afluentes					
		pH <i>in loco</i>					
Estações de monitoramento	n	Total		Seco		Chuvoso	
		% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n
MG	RD009	66	0%	33	0%	33	0%
	RD071	29	0%	14	0%	15	0%
	RD013	89	0%	44	0%	45	0%
	RD018	64	0%	32	0%	32	0%
	RD073	29	0%	14	0%	15	0%
	RD034	64	0%	32	0%	32	0%
	RD039	73	10%	36	6%	37	14%
	RD040	64	3%	32	0%	32	6%
	RD089	30	0%	15	0%	15	0%
	RD057	73	0%	36	0%	37	0%
	RD065	73	0%	36	0%	37	0%
ES	RDC2C007	27	4%	18	6%	9	0%
	RDC2C012	27	7%	19	5%	8	13%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

A Figura 164 e a Figura 165 apresentam os valores de mediana de pH para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. Tanto para o rio Doce quanto para seus afluentes, não houve variações que pudessem ser consideradas entre o período seco e chuvoso.

No rio Doce, os valores de mediana não foram muito diferentes em termos espaciais, variando de 6,8 a 7,2, no período total. Nos afluentes, a variação foi maior: 5,5 a 8,5, no período total.

Figura 164 – Medianas dos valores de pH *in loco* para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

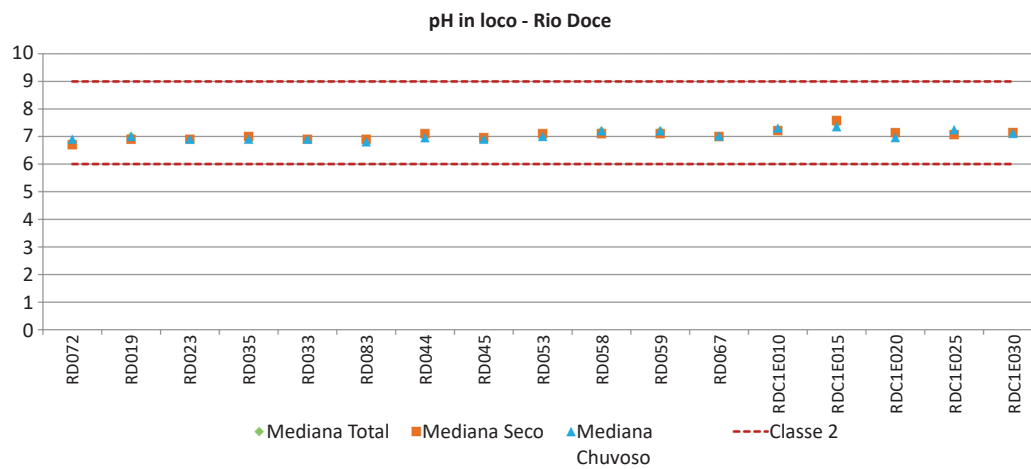
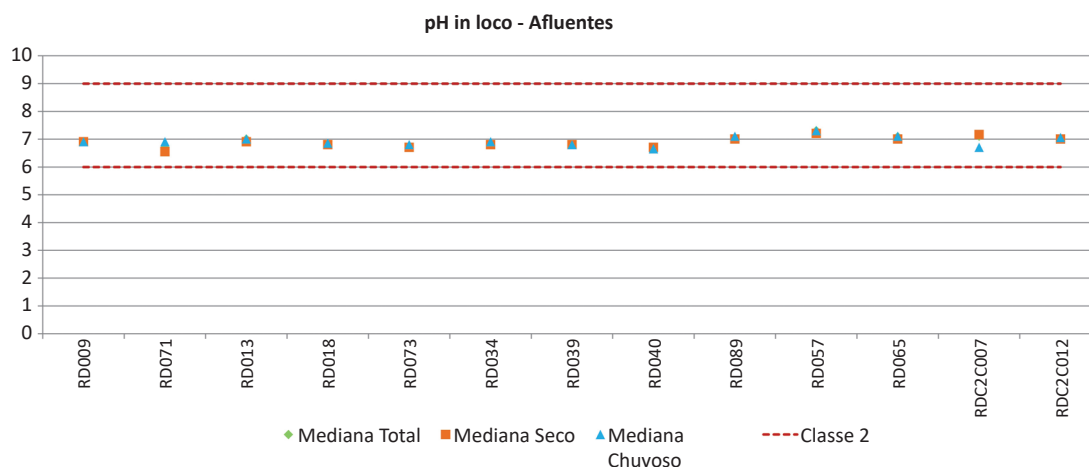


Figura 165 – Medianas dos valores de pH *in loco* para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão dos valores de pH ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce, de montante para jusante. Em virtude de o número de estações ser elevado, os gráficos foram divididos em parte I (Figura 166) e parte II (Figura 167).

O comportamento da referida variável, apesar de variar ao longo do tempo, manteve-se dentro da faixa de 6,0 a 9,0, de modo geral. Dessa forma, poucos desacordos para o pH foram registrados em relação à faixa de 6,0 a 9,0, sendo estes sempre inferiores a 6,0 e não superiores a 9,0. Em especial, é possível notar para as estações do IEMA a menor quantidade de dados disponíveis.

Figura 166 – Gráficos de dispersão dos dados de pH *in loco* ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte I).

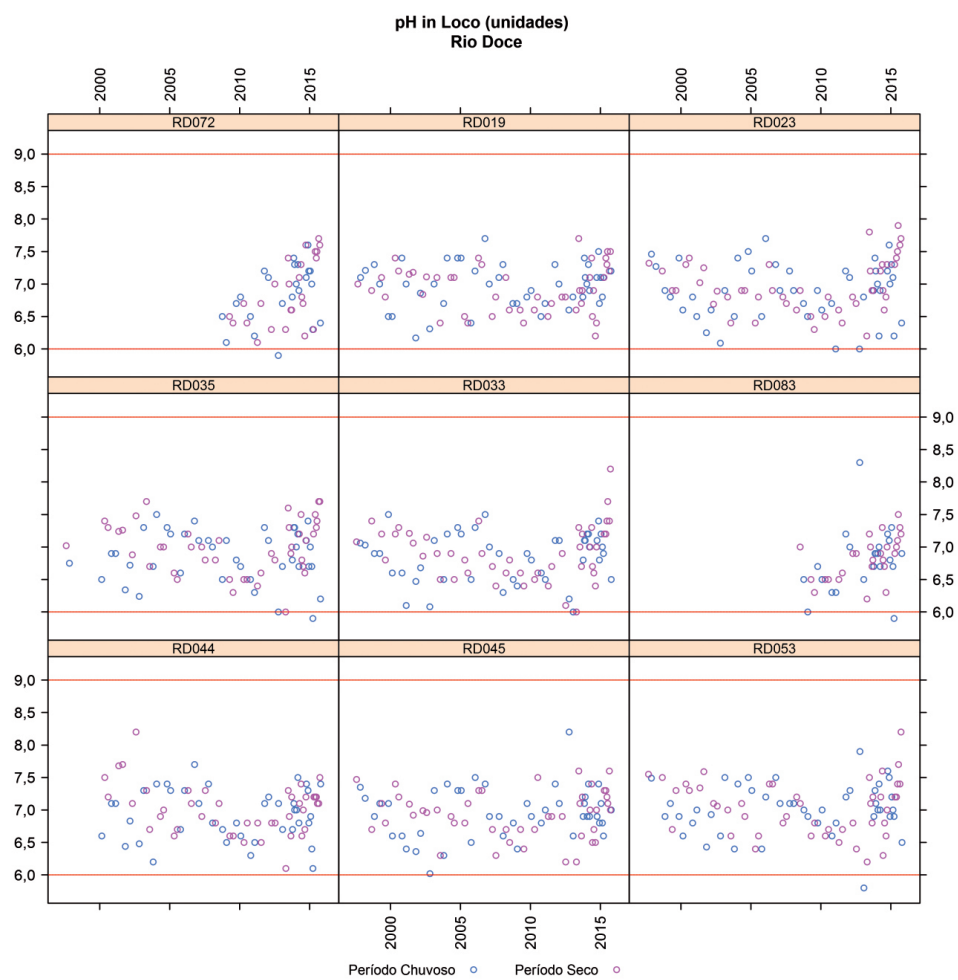
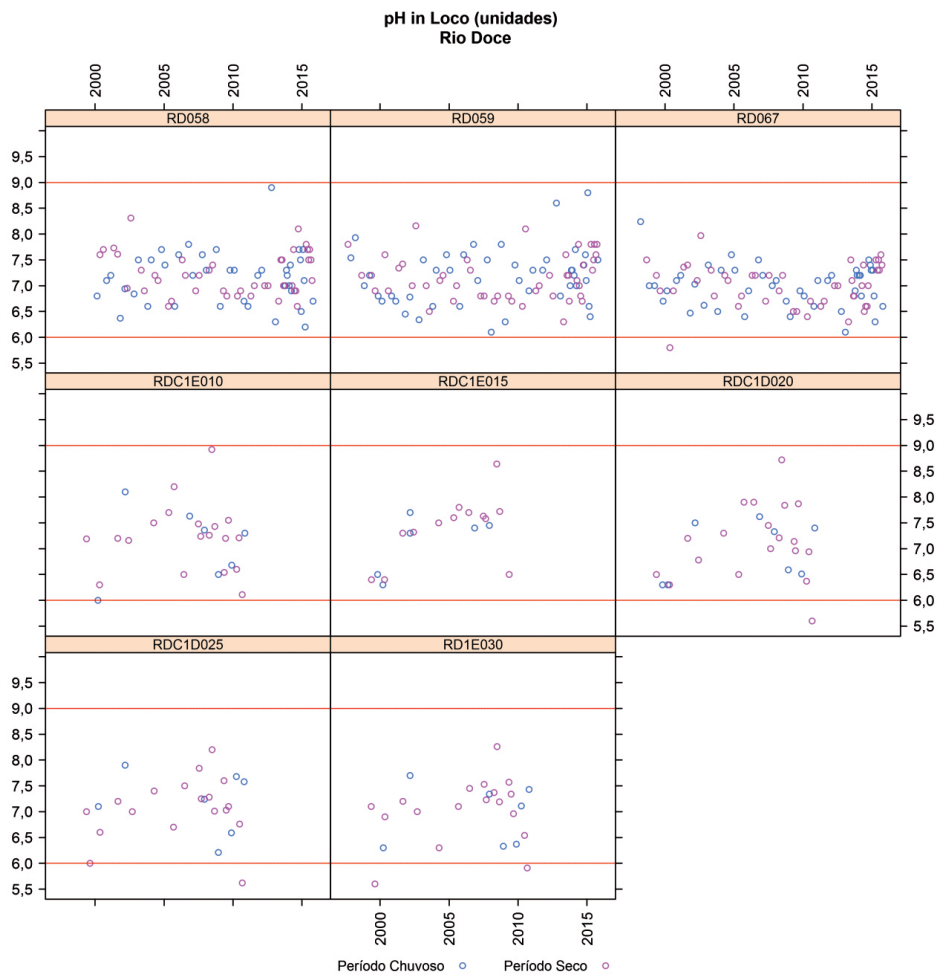


Figura 167 – Gráficos de dispersão dos dados de pH *in loco* ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce (parte II).



A Figura 168 (parte I) e a Figura 169 (parte II) apresentam os valores de pH ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas nos afluentes do rio Doce, de montante para jusante. De modo geral, foram registrados poucos desacordos nas estações situadas nos afluentes. Na estação RD039, foi observado o maior número de desacordos para o pH, sendo estes sempre inferiores a 6,0. O comportamento da referida variável, apesar de variar ao longo do tempo, se manteve dentro da faixa de 6,0 a 9,0, de modo geral.

Figura 168 – Gráficos de dispersão dos dados de pH *in loco* ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte I).

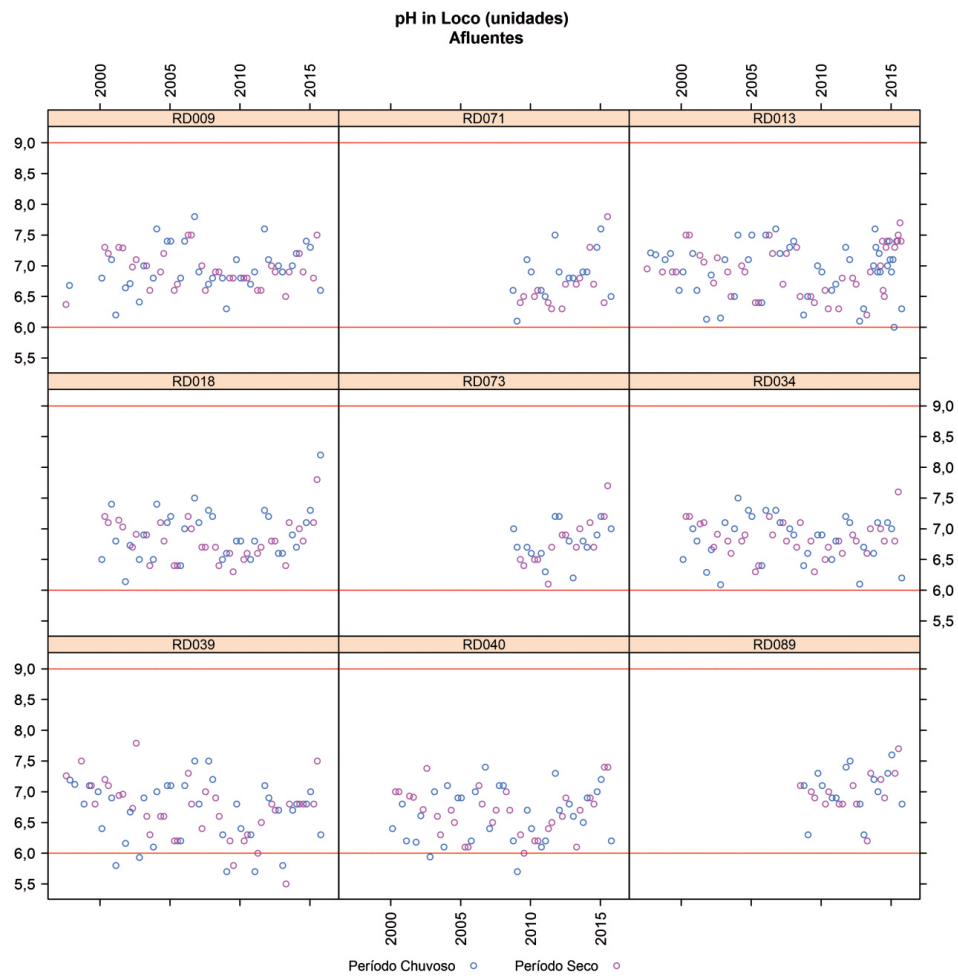
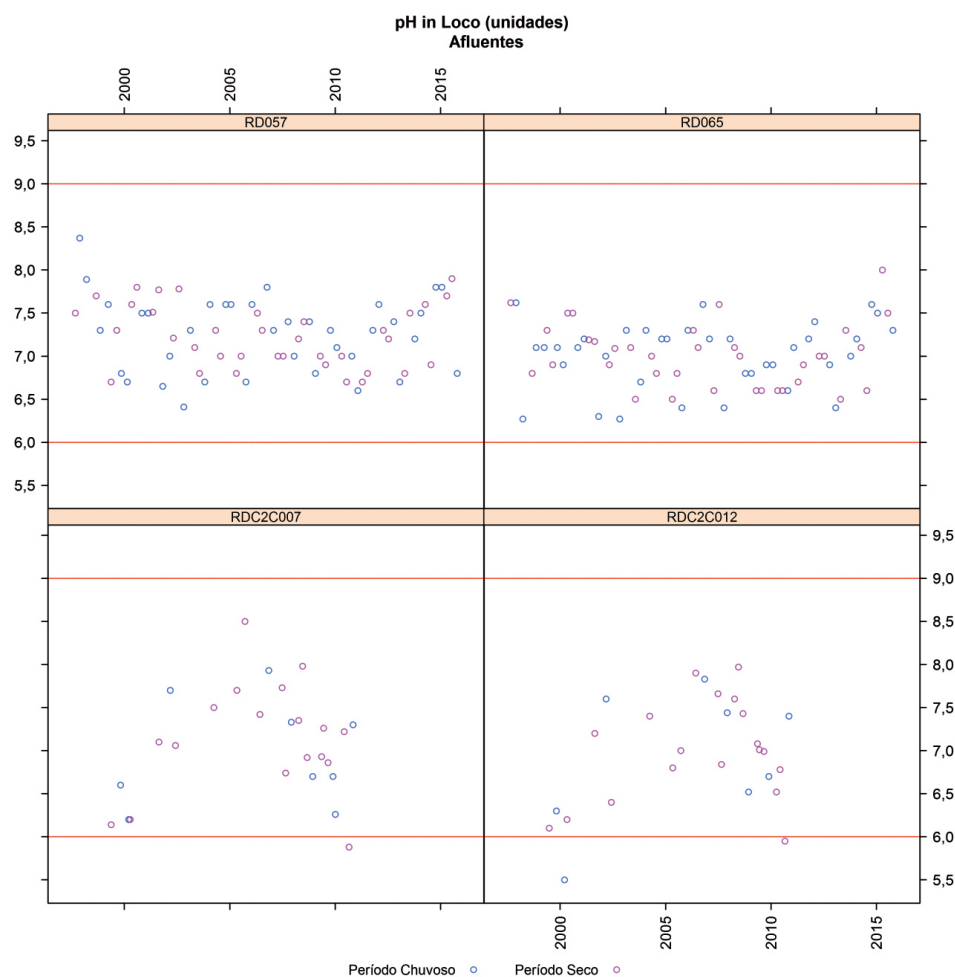


Figura 169 – Gráficos de dispersão dos dados de pH *in loco* ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce (parte II).



2.2.3.2.17 Selênio total

O selênio é um elemento que ocorre em baixas concentrações em águas naturais. Fontes antropogênicas relacionam-se a descargas de efluentes industriais, sendo essa substância utilizada no fabrico de eletrônicos, cerâmicas e xampus. O selênio é considerado um elemento-traço não essencial para plantas, mas essencial para animais. No entanto, em concentrações acima de valores-traço pode ser tóxico (APHA, 2005; PIVELI; KATO, 2005).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, as concentrações de selênio total não devem ultrapassar 0,01 mg/L em rios de Classe 2. Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM, entre os anos de 1998 e 2013, no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado. O limite de quantificação do método utilizado foi de 0,0005 mg/L.

Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 56) e seus afluentes (Tabela 57), de montante para jusante.

Tabela 56 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para selênio total no rio Doce.

Rio Doce							
Selênio Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	
MG	RD072	10	0%	5	0%	5	0%
	RD019	31	0%	16	0%	15	0%
	RD023	31	0%	16	0%	15	0%
	RD035	28	0%	14	0%	14	0%
	RD033	31	0%	16	0%	15	0%
	RD083	11	0%	6	0%	5	0%
	RD044	28	0%	14	0%	14	0%
	RD045	31	0%	16	0%	15	0%
	RD053	31	0%	16	0%	15	0%
	RD058	28	0%	14	0%	14	0%
	RD059	31	0%	16	0%	15	0%
	RD067	31	0%	16	0%	15	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 57 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para selênio total em afluentes do rio Doce.

Afluentes							
Selênio Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos	n	
MG	RD009	28	0%	14	0%	14	0%
	RD071	10	0%	5	0%	5	0%
	RD013	31	0%	16	0%	15	0%
	RD018	28	0%	14	0%	14	0%
	RD073	10	0%	5	0%	5	0%
	RD034	28	0%	14	0%	14	0%
	RD039	31	0%	16	0%	15	0%
	RD040	28	0%	14	0%	14	0%
	RD089	11	0%	6	0%	5	0%
	RD057	31	0%	16	0%	15	0%
	RD065	31	0%	16	0%	15	0%

Nota: n: número de observações.

Observou-se que tanto para as estações do rio Doce quanto para aquelas situadas em seus afluentes não foram registrados desacordos durante o período avaliado.

Avaliação espacial

A Figura 170 e a Figura 171 apresentam os valores de mediana de selênio total para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente.

Tanto nas estações do rio Doce quanto naquelas situadas em seus tributários, os valores das medianas foram de 0,0005 mg/L para os três períodos avaliados (total, seco e chuvoso).

Figura 170 – Medianas dos valores de selênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.

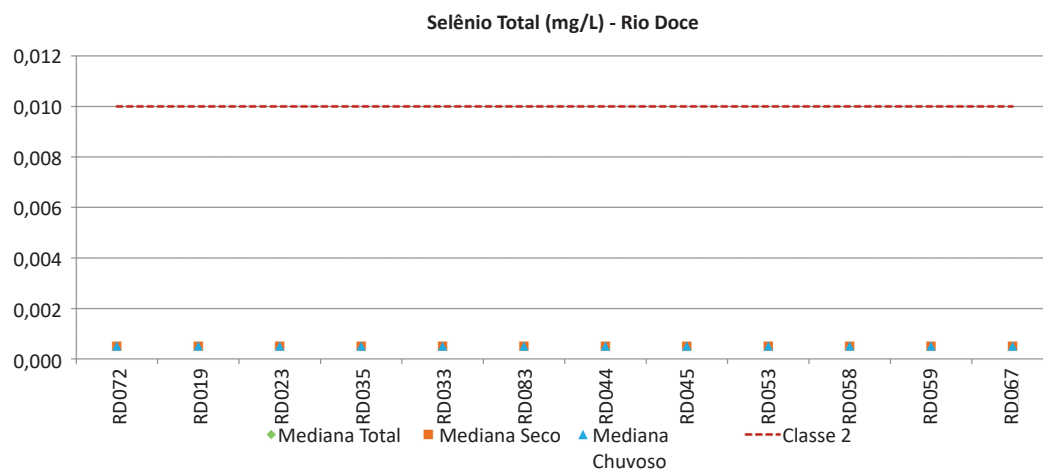
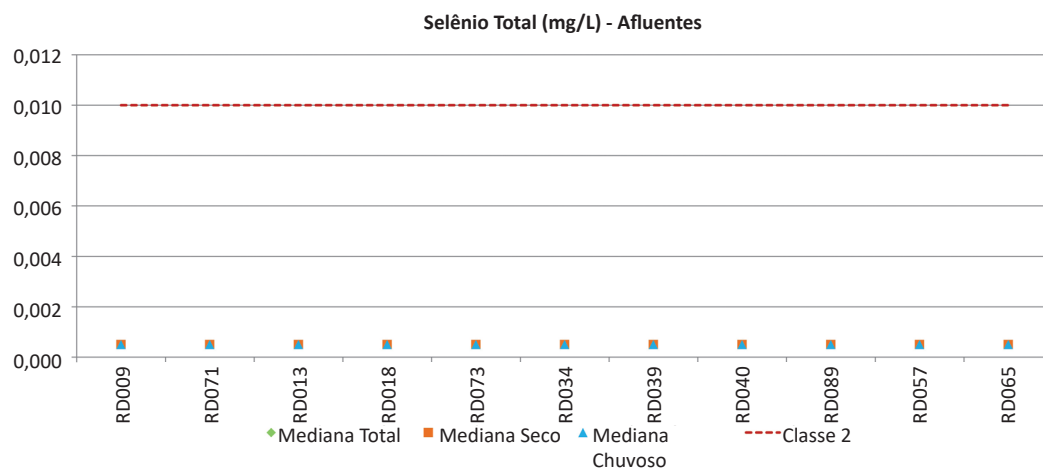


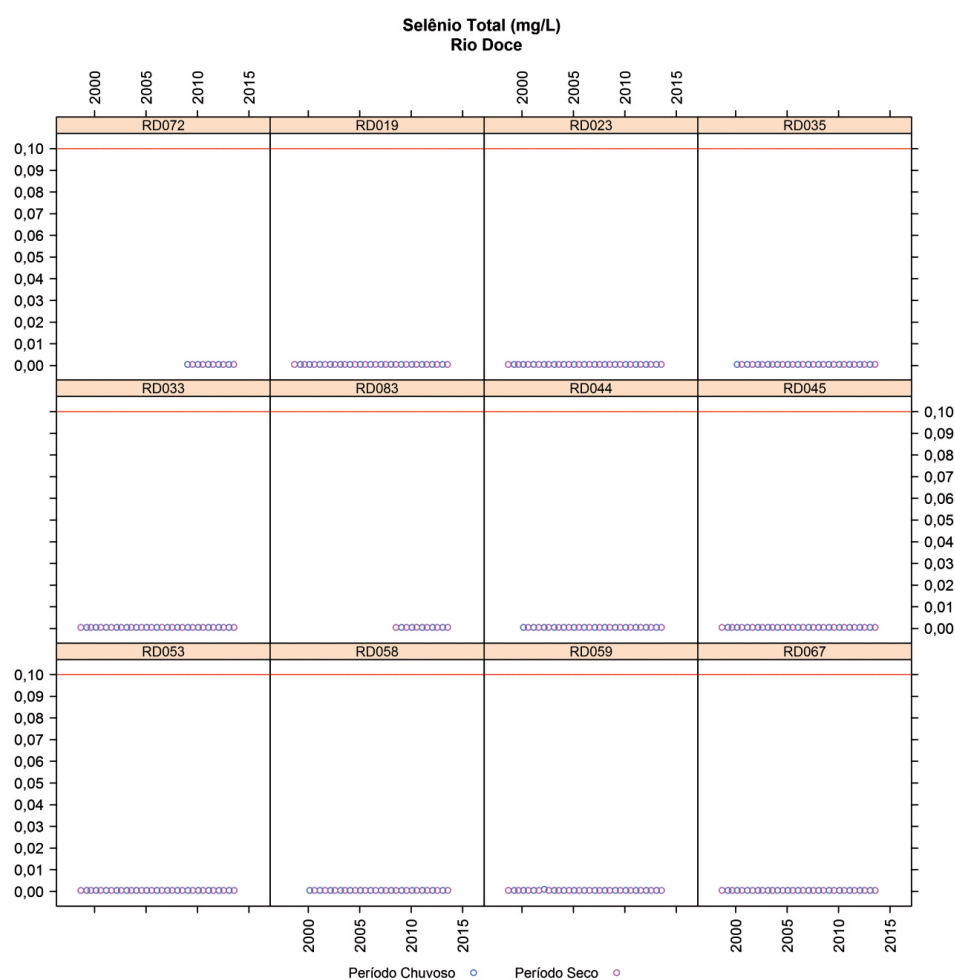
Figura 171 – Medianas dos valores de selênio total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de selênio total ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 172) e seus afluentes (Figura 173), de montante para jusante.

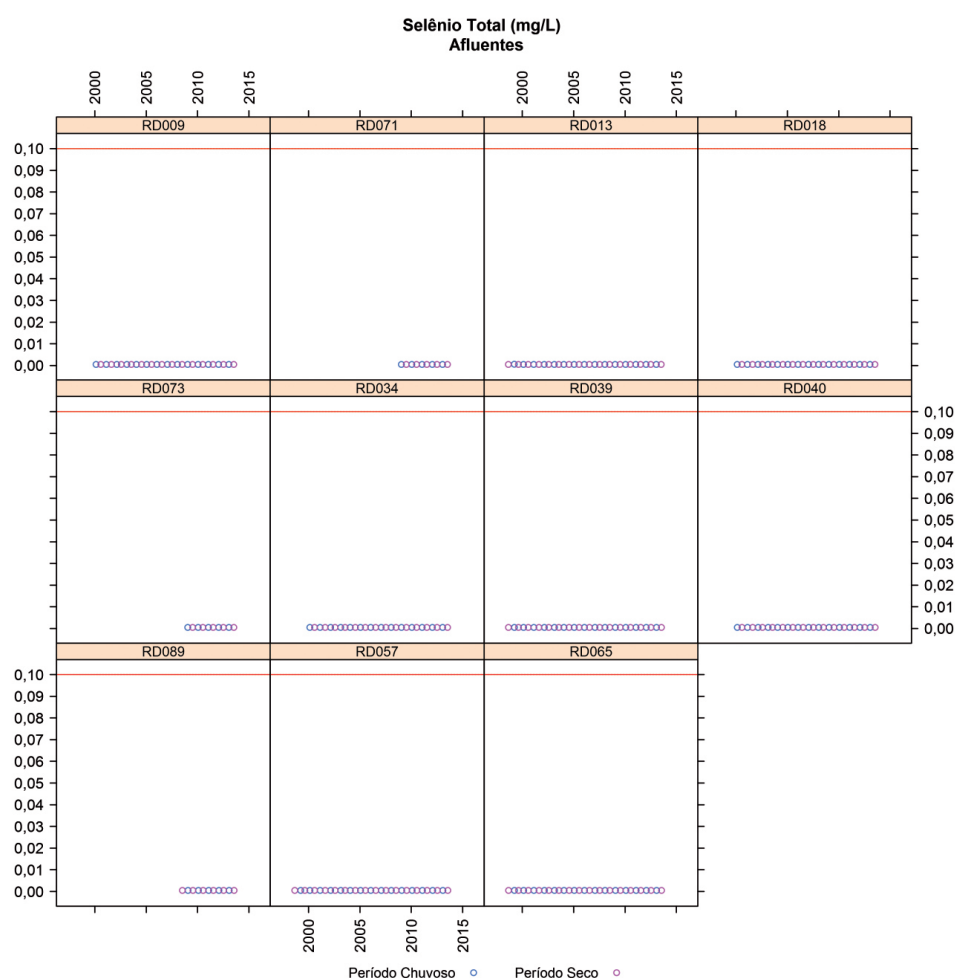
Figura 172 – Gráficos de dispersão dos dados de selênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento do rio Doce.



As concentrações de selênio total tenderam ao limite de quantificação do método (0,0005 $\mu\text{g/L}$) em todo o período monitorado nas estações situadas no rio Doce e seus tributários.

Conforme comentado no item 2.2.2.1.2, quando os resultados das análises dos parâmetros de qualidade de água resultaram em “inferior ao limite de quantificação (LQ)”, utilizou-se o próprio valor do LQ para fins de cálculo. Ou seja, originalmente os dados de selênio total resultaram em $< 0,0005 \text{ mg/L}$, mas, para fins de cálculo, adotou-se o valor de $0,0005 \mu\text{g/L}$.

Figura 173 – Gráficos de dispersão dos dados de selênio ao longo do tempo para as estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



2.2.3.2.18 Sulfato total

O sulfato é o ânion SO_4^{-2} , um dos mais abundantes íons na natureza. Origina-se do enxofre presente nas rochas e da lixiviação de compostos sulfatados que são muito solúveis, exceto SrSO_4 e BaSO_4 (FEITOSA, 1997 apud COSTA, 2001).

Nas águas superficiais, ocorre em descargas de esgotos domésticos (por exemplo, através da degradação de proteínas) e efluentes industriais (exemplos: efluentes de indústrias de celulose e papel, química, farmacêutica etc.). Em águas tratadas, o sulfato é proveniente do emprego de coagulantes, como o sulfato de alumínio, o sulfato ferroso, o sulfato férrico e a caparrosa clorada (PIVELI; KATO, 2005).

Os sulfatos também podem se originar da oxidação da pirita, bem como da lixiviação de minerais como gipsita e anidrita, sendo, geralmente, muito solúveis (SANTOS, 1997 apud MARTINS, 2005).

Avaliação de não conformidades

Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, rios de Classe 2 podem apresentar concentrações de sulfato total de até 250 mg/L. Nesse contexto, foi avaliada a série histórica de dados do IGAM no que diz respeito aos percentuais de desacordos em relação ao limite legislado (item 2.2.2.1.1). Os percentuais de desacordos foram calculados, considerando-se o período total amostrado, o período seco e o período chuvoso, para as estações localizadas no rio Doce (Tabela 58) e seus afluentes (Tabela 59).

De acordo com a Tabela 58 e a Tabela 59, não foram observados desacordos com o limite legislado durante o período avaliado, tanto nas estações de monitoramento do rio Doce quanto naquelas situadas em seus afluentes.

Tabela 58 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sulfato total no rio Doce.

Rio Doce							
Sulfato Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD072	14	0%	7	0%	7	0%
	RD019	36	0%	18	0%	18	0%
	RD023	36	0%	18	0%	18	0%
	RD035	32	0%	16	0%	16	0%
	RD033	36	0%	18	0%	18	0%
	RD083	15	0%	8	0%	7	0%
	RD044	32	0%	16	0%	16	0%
	RD045	36	0%	18	0%	18	0%
	RD053	35	0%	18	0%	17	0%
	RD058	32	0%	16	0%	16	0%
	RD059	36	0%	18	0%	18	0%
	RD067	36	0%	18	0%	18	0%

Nota: n: número de observações.

Tabela 59 – Percentuais de desacordos com a Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para sulfato total em afluentes do rio Doce.

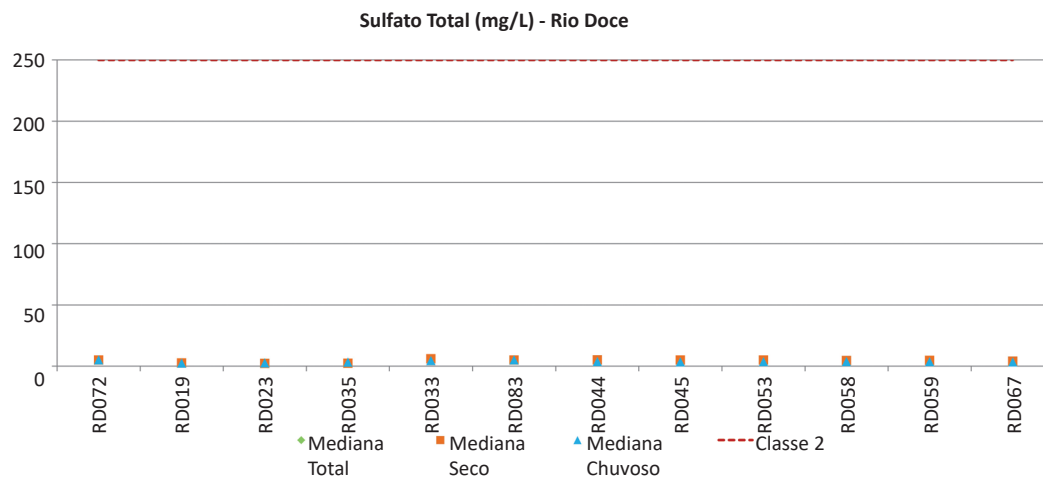
Afluentes							
Sulfato Total							
Estações de monitoramento n	Total		Seco		Chuvoso		
	% de desacordos	n	% de desacordos	n	% de desacordos		
MG	RD009	32	0%	16	0%	16	0%
	RD071	14	0%	7	0%	7	0%
	RD013	36	0%	18	0%	18	0%
	RD018	32	0%	16	0%	16	0%
	RD073	14	0%	7	0%	7	0%
	RD034	32	0%	16	0%	16	0%
	RD039	36	0%	18	0%	18	0%
	RD040	32	0%	16	0%	16	0%
	RD089	15	0%	8	0%	7	0%
	RD057	36	0%	18	0%	18	0%
	RD065	36	0%	18	0%	18	0%

Nota: n: número de observações.

Avaliação espacial

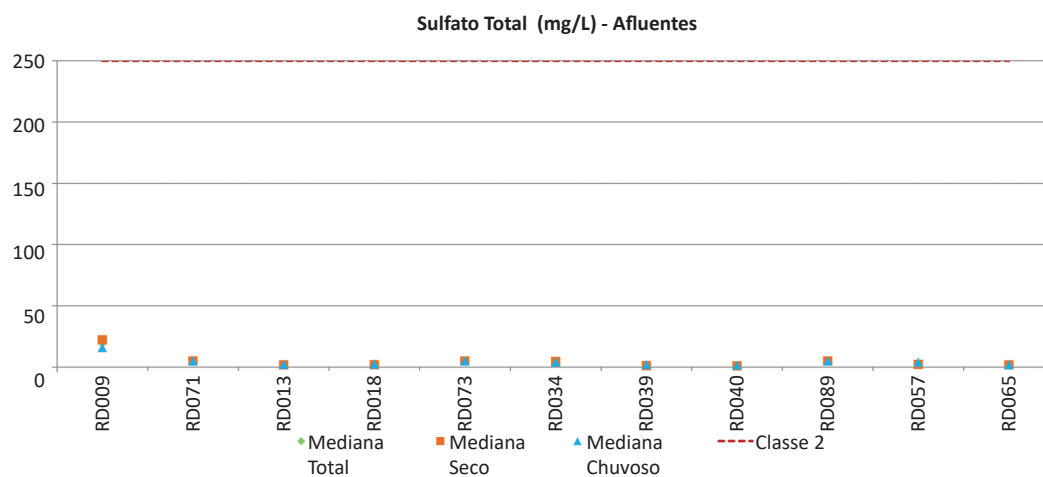
A Figura 174 e a Figura 175 apresentam os valores de mediana de sulfato total para as estações do rio Doce e afluentes, respectivamente. Para as estações localizadas no rio Doce (Figura 174), pouca oscilação foi observada ao longo do referido curso d'água, com valores de mediana do período total variando de 2,45 a 5,15 mg/L.

Figura 174 – Medianas dos valores de sulfato total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento do rio Doce.



Para as estações situadas em afluentes do rio Doce (Figura 175), notou-se valor mais elevado na estação RD009, no rio do Carmo, com mediana para o período total igual a 19,70 mg/L. Para as demais estações, as medianas variaram entre 1,30 e 5,00 mg/L, considerando o período total.

Figura 175 – Medianas dos valores de sulfato total para os períodos total, seco e chuvoso ao longo das estações de monitoramento de afluentes do rio Doce.



Avaliação temporal

Na sequência, apresentam-se os gráficos de dispersão das concentrações de sulfato total ao longo do tempo para as estações de monitoramento localizadas no rio Doce (Figura 176) e seus afluentes (Figura 177), de montante para jusante.