

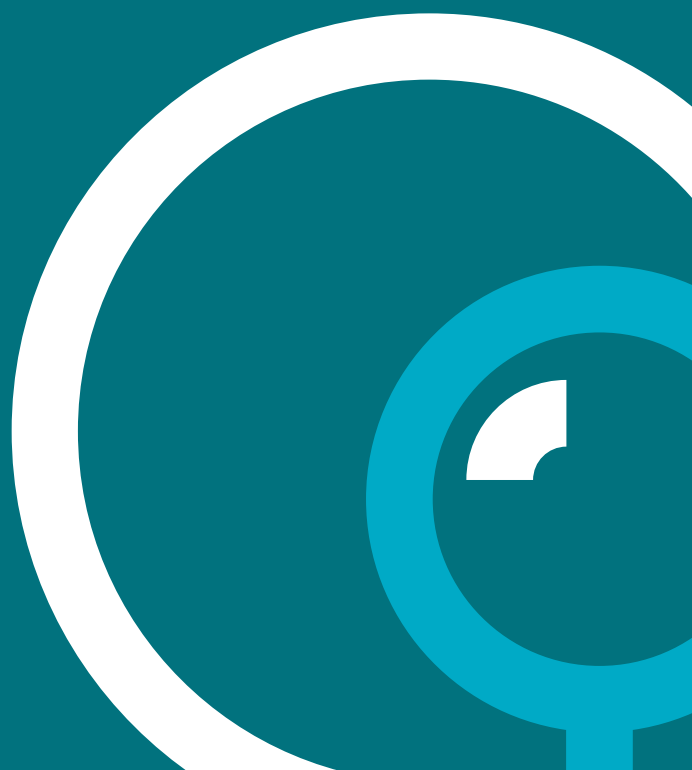
Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente

Diagnóstico de Danos: Resumo Executivo

Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente

Diagnóstico de Danos: Resumo Executivo

Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Maio/2020



Documento:	Diagnóstico Socioambiental dos Danos Decorrentes do Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce e Região Costeira Adjacente – Resumo Executivo
Considerações Gerais:	Este documento refere-se ao resumo executivo 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 identificação e mensuração dos danos socioambientais advindos do desastre até Junho de 2019.
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: 30140-007
	A/C: Dr. José Adercio Leite Sampaio
	E-mail: joseadercio@mpf.mp.br
Executante:	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 Meio Ambiente T + 55 (41) 3361-6882

Autoria: Equipe Técnica do 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	
Katia Patrícia Campanharo Fiebich Peroni	Diretora Administrativo-Financeira	
GERÊNCIA DE SEGMENTO		
André Ricardo Capra	MSc. Engenheiro Mecânico	Ensaio e Análises. Laboratoriais
Luiz Alkimin de Lacerda	Dr. Engenheiro Civil	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Tania Lucia Graf de Miranda	Dra. 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	Dr. 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	Dr. Engenheiro Civil	Coordenação Técnica
Tania Lucia Graf de Miranda	Dra. Engenheira Agrônoma	Coordenação Técnica
Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	MSc. Engenheira Ambiental	Coordenação Executiva
GESTÃO E ACOMPANHAMENTO		
Franciele Dãobroski	Esp. Engenheira Eletricista	Analista de Projeto
Guilherme de Poli	Administrador de Empresas	Analista de Projeto
Leandro Zem	Esp. Administrador de Empresas	Analista de Projeto
EQUIPE EXECUTORA		
Ana Paula Zampieri da Silva	Técnica em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Davi da Silva Nascimento	Esp. Engenheiro Cartógrafo	Geoprocessamento
Edson Haruo Yoshizumi	Técnico em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Fabiano Scheer Hainosz	MSc. Engenheiro Cartógrafo	Geoprocessamento
Lazaro Filipe de Souza	Geógrafo	Geoprocessamento e Paisagem
Maricler Toigo	Tecnóloga em Processamento de Dados	Geoprocessamento
Peterson da Silva Beherend	Técnico em Geomática	Geoprocessamento
Bruna Gomes Dias	Técnica em Química	Caracterização físico-química
Camila Marçal Gobi Pacher	MSc. Química	Caracterização físico-química
Camila Melo Pesqueira	MSc. Química	Caracterização físico-química
Fernando Henrique Coffacci de Lima	Químico	Caracterização físico-química
Heloisa Nunes da Motta	Dra. Engenheira Química	Caracterização físico-química

Joseane Valente Gulmine	Dra. Química	Caracterização físico-química e Química Ambiental
Juliano de Andrade	Dr. Engenheiro Químico	Caracterização físico-química
Kassia dos Santos Kanieski	MSc. Química	Caracterização físico-química
Danielle Caroline Schnitzler	Dra. Química	Química Ambiental
Marco Tadeu Grassi	Dr. Químico	Química Ambiental
Kleber Franke Portella	Dr. Químico	Rejeitos e Química Ambiental
Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança	Dra. Engenheira Ambiental	Rejeitos e Química Ambiental
Claudia Bueno dos Reis Martinez	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Kelly Sabrina Riby Afonso	Técnica em química	Ecotoxicologia
Leticia da Silva Pereira Fernandes	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luís Fernando Fávaro	Dr. Biólogo	Ecotoxicologia
Mariana Machado Lauer	Dra. Oceanógrafa	Ecotoxicologia
Tiago Tomiama Alvim	M.Sc. Biólogo	Ecotoxicologia
Fernando Mainardi Fan	Dr. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Hugo de Oliveira Fagundes	MSc. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Irani do Santos	Dr. Geógrafo	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Batista Dias de Paiva	Dr. Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Paulo Jankowski Saboia	MSc. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Julio Werner Yoshioka Bernardo	Dr. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Dr. Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	MSc. Engenheira Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rubem Luiz Daru	MSc. Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Tobias Bernward Bleninger	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Alcides Conte Neto	Estatístico	Águas Superficiais Continentais
Ana Carolina Canossa Becker	Engenheira Civil	Águas Superficiais Continentais
Ana Carolina Wosiack	MSc. Bióloga	Águas Superficiais Continentais
Bruna Arcie Polli	Dra. Engenheira Ambiental	Águas Superficiais Continentais
Cristovão Vicente Scapul tempo Fernandes	Dr. Engenheiro Civil	Águas Superficiais Continentais
Marianne Schaefer França Sieciechowicz	MSc. Engenheira Ambiental	Águas Superficiais Continentais
Nicole Machuca Brassac de Arruda	Dra. Bióloga	Águas Superficiais Continentais
André Filgueiras	MSc. Oceanógrafo	Águas e Sedimentos Costeiros
Emilio Marcelo Dolichney	Oceanógrafo	Águas e Sedimentos Costeiros
Guilherme de Godoy Baratella	Oceanógrafo	Águas e Sedimentos Costeiros
Luciano Hermanns	Dr. Oceanógrafo	Águas e Sedimentos Costeiros
Josiane Rovedder	MSc. Bióloga	Águas e Sedimentos Costeiros
Rafaela Michels da Silveira	MSc. Oceanógrafa	Águas e Sedimentos Costeiros
Tomaz Bohrer Brentano	Engenheiro Ambiental	Águas e Sedimentos Costeiros
Fernando Luiz Diehl	MSc. Oceanógrafo	Águas, Sedimentos e Zooplâncton Costeiros

André Virmond Lima Bittencourt	Dr. Engenheiro químico	Água Subterrânea
Paula Neuburger	Geóloga	Água Subterrânea
Bruna Pereira de Souza	MSc. Engenheira Ambiental	Saneamento
Mariana Vieira Calixto	Engenheira Ambiental	Saneamento
Thiago Carvalho de Mello	MSc. Engenheiro Químico	Saneamento
Patricia Dammski Borges de Andrade	MSc. Bióloga	Fauna aquática
Priscila Izabel Tremarin	Dra. Bióloga	Fitoplâncton
Sarah Meier Lopes	MSc. Bióloga	Fitoplâncton
Claudia Costa Bonecker	Dra. Bióloga	Zooplâncton Continental
João Vitor Fonseca da Silva	MSc. Biólogo	Zooplâncton Continental
Luiz Felipe Machado Velho	Dr. Biólogo	Zooplâncton Continental
Ludmilla Dias Veadó	MSc. Oceanógrafa	Zooplâncton e Ictioplâncton Costeiro
Gheysa do Rocio Moraes Pires	MSc. Tecnóloga em Química Ambiental	Qualidade de Sedimentos Continentais
Camila Ghilardi Cardoso Fontanella	MSc. Bióloga	Macroinvertebrados Aquáticos e Quelônios
Roger Henrique Dalcin	MSc. Biólogo	Bentos de Fundos Inconsolidados e Ictiofauna
Rosemary A. Brogim	Dra. Bióloga	Bentos de Fundos Inconsolidados
Adriano Hauer	Esp. Biólogo	Ictiofauna
Bruno Kazuo Nakagawa	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Giuliano Menegale Martinazzo	Biólogo	Ictiofauna
Matheus Oliveira Freitas	Dr. Biólogo	Ictiofauna e Quelônios
Maurício Belezia de Oliveira	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Vinícius Abilhoa	Dr. Biólogo	Ictiofauna
Emanuel Luis Razzolini	MSc. Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Rafael Antunes Baggio	Dr. Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética e Modelagem da dinâmica populacional
Walter Antônio Pereira Boeger	Dr. Oceanógrafo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Angie Thaisa da Costa Souza	MSc. Bióloga	Ictiofauna – Modelagem da dinâmica populacional
Sabrina Borges Lino de Araújo	Dra. Física	Ictiofauna – Modelagem da dinâmica populacional
Fabício Locatelli Trein	Esp. Biólogo	Quelônios
Letícia Kienen Languer Rolim	Médica Veterinária	Quelônios
Lucas Reinert Mendes	Biólogo	Quelônios
Marcos André Navarro	MSc. Biólogo	Quelônios
Matheus Ferreira de Souza	Médico Veterinário	Quelônios
Leonardo Liberali Wedekin	Dr. Biólogo	Cetáceos
Samira Costa da Silva	MSc. Médica Veterinária	Cetáceos
Ernesto Goldfarb Figueira	MSc. Geólogo	Geologia, Paisagem, Água Subterrânea e Qualidade de Sedimentos
Isabella Francoso Rebutini Figueira	Dra. Geóloga	Geologia, Qualidade de Sedimentos, Água Subterrânea
Leonardo Evangelista Lagoeiro	Dr. Geólogo	Geologia, Geoquímica
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
Betina Lepretti Medeiros	MSc. Engenheira Civil	Geotecnia
Esther Dyck	Engenheira Civil	Geotecnia
Joubert Weigert Favaro	MSc. Engenheiro Ambiental	Geotecnia
Marcelo Buras	MSc. Engenheiro Civil	Geotecnia
Rodrigo Moraes da Silveira	Dr. Engenheiro Civil	Geotecnia
Ana Alice Biedzicki de Marques	Dra. Bióloga	Biodiversidade
Dimas Vital Sabioni Resck	Engenheiro Florestal	Flora
Fábio Antônio da Paixão	Engenheiro Florestal	Flora
Fernando Camargo da Silva	Esp. Engenheiro Florestal	Flora
Juliano José da Silva Santos	MSc. Biólogo	Flora e Bioespeleologia
Jonas Eduardo Bianchin	Dr. Engenheiro Florestal	Flora
Marcelo Augusto da Silva	Biólogo	Flora
Tamara Molin	Bióloga	Flora
Vanessa Ariati	MSc. Bióloga	Flora
Marcelo Alejandro Villegas Vallejos	MSc. Biólogo	Fauna Silvestre e Áreas Protegidas
Luiz Eduardo Macedo Reis	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Rafael Lucchesi Balestrin	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Raphael Eduardo Fernandes Santos	Esp. Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
Andressa Gatti	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – mastofauna terrestre
Daniel da Silva Ferraz	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna terrestre
João Eduardo Cavalcanti Brito	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna terrestre
Michel Barros Faria	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna terrestre
Paulo Rogerio Mangini	Dr. Médico Veterinário	Fauna silvestre – mastofauna terrestre
Thadeu Sobral de Souza	Dr. Biólogo	Modelagem da biodiversidade
Maurício Humberto Vancine	MSc. Ecólogo	Modelagem da biodiversidade
Ana Tereza Bittencourt Guimarães	Dra. Bióloga	Modelagem da biodiversidade
Bernardo Brandão Niebuhr dos Santos	Dr. Físico	Modelagem da biodiversidade
João Luís Bittencourt Guimarães	MSc. Eng. Florestal	Modelagem de Serviços Ecossistêmicos
Leandro Moraes Scoss	MSc. Zootecnista	Áreas Protegidas
Robson Odeli Espíndola Hack	MSc. Biólogo	Áreas Protegidas e Fauna Silvestre
Karime Dawidziak Piazzetta	MSc. Tecnóloga em Processos Ambientais	Atmosfera
Luis Eduardo Soares Mayer	Geógrafo	Atmosfera
Camila Azevedo de Moraes Wichers	Dra. Arqueóloga e Museóloga	Patrimônio Cultural
Cristiane Schappo Wessling	MSc. Engenheira Ambiental	Patrimônio Cultural
Ellen Christine Prestes Ferronato	Esp. Engenheira Ambiental	Patrimônio Cultural
Gabriela Ribeiro Farias	Arquiteta	Patrimônio Cultural
Larissa M. Ferreira da Costa	Administradora	Patrimônio Cultural
Leandro S. C. Nascimento	Engenheiro civil	Patrimônio Cultural

Melina Pissolato Moreira	MSc. Arqueóloga	Patrimônio Cultural
Pamela Pereira de Araújo	Engenheira Ambiental	Patrimônio Cultural
Paulo Eduardo Zanettini	Dr. Arqueólogo	Patrimônio Cultural
Rogério Ricciluca Matiello Félix	MSc. Historiador	Patrimônio Cultural
Alex Sandro Barros	MSc. Arqueólogo	Patrimônio Arqueológico
Carlos Alberto Alves	Historiador	Patrimônio Arqueológico
Ilanthe Silva	Arqueólogo	Patrimônio Arqueológico
Letícia Ribeiro da Silva	MSc. Arqueóloga	Patrimônio Arqueológico
Lucas de P. Souza Troncoso	MSc. Arqueólogo	Patrimônio Arqueológico
Luciana Bozzo Alves	MSc. Arqueóloga	Patrimônio Arqueológico
Luiz Antonio Queiroz Pacheco	MSc. Arqueólogo	Patrimônio Arqueológico
Matilde A. Alves de Barros	Historiadora	Patrimônio Arqueológico
Paulo F. Bava de Camargo	Dr. Arqueólogo	Patrimônio Arqueológico
Roberto Faini Baracho	Mergulhador	Patrimônio Arqueológico
Sheila Silva	Arqueóloga	Patrimônio Arqueológico
Thais Pereira Rocha	Assistente de Pesquisa	Patrimônio Arqueológico
Devanir José de Oliveira Júnior	Historiador	Patrimônio Arqueológico e Material
Everaldo Cristiano da Silva	Arquiteto	Patrimônio Cultural Material
Rodrigo Silva	Dr. Historiador	Patrimônio Cultural Material
Enrico Spaggiari	Dr. Antropólogo	Patrimônio Cultural Imaterial
José Agnello Alves Dias de Andrade	Dr. Antropólogo	Patrimônio Cultural Imaterial
José Guilherme Cantor Magnani	Dr. Antropólogo	Patrimônio Cultural Imaterial
Leslie Lopes Sandes	Cientista Social	Patrimônio Cultural Imaterial
Mariana Hangai Vaz Guimarães Nogueira	Cientista Social	Patrimônio Cultural Imaterial
Mariana Luiza Fiocco Machini	MSc. Antropóloga	Patrimônio Cultural Imaterial
Michel de Paula Soares	MSc. Antropólogo	Patrimônio Cultural Imaterial
Rodrigo Valentim Chiquetto	MSc. Antropólogo	Patrimônio Cultural Imaterial
Yuri Bassichetto Tambucci	MSc. Antropólogo	Patrimônio Cultural Imaterial

EQUIPE DE CAMPO

Rômulo Henrique Santos Correa	Técnico em hidrologia	Águas superficiais e sedimentos
Fernando Figueiredo Laabs	Técnico em hidrologia	Águas superficiais e sedimentos
Adilson José de Lara	Hidrometrista	Águas superficiais e sedimentos
Edson Haruo Yoshizumi	Técnico	Águas superficiais e sedimentos
Fernando Gonçalves Opalinski	Técnico em eletrônica	Águas superficiais e sedimentos
Rafael Santos	Bioteecnólogo	Águas superficiais e sedimentos
Helen Sadauskas Henrique	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Matheus Ferreira de Souza	Médico Veterinário	Ecotoxicologia
Sabrina Loise de Moraes Calado	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Lygia Segal Nogueira	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
João Marques Lima da Fonseca	Biólogo	Flora – inventário florestal
Vicente de Jesus Durães	Esp. Engenheiro Ambiental	Flora – inventário florestal

Guilherme Felitto da Costa	Esp. Biólogo	Flora – reófitas
Emanuel Giovani Cafôfo Silva	MSc. Biólogo	Flora – macrófitas aquáticas
Antônio Campos Rocha Neto	MSc. Biólogo	Flora – campos rupestres
Marcel Comin	MSc. Biólogo	Flora – campos rupestres
Eli Carlos de Nardin	Biólogo	Flora – várzeas, vegetação secundária inicial e restinga
Felipe Eduardo Cordeiro Marinero	MSc. Biólogo	Flora – várzeas, vegetação secundária inicial e herbário
José Marcelo Pelloso Molina	MSc. Biólogo	Flora – epífitas
Alexandrina Pujals	Dra. Bióloga	Flora – trepadeiras
Frederico Fregolente Faracco Mazziero	MSc. Biólogo	Flora – herbáceas florestais
Públio Bonin Júnior	Biólogo	Flora – herbáceas florestais
Darlan Junior Cherion	Esp. Biólogo	Flora – banco de sementes, plântulas e serrapilheira
Lucas Junqueira Roncon	Biólogo	Flora – banco de sementes, plântulas e serrapilheira
Thiago Junqueira Roncon	Dr. Biólogo	Flora – banco de sementes, plântulas e serrapilheira
Paula de Freitas Larocca	Esp. Bióloga	Flora – restinga
Affonso Henrique Nascimento de Souza	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Alex Chavier Silva	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Cleandson Ferreira Santos	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Fabiano de Oliveira Silva	Esp. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Fernanda Vieira da Costa	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – entomofauna
Flávio Siqueira de Castro	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Lucas Neves Perillo	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Tandara de Souza Gomes	Bióloga	Fauna silvestre – entomofauna
Arthur Schramm de Oliveira	Esp. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Bernardo Franco da Veiga Teixeira	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Cyro de Sousa Bernardes	Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Guilherme Bard Adams	Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Martin Schossler	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Dalila de Fátima Ferreira	Bióloga	Fauna silvestre – avifauna
João Antônio de Bittencourt Vitto	Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
João Paulo Gava Just	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
Willian Menq dos Santos	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
Ariel Guilherme Santos do Nascimento	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Isteliene Lopes Leodoro	Bióloga	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Lizandra Regina Bigai	Bióloga	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Max Antonioni da Silva	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Ruan Márcio Ruas Nunes	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte

Vinicius Peron de Oliveira Gasparotto	MSc. Médico Veterinário	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Diego Afonso Silva	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Mattheus Torrezani Silveira	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Paula Beatriz Mangini	Dra. Médica Veterinária	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Ricardo Krul	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Bruna da Silva Fonseca	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Cristina Jaques da Cunha	MSc. Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Danielle de Oliveira Moreira	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Paula Modenesi Ferreira	Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Thali Leal Sampaio	MSc. Médica Veterinária	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Ana Lúcia Cypriano Souza	Dra. Bióloga	Cetáceos
Clarêncio Gomes Baracho	MSc. Biólogo	Cetáceos
Daniela Pitol	Biólogo	Cetáceos
Denis Alessandro Hille	Biólogo	Cetáceos
ESTAGIÁRIOS		
Rafaella Moreira	Engenharia Ambiental	Contextualização e danos
Bruno Nadalin Lima de Melo	Ciências Biológicas	Áreas Protegidas e Fauna Silvestre
Mirian Kaori Nagano	Geografia	Geoprocessamento
Matheus de Andrade Machado	Engenharia Cartográfica e de Agrimensura	Geoprocessamento
Eliana Vieira de Freitas	Engenharia Cartográfica e de Agrimensura	Geoprocessamento
Janiny Zanda Soares da Silva	Engenharia Cartográfica e de Agrimensura	Geoprocessamento
Laura Damasceno da Silva	História	Patrimônio Arqueológico
Sabrina Lisboa Alves	História	Patrimônio Arqueológico
Devon Gebauer Mayer	Ciências Biológicas	Bentos de Fundos Inconsolidados
Bruna Bergman Machado	Ciências Biológicas	Cetáceos
Marina Ferraz Sampaio	Ciências Biológicas	Fauna Silvestre
Izadora de Moura de Moraes	Ciências Biológicas	Fitoplâncton
Emerson Fernando Garcia Machado	Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Murilo Radloff Barghouthi	Engenharia Florestal	Flora
Saymon Hamses Monastier	Engenharia Florestal	Flora
João Marcos Carvalho	Engenharia Civil	Hidrologia
Nilo Kruchelski	Engenharia Civil	Hidrologia
Vitor Mittelstaedt Alfaro	Engenharia Civil	Hidrologia
Lucas Jerszurki	Geografia	Hidrologia
André Luiz de Souza Bonfim	Engenharia Ambiental	Hidrologia
Leticia Giese de Andrade Cruz	Engenharia Civil	Hidrologia
Ericka Viviane Lemos Marcondes	Ciências Biológicas	Macroinvertebrados bentônicos
Phillip Alves Schuster	Ciências Biológicas	Macroinvertebrados bentônicos
Aline Guidolin da Luz	Engenharia Civil	Águas Superficiais Continentais
Antônio José Hamerschmidt	Estatística	Águas Superficiais Continentais
Eduarda Bertoletti Duarte	Ciências Biológicas	Águas Superficiais Continentais
Jéssica Cristina Lozovei	Geografia	Qualidade de Sedimentos Continentais

Mirian Kaori Nagano	Geografia	Qualidade de Sedimentos Continentais
Amanda Cristina Fraga de Albuquerque	Engenharia Ambiental	Saneamento
Nayara Caroline M. Ulbrich	Agronomia	Solos
Tamires Maiara Ercole	Agronomia	Solos
Rebeca Dias Pegollo	Ciências Biológicas	Fauna Aquática
Ana Cleuza de Souza Pelanda	Ciências Biológicas	Fauna Aquática
Camilla Alves Oliveira	Ciências Biológicas	Fauna Aquática
Carolina Valério Leme	Engenharia Ambiental	Ecotoxicologia
Gisele Tatiane Soares da Veiga	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Luiz Guilherme Tatsh Henrique	Engenharia Ambiental	Ecotoxicologia
Mayara Rodrigues	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Rafaela Cruz Dias	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.	40
Figura 2 – Localização dos reservatórios de Germano e Fundão e da barragem de Santarém à jusante.....	42
Figura 3 – Fotografia panorâmica da cava da barragem de Fundão em 03/05/2017.....	43
Figura 4 – Divisão por compartimentos adotada no diagnóstico.....	45
Figura 5 – Atributos de classificação dos danos socioambientais.	46
Figura 6 – Foto da formação ferrífera.	46
Figura 7 – Esquema simplificado de beneficiamento do minério de Fe.....	48
Figura 8 – Gráfico da concentração média dos elementos químicos presentes nos rejeitos avaliados (subdivididos em categorias, conforme também abordado no texto).	50
Figura 9 – Ilustração da área de passagem e deposição da lama entre Fundão e a UHE Risoleta Neves.....	51
Figura 10 – Volumes de deposição de estimados para a área de estudo.....	52
Figura 11 – Área da pluma de rejeitos de Fundão na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro.	54
Figura 12 – Esquema cronológico e sintetizado dos danos.....	56
Figura 13 – Divisão dos compartimentos estudados ao longo do rio Doce no ambiente terrestre.	57
Figura 14 – Processos minerários com as respectivas áreas afetadas pela passagem e deposição da lama de rejeitos - detalhe de um segmento próximo a Barra Longa.....	58
Figura 15 – Localização das feições subterrâneas cadastradas no entorno da barragem de Santarém na Figura da esquerda e localização das cavernas mapeadas pelo Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), à direita.....	59
Figura 16 – Coleta de amostras deformadas e indeformadas de rejeito depositado, solo controle e misturas.	60
Figura 17 – Eventos que envolvem a geotécnica.....	61
Figura 18 – Exemplos de amostragem da vegetação nativa.	64
Figura 19 – Localização das Unidades Amostrais (UA) do estudo da fauna ao longo dos três compartimentos alocados na bacia do rio Doce.	65
Figura 20 – Resumo esquemático do conjunto de três sítios amostrais (T1, T2, C) de fauna terrestre que compõem uma Unidade Amostral.	66
Figura 21 – Parte dos trabalhos de diagnóstico da fauna silvestre: a) Papa-formigas-pardo (<i>Formicivora grisea</i>) capturada em rede de neblina, ainda presa à malha; b) Gambá-de-orelha-preta (<i>Didelphis aurita</i>) sob contenção manual; c) Instalação de armadilha fotográfica às margens do rio Gualaxo do Norte.	66
Figura 22 – Síntese dos métodos de amostragem utilizados para estudos da fauna terrestre.	67
Figura 23 – Imagens de exemplares de fauna silvestre avaliados. a): <i>Rhinella</i> sp (sapo cururu), espécie representativa dos anfíbios; b): <i>Akodon montensis</i> (rato-do-mato), espécie representativa do mamífero de pequeno porte; c): <i>Artibeus lituratus</i> , espécie representativa dos morcegos.	69

Figura 24 – Esquema de todas as análises realizadas no sangue retirado de cada um dos exemplares de fauna avaliados.	70
Figura 25 – Visão geral das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova em Barra Longa (estação Centro e estação Volta da Capela), Gesteira e Paracatu de Baixo.....	71
Figura 26 – Margens do rio Gualaxo do Norte com a remoção de solos e rochas e deposição da lama de rejeito.	73
Figura 27 – Perfil geológico-geomorfológico realizado ao longo do perfil do rio afetado pela lama de rejeito.	74
Figura 28 – CA-14. Caverna com desenvolvimento de cinco metros, não possui espeleotemas e foi atingida pela lama de rejeitos.	76
Figura 29 – CA-12. Caverna atualmente encontra-se alagada.....	77
Figura 30 – CA-17. À esquerda, fotografia fornecida pela Samarco (26/02/2015), anterior ao alteamento da Barragem de Nova Santarém. À direita, imagem atual obtida pela equipe do Lactec na posição onde se encontrava o abrigo.	77
Figura 31 – Fábrica Nova – Mina Santo Antônio. Localização do antigo sítio arqueológico correspondente às áreas da mineração Fábrica Nova. Atualmente o local encontra-se totalmente descaracterizado pelas bermas do talude construído à jusante da barragem de Santarém. a) Visão geral do local da antiga mina Santo Antônio / Fábrica Nova (foto com drone); b) Visão geral da região alterada pelas obras.	78
Figura 32 – Exemplo das edificações impactadas pela onda de lama no distrito de Bento Rodrigues. 79	
Figura 33 – Aterro Fazenda Vista Alegre: Imagem pré-desastre (esquerda) e pós-desastre (direita). ..	80
Figura 34 – Difratograma de raio-X (picos de minerais) das amostras de solo controle (linha vermelha e rosa) e rejeito (linhas azul e verde). Legenda: Ct - caulinita, Mi - mica, Gt - goethita, Hm - hematita, Qz - quartzo, Fd-K - feldspato potássico. Os círculos destacam os picos de hematita no rejeito.	81
Figura 35 – Teor de carbono orgânico de amostras de rejeito.	82
Figura 36 – Teores de silte de amostras de rejeito.....	82
Figura 37 – Valores de densidade do solo e macroporosidade de amostras de rejeito.....	83
Figura 38 – Registros fotográficos de processos erosivos nas áreas de deposição do rejeito (processos de erosão laminar e erosão em sulcos).	84
Figura 39 – Plantas de arroz cultivadas em solo controle (acima), rejeito (meio) e rejeito em sistema inundado (abaixo). Da esquerda para direita: tratamento sem adição de nutrientes (para o rejeito foram considerados dois tratamentos: rejeito puro e rejeito com adição de cascalho); tratamento com N; tratamento com N+K; tratamento com N+K+Mg; tratamento com N+K+Mg+Zn; tratamento completo (N+K+Mg+Zn+Mo+Cu+B+P).....	87
Figura 40 – Fator de contaminação de EPTs (teores pseudototais) no rejeito em relação à linha-base anterior ao desastre. Os elementos Ag, Sb, Hg, Se e Sn não possuem teores de linha-base e por isso não estão representados no gráfico.	88
Figura 41 – Sintoma de toxidez de Fe (coloração alaranjada) nas folhas de arroz (<i>Oryza sativa</i>) cultivado no rejeito em condição inundada.....	88

Figura 42 – Painel superior: teores pseudototais de Fe e Mn de amostras de rejeito. Painel inferior: frações (média) de Fe e Mn no rejeito.	89
Figura 43 – Teores de Fe em gramíneas desenvolvidas no rejeito (<i>Brachiaria</i> , <i>Cynodon</i> , <i>Panicum</i> e capineiras) e sobre o solo controle (<i>Brachiaria</i>).	90
Figura 44 – Visualização, em campo, de uma camada de solo de áreas de empréstimo (indicada pela trema) depositado acima do rejeito.	90
Figura 45 – Teores pseudototais de Cr e Pb de amostras do rejeito (em vermelho), dos solos controle (em amarelo) e de misturas (em marrom).	91
Figura 46 – Imagens de satélite indicando a adição de solo de empréstimo sobre áreas de deposição de rejeito. Fotos: coordenadas: 20°16'48.57" S e 43°2'20.82" O, nas datas de 25/04/2016 e 09/08/2016, respectivamente.	91
Figura 47 – Dispersão das medidas de espessura da camada de rejeito depositado e de mistura solo/rejeito ao longo da APDL dentro do C1.	92
Figura 48 – Solos de várzea soterrados pelo rejeito no C1.	92
Figura 49 – Exemplo de áreas onde houve supressão mecânica (linha clara) e mortalidade tardia (linha escura).	93
Figura 50 – Exemplos de locais onde houve supressão de vegetação para implantação de infraestrutura, no caso, a barragem de Nova Santarém.	94
Figura 51 – Exemplos de espécies de flora encontradas nos levantamentos.	95
Figura 52 – Aspecto dos fragmentos e do inventário florestal.	96
Figura 53 – Exemplos de espécies com usos e potencialidades conhecidos.	97
Figura 54 – Número de espécies com usos e potencialidades conhecidas por grupo.	97
Figura 55 – Amostragem do banco de sementes, plântulas e serapilheira.	98
Figura 56 – Relação entre o número de fragmentos, à esquerda, e proporção de áreas de borda, à direita, entre os cenários T0 e T1.	99
Figura 57 – Exemplo de espécies exóticas utilizadas nas ações de restauração.	100
Figura 58 – Relação entre a abundância de insetos e a distância ao rio danificado na bacia do rio Doce, sendo (a) Borboletas – (Nymphalidae); (b) besouros – Scarabaeinae; (c) formigas – Formicidae; (d) mosquitos – Culicidae.	101
Figura 59 – Abundância relativa de cinco espécies de mamíferos de grande porte nos sítios. Tratamento e Controle em cada uma das seis Unidades Amostrais (UA) ao longo do rio Doce: <i>Cerdocyon thous</i> (cachorro-do-mato), <i>Cuniculus paca</i> (paca), <i>Hydrochoeris hydrochaeris</i> (capivara), <i>Lontra longicaudis</i> (lontra) e <i>Procyon cancrivorus</i> (mão-pelada). O C1 é contemplado pelas UA1 e UA2.	101
Figura 60 – Gráficos de ordenação construídos com dados das espécies de anfíbios do C1 (UA1 e UA2).	102
Figura 61 – Proporção de espécies de aves encontradas nos sítios T1, T2 e Controle classificadas em cada categoria de sensibilidade a alterações ambientais: baixa (verde), média (amarelo) e alta (vermelho) sensibilidade.	103

Figura 62 – Prevalência e grau de infestação de ectoparasitos em morcegos no C2. As barras alaranjadas indicam a proporção de animais parasitados e capturados nas áreas próximas ao rio Doce.....	104
Figura 63 – Resultados da análise de perda de conectividade funcional para a fauna. (À esquerda), área funcionalmente conectada média da fauna no C1 em função de diferentes capacidades de dispersão. À direita, resultados da análise de corredores ecológicos e perdas de linearidade e conectividade funcional para a espécie sapo-de-chifre (<i>Proceratophrys boiei</i>).....	104
Figura 64 – Mapeamento das perdas de qualidade dos habitat para as espécies acauã (<i>Herpetotheres cachinnans</i> , acima) e jacarandá-da-Bahia (<i>Dalbergia nigra</i> , abaixo) no C1.	105
Figura 65 – Áreas protegidas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo afetadas pela passagem e deposição da lama (parte 1).....	110
Figura 66 – Áreas protegidas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo afetadas pela passagem e deposição da lama (parte 2).....	111
Figura 67 – Análise dos dados obtidos para partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2018. a) Variação média diária. (b, c e d) Índice de Qualidade do Ar (IQAr) calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 003/1990.....	113
Figura 68 – Áreas temáticas do ambiente terrestre.....	114
Figura 69 – Análise integrada para abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade para os danos.....	115
Figura 70 – Síntese dos danos socioambientais do ambiente aquático continental.....	117
Figura 71 – Características dos principais ambientes estudados, presentes nos compartimentos 1, 2 e 3.....	117
Figura 72 – Localização dos compartimentos do ambiente aquático continental ao longo do rio Doce.	118
Figura 73 – Distribuição das estações amostrais dos estudos realizados no ambiente aquático continental, na bacia do rio Doce	118
Figura 74 – Detalhe da posição das estações amostrais do C1	119
Figura 75 – Detalhe da posição das estações amostrais do C2, que engloba o C2A e 2B	119
Figura 76 – Detalhe da posição das estações amostrais do C3	120
Figura 77 – Sub-bacia com indicação da nascente e área atingida pela lama.....	121
Figura 78 – Relação entre variáveis representando a vazão de um rio: velocidade média na seção (v), largura (w) e profundidade (d) e área de seção transversal (s).	122
Figura 79 – Atividades de coleta: purga de poços, coleta de amostras, medições em campo e preparo de amostras para análises laboratoriais, ao fim de cada dia de coletas.	125
Figura 80 – Exemplo de sequência de levantamentos de sessões transversais.....	129
Figura 81 – Esquema representando duas seções batimétricas realizados em dois momentos diferentes. As diferenças positivas entre o levantamento mais atual (Perfil Depois) e o levantamento mais antigo (Perfil Antes) indicam o volume depositado e as diferenças negativas volume erodido	129
Figura 82 – Compartimentos do rio Doce e a distribuição das estações amostrais.....	131

Figura 83 – Equipamentos utilizados na coleta.....	131
Figura 84 – Classificação do dano para a análise granulométrica.....	132
Figura 85 – Métodos de coleta utilizados para a captura dos peixes: (a) rede de espera; (b) rede de arrasto; (c) tarrafa e; (d) puçá.....	134
Figura 86 – a) Preparação da seringa com heparina para coleta de sangue; b) Obtenção de sangue	136
Figura 87 – Esquema de todas as análises realizadas em cada um dos tecidos retirados dos peixes amostrados.	136
Figura 88 – Métodos de captura de quelônios: (a) rede de espera; (b) armadilha do tipo covão e; (c) busca noturna. Em (d) mostra-se biometria em espécime de cágado-de-barbicha (<i>Phrynops geoffroanus</i>).	138
Figura 89 – Proporção da área atingida pela lama em relação à área de drenagem das sub-bacias. .	139
Figura 90 – Proporção da área atingida pela lama em relação à quantidade de sub-bacias.	140
Figura 91 – Evolução da largura média do canal fluvial em relação a vazão média no trecho entre Fundão e UHE Risoleta Neves.	141
Figura 92 – Localização das cavas atingidas pela lama de rejeito entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves.....	143
Figura 93 – Exemplo de uma área com o mapeamento da área afetada e seu correspondente ao lado.	144
Figura 94 – Concentrações de OD na água ao longo da APDL (novembro/2015 a dezembro/2015) ..	146
Figura 95 – Rio do Carmo, a montante da confluência com o rio Piranga, em 28/09/2015 (foto à esquerda) e em 03/12/2015 (foto à direita).	147
Figura 96 – Sistemas de abastecimento de água afetados: a) Caminhão-pipa alimentando a ETA de Mascarenhas - ES com água tratada proveniente da Sede Municipal; b) Nova adutora de água bruta da ETA Sede de Linhares; c) Materiais da nova ETA para ser instalada em Galileia e d) Ponto de captação de água no rio Doce da Sede de Colatina.....	149
Figura 97 – Ilustração de alguns representantes do fitoplâncton encontrados nos ambientes aquáticos continentais.	152
Figura 98 – Riqueza e abundância registrada em diferentes estações amostrais no C1. A linha vertical, em cada gráfico, representa o momento do desastre. Dados obtidos do monitoramento da usina hidrelétrica Risoleta Neves.	153
Figura 99 – Exemplos de espécies zooplânctônicas que ocorreram nas estações da APDL nos monitoramentos do Lactec, após o desastre. da esquerda para a direita: Rotífera, Cladocea e Copepoda. <i>Kellicottia bostoniensis</i> (rotífero) é uma espécie invasora.	154
Figura 100 – Aspecto das áreas de várzea estudadas.	154
Figura 101 – Aspecto da vegetação aquática encontrada nos locais de estudo.	155
Figura 102 – Exemplos de espécies com usos e potencialidades identificados.	156
Figura 103 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD013.	157
Figura 104 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD023.	157
Figura 105 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD044.	158

Figura 106 – Variação espacial do volume de rejeito depositado na calha do rio (C1).	159
Figura 107 – Sumário dos resultados da análise da variação da espessura dos depósitos usando dados observados de seções transversais, C2 (Fazenda Rio Dantas) na esquerda e C3 (Colatina) na direita. A barra vermelha refere-se ao período em que ocorreu o desastre.	160
Figura 108 – Porcentagem do volume assoreado em relação ao volume total do reservatório.	161
Figura 109 – Gráfico das frações dos sedimentos no pré-desastre e pós-desastre.	163
Figura 110 – Fotos de macroinvertebrados a) Chironomidae, b) Oligochaeta.	165
Figura 111 – Exemplo de resultados do C2 em ambiente fluvial e reservatório: à esquerda, série temporal de cada um dos indicadores analisados (a linha pontilhada vermelha indica a data do desastre, a linha azul captura a tendência dos dados); à direita, box plots das comparações múltiplas pelo teste LSD de Fisher.	166
Figura 112 – Surubim do rio Doce (<i>Steindachneridion doceanum</i>). Exemplo de espécie endêmica ameaçada de extinção.	168
Figura 113 – Piabanha (<i>Brycon devillei</i>). Exemplo de espécie endêmica ameaçada de extinção.	168
Figura 114 – Riqueza da ictiofauna registrada no ambiente aquático continental do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – Fases 1, 2, 3 e 4) e secundários. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	169
Figura 115 – Componentes (presas) da dieta de invertívoros bentônicos, com detalhe de partículas minerais associadas ao sedimento com rejeito de mineração encontrados nos tratos digestórios em 2018/2019 na bacia do rio Doce.	170
Figura 116 – Proporção dos grupos tróficos (riqueza) registrados nas fases amostrais realizadas em 2018/2019 na bacia do rio Doce e na Linha de Base. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	170
Figura 117 – Proporção entre as categorias de espécies de peixes endêmicos, nativos e introduzidos (exóticos) registrados nas fases amostrais realizadas em 2018/2019 na bacia do rio Doce, Linha de Base e programas de monitoramento das UHE Baguari e Aimorés. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	171
Figura 118 – Espécies de peixes introduzidos (exóticos) registrados com maior frequência e biomassa nas fases amostrais realizadas em 2018/2019 na bacia do rio Doce.	172
Figura 119 – Exemplar de <i>Pimelodus maculatus</i>	173
Figura 120 – Exemplar de <i>Astyanax bimaculatus</i>	173
Figura 121 – Espécimes de <i>Hypostomus affinis</i> (à esquerda) e <i>Pygocentrus nattereri</i> (à direita) coletados nas estações de coleta da bacia do rio Doce.	175
Figura 122 – Imagens representativas de cortes histológicos de brânquia de diferentes espécies de peixes que apresentaram alterações na estrutura das brânquias. a) Brânquia de <i>Geophagus brasiliensis</i> (acará) com descolamento do epitélio lamelar (seta vermelha) e hiperplasia (seta preta); b) Brânquia de <i>G. brasiliensis</i> com indicação de alteração morfológica na disposição das lamelas (seta vermelha) e hiperplasia (seta preta); c) Brânquia de <i>Hoplosternum littorale</i> (tamoatá) com adesão de material (seta vermelha); d) Brânquia de <i>H. littorale</i> com aneurisma (seta = aneurisma); e) Brânquia de <i>Hoplias intermedius</i> (traíra) com indicação de região de hiperplasia lamelar e edema (chave) e de fusão lamelar (seta vermelha); f) Brânquia de <i>Hypostomus affinis</i> (cascudo areia) com indicação de hiperplasia e fusão lamelar (seta preta);	

g) Brânquia de <i>H. affinis</i> com encapsulamento de parasitas (seta preta); h) Brânquia de <i>H. affinis</i> com indicação de aneurisma (seta preta).	177
Figura 123 – Imagens representativas de cortes histológicos de estruturas reprodutivas (gônadas) saudáveis, de diferentes espécies de peixes. a) Ovários maduros de <i>Astyanax fasciatus</i> com a presença de folículos maduros (estrela azul); b e c) Ovários desovados de <i>Astyanax bimaculatus</i> e <i>Hoplosternum littorale</i> com indicação de folículos pós-ovulatórios (seta vermelha); d) Testículos maduros de <i>Geophagus brasiliensis</i> com a presença de grande quantidade de espermatozoides (spz); e) Ovários maduros de <i>G. brasiliensis</i> com a presença de folículos maduros (estrela azul); f) Testículos maduros de <i>Pimelodus maculatus</i> com a presença de grande quantidade de espermatozoides (spz); g) Testículo maduro de <i>P. nattereri</i> ; h) Testículo esvaziado de <i>P. maculatus</i> com indicação de espaços que foram deixados pelos espermatozoides eliminados (setas pretas).	179
Figura 124 – Perfil hidrológico regional.	183
Figura 125 – Registro das espécies nas campanhas de campo, (da esquerda para a direita): indivíduo jovem de cágado-de-barbicha (<i>Phrynos geoffroanus</i>), indivíduo adulto de cágado-amarelo (<i>Acontochelys radiolata</i>) e espécime adulto de cágado-da-serra (<i>Hydromedusa maximiliani</i>).	184
Figura 126 – Indivíduo filhote de <i>P. geoffroanus</i> registrado na área amostral R 12, no rio Doce, município de Rio Casca (MG).	185
Figura 127 – Áreas temáticas do ambiente aquático continental.	186
Figura 128 – Gráficos de gravidade, tendência e reversibilidade geral para o meio aquático continental.	187
Figura 129 – Síntese dos danos socioambientais na Zona Costeira e Marinha.	188
Figura 130 – Mapa da área de estudo para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).	189
Figura 131 – Compartimentalização e estações amostrais da Área Marinha para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).	190
Figura 132 – Estuários e estações amostrais avaliados para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).	191
Figura 133 – Faixa de praia e estações amostrais para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).	191
Figura 134 – Manguezais avaliados para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).	192
Figura 135 – Fotos das coletas dos organismos bênticos de fundos inconsolidados na área de passagem da pluma de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG. a) Equipamento de coleta e estocagem das amostras de estuários e ambiente marinho; b) Método de coletas da infauna de manguezais; c): Método de coleta da infauna de praias e d) Lavagem das amostras em peneira de malha de 0,5 mm de diâmetro.	197
Figura 136 – Métodos de coleta utilizados para a captura dos peixes.	198
Figura 137 – À esquerda, embarcação utilizada para amostragem de cetáceos; à direita, realização de necropsia em tartaruga-verde (<i>Chelonia mydas</i>) encontrada morta em praia na APA Costa das Algas, em Aracruz/ES.	201

Figura 138 – Gráfico de barra com os dados de oxigênio dissolvido na região marinha classificados conforme a escala de alteração definida e agregados por compartimento e segmentação temporal. (P1 – novembro/2015 a março/2016; P2 – abril/2016 a dez/2016; P3 – 2017; e P4 – 2018).....	203
Figura 139 – Classificação dos danos em relação ao aumento da concentração de sólidos nos diferentes compartimentos da região marinha avaliada.	204
Figura 140 – Classificação dos dados de turbidez pós-desastre no estuário do rio Doce e no compartimento marinho mais próximo a foz (5-A). Linhas verticais tracejadas indicam a data do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e a transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).	205
Figura 141 – Ilustração de algumas espécies do fitoplâncton encontradas na região costeira do Espírito Santo.	207
Figura 142 – Variação da densidade (org.m^{-3}) para o zooplâncton por ponto amostral (coluna azul) no Ambiente Marinho na foz do rio Doce (julho/2018 e fevereiro/2019 – DADOS PRIMÁRIOS) e zona costeira adjacente. Linha tracejada (DADOS PRIMÁRIOS) = azul – densidade média total pós-desastre (P2); Linhas tracejadas (DADOS SECUNDÁRIOS) = verde – densidade média total pré-desastre (P0); vermelha – pico de densidade logo após o desastre; marrom – densidade média total pós-desastre (P1 e P2).	208
Figura 143 – Algumas espécies representativas de Copepoda: a) <i>Temora stylifera</i> , no ambiente marinho; b) <i>Paracalanus quasimodo</i> , no ambiente de transição.	209
Figura 144 – Variação da concentração corporal de Fe nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido Sul-Norte: Figura da esquerda refere-se a janeiro e fevereiro de 2016 e os dados estão expressos como média $\pm$ desvio e erro padrão; a Figura da direita refere-se a abril de 2016 e os dados estão expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com o período anterior.	210
Figura 145 – Fator de contaminação para a espessura do sedimento depositado, obtidos pela divisão entre a diferença de espessuras de depósito do cenário com desastre e sem desastre pela espessura do cenário de deposição natural.....	211
Figura 146 – Média das classes granulométricas das amostras nos períodos pré e pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce, desconsiderando resultados atípicos. (P0 – Pré-desastre; P1 – novembro/2015 a março/2016; P2 – abril/2016 a dezembro/2016; P3 – 2017; e P4 – janeiro/2018 a fevereiro/2019).	212
Figura 147 – Classificação dos danos em relação ao aumento da concentração de EPTs no sedimento nos diferentes compartimentos da região marinha avaliada.....	215
Figura 148 – Fotos dos animais bênticos utilizados pelas equipes para as análises de contaminação por EPTs e biomarcadores. a) <i>Mytella guyanensis</i> ; b) <i>Ucides cordatus</i> e c) <i>Polychaeta</i>	218
Figura 149 – Riqueza da ictiofauna registrada no ambiente marinho adjacente à foz do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – P1, P2, P3 e P4) e secundários. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	219
Figura 150 – Riqueza da ictiofauna registrada no estuário do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – P1, P2, P3 e P4) e secundários. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	219

- Figura 151** – Espécies de peixes demersais registradas nas amostragens realizadas pelo Lactec entre 2018 e 2019 no ambiente costeiro atingido pelo rejeito de mineração..... 221
- Figura 152** – *Genidens genidens*, espécie de bagre registrada nas amostragens realizadas pelo Lactec entre 2018 e 2019 no ambiente estuarino atingido pelo rejeito de mineração..... 221
- Figura 153** – Relação entre a riqueza e abundância de peixes ictiófagos e zooplânctívoros registrada nas fases amostrais de 2018 e 2019 (à esquerda) nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce e no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2017 pela SAMARCO/CTA no ambiente marinho e (à direita) no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela COPPE (2017) e em 2017 pela SAMARCO no ambiente estuarino. 222
- Figura 154** – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada no ambiente marinho adjacente à foz do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – Fases 1, 2, 3, 4, 5 e 6) e secundários. Os dados da COPPE/UFRJ (2017) apresentam apenas a riqueza de peixes recifais. 223
- Figura 155** – Imagens representativas de cortes histológicos de brânquia de diferentes espécies de peixes, capturados nos ambientes estuarino e marinho, que apresentaram alterações na estrutura das brânquias. Presença de desestruturação do filamento branquial (seta vermelha), fusão de lamelas (seta verde), aneurisma (seta azul) e proliferação celular (estrela amarela) em peixes da espécie *Genidens genidens* a e b); *Pimelodus maculatus* c); *Pseudauchenipterus affinis* d); *Cathorops spixii* e) e *Conodon nobilis* f) capturados no estuário da Foz do rio Doce e região marinha adjacente. 225
- Figura 156** – Imagens representativas de cortes histológicos de estruturas reprodutivas (gônadas) saudáveis de diferentes espécies de peixes. a) Testículo Imaturo de *Cathorops spixii* com túbulo seminífero contendo espermatogônias, circundado em branco pela linha pontilhada e b) Testículo Esgotado de *Cathorops spixii* com espaços deixados pelos espermatozoides após a eliminação (setas pretas); c) Ovário Imaturo de *Conodon nobilis* contendo ovócitos pré vitelogênicos em lamelas ovígeras organizadas; d) Ovário Semi-Desovado de *Conodon nobilis* contendo folículos maduros (estrela azul) e folículos pós-ovulatórios (estrela amarela); e) Ovário Maduro de *Cathorops spixii* repleto de folículos maduros (estrela azul); f) Testículo Maduro de *Conodon nobilis* com túbulos seminíferos repletos de espermatozoides (spz)..... 227
- Figura 157** – Gráfico exemplificando as alterações que ocorreram nos sistemas não enzimáticos de peixes estuarinos capturados na Foz do rio Doce na estação seca (símbolo branco) e chuvosa (símbolo preto) do ano de 2018. Setas vermelhas e verdes indicam redução e aumento das respostas, respectivamente. Quadrados, triângulos para cima e losangos representam resultados dos biomarcadores nas brânquias enquanto círculos e triângulos para baixo representam resultados dos biomarcadores no fígado. 228
- Figura 158** – Média da concentração de As (mg.kg^{-1}) determinada em peixes capturados (à esquerda) na Foz do rio Doce nas estações seca (coluna branca) e chuvosa (coluna preta) e (à direita) nos pontos marinhos próximos (5 km – 1, 3 e 5) e afastados (20 km – 2, 4 e 6) da costa, nas estações seca (colunas escuras) e chuvosa (colunas claras). Linha pontilhada em laranja corresponde aos limites máximos estabelecidos pela ANVISA..... 230
- Figura 159** – Resultado da modelagem de nicho que demonstra áreas de perda de adequabilidade ambiental no espaço temporal P1-P0 para *Chelonia mydas*. 231
- Figura 160** – Resultado da modelagem de nicho que demonstra áreas de perda de adequabilidade ambiental no espaço temporal P1-P0 para *Sotalia guianensis*..... 232
- Figura 161** – Indivíduo jovem de tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) registrado na área de estudo. ...233
- Figura 162** – Boto-cinza (*Sotalia guianensis*) registrado no monitoramento da região. 234

Figura 163 – Número de encalhes do boto-cinza entre Conceição da Barra e Barra Seca (ES). Linha tracejada indica a tendência linear de encalhes.	234
Figura 164 – Terra Indígena (TI), do ambiente costeiro, afetada pela pluma de rejeitos decorrente do desastre da Samarco.	236
Figura 165 – Unidades de Conservação, costeiras e marinhas, afetadas pela passagem e deposição da lama (pluma de rejeitos) oriunda do desastre.	237
Figura 166 – Zonas de amortecimento das Unidades de Conservação também afetadas pelo desastre.	241
Figura 167 – Localização do Banco dos Abrolhos, norte do estado do Espírito Santo e do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos.	242
Figura 168 – Pluma de sedimentos em suspensão onde estão localizados os recifes costeiros da região de Abrolhos.	243
Figura 169 – Mapa da distribuição geral dos tipos de rochas e a localização das principais drenagens que desembocam nas proximidades do banco de Abrolhos.	244
Figura 170 – Áreas temáticas da zona costeira e marinha.	246
Figura 171 – Análise integrada para gravidade, tendência e reversibilidade para os danos.	247
Figura 172 – Patrimônio Cultural: Campos de Pesquisa do Diagnóstico de Danos.	248
Figura 173 – Área de Abrangência e Compartimentos para Diagnóstico dos Danos do Patrimônio Cultural.	250
Figura 174 – Tipologias de ferramentas e análises utilizadas pela equipe de arqueologia para identificar os bens danificados pelo desastre: a) Exame e classificação de peças arqueológicas coletadas em campo; b) Prospeção Extensiva de Superfície: Planta e perfil de estrutura em sítio arqueológico; c) Prospeção de Subsuperfície: Unidade de Escavação realizada em Bento Rodrigues, Mariana/MG; d) Prospeção Subaquática no oceano Atlântico; e) e f) Fragmentos cerâmicos coletados no sítio arqueológico Terra Prometida I, Tumiritinga (MG).	252
Figura 175 – Tipologias de ferramentas e análises utilizadas pela equipe de bens materiais para identificar os bens danificados pelo desastre: a) Capela de São Bento (pré e pós-desastre), Bento Rodrigues, Mariana, MG; totalmente destruída pela onda de rejeito; b) Croqui da Capela de São Bento e entorno (composição pré-desastre); c) Planta da Capela de São Bento e Imagens Internas e Externas (composição pré-desastre); d) Cabeça de uma imagem registrada na Reserva Técnica da Fundação Renova (pós-desastre).	256
Figura 176 – Tipologias de ferramentas e análises utilizadas pela equipe de bens imateriais para identificar os bens danificados pelo desastre: a) Equipe de antropologia junto com morador da região mostrando a área atingida na margem do rio Doce; b) Pescador mostrando suas redes inutilizadas pós-desastre; c) Memórias de práticas culturais no rio Doce; d) Memórias de batismo no rio Doce.	259
Figura 177 – a) Unidade de Escavação em Bento Rodrigues, Mariana (MG): Solo original está abaixo da camada de rejeito; b) Marco de divisa em pedra, de propriedade soterrada em Bento Rodrigues, Mariana (MG).	261
Figura 178 – Classificações do Dano.	262
Figura 179 – a) Sítios arqueológicos danificados em Mariana, MG: Mina Santo Antônio e Fazenda Fábrica Nova; b) Unidade de Escavação aberta rente à estrutura de muro de pedra localizado na planície fluvial (neste caso, o rejeito alcançou uma marca de 1,3 m de profundidade).	263

Figura 180 – Classificações do Dano.	263
Figura 181 – a) Terraço fluvial no sítio arqueológico Terra Prometida 1 (pós-desastre); b) Mina Santo Antônio (pós-desastre), Mariana (MG).....	264
Figura 182 – Classificações do Dano.	265
Figura 183 – a) Estrutura da ponte que compõe o SA Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway com marcas de rejeito (visível nos pilares de sustentação da ponte) ; b) Imagem destacada de vídeo subaquático: Evidencia-se uma das portas do casario da embarcação no sítio arqueológico Naufrágio Comboios 1, em Linhares (ES) (oceano Atlântico).	266
Figura 184 – Classificações do Dano.	266
Figura 185 – a) Casa das Rótulas, Santa Rita Durão, Mariana (MG); b) Sobrado feito de taipa de pilão, Santa Rita Durão, Mariana (MG).	268
Figura 186 – Classificações do Dano.	268
Figura 187 – a) Imagem de Roca de Nossa Senhora das Mercês. Vista frontal. Data: 10/2017. Fonte: Estilo Nacional (2017c). ; b) Imagem sacra não identificada. Vista frontal. Data:10/2016.	270
Figura 188 – Classificações do Dano.	270
Figura 189 – a) Vista do balneário inundado na Lagoa de Juparanã, Linhares (ES); b) Bens materiais edificadas que sofreram danos no Conjunto Barra Longa/ Sede sobre ortoimagens orbitais pós-desastre (T2), Barra Longa (MG).	271
Figura 190 – Classificações do Dano.	271
Figura 191 – a) Trecho da Estrada Real, em Bento Rodrigues, Mariana (MG); b) Interrupção no caminho de São José, entre Barra Longa, MG e Santa Cruz do Escalvado (MG).	273
Figura 192 – Classificações do Dano.	273
Figura 193 – a) Hotel Xavier, em Barra Longa, MG; b) Capela de Nossa Senhora das Mercês, Bento Rodrigues, Mariana (MG).	274
Figura 194 – Classificações do Dano.	275
Figura 195 – a) Dona Iranir, doceira, relatou as dificuldades de manutenção de seu ofício, após a queda de frequentadores da praia do Jaó, sua principal clientela, em Tumiritinga (MG); b) Memória de família indo para uma das ilhas do rio Doce, Ilha Brava, Governador Valadares (MG).	277
Figura 196 – Classificações do Dano.	277
Figura 197 – a) Barraca “Coxinha da Sandra”, na Feira do Produtor Rural, Sede, Mariana (MG), para onde foi deslocada após o desastre (registro de 18/08/2018); b) Casa de Oxum, dona das águas doces, em terreiro localizado em Barbados, Colatina (ES): Identificados relatos de ofensa à entidade pelos rejeitos, interrupção temporária de atividades no terreiro por falta d’água e diminuição de rituais realizados no rio Doce.	278
Figura 198 – Classificações do Dano.	279
Figura 199 – a) Memória da Folia de Reis de Povoação, Linhares (ES) (registro de Claudionor Soares); b) Foto de cartaz de apresentação da Banda de Congo São Benedito do Rosário de Vila do Riacho, Aracruz (ES).....	280
Figura 200 – Classificações do Dano.	280

Figura 201 – a) Festa Nossa Senhora das Mercês (2018), Bento Rodrigues, Mariana (MG); b) Bote de uso da família de Marizete, moradora de Biboca, São José do Goiabal (MG), inutilizado pós-desastre (registro de 22/09/2018).	281
Figura 202 – Classificações do Dano.	282
Figura 203 – a) Recorte de jornal: Fotografia de quintal de Bento Rodrigues, Mariana (MG); a) Morador de Revés do Belém exibe foto de pescaria (memória) no rio Doce pré-desastre (registro de 23/09/2018), Revés do Belém, Bom Jesus do Galho (MG).	283
Figura 204 – Classificações do Dano.	283
Figura 205 – a) Memória de Juarez pescando no rio Doce (pré-desastre), em Perpétuo Socorro, Belo Oriente (MG); b) Arcedino Esteves de Sousa mostrando uma pequena quantidade de ouro, o qual apresenta como prova de sua atividade na faiscagem (registro de 23/08/2018), Sede, Rio Doce (MG).	284
Figura 206 – Classificações do Dano.	284
Figura 207 – a) Mestre Alcides com o estandarte da Folia de Reis de Barreto, em Barreto, Barra Longa (MG); b) Memória de Cavalgada pré-desastre, em Ponte do Gama, Mariana (MG).	286
Figura 208 – Classificações do Dano.	286
Figura 209 – Quantitativo de Bens Danificados: Total e por Patrimônio.	288
Figura 210 – Total de bens culturais (LB) e bens danificados pelo desastre, de acordo com suas categorias.	288
Figura 211 – Danos ao Patrimônio Cultural e Serviços Ecossistêmicos Culturais.	291

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física das amostras de rejeito coletadas.	49
Tabela 2 – Tipos de danos às feições subterrâneas associados à gravidade e tempo de recuperação	59
Tabela 3 – Descrição da escala de gravidade utilizada para os danos relacionados à paisagem, processos minerários e resíduos sólidos.	59
Tabela 4 – Definição das categorias de dano estabelecidas para avaliar os danos ao solo.	62
Tabela 5 – Critérios assumidos para a classificação do dano de aumento dos processos erosivos.	63
Tabela 6 – Critérios assumidos para a classificação do dano de alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo.	63
Tabela 7 – Critérios assumidos para a classificação do dano de alteração da permeabilidade e do fluxo de água no solo.	63
Tabela 8 – Critérios assumidos para a classificação do dano de alteração da estabilidade de encostas.	63
Tabela 9 – Classificação de gravidade dos danos à flora, aplicados nos Compartimentos 1 e 3.	65
Tabela 10 – Classes de danos à fauna terrestre e critérios assumidos para sua classificação.	68
Tabela 11 – Dano decorrente do desastre do rompimento da barragem de Fundão da Samarco identificado nas Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas com seu respectivo indicador, escala e gravidade.	71
Tabela 12 – Definição das categorias de dano estabelecidas para avaliar o dano à qualidade do ar. ..	72
Tabela 13 – Quantitativos dos processos DNPM atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas fases.	75
Tabela 14 – Quantitativos dos processos DNPM atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas substâncias.	76
Tabela 15 – Tabela resumo das feições subterrâneas vistoriadas e avaliação dos danos.	77
Tabela 16 – Tabela resumo das feições subterrâneas vistoriadas e avaliação dos danos.	78
Tabela 17 – Área de supressão vegetal e estruturas civis impactadas.	79
Tabela 18 – Estimativa das áreas de remoção e disposição de resíduos sólidos	80
Tabela 19 – Fatores de segurança e respectivas condições de segurança.	86
Tabela 20 – Parâmetros de fertilidade e química do solo (valores médios) quantificados nas amostras de rejeito depositado, em relação à linha-base.	87
Tabela 21 – Quantitativo de área suprimida de acordo com a forma de supressão e classe de vegetação.	93
Tabela 22 – Quantitativo de áreas afetadas por classe de vegetação nativa.	94
Tabela 23 – Total de espécies, espécies ameaçadas, endêmicas e protegidas por grupo	95
Tabela 24 – Estimativa do total de madeira suprimida	96

Tabela 25 – Número de espécies e estimativa do número de indivíduos encontrados nas avaliações do banco de sementes, plântulas e serapilheira.	98
Tabela 26 – Modificação percentual do índice de conectividade funcional entre os cenários pré e pós-desastre (T1-T0); valores negativos indicam PERDAS de conectividade	105
Tabela 27 – Estimativas de área total, em hectares, da perda de adequabilidade ambiental entre os cenários pré e pós-desastre das cinco espécies animais e duas espécies vegetais modeladas. As perdas foram classificadas em categorias quantitativas dessa métrica em perdas ‘leves’ (perdas menores de 20%), ‘moderadas’ (perdas entre 20% e 40%) ou ‘severas’ (perdas maiores que 40%).	106
Tabela 28 – Resumo das alterações encontradas nas concentrações de EPTs em amostras de sangue de exemplares da fauna silvestre	108
Tabela 29 – Relação das Unidades de Conservação e outras Áreas Naturais Protegidas afetadas pelo desastre, extensão linear (km) e área (ha) afetada pela onda de lama.....	109
Tabela 30 – Classificação dos danos às áreas de drenagem das sub-bacias afluentes.	121
Tabela 31 – Classificação dos danos à configuração da rede de drenagem.....	122
Tabela 32 – Indicadores dos danos à qualidade da água superficial.....	123
Tabela 33 – Categorias de classificação dos dados de qualidade da água superficial.	124
Tabela 34 – Critério para definição da gravidade dos danos à qualidade da água superficial.....	125
Tabela 35 – Classificação dos danos à comunidade fitoplanctônica.....	126
Tabela 36 – Classificação do dano ao zooplâncton	127
Tabela 37 – Escala de classificação dos danos à flora aquática.	128
Tabela 38 – Categorias de danos associados ao transporte de sedimentos.	128
Tabela 39 – Categorias de dano associadas ao assoreamento de reservatórios	129
Tabela 40 – Categorias de dano associadas ao assoreamento em rios - C1.....	130
Tabela 41 – Categorias de dano associadas ao assoreamento em rios - C2 e C3.....	130
Tabela 42 – Interpretação da gravidade do dano da alteração da granulometria	132
Tabela 43 – Descrição da classificação da gravidade do dano referente ao aumento das concentrações de EPTs.....	133
Tabela 44 – Classificação dos danos aos macroinvertebrados bentônicos.....	133
Tabela 45 – Descrição da classificação da gravidade dos danos referentes à ictiofauna.....	135
Tabela 46 – Expoentes para elementos geométricos na bacia do rio Doce.....	140
Tabela 47 – Expoentes dos elementos geométricos para a Fazenda Ocidente.....	141
Tabela 48 – Quantitativos das cavas atingidas pela lama de rejeito.	143
Tabela 49 – Classificação para cada EPT e alterações em relação ao limite legislado	148
Tabela 50 – Tempo de paralisação do fornecimento de água potável de cada localidade afetada....	150
Tabela 51 – Resumo do quantitativo de espécies encontradas por grupo.....	155

Tabela 52 – Usos e potencialidades das espécies de flora aquática encontradas.	156
Tabela 53 – Síntese dos resultados da classificação do dano sobre a alteração da composição granulométrica.....	163
Tabela 54 – Classificações das alterações por elementos em cada compartimento respectivo.....	165
Tabela 55 – Síntese do dano sobre a alteração da concentração de EPTs nos sedimentos.	165
Tabela 56 – Lista de espécies ameaçadas e endêmicas registradas presentes no relatório “Mortandade de peixes na Bacia do rio Doce após rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues (Mariana/MG), em 05/11/2015 (DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016).	167
Tabela 57 – Cenários de danos e recuperação das populações de peixes de <i>Astyanax bimaculatus</i> e <i>Pimelodus maculatus</i> dentro da APDL	174
Tabela 58 – Compartimentalização da Zona Marinha para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).	190
Tabela 59 – Definições utilizadas para classificação do dado.	193
Tabela 60 – Critério para definição da gravidade dos danos à qualidade da água superficial.....	193
Tabela 61 – Critérios de classificação da gravidade do dano.	195
Tabela 62 – Definições utilizadas para classificação do dano.	196
Tabela 63 – Classificação dos danos aos peixes.	198
Tabela 64 – Dano decorrente do desastre do rompimento da barragem de Fundão da Samarco identificado nas Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas com seu respectivo indicador, escala e gravidade.	199
Tabela 65 – Categorias do dano de perda de adequabilidade ambiental para mamíferos e quelônios marinhos.	200
Tabela 66 – Categorias de classificação no estuário do rio Doce e região marinha para cada um dos indicadores definidos, e número de vezes em que as concentrações ultrapassaram o limite da classe 1.	206
Tabela 67 – Classificação do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs no sedimento do estuário do rio Doce e da região marinha para cada um dos indicadores definidos, e número de vezes acima do limite legislado e do máximo histórico pré-desastre.	214
Tabela 68 – Relação das Unidades de Conservação e Terra Indígena afetadas pela pluma de rejeitos, extensão linear (km) e área (ha) alterada por classe da pluma (nível de concentração).....	238
Tabela 69 – Relação das Unidades de Conservação que tiveram parte da área de suas respectivas zonas de amortecimento afetadas pela sobreposição com a pluma de rejeitos decorrente do desastre.....	239
Tabela 70 – Dados comparativos dos estudos de vegetação de restinga no estado do Espírito Santo.	245
Tabela 71 – Relação de danos decorrentes do desastre da Samarco identificados no Patrimônio Arqueológico com seus respectivos Indicadores, Escalas de Indicadores e Gravidade.	253
Tabela 72 – Conjuntos do Patrimônio Cultural Material.	255

Tabela 73 – Relação de danos decorrentes do desastre da Samarco identificados no Patrimônio Cultural Material com seus respectivos Indicadores, Escalas de Indicadores e Gravidade	257
Tabela 74 – Relação de danos decorrentes do desastre da Samarco identificados no Patrimônio Cultural Imaterial com seus respectivos Indicadores, Escalas de Indicadores e Gravidade.....	260
Tabela 75 – Matriz de danos do ambiente terrestre e atmosfera, ambiente aquático continental e zona costeira e marinha e suas respectivas classificações em termos de abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade.	293

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE ABREVIATURAS	
Ag	- Prata
Al	- Alumínio
As	- Arsênio
B	- Boro
Ba	- Bário
Cr	- Cromo
Cu	- Cobre
Cd	- Cádmio
Cél.	- Célula
cm	- Centímetro
Co	- Cobalto
e.g.	- Abreviação em latim que significa 'por exemplo'
Etc.	- Et cetera
Fe	- Ferro
g	- Grama
ha	- Hectares
Hg	- Mercúrio
Ind.	- Indivíduo
kg	- Quilograma
L	- Litro
m	- Metro
Mg	- Magnésio
mg/L	- Miligrama por litro
Min.	- Minuto
mL	- Mililitro
mm	- Milímetro
Mn	- Manganês
Mo	- Molibdênio
Ni	- Níquel
Noc	- Navio oceanográfico
P	- Fósforo
p.	- Página
p.ex.	- Por exemplo
Pb	- Chumbo
s	- Segundos
Sb	- Antimônio
Se	- Selênio
Sn	- Estanho
Ti	- Titânio
V	- Vanádio
Zn	- Zinco

LISTA DE SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	- Aberrações Cromossômicas
ANA	- Agência Nacional de Águas
APA	- Área de Preservação Ambiental
APDL	- Área de Passagem e Deposição da Lama
APE	- Áreas de Proteção Especial
APP	- Áreas de Preservação Permanente
BA	- Bahia
BC	- Bray-Curtis
BHRD	- Bacia Hidrográfica do rio Doce
C	- Índice de Dominância de Simpson
C1	- Compartimento 1
C2	- Compartimento 2
C2A	- Compartimento 2A
C2B	- Compartimento 2B
C3	- Compartimento 3
C4	- Compartimento 4
C5	- Compartimento 5
CBR	- Índice de Suporte Califórnia
CITES	- Comércio Internacional de Espécies da Fauna e da Flora Selvagem Ameaçadas de Extinção
CO	- Carbono Orgânico
CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
COVs	- Compostos Orgânicos Voláteis
CSS	- Concentração de Sedimentos em Suspensão
CTA	- Capacidade de Troca Aniônica
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica
CVRD	- Complexo de Água Limpa
DNA	- Ácido Desoxirribonucleico
EDS	- Análise Química Elementar
EPA	- Environmental Protection Agency
EPTs	- Elementos Potencialmente Tóxicos
ES	- Espírito Santo
ETA	- Estação de Tratamento de Água
FC	- Fator de Contaminação
FS	- Fator de Segurança
FURG	- Universidade Federal de Rio Grande
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IMA	- Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (ES)
IGAM	- Instituto Mineiro de Gestão de Águas
IPHAN	- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
IQAr	- Índice de Qualidade do Ar
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura

LISTA DE SIGLAS

MG	- Minas Gerais
MOS	- Matéria Orgânica do Solo
MPF	- Ministério Público Federal
MPMG	- Ministério Público de Minas Gerais
OD	- Oxigênio Dissolvido
PA	- Pará
PCH	- Pequena Central Hidrelétrica
PE	- Parque Estadual
PGPC	- Programa de Gestão do Patrimônio Cultural
pH	- Potencial Hidrogeniônico
PMN	- Parque Natural Municipal
PMQQS	- Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos
PR	- Paraná
PTS	- Partículas Totais em Suspensão
QF	- Quadrilátero Ferrífero
RB	- Reserva da Biosfera
RBMA	- Reserva da Biosfera da Mata Atlântica
REBIO	- Reserva Biológica
RJ	- Rio de Janeiro
RT	- Relatório Técnico
RUSLE 1	- Equação Universal de Perda de Solo Revisada
SAA	- Sistema de Abastecimento de Água
SC	- Santa Catarina
SEMAD	- Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (MG)
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SP	- São Paulo
TI	- Terras Indígenas
UA	- Unidades Amostrais
UC	- Unidade de Conservação
UFES	- Universidade Federal do Espírito Santo
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHE	- Usina Hidrelétrica
Unesco	- Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNT	- Unidade Nefelométrica de Turbidez
UTM	- Universal Transversa de Mercator
VMP	- Valor Máximo Permitido
VRQs	- Valores de Referência de Qualidade
ZA	- Zona de Amortecimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	37
2 CONTEXTUALIZAÇÃO	39
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE E REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE.....	39
2.2 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS MINERÁRIOS DE FUNDÃO.....	42
2.3 ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA O DIAGNÓSTICO	43
2.3.1 Área de estudo, ambientes e compartimentos.....	44
2.3.2 Classificação do dano.....	45
2.4 O REJEITO DE FUNDÃO	46
2.4.1 O Quadrilátero Ferrífero e o processo de beneficiamento de minério de FERRO	46
2.4.1.1 Processo de beneficiamento dos minérios das Formações Ferríferas	47
2.4.2 Caracterização físico-química do rejeito.....	48
2.4.2.1 Caracterização física do rejeito.....	48
2.4.2.2 Caracterização química.....	49
2.4.2.3 Caracterização de resíduos sólidos	50
2.4.3 Área de passagem e deposição da lama de rejeitos	50
2.4.4 Volume de deposição de rejeitos	51
2.4.5 Pluma de dispersão do rejeito na região costeira	52
3 AMBIENTE TERRESTRE E ATMOSFERA.....	55
3.1 ÁREA DE ESTUDO	56
3.2 METODOLOGIA.....	57
3.2.1 Superfície	57
3.2.2 Solo	60
3.2.3 Vegetação	64
3.2.4 Fauna Silvestre	65
3.2.5 Áreas protegidas	70
3.2.6 Atmosfera	71
3.3 DANOS À SUPERFÍCIE	72
3.3.1 Alteração na paisagem.....	72
3.3.2 Danos em processos de extração de bens minerais	75
3.3.3 Danos em feições subterrâneas	76
3.3.4 Áreas de Geração de resíduos sólidos	79
3.3.5 Ampliação de áreas de disposição de rejeitos	80
3.4 DANOS AOS SOLOS.....	81
3.4.1 Alteração da composição do solo	81

3.4.2	Aumento da densidade do solo	82
3.4.3	Aumento dos processos erosivos.....	83
3.4.4	Alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo.....	84
3.4.5	Alteração da permeabilidade e fluxo de água no solo	85
3.4.6	Alteração da estabilidade de encostas.....	85
3.4.7	Alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo.....	86
3.4.8	Contaminação do solo por EPTs	88
3.4.9	Contaminação do solo por EPTs devido às ações emergenciais pós-desastre	90
3.4.10	Formação de Tecnossolo	92
3.5	DANOS À VEGETAÇÃO.....	93
3.5.1	Supressão de vegetação nativa ciliar	93
3.5.2	Supressão de vegetação nativa por implantação de infraestrutura	94
3.5.3	Perda de biodiversidade de flora	95
3.5.4	Perda de recursos florestais madeireiros.....	96
3.5.5	Perda de recursos florestais não madeireiros.....	96
3.5.6	Redução na capacidade de resiliência da floresta	98
3.5.7	Aumento do efeito de borda.....	99
3.5.8	Introdução e aumento de espécies exóticas.....	99
3.6	DANOS À FAUNA SILVESTRE	100
3.6.1	Alterações nas populações faunísticas.....	100
3.6.2	Alterações nas assembleias faunísticas.....	102
3.6.3	Piora nas condições físicas da fauna	103
3.6.4	Perda de conectividade na paisagem.....	104
3.6.5	Perda de qualidade dos habitat	105
3.6.6	Comprometimento à saúde da fauna silvestre	106
3.6.6.1	Prejuízos à osmorregulação (biomarcadores: osmolalidade e íons)	106
3.6.6.2	Prejuízos ao metabolismo (biomarcadores: glicose, lactato e proteína plasmática)	106
3.6.6.3	Alterações no sistema antioxidante e de biotransformação (biomarcadores: cat, sod, gpx e gst)	107
3.6.6.4	Alterações em sistemas não enzimáticos (biomarcadores: GSH, MET, LPO)	107
3.6.6.5	Genotoxicidade e mutagenicidade (biomarcadores: ensaio cometa, MN E ANES)	107
3.6.7	Aumento na bioacumulação - Alterações nas concentrações de EPTs.....	107
3.7	DANOS ÀS ÁREAS PROTEGIDAS	108
3.8	DANOS À ATMOSFERA	112

3.8.1 Alteração da qualidade do ar	112
3.9 SÍNTESE DOS DANOS.....	113
4 AMBIENTE AQUÁTICO CONTINENTAL.....	116
4.1 ÁREA DE ESTUDO	117
4.2 METODOLOGIA.....	120
4.2.1 Morfologia dos cursos d'água	120
4.2.2 Qualidade das águas	123
4.2.3 Comunidades planctônicas	126
4.2.4 Flora aquática.....	127
4.2.5 Transporte de sedimentos	128
4.2.6 Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	130
4.2.7 Peixes	133
4.2.8 Quelônios	137
4.3 DANOS À MORFOLOGIA DOS CURSOS D'ÁGUA	138
4.3.1 Alteração na área de drenagem dos cursos de água	138
4.3.2 Alteração na configuração da rede de drenagem dos cursos de água	140
4.3.3 Soterramento de cavas e açudes	142
4.4 DANOS À QUALIDADE DAS ÁGUAS	145
4.4.1 Redução das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) na água	145
4.4.2 Aumento das concentrações de sólidos na água	147
4.4.3 Aumento das concentrações de EPTs na água	148
4.4.4 Dano ao uso da água para abastecimento público	149
4.5 DANOS ÀS COMUNIDADES PLANCTÔNICAS.....	151
4.5.1 Alteração da comunidade fitoplanctônica	151
4.5.2 Alterações nas comunidades zooplanctônicas.....	152
4.6 DANOS À FLORA AQUÁTICA	154
4.6.1 Supressão de vegetação nativa	154
4.6.2 Perda da biodiversidade de flora	155
4.6.3 Perda de recursos FLORESTAIS NÃO MADEIREIROS	155
4.7 DANOS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE DOS SEDIMENTOS	156
4.7.1 Alteração da dinâmica do transporte de sedimentos ao longo do rio Doce	156
4.7.2 Assoreamento do canal do rio.....	159
4.7.3 Assoreamento dos reservatórios hidrelétricos	161
4.8 DANOS À QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS	162
4.8.1 Alteração na composição granulométrica do sedimento	162

4.8.2 Alteração da concentração de EPTs nos sedimentos	164
4.8.3 Alteração na comunidade de macroinvertebrados bentônicos presentes no sedimento	165
4.9 DANOS AOS PEIXES	167
4.9.1 Mortandade de peixes nos corpos d'água afetados	167
4.9.2 Alterações na composição e estrutura da comunidade de peixes	168
4.9.3 Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	169
4.9.4 Aumento da riqueza e abundância de peixes introduzidos (exóticos)	171
4.9.5 Redução da diversidade genética da ictiofauna	172
4.9.6 Alteração da dinâmica populacional da ictiofauna	174
4.9.7 Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	176
4.9.7.1 Prejuízos às estruturas e função das brânquias (biomarcador: histopatologia de brânquias)	176
4.9.7.2 Prejuízos às funções fisiológicas de osmorregulação, respiração, excreção e equilíbrio ácido-base	178
4.9.7.3 Prejuízos ao metabolismo (biomarcadores: glicose, glicogênio e lactato)	178
4.9.7.4 Prejuízos às estruturas e função reprodutiva (biomarcador: histopatologia de gônadas)	178
4.9.7.5 Alterações no sistema antioxidante e de biotransformação (biomarcadores: CAT, SOD, GPx e GST)	180
4.9.7.6 Alterações em sistemas não enzimáticos (biomarcadores: GSH, MET, LPO)	180
4.9.7.7 Genotoxicidade e mutagenicidade (biomarcadores: ensaio cometa, MN e ANEs)	180
4.9.7.8 Neurotoxicidade (biomarcadores: AChE)	180
4.9.8 Aumento na bioacumulação	181
4.10 OUTROS TEMAS ESTUDADOS	182
4.10.1 Águas subterrâneas	182
4.10.2 Quelônios	184
4.11 SÍNTESE DOS DANOS	185
5 ZONA COSTEIRA E MARINHA	188
5.1 ÁREA DE ESTUDO	189
5.2 METODOLOGIA	192
5.2.1 Qualidade das águas	192
5.2.2 Comunidades planctônicas	194
5.2.3 Deposição de sedimentos no mar	195
5.2.4 Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	195

5.2.5	Peixes	198
5.2.6	Áreas protegidas	199
5.2.7	Vegetação costeira	200
5.2.8	Quelônios e mamíferos marinhos	200
5.3	DANOS À QUALIDADE DAS ÁGUAS	202
5.3.1	Redução das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) na água	202
5.3.2	Aumento das Concentrações de Sólidos na Água	203
5.3.3	Aumento da concentração de EPTs na água	205
5.4	DANOS ÀS COMUNIDADES PLANTÔNICAS	206
5.4.1	Alterações da comunidade fitoplanctônica	207
5.4.2	Alteração da comunidade zooplânctônica	208
5.4.2.1	Alterações na densidade e na composição das espécies do zooplâncton	208
5.4.2.2	Aumento da concentração de elementos potencialmente tóxicos – epts no zooplâncton marinho	209
5.5	DANOS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE DOS SEDIMENTOS	210
5.5.1	Incremento na deposição de sedimentos	210
5.6	DANOS À QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS	212
5.6.1	Alteração das Características Granulométricas do Sedimento Superficial	212
5.6.2	Aumento da Concentração de EPTS no Sedimento	213
5.6.3	Alteração na estrutura das comunidades bêmicas de fundos inconsolidados	215
5.6.4	Alterações na condição de saúde e contaminação por EPTS em invertebrados bêmicos de fundos inconsolidados	217
5.7	DANOS AOS PEIXES	218
5.7.1	Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna do ambiente marinho adjacente à foz do rio Doce	218
5.7.2	Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	222
5.7.3	Diminuição das populações de espécies de peixes costeiros de interesse comercial	223
5.7.4	Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	224
5.7.4.1	Prejuízos às estruturas e função das brânquias em Peixes (biomarcador: histopatologia de brânquias)	224
5.7.4.2	Prejuízos às funções fisiológicas de osmorregulação, respiração, excreção e equilíbrio ácido-base em Peixes (biomarcadores: osmolalidade, íons, teor hídrico, atividade específica das enzimas AC, NAK e H ⁺ -ATPase)	226
5.7.4.3	Prejuízos ao metabolismo em peixes (biomarcadores: glicose, glicogênio e lactato)	226

5.7.4.4	Prejuízos às estruturas e função reprodutiva (biomarcador: histopatologia de gônadas).....	226
5.7.4.5	Alterações no sistema antioxidante e de biotransformação em Peixes (biomarcadores: CAT, SOD, GPx e GST).....	227
5.7.4.6	Alterações em sistemas não enzimáticos em Peixes (biomarcadores: GSH, MET, LPO).....	228
5.7.4.7	Neurotoxicidade (biomarcadores: AChE).....	229
5.7.4.8	Genotoxicidade e Mutagenicidade em Peixes (biomarcadores: ensaio cometa, MN e ANEs).....	229
5.7.5	Aumento na bioacumulação.....	229
5.8	DANOS AOS QUELÔNIOS E MAMÍFEROS MARINHOS	230
5.8.1	Perda da qualidade dos habitats marinhos.....	231
5.9	DANOS ÀS ÁREAS PROTEGIDAS	235
5.9.1	Abrolhos	242
5.10	OUTROS TEMAS ESTUDADOS.....	245
5.10.1	Vegetação costeira	245
5.11	SÍNTESE DOS DANOS.....	246
6	PATRIMÔNIO CULTURAL.....	248
6.1	ÁREA DE ESTUDO	249
6.2	METODOLOGIA.....	250
6.2.1	Bens Arqueológicos.....	250
6.2.2	Bens culturais materiais	254
6.2.3	Bens culturais imateriais	258
6.3	DANOS AO PATRIMÔNIO ARQUEOLÓGICO	261
6.3.1	Soterramento de bem arqueológico.....	261
6.3.2	Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico.....	262
6.3.3	Modificação da paisagem de implantação de bem arqueológico	264
6.3.4	Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos.....	265
6.4	DANOS AO PATRIMÔNIO MATERIAL.....	267
6.4.1	Comprometimento de estruturas de bens culturais materiais	267
6.4.2	Desencadeamento de processos físico-químicos que acelerem a degradação dos bens culturais materiais.....	269
6.4.3	Modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais	271
6.4.4	Alteração de partes ou setores de rotas e caminhos históricos e/ou tradicionais	272
6.4.5	Interrupção ou cessão do acesso e/ou uso dos bens culturais materiais	274
6.5	DANOS AO PATRIMÔNIO IMATERIAL.....	276

6.5.1 Alteração de práticas culturais.....	276
6.5.2 Alteração da rede de relações comunitárias.....	278
6.5.3 Sofrimento social	279
6.5.4 Alteração de espaços relacionados a práticas culturais.....	281
6.5.5 Alteração de espaços de referência de memória	282
6.5.6 Alteração no acesso a matérias-primas e implementos associados necessários à produção dos bens culturais	284
6.5.7 Alteração na circulação de práticas e bens culturais	285
6.6 SÍNTESE DE DANOS	288
7 MATRIZ DE DANOS	292
8 CONCLUSÕES.....	299
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	302

1 INTRODUÇÃO

No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos minerários de Fundão, pertencente à Samarco Minerações S.A., situada em uma região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Doce, subdistrito de Bento Rodrigues, município de Mariana, estado de Minas Gerais. O rompimento resultou na liberação de um volume estimado de 44 milhões de m³ de rejeitos de mineração sobre os córregos Fundão e Santarém e os rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce.

Este volume foi transportado pelos corpos hídricos por mais de 650 km, desde a barragem de Fundão, em Minas Gerais, até o oceano Atlântico, no estado do Espírito Santo, onde, ao longo de 17 dias, se depositou pelo caminho em diferentes concentrações (PINTO-COELHO, 2015; FERNANDES *et al.*, 2016). Este, que é um dos maiores desastres socioambientais da história do Brasil (ESCOBAR, 2015; SILVA; FERREIRA; SCOTTI, 2015; ESPINDOLA *et al.*, 2016; FREITAS; SILVA; MENEZES, 2016; LEONARDO *et al.*, 2017) afetou, de forma direta ou indireta, aproximadamente 1,4 milhão de pessoas em Minas Gerais e no Espírito Santo e, devido a sua intensidade, foi classificado pela Defesa Civil como desastre de nível IV, o qual corresponde a um “desastre de muito grande porte”, cujos danos são importantes e consideráveis (IBAMA, 2015; PINTO-COELHO, 2015).

Conforme o Termo de Ajustamento Preliminar firmado entre o Ministério Público Federal (MPF), a Samarco Mineração S.A., a Vale S.A. E a BHP Billiton Brasil Ltda., cabe ao Lactec a realização do diagnóstico dos danos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, ao longo da bacia do rio Doce e da zona costeira adjacente, incluindo assessoria técnica ao MPF-MG. As atividades do Lactec se iniciaram em março de 2017, contando com uma equipe multidisciplinar composta por pesquisadores e consultores especialistas em várias áreas de conhecimento, para a realização de coletas, pesquisas e análises de dados da região para obtenção de um quadro detalhado dos danos socioambientais provocados ou intensificados pelo desastre.

As atividades iniciaram-se pelo levantamento de dados dos ambientes afetados antes do desastre (também chamados de linha-base), seguido pelo levantamento de dados bibliográficos e de campo após o evento, sobre o meio ambiente e o patrimônio cultural. Com a execução de dois anos de estudo, sendo um de levantamento de dados em campo, este resumo apresenta os primeiros resultados consolidados por danos do desastre, mensurados em relação à linha-base. Os danos estão descritos de forma simplificada, visando informar aos mais variados leitores sobre o que ocorreu ao meio ambiente e ao patrimônio cultural após o desastre. O foco desse trabalho é o levantamento dos danos socioambientais, e apesar de muitos aspectos apresentarem uma grande interface com a população humana, os danos sociais e econômicos não são abordados nesse estudo. Esses danos estão sendo estudados por outras instituições selecionadas pelo MPF.

O relatório foi dividido em grandes áreas temáticas, sendo descrito inicialmente pela contextualização sobre o que era o rejeito que extravasou após o rompimento da barragem, qual era sua caracterização e composição, e quais elementos potencialmente tóxicos (EPTs) estavam presentes. Também traz informações sobre a quantidade de rejeito que havia no local e que foi despejado ao longo do rio Doce, qual foi a área onde a lama passou e se depositou em toda a extensão do rio, afluentes e oceano, chamada nesse estudo de Área de Passagem e Deposição da Lama (APDL).

Posteriormente são apresentados os danos, mensurados em relação à linha-base, conforme os três ambientes atingidos: o ambiente terrestre, que corresponde à porção exterior às calhas dos rios; o ambiente aquático continental, que engloba todos os ecossistemas aquáticos de água doce, como rios, lagoas e reservatórios hidrelétricos; e a zona costeira e marinha, que contempla a foz do rio Doce e porção oceânica próxima, as faixas de areia e os manguezais.

Na sequência são apresentados os danos sobre o patrimônio cultural, considerando o patrimônio arqueológico, além dos bens materiais e imateriais. Ao final desse documento pode-se consultar uma tabela que apresenta, de maneira resumida, os danos que foram verificados ao meio ambiente e a conclusão deste diagnóstico.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente causou danos socioambientais em uma escala sem precedentes em termos de extensão espacial e temporal. Além disso, a singularidade e a heterogeneidade dos ambientes afetados ampliaram ainda mais os efeitos do desastre, tornando o diagnóstico de danos um trabalho complexo e com grande volume de dados.

Apesar disso, com dois anos de estudo, sendo um de coleta de dados em campo, já foi possível chegar a resultados consistentes que caracterizaram os danos nos ambientes afetados com suas respectivas mensurações em relação à linha-base, quando disponível, além de sua relação com o rompimento da barragem de Fundão. Apesar de alguns danos ainda necessitam de investigações complementares, foi possível fornecer respostas concretas sobre questões como a toxicidade do rejeito, a contaminação das águas, do solo, do ar, da flora e da fauna e os bens culturais afetados pelo desastre.

É importante ressaltar que os dados apresentados nesse resumo executivo referem-se a um estudo que teve início, aproximadamente, dois anos após a ocorrência do desastre, e dessa forma, muitos danos que ocorreram logo após o evento podem ter desaparecido antes mesmo do início deste levantamento, sendo possível descrevê-los apenas quando outros grupos de estudos avaliaram a região nesse período de tempo, sendo chamados nesse documento de dados secundários (ou seja, dados coletados e/ou publicados por outras instituições, que não o Lactec).

Além disso, para a realização do diagnóstico dos danos, foram selecionadas áreas temáticas e grupos biológicos que fossem representativos dos ambientes alvo do estudo (chamados de bioindicadores) e que pudessem, de fato, fornecer respostas sobre os efeitos do desastre e que apresentassem um histórico anterior ao qual os dados levantados pudessem ser comparados. Sendo assim, os danos descritos nesse resumo representam os danos do rompimento da barragem de Fundão nos diferentes ambientes, sendo esperado que outros organismos não avaliados, mas que utilizam os mesmos locais e recursos (como alimento, áreas de proteção, entre outros) estejam ou estivessem sujeitos aos mesmos efeitos que aqueles verificados nos bioindicadores selecionados.

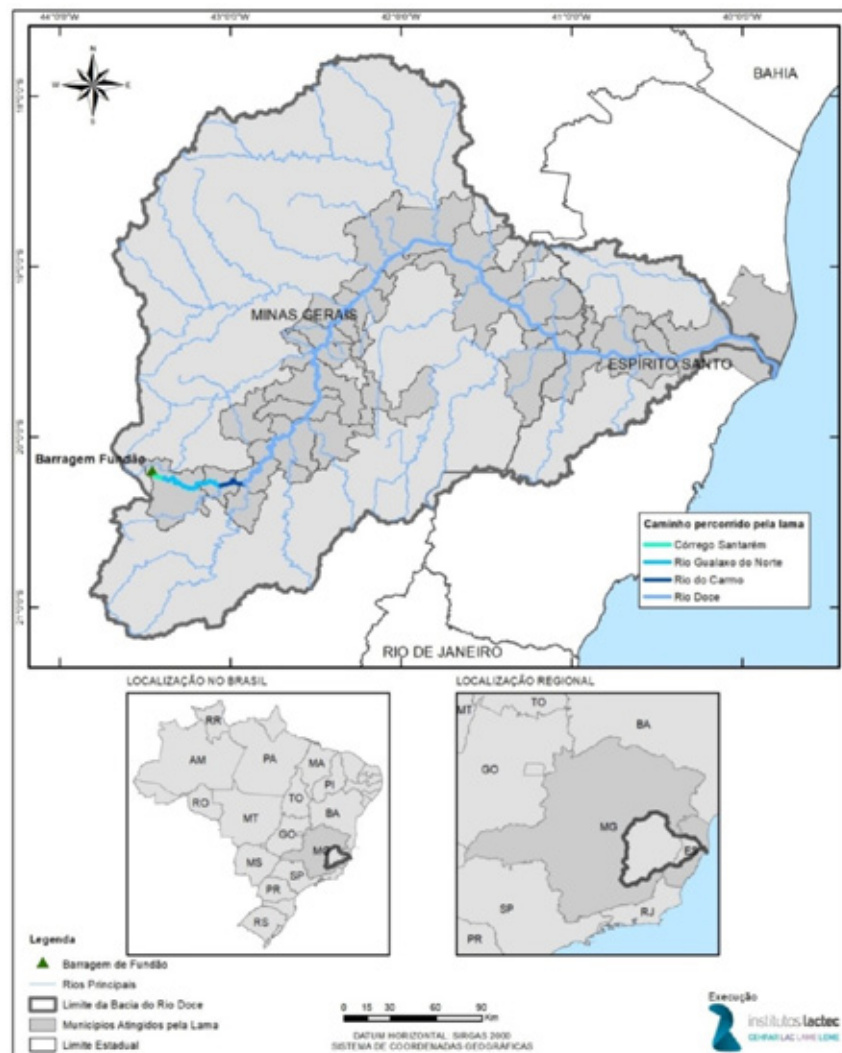
No presente capítulo buscou-se agregar as informações e os resultados transversais a todos os ambientes, iniciando com uma caracterização sintética da área em estudo, com dados pré-desastre. Na sequência foi apresentado o cenário do desastre e a abordagem metodológica adotada para o estudo.

Na continuidade são apresentadas informações sobre o rejeito de Fundão, além de dados sobre a dispersão do rejeito no vale do rio Doce e na região costeira, como a área total de passagem e deposição da lama, o volume depositado e a extensão da pluma de rejeitos na costa do Espírito Santo.

2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE E REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE

A bacia hidrográfica do rio Doce é considerada a quinta maior bacia hidrográfica brasileira, com uma área de 83.400 km², a qual atravessa o território de dois estados da região Sudeste do Brasil, Minas Gerais e Espírito Santo (Figura 1) (CBH-DOCE, 2014).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Execução: Lactec.

Nas cabeceiras da bacia hidrográfica localiza-se o Quadrilátero Ferrífero, onde encontram-se as mais importantes jazidas de Fe de Minas Gerais. Nessa região, além dos altos teores de Fe, que variam em distribuição espacial, há diversos outros elementos em diversos teores nas rochas.

Ao longo do rio Doce existem quatro usinas hidrelétricas, de montante para jusante, UHE Risoleta Neves, também conhecida como Candonga, UHE Baguari, UHE Eliezer Batista, também conhecida como Aimorés, e UHE Mascarenhas.

Os estudos de linha-base apontam que há carência de informações históricas sobre o meio ambiente e o patrimônio cultural na bacia do rio Doce, anteriores ao rompimento da barragem de Fundão.

Em virtude da exploração minerária ocorrente há centenas de anos na região, da expansão agropecuária e da urbanização presente em toda a bacia, o rio Doce historicamente apresenta degradação ambiental. O relevo acidentado e a supressão vegetal proporcionaram condições de fragilidade à erosão. Isso, aliado à falta de tratamento de esgotos domésticos na bacia, intensificaram a degradação da qualidade das águas. Além disso, conforme dados levantados para a linha-base (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017 a, b; 2018 b), a qualidade da água no rio Doce apresenta grande influência dos períodos seco e chuvoso na bacia.

No que se refere aos sedimentos de fundo, pode-se afirmar que a área de estudo afetada pelo rompimento da barragem de Fundão já apresentava concentrações elevadas de diferentes EPTs há vários anos também relacionados à exploração mineral e urbanização. Desta forma, a biodiversidade aquática reflete as condições de degradação da bacia.

Quanto à cobertura vegetal da bacia do rio Doce, esta é originalmente coberta por formações florestais e campestres do domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, embora haja influência do domínio do Cerrado em determinadas regiões. Porém, devido à intensa supressão vegetal ao longo dos anos, os maiores remanescentes vegetais localizam-se protegidos em Unidades de Conservação (UCs). Dessa forma, os estudos realizados antes do desastre de flora e fauna terrestre na região concentraram-se nas áreas protegidas.

Ao longo do rio Doce existem dois ricos e complexos sistemas lacustres, um no médio rio Doce, no entorno do Parque Estadual do Rio Doce, e outro próximo à região costeira, no Espírito Santo. De forma oposta às lagoas do médio rio Doce, algumas lagoas do Espírito Santo são anualmente inundadas com as águas provenientes do rio Doce, principalmente quando estas extrapolam a calha principal nos eventos de cheias. Apesar da importância desses ambientes para os usuários da água na região e biodiversidade aquática, existem poucos dados prévios ao desastre.

O delta do rio Doce, na região costeira do estado do Espírito Santo, é um dos mais expressivos do Brasil, excedendo 2.500 km², sendo dominado por ondas. Possui um único canal de rio, que lança ao mar grande quantidade de sedimentos. Essa configuração também atua no bloqueio dos sedimentos arenosos transportados pelo mar, levando à deposição em sua foz. A análise da turbidez na área de estudo por meio de imagens de satélite mostrou que a foz do rio Doce já apresentava altos valores de turbidez antes do desastre.

O ambiente marinho do Espírito Santo, anteriormente ao desastre, abrigava elevada biodiversidade e produtividade, com destaque para a formação do banco de Abrolhos, que se estende da região marinha próxima à foz do rio Doce até o sul da Bahia, com a presença do maior e mais diverso ecossistema de recifes de coral e o maior sítio de reprodução das baleias-jubarte (*Megaptera novaeangliae*) do Atlântico Sul. A região litorânea do estado é de grande importância para diferentes espécies de tartarugas, golfinhos, peixes, aves marinhas e invertebrados, com elevada diversidade, ocorrência de endemismos e de espécies ameaçadas de extinção (DUTRA *et al.* 2006; BRASIL, 2007; IA-RBMA, 2014).

Conforme o levantamento de dados sobre o patrimônio cultural (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018a), foram identificados na área de estudo um total de 5.040 bens e referências culturais, sendo 395 sítios arqueológicos cadastrados no CNSA/IPHAN, e outros 4.645 itens (acauteladas ou não) relacionados às demais categorias. Do total do patrimônio cultural evidenciado, 216 são protegidos pela Figura do tombamento, sendo 60 bens tombados em nível federal, 18 bens em âmbito estadual e 138 bens em âmbito municipal (alguns submetidos a tombamento em mais de uma instância), estando predominantemente localizados em áreas urbanizadas. Além disso, 94% dos registros encontram-se no estado de Minas Gerais.

Em linhas gerais, o conjunto de sítios arqueológicos remete a três grandes cenários de ocupação da região do vale do rio Doce e seu entorno, abrangendo evidências relacionadas à passagem e instalação de caçadores-coletores-pescadores antigos; aldeias associadas à instalação na região de indígenas horticultores ceramistas afiliados a diversos grupos linguísticos e, por fim, um cenário, abrangendo um

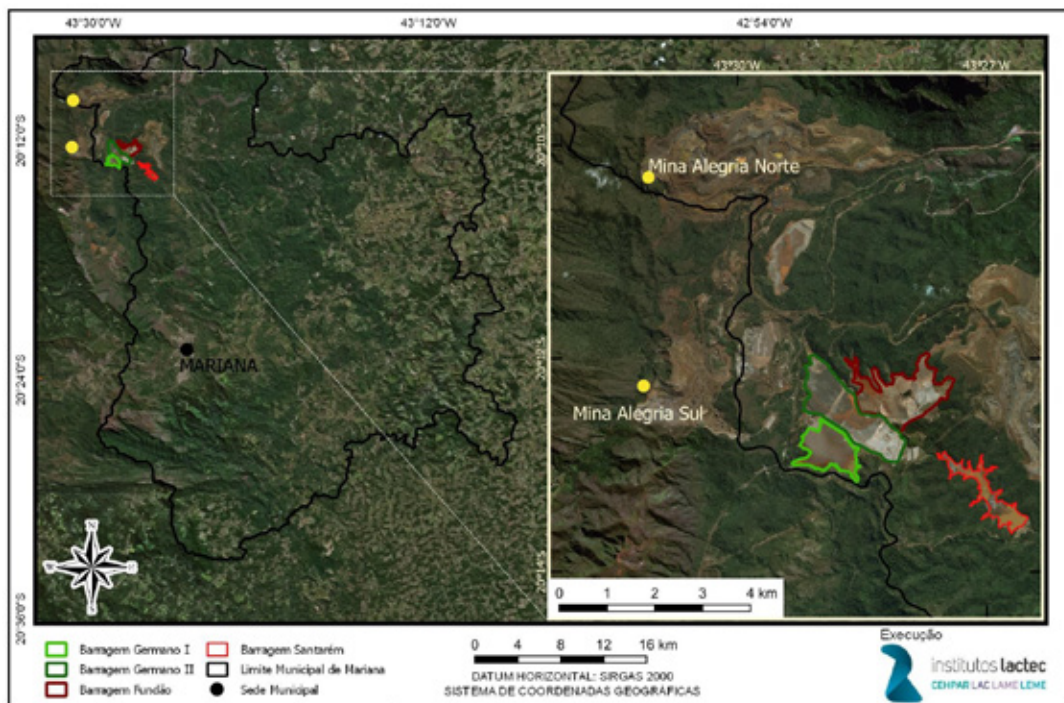
espectro temporal de mais de 10 mil anos. Entre o total dos sítios evidenciados, ao menos 43 sítios, guardam proximidade do rio.

No que tange aos demais bens culturais acautelados (bens materiais, lugares, celebrações, formas de fazer etc.) e referências não protegidas, pode-se citar o cenário dito histórico, desde os primeiros contatos e início do processo de colonização a partir do século XVI até o momento presente, inclusas referências relacionadas ao período de industrialização vivenciado ao longo do médio vale do rio Doce.

2.2 O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS MINERÁRIOS DE FUNDÃO

Fundada em 1977, a Samarco Mineração S/A de propriedade da Vale S/A e da BHP Billiton Ltda. tem duas unidades operacionais, sendo uma delas localizada em Mariana (MG), onde era realizada a extração de minério de Fe nas minas de Alegria (Norte e Sul). Nesta unidade, os rejeitos resultantes do processo de beneficiamento do minério de Fe eram estocados em dois reservatórios: Germano e Fundão. A jusante destas barragens também se encontrava a barragem de Santarém, cuja função era de armazenar água para o processo industrial e reter sedimentos advindos das barragens de rejeitos (Figura 2).

Figura 2 – Localização dos reservatórios de Germano e Fundão e da barragem de Santarém à jusante.



Execução: Lactec.

Construída em 2008, Fundão chegou a armazenar 55 hm³ de rejeitos intitulados arenosos e argilosos (SAMARCO, 2019) até que, na tarde de 5 de novembro de 2015, a barragem se rompeu, liberando imediatamente 33 hm³ de rejeitos ao ambiente, passando por cima da barragem de Santarém e seguindo os cursos d'água até chegar ao mar. A força e o volume de material fizeram com que a onda

de rejeitos alcançasse a altura média de nove metros, em relação ao nível d'água nos rios atingidos. A altura máxima, próxima a 20 metros, foi verificada na região de Bento Rodrigues.

Após o rompimento, o rejeito continuou vazando da cava de Fundão (Figura 3), influenciado pelo período chuvoso, incrementando o volume extravasado em, aproximadamente, mais 11 hm³. Além disso, em janeiro de 2016 houve uma cheia que alcançou áreas que não haviam sido atingidas pela onda de rejeitos. Essas áreas também foram consideradas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

Figura 3 – Fotografia panorâmica da cava da barragem de Fundão em 03/05/2017.



Fonte: Lactec.

2.3 ABORDAGEM METODOLÓGICA PARA O DIAGNÓSTICO

A abordagem metodológica para o diagnóstico de danos socioambientais advindos do rompimento da barragem de Fundão teve como base inicial a publicação “Valoração de danos em matéria de meio ambiente e patrimônio cultural” da Série Manuais de atuação da 4ª Câmara de Coordenação e Revisão (BRASIL (MPF), 2014).

Para este diagnóstico, optou-se em não delimitar uma área afetada, visto que a abrangência do dano sobre o meio ambiente e o patrimônio cultural é bastante diversa, delimitando então a abrangência por dano identificado. Seguindo as recomendações descritas em Brasil (MPF) (2014), buscou-se a aplicação do máximo rigor técnico na identificação e mensuração de danos, com o registro de todos os métodos, técnicas e tempos de obtenção de dados, presando pela transparência nas conclusões e limitações das técnicas empregadas.

A abordagem metodológica adotada para o diagnóstico é a aplicação dos métodos tradicionais de avaliação de danos e adoção da abordagem ecossistêmica para entendimento global dos danos advindos do desastre. Considerando que o rompimento da barragem de Fundão causou danos socioambientais em uma escala sem precedentes em termos de extensão espacial e temporal, foi necessária a aplicação de uma abordagem ecossistêmica para que fosse possível identificar e mensurar não só os danos aos componentes do ecossistema, mas também suas interrelações e processos que apresentam consequências dos efeitos do desastre.

A avaliação iniciou-se com a identificação do dano, passando para a sua mensuração, por meio de um ou mais indicadores, comparando-os com dados de linha-base, quando possível, ou pontos de controle. A maior dificuldade no diagnóstico de danos residuiu no estabelecimento da linha-base, pois a falta de dados anteriores ao evento dificulta, ou até impossibilita, a mensuração de danos. Como solução, foram estabelecidos pontos de controle, caracterizados por ambientes que se assemelham aos afetados antes da passagem da lama. Ainda assim, houve danos cuja mensuração não foi viável, sendo os mesmos discutidos criticamente sobre sua relação com o desastre.

Para a avaliação de danos provocados ou potencializados por ações emergenciais ou reparatórias foram consideradas as ações desenvolvidas ou planejadas nas áreas atingidas pelo desastre até dezembro de 2018.

2.3.1 ÁREA DE ESTUDO, AMBIENTES E COMPARTIMENTOS

A área de estudo levou em consideração a extensão espacial que a lama de rejeitos passou e ficou depositada, denominada Área de Passagem e Deposição da Lama (APDL) e seu entorno, compreendendo o trecho desde a barragem de Fundão, no município de Mariana (MG), até a foz do rio Doce (ES). Já a área de dispersão dos rejeitos no mar foi denominada “pluma de rejeitos”. Ambas as áreas estão detalhadas, respectivamente nos capítulos 2.4.3 e 2.4.5.

Considerando o trajeto percorrido pelos rejeitos e áreas adjacentes, foram caracterizados três ambientes principais afetados pelo desastre, os quais foram alvo de levantamento de danos para o diagnóstico. O primeiro foi denominado Ambientes Aquáticos Continentais, que abrangeram o ambiente fluvial (rios), os quatro reservatórios hidrelétricos existentes ao longo da calha do rio Doce e os ambientes lacustres (lagoas costeiras próximas à foz do rio Doce no Espírito Santo).

O segundo ambiente considerado foi a denominada Zona Costeira e Marinha, englobando estuários, praias, manguezais e o ambiente marinho, considerado a porção oceânica adjacente à foz do rio Doce, além do banco de Abrolhos.

O terceiro, Ambiente Terrestre e Atmosfera, abrangeu a superfície terrestre e subsolo adjacente aos corpos d’água atingidos e a área onde houve extravasamento da lama, incluindo a flora e fauna, além da atmosfera, cujo foco é sobre a qualidade do ar.

O patrimônio cultural foi tratado como um campo único, com a identificação de danos em todos os ambientes, sem divisão. Abrangeu os campos de bens arqueológicos, bens culturais materiais e bens culturais imateriais.

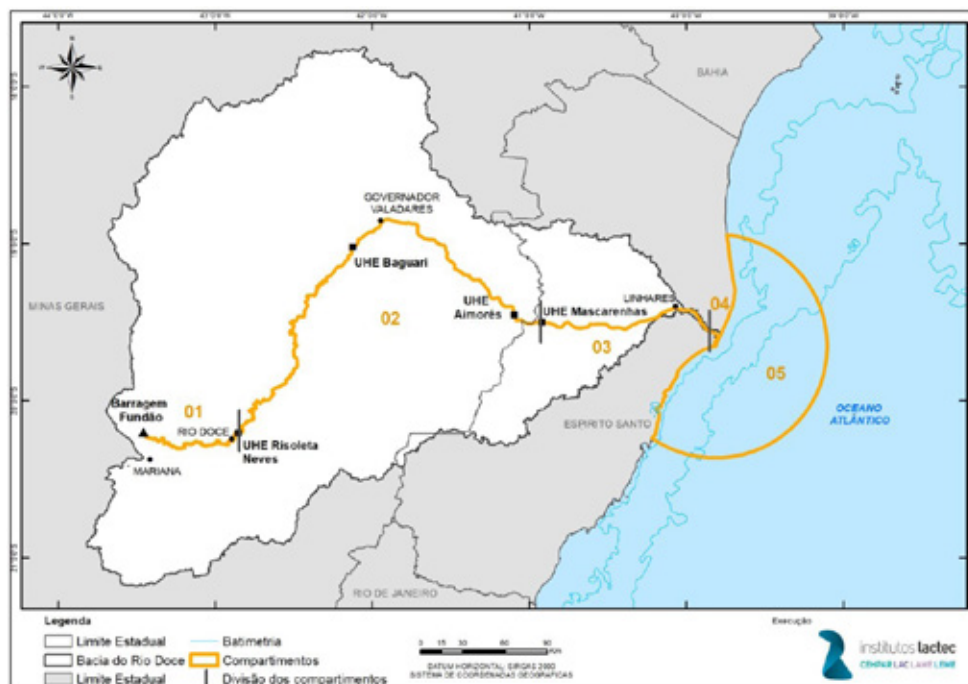
Considerando a extensão espacial que a lama de rejeitos alcançou, foi preciso subdividir os três ambientes em cinco compartimentos para análise e mensuração dos danos (Figura 4). Para os rios atingidos e seu entorno no ambiente terrestre, foram definidos três compartimentos em função do relevo e da presença das usinas hidrelétricas.

O Compartimento 1 (C1) foi definido como o trecho de corpos d’água atingidos, e seu entorno no ambiente terrestre, deste a barragem de Fundão até a UHE Risoleta Neves, onde grande parte do volume de rejeitos ficou retido. O Compartimento 2 (C2) abrange o trecho do rio Doce, e seu entorno no ambiente terrestre, desde a UHE Risoleta Neves até a UHE Mascarenhas, próximo à divisa entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Já o Compartimento 3 (C3) inicia-se na UHE Mascarenhas até o limite com o Compartimento 4 (C4), definido neste estudo como estuário do rio Doce.

Para a zona costeira, como não existe uma delimitação clara do estuário do rio Doce, adotou-se como iniciando a aproximadamente 7 km da linha da costa, abrangendo a calha do rio Doce e entorno até a sua foz, em Regência, no Espírito Santo. Assim, o C4 englobou o estuário do rio Doce, além da Lagoa ou Laguna Monsarás e o estuário do rio Piraquê-açu (confluência com o rio Piraquê-mirim).

Já o Compartimento 5 (C5) é a porção marinha da área abrangida pelo diagnóstico, delimitado a partir da foz do rio Doce, por um raio de 80 km. Fazem parte do C5, também, as faixas de praia arenosa e os manguezais. Ressalta-se que o banco dos Abrolhos foi tratado separadamente dentro do ambiente da zona costeira e marinha.

Figura 4 – Divisão por compartimentos adotada no diagnóstico.



Execução: Lactec.

2.3.2 CLASSIFICAÇÃO DO DANO

Como dito anteriormente, os danos foram primeiramente identificados e depois mensurados por indicadores em relação à linha-base ou aos pontos de controle. Para a avaliação de danos buscou-se também uma classificação de modo a sintetizar a magnitude e as consequências dos danos.

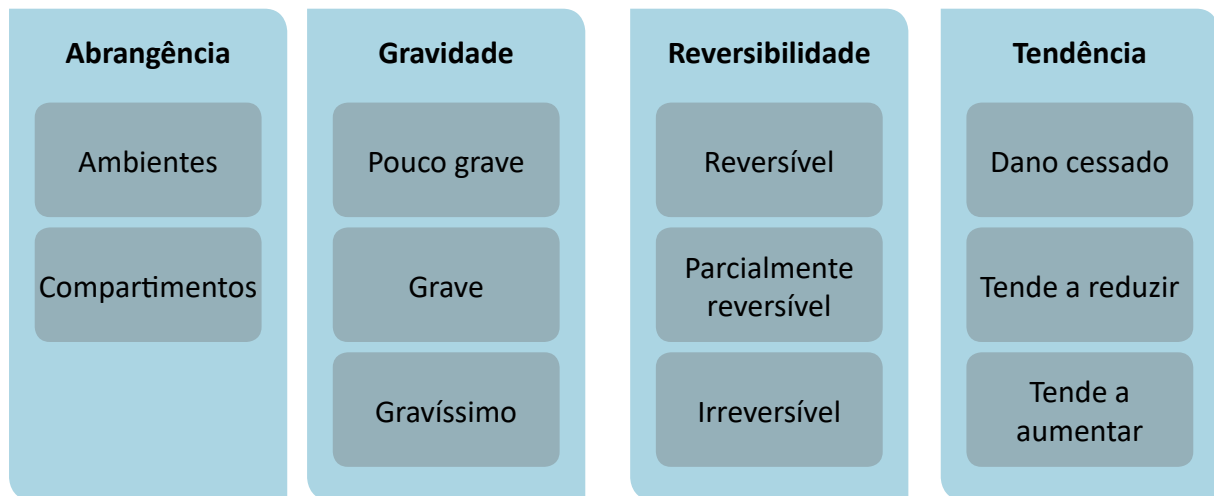
A classificação dos danos socioambientais levou em consideração os seguintes atributos: abrangência, gravidade, reversibilidade e tendência (Figura 5). Para cada um dos atributos foram adotadas classes padronizadas para caracterizar os danos.

O atributo abrangência referiu-se à extensão espacial do dano, considerando os ambientes e compartimentos afetados, podendo ser considerado como a área afetada pelo dano.

O atributo gravidade definiu a magnitude do dano, de acordo com a escala de cada indicador, sendo classificada como pouco grave, grave e gravíssimo.

O atributo reversibilidade referiu-se à possibilidade de retorno à condição de linha-base, caso o dano seja cessado ou com a adoção de ações de reparação. Nesse atributo foram adotadas as classes reversível, parcialmente reversível e irreversível.

Figura 5 – Atributos de classificação dos danos socioambientais.



Elaborado por: Lactec.

O atributo tendência referiu-se à extensão temporal do dano, visando caracterizar se o dano já foi cessado¹ ou não. Caso o dano permaneça acontecendo, é apresentada a tendência a partir de 2019, dividida entre tende a reduzir (melhorar) ou tende a aumentar (piorar).

2.4 O REJEITO DE FUNDÃO

Para compreender a composição do rejeito armazenado em Fundão é apresentada, inicialmente, uma contextualização sobre o Quadrilátero Ferrífero e o processo de beneficiamento do minério de Fe. Na sequência são apresentados os resultados de caracterização físico-química do rejeito barrado em Germano e Fundão e do depositado até a UHE Risoleta Neves. Posteriormente são detalhadas a área de passagem e deposição da lama, bem como o volume depositado e a pluma de rejeitos no mar.

2.4.1 O QUADRILÁTERO FERRÍFERO E O PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO

O Quadrilátero Ferrífero (DORR, 1969) constitui-se em uma das províncias mais ricas em minerais metálicos do mundo. Seu histórico de exploração e exploração mineral data do século 19, tendo sido o ouro o metal mais cobiçado da região. Somente a partir de metade do século 20 iniciou-se a exploração do Fe, impulsionado pela criação da Companhia Vale do Rio Doce.

Figura 6 – Foto da formação ferrífera.



Fonte: Lactec.

¹ Um dano pode ser considerado cessado quando sua ocorrência foi terminada, entretanto não se trata aqui da recuperação ou compensação do mesmo. Um exemplo é o dano de supressão da vegetação que pode ser considerado cessado, pois não há mais vegetação sendo suprimida pelo desastre, entretanto, a recuperação da floresta perdida pode levar dezenas de anos.

Essa região é composta basicamente por intercalações de rochas quartzosas com rochas carbonáticas e formações ferríferas.

Os componentes principais primários das formações ferríferas (Figura 6) são, essencialmente, a magnetita, a hematita e o quartzo. Nessas, incluem minerais de Mn, além da alternância de minerais de Fe com silício, há também formação de carbonatos de Fe e Mg. As formações ferríferas (JAMES, 1954; TRENDALL, 1983) possuem conteúdos anormalmente altos em Fe (>15%). Sua ocorrência se dá por todo o Quadrilátero Ferrífero associada principalmente a dobras geológicas, limitadas por rochas graníticas e gnáissicas (MARSHAK, 1997).

Considerando que as rochas do Quadrilátero Ferrífero, além dos altos teores de Fe, são ricas em diversos outros elementos, buscou-se caracterizar a composição química dos sedimentos produzidos naturalmente na bacia do rio Doce. O objetivo dessa análise foi o de verificar a contribuição natural de EPTs para os rios, em comparação com os rejeitos advindos do desastre. Para tanto, foram escolhidos locais sem influências antrópicas, distante de áreas de mineração ativas, garimpos, residências, entre outras. Desta forma, as áreas escolhidas se caracterizam por serem as cabeceiras das principais drenagens, afluentes do rio Gualaxo do Norte, Piracicaba e rio Conceição. Estas coletas de sedimentos em áreas não antropizadas tiveram como objetivo caracterizar a composição natural dos materiais oriundos dos processos de intemperismo e posteriormente comparar com os materiais presentes no rejeito.

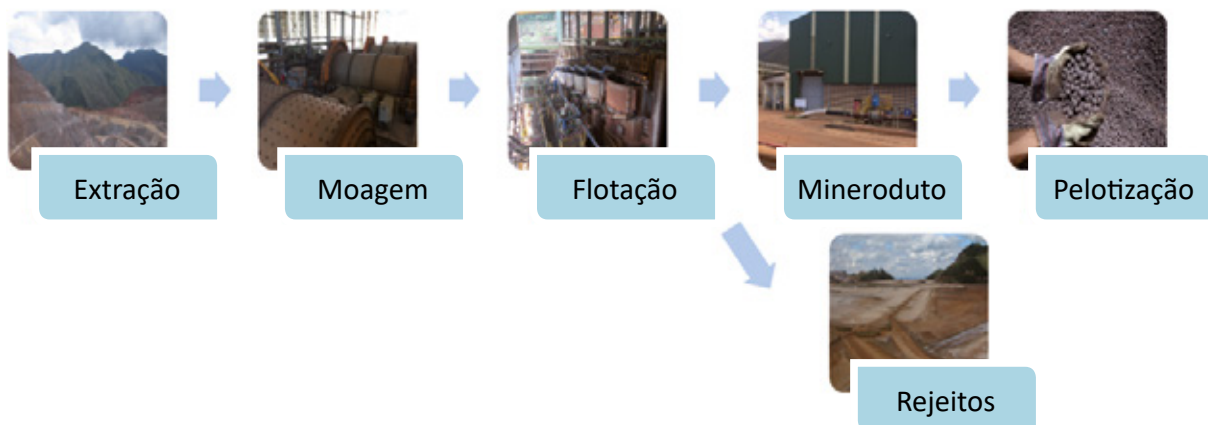
Para essa análise, foram coletadas seis amostras de sedimentos, na Serra da Gandarela com nascentes que deságuam no rio Piracicaba e nas proximidades do limite do Parque Nacional do Gandarela. A determinação química realizada por ICP-MS (Espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente), que é um ensaio capaz de detectar metais e diversos não-metais em concentrações muito baixas, indica que os minerais presentes são típicos desta região e caracterizados por altos teores de Al, As, Ba, Cu, Cr, Fe, Mn, Ti e Zn.

2.4.1.1 Processo de beneficiamento dos minérios das Formações Ferríferas

O minério explotado no Quadrilátero Ferrífero apresenta teores de Fe variáveis. Junto com o minério ocorrem outros minerais, como a sílica, que devem ser removidos no processo de beneficiamento. A remoção desses componentes é feita para que o minério atinja uma composição específica definida pela indústria do aço. Quando o minério de Fe (pobre ou rico) é lavrado, o silício e outros componentes químicos como o Mn, o Ti e o Mg devem ser reduzidos a teores desejados.

De forma simplificada, após a extração, o minério é encaminhado para a moagem, reduzindo o tamanho dos grãos. Para a remoção da sílica, o principal componente dos minérios de Fe, é empregado o processo de flotação, podendo ser ela direta e inversa, o que depende da proporção entre a sílica e os óxidos de Fe presentes no minério (IWASAKI, 1983; MA, 2012). Este processo consiste na adição de reagentes e injeção de ar em água o que leva à separação dos componentes. Os grãos de Fe são transportados via mineroduto para o processo de pelotização. O material não mais aproveitável no processo se torna o rejeito (Figura 7).

Figura 7 – Esquema simplificado de beneficiamento do minério de Fe.



Elaborado por: Lactec.

Na área de lavra da Samarco foi constatado que as rochas na mina Alegria Sul são compostas por quartzo, hematita e goethita. Já na mina Alegria Norte as rochas possuem além dos já citados, minerais de magnetita e birnessita. Análises químicas mostraram altas concentrações de Fe e Al em ambas as minas, além do Mn, na mina Alegria Norte.

2.4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO REJEITO

A caracterização do rejeito é apresentada conforme suas propriedades físicas, químicas e de caracterização de resíduos sólidos (conforme definição estabelecida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305/10).

2.4.2.1 Caracterização física do rejeito

Verificou-se que o rejeito de mineração da Samarco apresentou distinção de características, que podem ser agrupadas em quatro categorias principais: rejeito barrado intitulado (i) argiloso e (ii) arenoso, oriundos de Germano; (iii) rejeito barrado, remanescente da barragem de Fundão e depositado entre as barragens de Fundão e Santarém (provenientes do rompimento de Fundão); e (iv) rejeito depositado no trecho entre a barragem de Santarém e a UHE Risoleta Neves, com características mais próximas ao rejeito remanescente em Fundão. Todos os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização física das amostras de rejeito coletadas.

Rejeito barrado em Germano	Rejeito barrado remanescente em Fundão e depositado entre Fundão e Santarém	Rejeito depositado entre Santarém e UHE Risoleta Neves
Argiloso – siltes a siltes argilosos, pouco plásticos, com partículas finas e arredondadas, diâmetro médio da ordem de 0,001 a 0,02 mm, massa específica dos grãos em torno de 3,98 g/cm ³ e com pH próximo a 9.	Material de característica intermediária, mistura dos materiais argiloso e arenoso. Siltes com partículas intermediárias, com diâmetros médios da ordem de 0,003 a 0,1 mm e limites de liquidez e de plasticidade da ordem de 27% e 16%, respectivamente. A massa específica dos grãos ficou em torno de 3,11 g/cm ³ e a massa específica natural em torno de 1,94 g/cm ³ , com pH variável entre 7 e 9.	Material de característica similar ao remanescente na barragem de Fundão. Siltes, com partículas intermediárias, com diâmetros médios da ordem de 0,003 a 0,1 mm, não plástico e não líquido. A massa específica dos grãos ficou em torno de 2,98 g/cm ³ e o pH entre 6,2 e 8,1.
Arenoso – arenoso e siltoso não plástico, com partículas intermediárias e facetadas, com diâmetro médio da ordem de 0,003 a 0,1 mm, massa específica dos grãos em torno de 2,98 g/cm ³ , com pH 6.		

2.4.2.2 Caracterização química

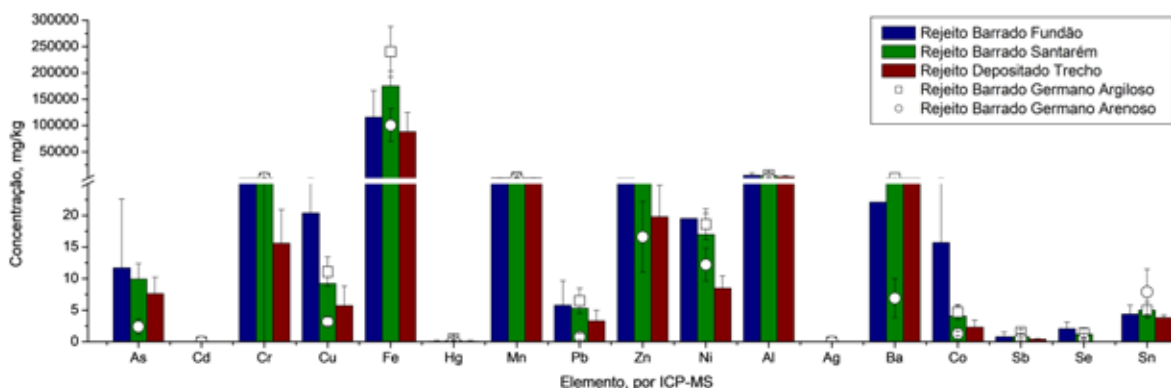
Para a avaliação química elementar das amostras de rejeito de mineração barrado e depositado, foram utilizadas três metodologias: a) espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), semiquantitativa b) espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e c) espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

Os resultados apontaram que no rejeito remanescente em Fundão e depositado entre Fundão e Santarém, em analogia as metodologias para avaliação de áreas contaminadas (para solos), há a ocorrência de Mn, Co (apenas Fundão), Sb e Se em concentrações superiores aos valores de referência para solos específicos da bacia do rio Doce (GUEVARA *et al.*, 2018). O Cr ocorreu em concentrações superiores aos teores de prevenção, ou seja, concentração de valor limite no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais (Fundão) e de investigação agrícola, relacionada à concentração acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado (Santarém), propostos pela Resolução CONAMA nº 420/2009.

Já para o rejeito depositado entre Santarém e a UHE Risoleta Neves, verificou-se Mn em teor médio superior aos valores orientadores de qualidade específicos da bacia do rio Doce (GUEVARA *et al.*, 2018).

Os resultados de concentração média dos elementos químicos presentes estão apresentados graficamente na Figura 8.

Figura 8 – Gráfico da concentração média dos elementos químicos presentes nos rejeitos avaliados (subdivididos em categorias, conforme também abordado no texto).



Elaborado por: Lactec.

Para a verificação da ocorrência de compostos orgânicos voláteis (COVs) e de fenóis nas amostras de rejeito barrado, foram utilizadas as técnicas de cromatografia em fase gasosa acoplado ao espectrômetro de massa (CG/MS).

Os resultados mostram que para algumas amostras, nas três barragens (Germano, Fundão e Santarém), foi observada a ocorrência de teores de diclorometano (0,007; 0,016; 0,038 mg/kg), fenol (entre 0,01 mg/kg e 40 mg/kg), fenóis clorados (2,4,5-triclorofenol, de 0,8 mg/kg a 69,3 mg/kg), tolueno (0,011 mg/kg) e etilbenzeno (0,003 mg/kg) em regiões pontuais.

2.4.2.3 Caracterização de resíduos sólidos

Uma vez que o rejeito é considerado, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, como um material residual do processo de mineração (Lei nº 12.305/10), foi realizada a caracterização das amostras como resíduo sólido, nas formas de massa bruta, extrato lixiviado e extrato solubilizado, conforme procedimentos analíticos descritos na coletânea de normas ABNT NBR 10.004 (2004). Dentre as substâncias analisadas, no rejeito depositado entre Santarém e a UHE Risoleta Neves, verificou-se ausência de fenóis e fenóis clorados em massa bruta, porém destacou-se a presença de clorofórmio em extrato lixiviado (obtido de acordo com a ABNT NBR 10005:2004) em todas as amostras coletadas na campanha, em concentrações médias de 0,00358 mg/L. Os extratos lixiviado e solubilizado classificam os materiais como não perigosos, sendo a maioria das amostras classificadas como IIA – não inerte.

Entretanto, elementos como Ag, As, Ba, Cd, Cr, Ni, Pb, Sb, Se, Hg e fenóis, encontrados no rejeito, estão listados no Anexo C da ABNT NBR 10004:2004 como capazes de conferir periculosidade ao resíduo sólido.

2.4.3 ÁREA DE PASSAGEM E DEPOSIÇÃO DA LAMA DE REJEITOS

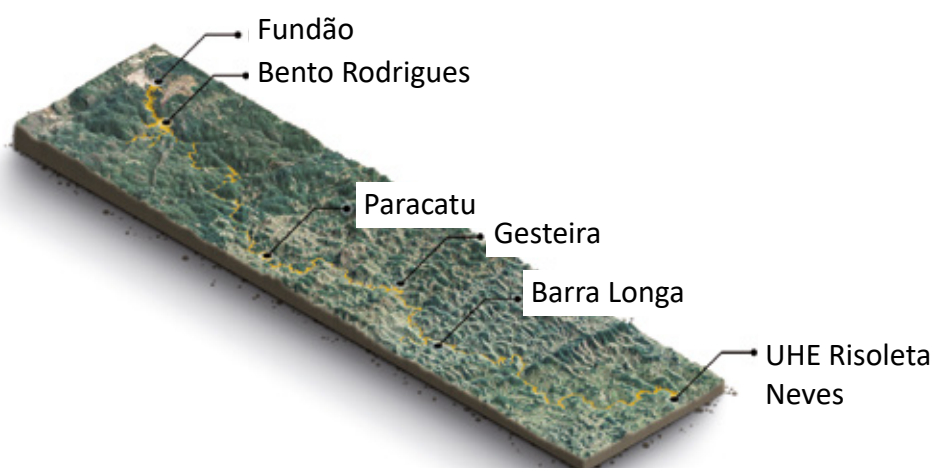
A Área de Passagem e Deposição da Lama (APDL) refere-se às áreas por onde a onda de rejeitos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão passou e a lama ficou depositada, compreendendo o trecho desde a barragem de Fundão, no município de Mariana (MG), até a foz do rio Doce, no município de Linhares (ES). Este trecho corresponde a, aproximadamente, 674 km de corpos d'água

afetados, sendo que no C1, cerca de pouco mais de 100 km de rios, houve o maior acúmulo de rejeitos fora da calha dos corpos d'água.

Para o mapeamento e delimitação do polígono da APDL, foram utilizadas imagens aéreas referentes ao período pós-desastre, curvas de nível e modelo digital do terreno, os quais foram disponibilizados pela Fundação Renova, bem como os pontos de pico de onda da lama, levantados pelo Lactec.

No trecho entre Fundão e a UHE Risoleta Neves, C1, a área total determinada foi de 2.380,76 ha (Figura 9), incluindo os rios afetados e a área adjacente fora da calha. Desta área total, 36% eram recobertas por vegetação nativa, 29% por corpos d'água e outros 28% eram utilizados para campo e pasto. A largura média da APDL fica em torno de 250 metros, sendo que a maior largura encontrada foi na região de Bento Rodrigues, com pouco mais de 1000 metros de extensão.

Figura 9 – Ilustração da área de passagem e deposição da lama entre Fundão e a UHE Risoleta Neves.



Elaborado por: Lactec.

Para a APDL após a UHE Risoleta Neves, foi combinada a mancha de inundação máxima gerada pelo modelo hidrodinâmico HEC-RAS e a detecção de presença de água delimitadas a partir de imagens dos satélites Landsat 8, Sentinel 1 e Sentinel 2. Para ambas as análises foram consideradas tanto a cheia proveniente do rompimento em novembro de 2015, como as cheias que ocorreram em janeiro de 2016.

Em função dos dados do modelo digital do terreno em alta resolução serem disponíveis apenas até a UHE Baguari só foi possível, até este momento, fazer a determinação das áreas afetadas neste trecho, totalizando 6.084,61 ha. Desta área, 72% são corpos hídricos e 13% são de vegetação nativa.

2.4.4 VOLUME DE DEPOSIÇÃO DE REJEITOS

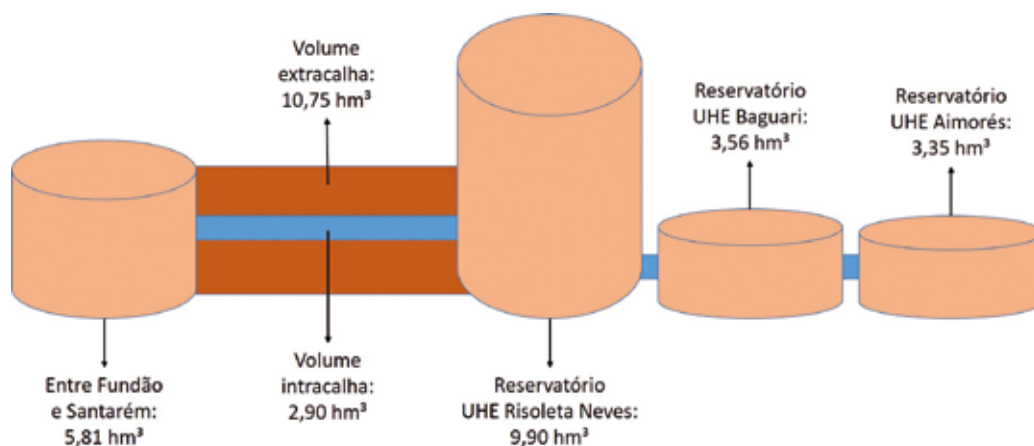
A metodologia aplicada para a estimativa do volume de rejeitos depositado fora das calhas dos rios foi diferente para dois trechos, sendo o primeiro compreendendo de Fundão à Santarém, utilizando-se dados de topografia e batimetria disponibilizados pela Fundação Renova, e o segundo trecho de Santarém à UHE Risoleta Neves, onde foram utilizados dados oriundos das sondagens a trado executadas pelo Lactec.

A estimativa do volume foi realizada para as regiões das encostas e planícies de inundação ao longo dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo, Doce e afluentes. Para o cálculo do volume, foi considerada a somatória entre as espessuras do rejeito e a mistura solo com rejeito, em áreas onde houve adição de camada de solo natural sobre o rejeito.

Assim, o volume de rejeito depositado no trecho entre a barragem de Fundão e a barragem de Santarém, incluindo a área do reservatório, foi estimado em $5,81 \text{ hm}^3$. Já a estimativa do volume de rejeito extracalha (nas margens dos rios) depositado no trecho entre a barragem de Santarém e a UHE Risoleta Neves, foi de $10,75 \text{ hm}^3$.

Sobre o quantitativo de rejeito que ficou retido nos reservatórios das usinas hidrelétricas, conforme cálculos apresentados em BRASIL (MPF)/LACTEC (2018 b), o volume assoreado na UHE Risoleta Neves foi de aproximadamente $9,90 \text{ hm}^3$, na UHE Baguari de $3,56 \text{ hm}^3$ e na UHE Aimorés de $3,35 \text{ hm}^3$. Já o volume depositado dentro dos rios (intracalha) foi estimado em $2,9 \text{ hm}^3$. A Figura 10 resume as estimativas de volumes depositados.

Figura 10 – Volumes de deposição de estimados para a área de estudo.



Elaborado por: Lactec.

2.4.5 PLUMA DE DISPERSÃO DO REJEITO NA REGIÃO COSTEIRA

No dia 21 de novembro de 2015, a lama de rejeitos minerários proveniente do rompimento da barragem de Fundão se dispersou no mar ao longo das adjacências da foz do rio Doce. Assim, em analogia a definição da APDL para o ambiente terrestre e aquático continental foi necessário definir a área da pluma para descrição da abrangência e intensidade dos danos na região costeira e marinha.

A metodologia para definição da área da pluma se baseou na modelagem do transporte da pluma de sedimentos na costa e no oceano com apoio de métodos de sensoriamento remoto e utilizando medições oceanográficas para construção e calibração do modelo. Desde o rompimento da barragem de Fundão vários métodos para modelagem da pluma na área costeira foram aplicados e seus resultados publicados (MARTA-ALMEIDA *et al.*, 2016; COPPE, 2017; UFES, 2017; APLYSIA, 2018; MAGRIS,

2019), todos com objetivos distintos (prognóstico do espalhamento da pluma, diagnóstico do período da chegada da lama ou pós passagem etc.). A diferença entre as modelagens feitas é relacionada a abrangência espacial e temporal, e a quantificação específica para o aporte produzido pelo desastre.

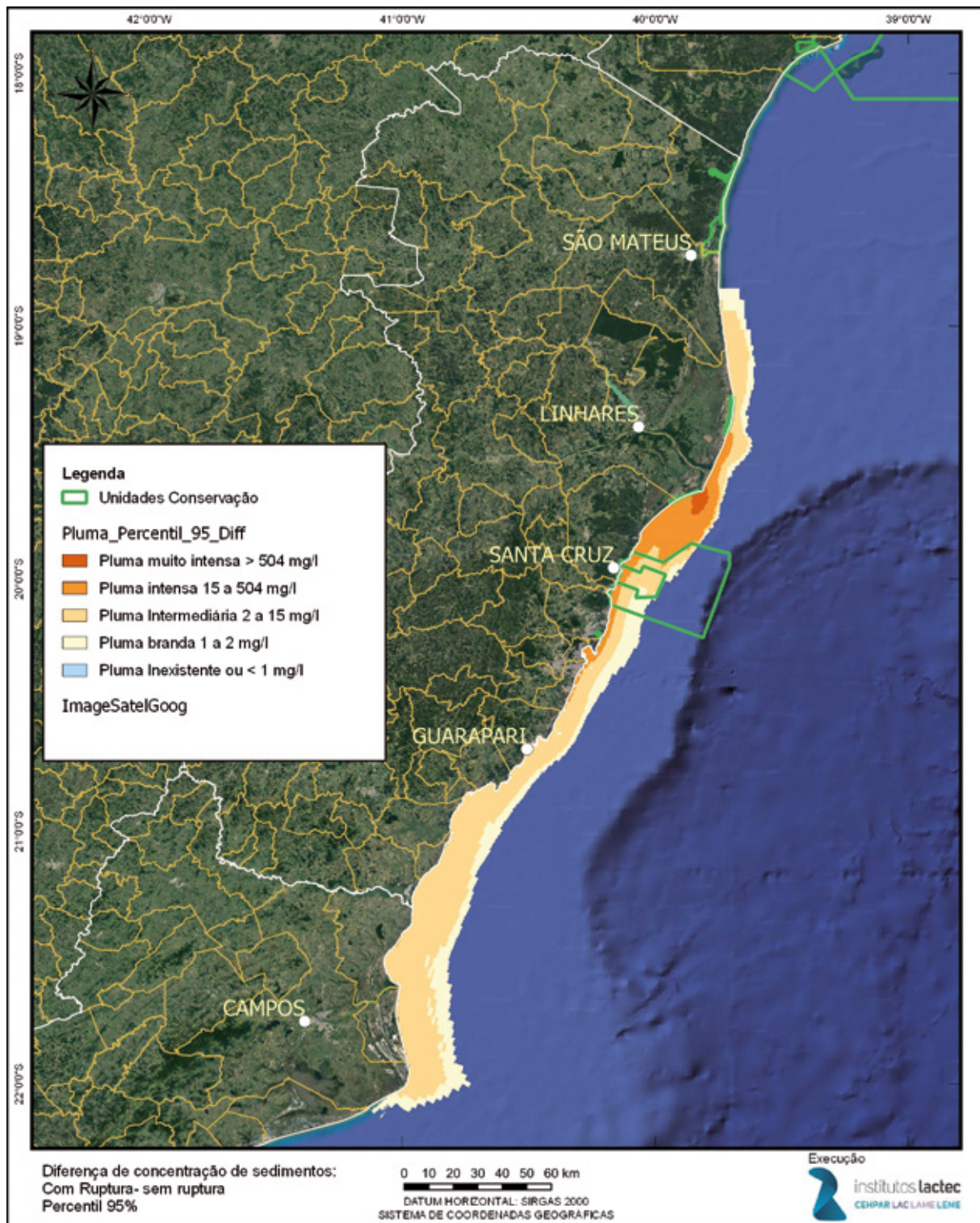
A modelagem realizada pelo Lactec buscou integrar, o máximo possível, os processos dominantes e abranger uma área intermediária entre modelos oceanográficos e costeiros para descrever melhor a área da passagem da pluma de rejeitos. Foi escolhido o sistema de modelos Delft3D o qual inclui a representação de todos os processos dominantes, especificamente as variações verticais e espaciais de salinidade, temperatura e forçantes adicionais que influenciam a dispersão da pluma.

A principal característica desse modelo foi a simulação de dois cenários, sem e com o rompimento da barragem de Fundão, para um período em comum, especificamente 21/11/2015 a 20/10/2016, mas mantendo para ambos os cenários os dados ambientais costeiros, hidrológicos e meteorológicos do período modelado. No primeiro cenário, foi calculada a distribuição de concentrações de um traçador artificial como se não houvesse o desastre. Para a modelagem desse cenário sem desastre foi utilizada, para o traçador, uma concentração igual à concentração de sedimento em suspensão calculada pela curva chave sólida da linha-base (pré-desastre), representando assim a variação natural de concentrações. No segundo cenário, com o rompimento da barragem de Fundão, foi calculada também a distribuição de concentrações de um traçador artificial, mas usando a concentração igual a de sedimento em suspensão medido incluindo, assim, os efeitos do desastre.

Para a definição da área da pluma foi calculada a diferença da distribuição de concentração do traçador do cenário com rompimento e do cenário sem rompimento, para cada passo temporal (1min) do período. Os resultados foram agrupados e analisados estatisticamente para o cálculo quantitativo das ocorrências de diferenças de concentrações, devido ao rompimento da barragem de Fundão. Foram calculados os percentis 95% para cada coordenada, obtendo um conjunto de dados para toda a região chamada S_{95} . A região que apresentou o percentil maior que 95% da série S_{95} foi considerada a região de pluma muito intensa. A região que apresentou o percentil de 85% a 95% da série S_{95} foi considerada região de pluma intensa, o percentil de 66% a 85% considerou-se pluma intermediária e entre 60% a 66%, pluma branda, conforme Figura 11. Desta maneira, a região das diferentes intensidades da pluma foi definida como o local onde, em 5% do tempo, ocorreu concentração (devido a ruptura da barragem de Fundão) maior que 504 mg/L na região de pluma muito intensa, entre 15 a 504 mg/L na pluma intensa, entre 2 a 15 mg/L na pluma intermediária e, entre 1 a 2 mg/L na pluma branda.

Considerando todas as intensidades da pluma, a extensão (aproximada) junto a costa foi de 93 km para norte (até o município de São Mateus - ES) e 325 km para o sul (até o município de Campos dos Goytacazes - RJ), com uma largura (avanço para o mar) variável de 9 a 22 km. A pluma intensa se estendeu junto a costa variando de 30 km para o norte da foz e 118 km para o sul (balneário Ponta da Fruta) e com uma largura variável de 600 m a 19 km aproximadamente.

Figura 11 – Área da pluma de rejeitos de Fundão na costa do Espírito Santo e Rio de Janeiro.



Execução: Lactec.

3 AMBIENTE TERRESTRE E ATMOSFERA

O ambiente terrestre corresponde à porção exterior à calha dos rios. Nele foram avaliados os seguintes componentes: superfície (incluindo paisagem, processos minerários e resíduos sólidos), espeleologia (cavidades naturais ou cavernas), solos, flora (vegetação), fauna (comunidades animais), áreas protegidas (o que contempla UC e outros tipos de áreas legalmente protegidas) e qualidade do ar.

Neste ambiente, o rompimento da barragem de Fundão deu origem a um fenômeno similar a uma avalanche de grandes proporções, devido ao grande volume de rejeito extravasado e à topografia da região. A onda de rejeitos atingiu alta velocidade, levando à remoção mecânica de vegetação, solos e rochas ao longo de seu percurso no C1, além da remobilização de sedimentos do fundo dos rios atingidos.

O carreamento de grande volume de restos vegetais e de edificações humanas gerou diversos focos de resíduos sólidos contaminados pelo rejeito, dispersos ao longo de toda a extensão entre Fundão e Candonga. Posteriormente, boa parte do rejeito extravasado da calha dos rios depositou-se no ambiente terrestre.

Para além da região cuja vegetação foi suprimida, houve deposição de rejeito em locais onde o estrato arbóreo não foi suprimido – a floresta permaneceu em pé – mas ocorreu a mortandade tardia das plantas ali presentes. Esse rejeito interagiu, ainda, com o solo natural da região, criando um novo tipo de material, chamado Tecnossolo, e que apresenta características químicas e físicas distintas do solo natural. As propriedades geotécnicas desse rejeito são também distintas do solo, apresentando elevada erodibilidade e baixa estabilidade. Além disso, o rejeito se compartimentou em materiais finos e a camada exposta desse rejeito possibilita a ressuspensão de partículas pela ação do vento e/ou pela movimentação de maquinário para a atmosfera. A exposição a esse material particulado em suspensão pode desencadear sintomas em pessoas sensíveis, como bebês, crianças, idosos e pessoas que já possuem problemas respiratórios e cardiovasculares.

A fauna, no C1, sofreu danos relacionados à alteração substancial da paisagem, a qual passou a ser dominada por terrenos estéreis formados pelo depósito de rejeitos. As comunidades animais que tem a capacidade de sobreviver nessas condições são apenas um subconjunto que habita as florestas da região, ao tempo em que houve maior ocupação por mamíferos domésticos (bovinos e cachorros-domésticos). Essas mudanças na paisagem acarretaram danos em recortes geográficos maiores, e a região sofreu perdas de conectividade (ou seja, a habilidade das comunidades animais se deslocarem entre os fragmentos de vegetação nativa) e qualidade dos habitat à biodiversidade terrestre.

Após atingir o reservatório da UHE Risoleta Neves, parte do rejeito continuou sendo transportado, especialmente a parte mais fina que corresponde à fração silte, que percorreu os C2 e C3. O ambiente terrestre, nessas regiões, pode ter sofrido danos a partir do rio pela dinâmica de cheias do rio Doce – que leva as partículas de rejeito em suspensão na água além das margens – mas também pela dispersão de contaminantes devido à atividade dos componentes bióticos. Neste caso, a absorção de EPTs pela fauna através da alimentação ou dessedentação pode contribuir para espalhar esses compostos no ambiente terrestre. Ainda nesses compartimentos, diversas áreas protegidas foram acometidas por esses danos, uma vez que são influenciadas pela presença do rio Doce.

Por fim, as ações emergenciais desenvolvidas para conter parte dos efeitos do desastre levaram a novos danos no ambiente terrestre, seja pela supressão adicional de vegetação, seja pela disposição dos resíduos sólidos em áreas não afetadas pela passagem do rejeito. Estas atividades ocorreram principalmente no C1, mas não se restringem àquele setor da região (Figura 12).

Figura 12 – Esquema cronológico e sintetizado dos danos.

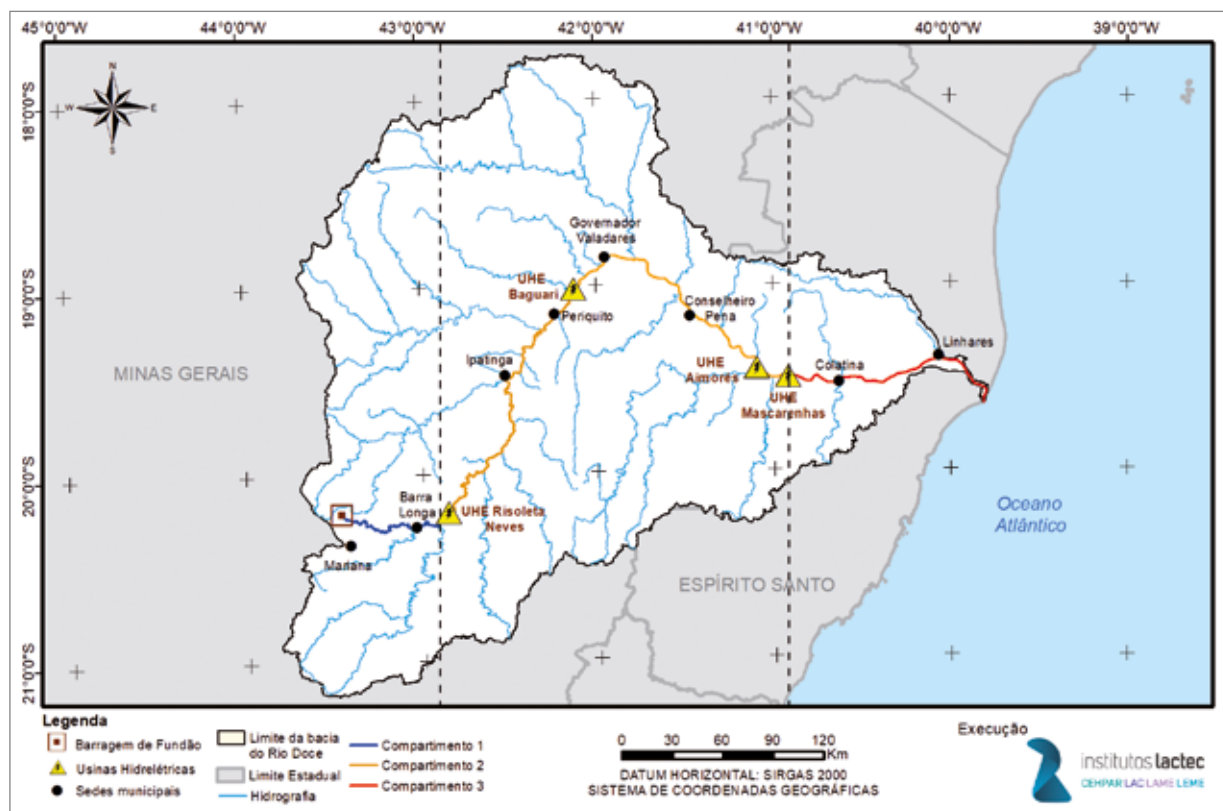


Elaborado por: Lactec.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O diagnóstico dos danos ao ambiente terrestre envolveu toda a extensão atingida pelos rejeitos, desde a região onde se localiza a barragem de Fundão, até a foz do rio Doce. Toda essa extensão territorial, ao longo do rio Doce, foi avaliada nos C1, C2 e C3 (Figura 13). A maior parte dos danos investigados neste ambiente se concentra no C1, uma vez que ali ocorreram os maiores efeitos físicos da onda de rejeitos, como a remoção de solos, rochas e vegetação e deposição dos rejeitos sobre as superfícies.

Figura 13 – Divisão dos compartimentos estudados ao longo do rio Doce no ambiente terrestre.



Execução: Lactec.

As amostragens em campo, para flora e fauna, foram distribuídas ao longo das margens dos corpos hídricos afetados. Para a análise dos danos à superfície, aos solos e à atmosfera, as amostragens se concentraram no C1.

3.2 METODOLOGIA

Devido à grande diversidade de parâmetros, indicadores e componentes, cada área temática seguiu critérios independentes para mensuração dos danos e respectiva definição metodológica para a escala de gravidade. A seguir apresentam-se os métodos de coleta e análise dos dados de cada um dos componentes estudados no ambiente terrestre e atmosfera, utilizados para identificação e quantificação dos danos decorrentes do desastre.

3.2.1 SUPERFÍCIE

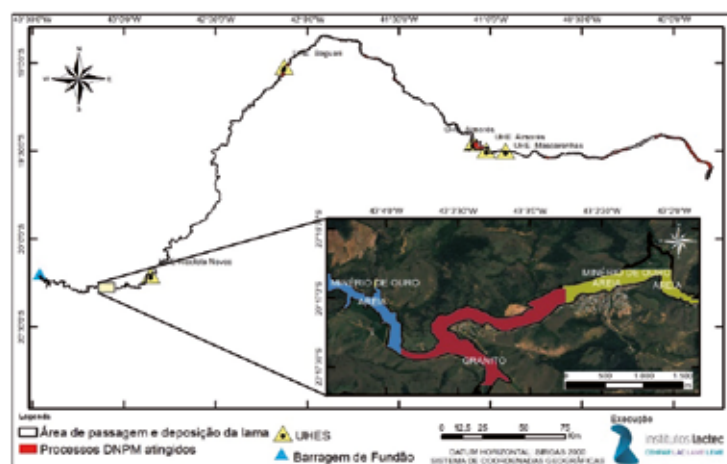
Os danos à superfície foram avaliados conforme suas especificidades temáticas, abrangendo a paisagem, os processos minerários, cavidades naturais e resíduos sólidos.

Para a análise da alteração na paisagem foram realizadas vistorias a campo, além de análises de imagens orbitais/aéreas e uso de modelos de terrenos para a geração de perfis geológicos-geomorfológicos, juntamente com informações complementares específicas de cada uma das áreas técnicas envolvidas no diagnóstico de danos.

A metodologia de avaliação dos danos aos processos minerários consistiu essencialmente no levantamento das informações na base de dados do Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE) (DNPM, 2017) e na análise de imagens de satélite anteriores e posteriores ao desastre, visando quantificar a perda de área e o respectivo bem mineral associado.

Para a quantificação dos processos minerários afetados, conforme a Figura 14, foram inseridos os polígonos desses processos para o estado de Minas Gerais e Espírito Santo e, com base nos limites da APDL, verificou-se qual a área desses polígonos foi afetada.

Figura 14 – Processos minerários com as respectivas áreas afetadas pela passagem e deposição da lama de rejeitos- detalhe de um segmento próximo a Barra Longa.



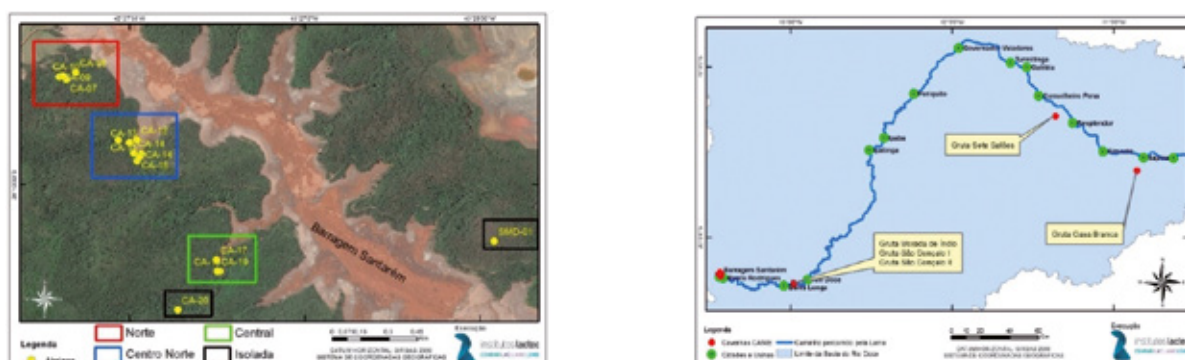
Execução: Lactec.

Quanto às cavidades naturais, foram utilizadas as feições subterrâneas mapeadas no cadastro do ICMBIO / CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, mais especificamente os dados do CANIE – Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas e licenças ambientais.

Para caracterização dos danos relacionados às feições subterrâneas, foram vistoriadas 15 feições subterrâneas (cavidades / abrigos), nas proximidades da barragem de Santarém, 2 antigas minerações de ouro e 5 cavidades cadastradas pelo CANIE, localizadas ao longo do rio Doce e afluentes (Figura 15).

Cabe-se ressaltar que, no que se refere às feições situadas nas proximidades da barragem Santarém (Figura 15), três delas não puderam ser vistoriadas devido a presença de abelhas. Nestes casos, a Samarco forneceu fotos e dados pré-existentis, que foram utilizados de forma comparativa para a análise dos danos.

Figura 15 – Localização das feições subterrâneas cadastradas no entorno da barragem de Santarém na Figura da esquerda e localização das cavernas mapeadas pelo Cadastro Nacional de Informações Espeológicas (CANIE), à direita.



Execução: Lactec.

A gravidade do dano às feições subterrâneas foi classificada de acordo com o tipo de dano incidente, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Tipos de danos às feições subterrâneas associados à gravidade e tempo de recuperação

Tipo de dano	Gravidade	Tempo para recuperação
Soterrada / Alagada	Gravíssimo	Irreversível
Atingida	Grave	Reversível até 50 anos.

Para a avaliação e levantamento dos danos pela geração, remoção e destinação de resíduos sólidos, foram consultados documentos técnicos oficiais produzidos entre os anos de 2016 e 2018 e, para a obtenção de parte dos dados utilizados no decorrer deste estudo, utilizaram-se imagens de satélites referentes aos períodos anteriores e posterior ao desastre. O tratamento e análise dos dados foram realizados por meio de softwares de geoprocessamento com o objetivo de uma melhor compreensão e identificação das movimentações dos resíduos e suas respectivas áreas de disposição. Concomitantemente, no mês de maio de 2019, a equipe de trabalho realizou uma visita técnica nas regiões estudadas.

A escala de gravidade dos danos relacionados à paisagem, processos minerários e resíduos sólidos foi estimada de forma empírica através da área total afetada. A descrição da escala de gravidade adotada encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição da escala de gravidade utilizada para os danos relacionados à paisagem, processos minerários e resíduos sólidos.

Categoria de dano	Definição
Pouco grave	Área Impactada entre 0 e 100 hectares.
Grave	Área Impactada entre 100 e 1000 hectares.
Gravíssimo	Área impactada acima de 1000 hectares.

3.2.2 SOLO

Para o diagnóstico de danos aos solos foram realizadas coletas do rejeito depositado e de misturas entre rejeito e solo entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves (C1) em sessões transversais à calha do rio Gualaxo do Norte e da confluência entre este e o rio do Carmo, nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m (Figura 16). Adicionalmente, foram coletadas amostras de solo que não tiveram contato com o rejeito nas mesmas seções (solo controle). Ainda no C1, foram realizados 395 furos de sondagem a trado para determinação da espessura da camada de rejeito depositada nessa região.

Figura 16 – Coleta de amostras deformadas e indeformadas de rejeito depositado, solo controle e misturas.



Fonte: Lactec.

As amostras de rejeito depositado, mistura e solo controle foram analisadas quanto à morfologia (análise da cor por padrão de Münsell e de pegajosidade), granulometria (teores de areia total, areia fina, areia grossa, silte e argila), mineralogia (por difração de raios X), física (densidade do solo e de partículas; porosidade total, macro e microporosidade; umidade em ponto de murcha permanente e em capacidade de campo; e capacidade de água disponível), fertilidade (pH em água, CaCl_2 e KCl; delta pH; teores de bases trocáveis, de macro e micronutrientes de planta e de carbono orgânico; acidez potencial; e capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva e potencial) e teores trocáveis, não-trocáveis, redutíveis e pseudototais de EPTs (Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn e Zn).

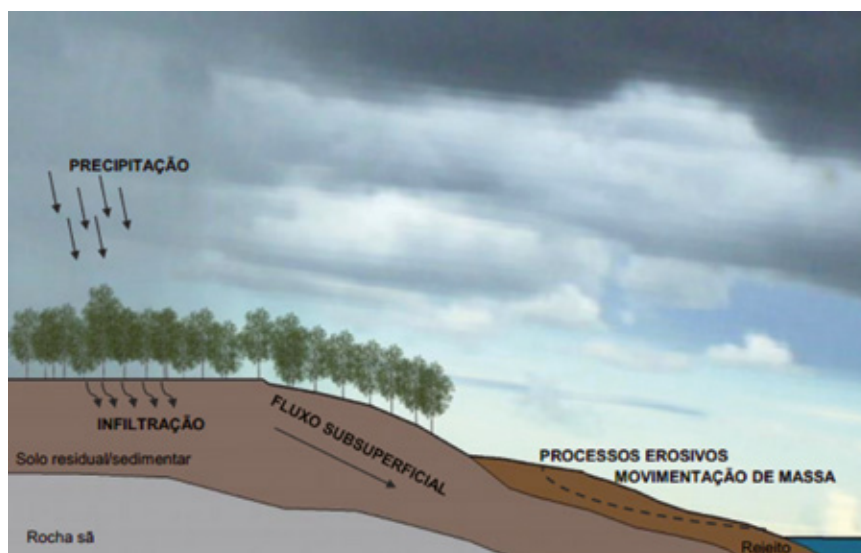
A definição e o diagnóstico de cada dano ao solo se baseou na comparação entre os indicadores avaliados nas amostras coletadas e a linha-base (PACHECO, 2015; RODRIGUES, 2012; OTTONI *et al.*, 2018), além da comparação entre os indicadores e a legislação e/ou artigos técnicos e manuais de interpretação (CONAMA n° 420/2009; COPAM, 2011; GUEVARA *et al.*, 2018; RIBEIRO *et al.*, 1999), ou ainda discussões críticas entre os resultados obtidos para o rejeito depositado em comparação aos resultados do solo controle. Especificamente para o dano ocasionado pelo aumento dos processos erosivos do solo foi realizada modelagem (InVEST 3.7.1) de exportação de sedimentos nos cenários pré e pós-desastre, tendo sido utilizada a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE 1) para quantificar o potencial de erosão. De maneira a complementar o entendimento sobre os danos ao potencial produtivo do solo e a poluição por EPTs, análises dos teores de nutrientes e de EPTs no tecido vegetal de pastagens coletadas em campo (mesmos locais de coleta de rejeito depositado e misturas) e de plantas de arroz cultivadas no rejeito em experimento controlado foram realizadas (mesmos nutrientes e EPTs determinados no rejeito depositado, misturas e solo controle).

Ainda, foram realizadas análises citogenotóxicas para plantas superiores (utilizando-se a cebola como modelo) no rejeito e no solo controle, bruto e em solução, além da determinação de EPTs na raiz

do arroz por meio de microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia por energia dispersiva (MEV/EDS).

Além da perspectiva agrônômica, o solo foi avaliado sob a perspectiva da geotecnia, que trata das propriedades mecânicas do solo. A Figura 17 ilustra um esquema básico de eventos que envolvem a geotecnia.

Figura 17 – Eventos que envolvem a geotécnica.



Elaborado por: Lactec.

Ao longo do C1, foram realizados ensaios geotécnicos de campo com o objetivo de se obter informações sobre a espessura e o volume de rejeito depositado oriundo da ruptura da barragem de Fundão (sondagens à trado); sobre a profundidade do nível d'água e resistência a penetração (ensaios SPT); e resistência de ponta, atrito lateral e poropressão (ensaios CPTu). Os resultados obtidos com os ensaios geotécnicos realizados em campo foram utilizados também para a distinção das camadas de rejeito, solo/rejeito e solo natural, além de auxiliarem em análises computacionais para análises de fluxo e estabilidade de taludes.

Com as informações obtidas, foram selecionados locais para a coleta de amostras deformadas de rejeito, com o objetivo de avaliar os danos identificados e referentes ao aumento de processos erosivos; alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do rejeito; alteração da permeabilidade e do fluxo de água e alteração da estabilidade de encostas com rejeito depositado. Essas amostras foram submetidas a ensaios geotécnicos de caracterização (determinação da massa específica dos grãos), curva de distribuição granulométrica e limites de Atterberg, capacidade de suporte e recalque/deformabilidade (índice de suporte Califórnia e ensaio de adensamento), permeabilidade (ensaio de permeabilidade a carga variável), resistência ao cisalhamento (ensaio de cisalhamento direto) e avaliação de processos erosivos (ensaios para avaliação de erodibilidade – *Crumb test*, *Pinhole test* e *Inderbitzen*). Com os parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto (ângulo de atrito interno e intercepto coesivo) e nos ensaios de permeabilidade (coeficiente de condutividade hidráulica), ambos realizados em laboratório, foram obtidos os fatores de segurança dos locais de estudo a partir de análises computacionais de estabilidade e de fluxo.

Para avaliar o Fator de Segurança (FS) de algumas encostas localizadas no C1, encostas estas selecionadas com base em investigações geotécnicas de campo (sondagens a trado e ensaios SPT), foram realizadas análises computacionais utilizando o software GeoStudio (SLOPE/W) empregando cinco métodos de cálculo para fator de segurança: *Bishop, Janbu, Morgenstern Price, Ordinary e Spencer*. Para a avaliação e classificação do dano referente a alteração da estabilidade de encostas foram utilizados os FS obtidos pelo método de *Morgenstern Price*, uma vez que para utilizar esse método são consideradas condições de estabilidade que satisfazem simultaneamente todas as condições de equilíbrio de forças e de momentos (FABRÍCIO, 2006).

Para a realização das análises geotécnicas foram adotados parâmetros de resistência ao cisalhamento (intercepto coesivo e ângulo de atrito interno) para dois tipos de solo (argiloso e arenoso, respectivamente coesivo e não coesivo), haja visto que sobre o solo natural foi depositada uma camada de rejeito oriunda do rompimento da barragem de Fundão. Para a camada de solo foram adotados parâmetros obtidos por Alonda (2017) e Pattrol (2017), enquanto que para o rejeito foram utilizados dados obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto realizados com amostras coletadas no C1.

Para a definição sobre a gravidade, a reversibilidade e a tendência dos danos ao solo levou-se em consideração a avaliação técnica dos indicadores em relação às funções ambientais e agronômicas deste e a possibilidade de retorno à condição inicial a partir de práticas de manejo, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Definição das categorias de dano estabelecidas para avaliar os danos ao solo.

Categoria de dano	Definição
Pouco grave	Possibilidade de o solo retornar à condição inicial a partir de práticas de manejo de baixa complexidade; e/ou a minoria dos indicadores do solo alterados negativamente em relação à linha-base; e/ou nenhum indicador do solo alterado em relação à linha-base, mas alterado em algum grau em relação à interpretação técnica*.
Grave	Possibilidade de o solo retornar à condição inicial a partir de práticas de manejo de média complexidade; e/ou grande parte ou a totalidade dos indicadores do solo alterados negativamente em relação à linha-base.
Gravíssimo	Impossibilidade de o solo retornar à condição inicial; e/ou possibilidade de o solo retornar à condição inicial a partir de práticas de manejo de alta complexidade.

*em relação aos EPTs no solo, essa interpretação técnica levou em consideração a biodisponibilidade em curto, médio e longo prazo, comparações com valores de referência de qualidade do solo (VRQs) e com o solo controle, além de classes de toxicidade entre os elementos para mamíferos (GUILHERME *et al.*, 2005) (Ag, As, Ba, Cd, Cr⁶⁺, Hg, Pb, Sb e Se: toxicidade alta; Co, Cr³⁺, Cu, Mn e Ni: toxicidade moderada; Zn: toxicidade moderada a baixa; Al e Fe: toxicidade baixa).

A gravidade dos danos identificados e referentes ao aumento dos processos erosivos; alteração da capacidade de suporte e deformabilidade; alteração da permeabilidade e fluxo de água no solo; e alteração da estabilidade de encostas foi classificada de acordo com critérios de classificação apresentados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8.

Tabela 5 – Critérios assumidos para a classificação do dano de aumento dos processos erosivos.

Classe	Critério para classificação
Pouco grave	É classificado como dano pouco grave quando o material possui comportamento não-dispersivo ou incipientemente dispersivo.
Grave	Aumento dos processos erosivos a partir da alteração da camada superficial de solo natural pela deposição de material classificado como levemente a moderadamente dispersivo implicando no carreamento contínuo de material para a calha do rio, aumento da velocidade e vazão de escoamento.
Gravíssimo	É classificado como dano gravíssimo o material que possui comportamento dispersivo a fortemente ou altamente dispersivo.

Tabela 6 – Critérios assumidos para a classificação do dano de alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo.

Classe	Critério para classificação
Pouco grave	O dano é considerado pouco grave quando forem necessárias a construção de fundações assentadas em solo natural, ultrapassando a espessura de camada de rejeito depositado.
Grave	O dano é considerado grave quando forem necessárias a construção de fundações assentadas em rejeito com a necessidade de técnicas de melhoramento de solos para que o terreno de fundação passe a ter capacidade de suporte compatível com a estrutura.
Gravíssimo	O dado é considerado gravíssimo quando for necessário a remoção completa de camadas de rejeito depositado sobre o solo natural.

Tabela 7 – Critérios assumidos para a classificação do dano de alteração da permeabilidade e do fluxo de água no solo.

Classe	Critério para classificação
Pouco grave	O dano é considerado pouco grave quando for identificada a alteração do coeficiente de permeabilidade do material (rejeito e/ou solo misturado com rejeito) em até 10 vezes, para mais ou para menos, quando comparado ao solo natural.
Grave	O dano é considerado grave quando for identificado a alteração do coeficiente de permeabilidade do material (rejeito e/ou solo misturado com rejeito) em até 100 vezes, para mais ou para menos, quando comparado ao solo natural.
Gravíssimo	O dano é considerado gravíssimo quando for identificada a alteração do coeficiente de permeabilidade do material (rejeito e/ou solo misturado com rejeito) em até 1.000 vezes, para mais ou para menos, quando comparado ao solo natural.

Tabela 8 – Critérios assumidos para a classificação do dano de alteração da estabilidade de encostas.

Classe	Critério para classificação
Pouco grave	Fator de segurança do talude em estudo for igual a 1,5 de acordo com as recomendações da ABNT NBR 11682:2009. Além disso a superfície de ruptura pode estar localizada nas cotas mais elevadas do talude.
Grave	Fator de segurança entre 1,1 e 1,49 de acordo com as recomendações da ABNT NBR 11682:2009. Além disso a superfície de ruptura pode estar localizada nas cotas mais elevadas do talude.
Gravíssimo	Fator de segurança menor que 1,1 de acordo com as recomendações da ABNT NBR 11682:2009. Além disso a superfície de ruptura pode estar localizada no pé do talude, onde foi depositado o rejeito.

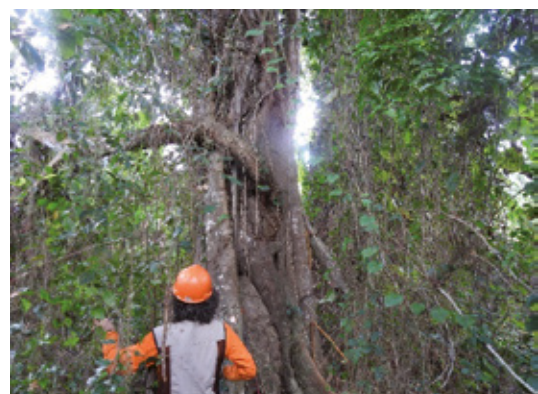
3.2.3 VEGETAÇÃO

Para avaliar os danos à flora, foram utilizadas as quatro classes de vegetação nativa previamente mapeadas para todos os compartimentos: Mata Nativa, Vegetação Secundária Inicial, Campos Rupestres e Várzeas. Dentro das classes, os grupos botânicos foram separados de acordo com as suas características, com a finalidade de contemplar o maior número possível de grupos e espécies afetadas. Desta forma, foram avaliados o estrato arbóreo, regeneração natural, epífitas, lianas, herbáceas, macrófitas, reófitas e banco de sementes, plântulas e serrapilheira.

A avaliação da perda geral de vegetação se deu por meio da comparação dos mapeamentos entre os períodos pré e pós-desastre, no seguintes períodos: T0 - imagens pré-desastre, relativas ao período de 21/01/2015 a 05/11/2015; T1 - imagens pós-desastre, no período de 06/11/2015 e 08/01/2016; T2 - imagens pós-desastre, relativas ao período de 05/02/2016 e 10/03/2016; - T4 - imagens pós-desastre, relativas ao período de 08/01/2017 e 01/04/2017; e T5 - imagens pós-desastre, relativas a 31/04/2017. A análise comparativa demonstrou a supressão da vegetação e a perda da cobertura do solo. Determinou-se, então, a quantidade de perda em área. Para tal, foram consideradas duas áreas: aquelas onde houve supressão mecânica de vegetação nativa e aquelas onde a lama adentrou a floresta e se depositou no solo. Neste último caso houve mortalidade tardia dos indivíduos arbóreos e alteração das plantas do sub-bosque, do banco de sementes e plântulas. Os mapeamentos permitiram também o cálculo do quantitativo de áreas de borda e de fragmentos.

A fim de obter o volume de recursos madeireiros perdidos, bem como informações sobre a biodiversidade, foram executados levantamentos florísticos, fitossociológicos e inventário florestal. As unidades amostrais foram instaladas em locais saudáveis, onde a lama não alcançou, com o objetivo de entender quais grupos botânicos se faziam presentes nos locais de supressão, bem como a composição de espécies e a estimativa do volume de madeira. Posteriormente, os resultados foram extrapolados para a área de vegetação nativa suprimida pela lama (Figura 18).

Figura 18 – Exemplos de amostragem da vegetação nativa.



Fonte: Lactec.

Para a classificação de gravidade dos danos à flora, foram utilizados a área do dano e o número de espécies afetadas, conforme Tabela 9. Partiu-se do entendimento de que a supressão de 5% da paisagem afeta significativamente o número de espécies encontradas (RIGUEIRA, ROCHA e MARIANO-NETO, 2013). Para o cálculo da área total da paisagem foi utilizado o *buffer* de 500m da calha do rio e somadas as áreas correspondentes a formações nativas.

Tabela 9 – Classificação de gravidade dos danos à flora, aplicados nos Compartimentos 1 e 3.

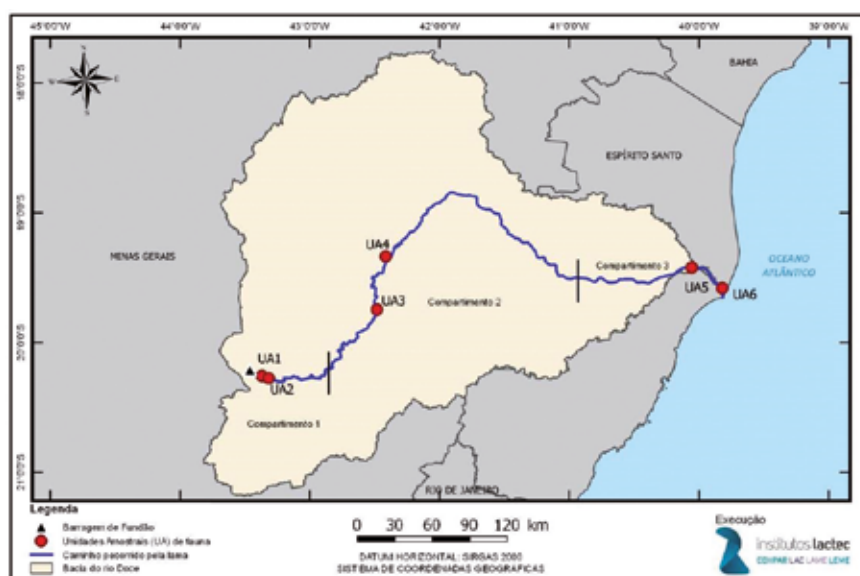
GRAVIDADE	ESCALA DO INDICADOR
Gravíssimo	Tamanho da área afetada maior que 518 hectares (5%) ou mais de 300 espécies afetadas.
Grave	Tamanho da área afetada de 100 a 518 hectares ou entre 50 e 300 espécies afetadas.
Pouco grave	Tamanho da área afetada de até 100 hectares ou menos de 50 espécies afetadas.

3.2.4 FAUNA SILVESTRE

A fauna silvestre foi estudada nos C1, C2 e C3 por meio de diferentes técnicas de amostragem de animais em campo. Este componente contempla os seguintes grupos animais: entomofauna (insetos, especificamente besouros, formigas, abelhas/vespas, borboletas e mosquitos), herpetofauna (inclui anfíbios e répteis), avifauna (aves), e mastofauna (considerando individualmente os pequenos mamíferos – pequenos roedores e marsupiais –, os grandes mamíferos e os morcegos (ou quirópteros)).

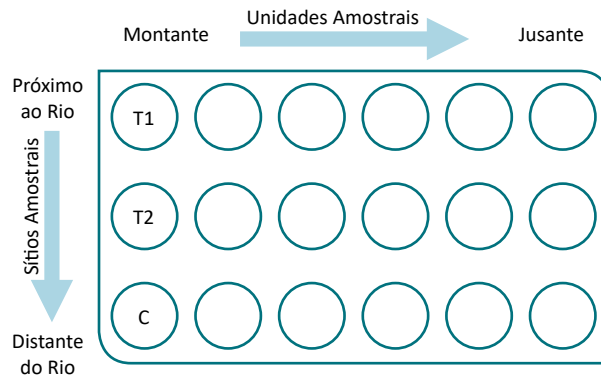
Cada compartimento recebeu duas unidades amostrais (Figura 19) e, em cada uma delas, foram definidos três sítios amostrais em um desenho que corresponde a duas situações ambientais, quais sejam, Tratamento e Controle, sendo os tratamentos alocados a diferentes distâncias dos corpos hídricos afetados (Figura 20). Os sítios Controle são considerados a linha de base para dados de fauna, assumindo-se que as condições ambientais ali representam aquelas disponíveis nos sítios Tratamento anteriormente ao desastre.

Figura 19 – Localização das Unidades Amostrais (UA) do estudo da fauna ao longo dos três compartimentos alocados na bacia do rio Doce.



Execução: Lactec.

Figura 20 – Resumo esquemático do conjunto de três sítios amostrais (T1, T2, C) de fauna terrestre que compõem uma Unidade Amostral.



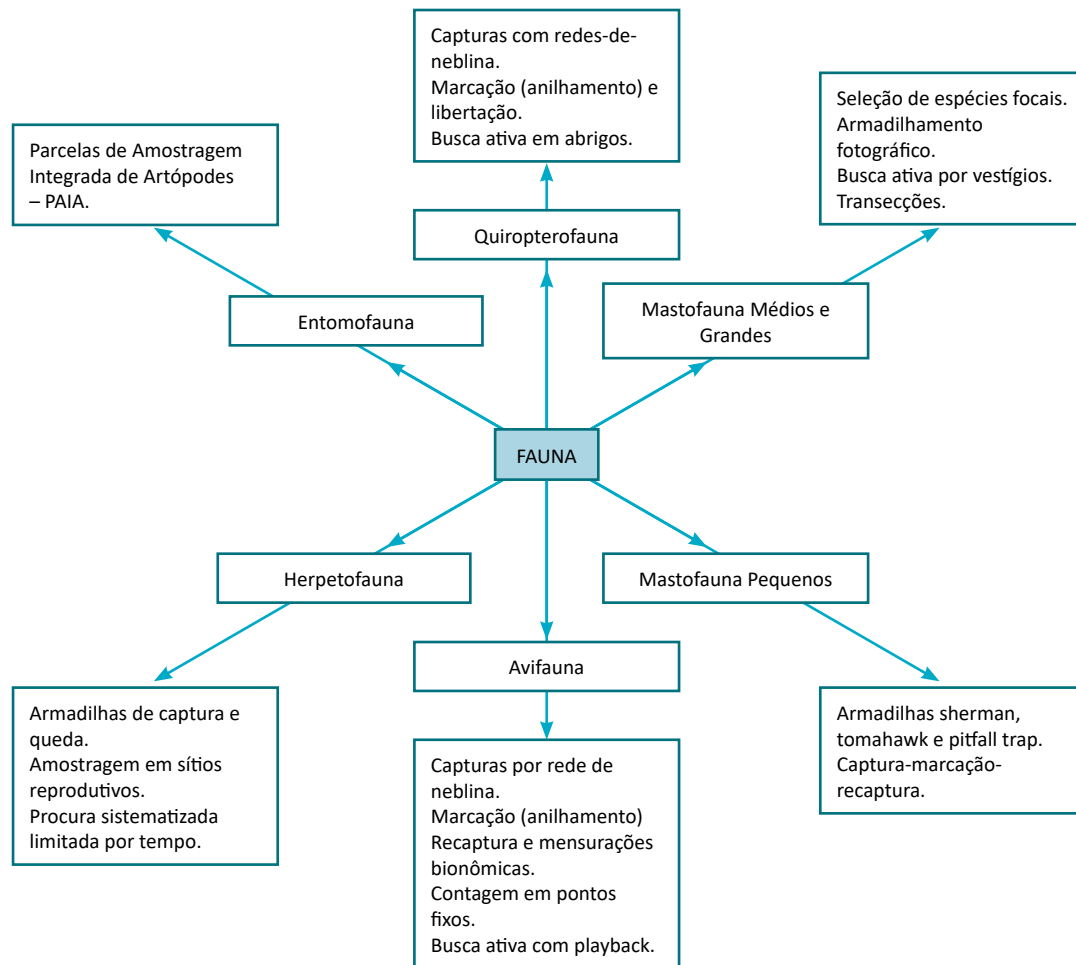
Elaborado por: Lactec.

Os estudos da fauna foram realizados em quatro campanhas, entre julho de 2018 e maio de 2019, envolvendo o uso de diferentes técnicas de captura e métodos de amostragem para contemplar todos os grupos envolvidos no diagnóstico (Figura 21 e Figura 22).

Figura 21 – Parte dos trabalhos de diagnóstico da fauna silvestre: a) Papa-formigas-pardo (*Formicivora grisea*) capturada em rede de neblina, ainda presa à malha; b) Gambá-de-orelha-preta (*Didelphis aurita*) sob contenção manual; c) Instalação de armadilha fotográfica às margens do rio Gualaxo do Norte.



Fonte: Lactec.

Figura 22 – Síntese dos métodos de amostragem utilizados para estudos da fauna terrestre.

Elaborado por: Lactec.

Os diversos grupos da fauna foram avaliados de forma similar. Analisaram-se principalmente o número de espécies (riqueza) e indivíduos (abundância), taxas de captura/recaptura, índices ecológicos de diversidade e métricas de similaridade de espécies (LEGENDRE; LEGENDRE, 2012). Refinamentos dessas análises foram realizados para alguns dos grupos faunísticos, classificando as espécies de acordo com seus hábitos (p. ex., espécies aquáticas ou arborícolas; espécies florestais ou generalistas; espécies insetívoras ou frugívoras etc.) e, no caso das aves, grau de sensibilidade a alterações ambientais (PARKER *et al.*, 1996). Por fim, no caso dos morcegos, todos os indivíduos capturados tiveram seu estado de saúde avaliado pela observação de lesões de pele e boca, e contagem de ectoparasitos (pulgas, carrapatos etc.) como forma indireta de indicação de estresse ambiental.

Para a avaliação da perda de qualidade ambiental para a fauna foram realizadas investigações de duas principais formas de dano: a conectividade na paisagem e a qualidade dos habitat. Para diagnosticar a conectividade na paisagem foram utilizados mapas de uso e cobertura da terra, considerando somente a classe “floresta” como habitat natural à fauna. Calcularam-se dois indicadores para esta análise: a) áreas funcionalmente conectadas nos cenários pré e pós-desastre, que correspondem à soma da área dos fragmentos contidos em diferentes classes de distância de deslocamento das espécies (com capacidades de deslocamento de 60m a até 1080m); b) e a análise de corredores ecológicos, que considera o quanto as espécies da fauna mudaram suas oportunidades de deslocamento na paisagem. A primeira métrica foi calculada com uso do software GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017), versão 7.4 (NETELER *et al.*, 2012), utilizando a ferramenta LandScape Metrics (NIEBUHR, 2018). Já para a segunda métrica foram levantados quatro elementos: a) seleção de dez espécies a serem modeladas; b) uma superfície de resistência de cada tipo de uso do solo, a partir de consulta a especialistas; c) os locais a serem conectados no C1; e d) um algoritmo de custo de movimento para desenvolver os modelos. Os corredores ecológicos foram modelados no pacote LSCorridors (RIBEIRO *et al.*, 2017), dentro do ambiente do software GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017).

A avaliação da qualidade dos habitat envolveu, além da fauna terrestre, também algumas espécies da flora, de modo a tornar mais robusta a análise de danos sobre a biodiversidade terrestre. Seleccionaram-se 51 espécies da fauna terrestre e 13 espécies de plantas com ocorrência na bacia e foram realizadas modelagens a partir de Modelagens de Nicho Ecológico. Dentre estas 64 espécies investigadas em toda a bacia, para cinco espécies de animais e duas espécies de plantas foram conduzidas investigações mais detalhadas. Confeccionaram-se modelos mais refinados considerando alterações de uso do solo para comparar os cenários pré e pós-desastre, cujos resultados permitiram identificar perdas de adequabilidade ambiental de cada espécie, indicador da qualidade dos habitat. Esta métrica foi classificada (em perdas leves, moderadas ou severas) e mapeadas no C1.

Os danos à fauna terrestre foram classificados, com relação à sua gravidade, conforme apresentado na Tabela 10.

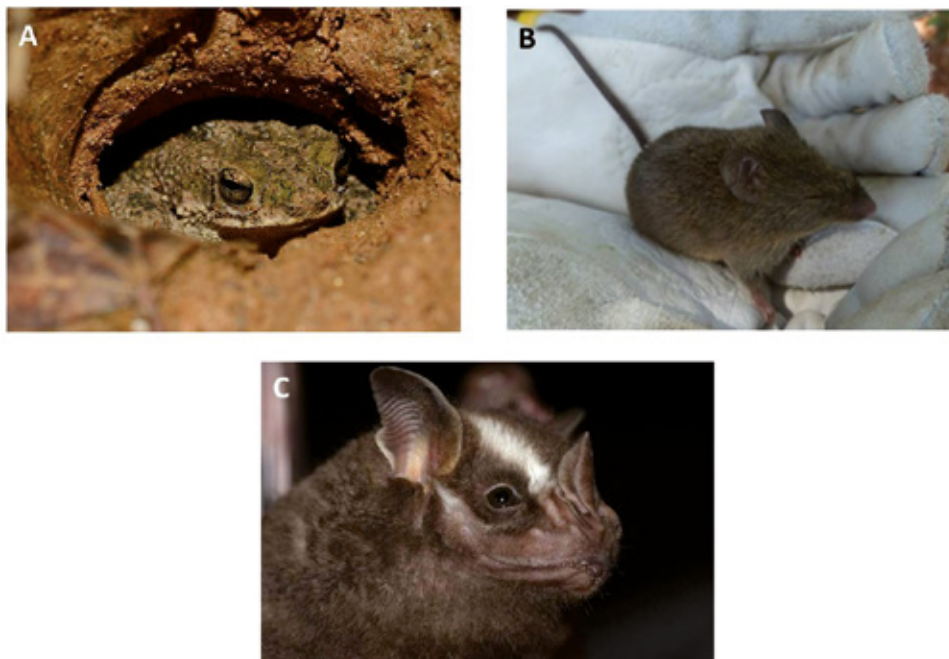
Tabela 10 – Classes de danos à fauna terrestre e critérios assumidos para sua classificação.

Classe	Critério para classificação
Pouco grave	Um indicador ecológico identificando alterações
Grave	Dois ou três indicadores ecológicos identificando alterações
Gravíssimo	Mais de três indicadores ecológicos identificando alterações

Fonte: Lactec.

Para avaliação ecotoxicológica da fauna silvestre foram analisados anfíbios, répteis, mamíferos de pequeno porte e morcegos (Figura 23). Estes animais foram capturados em um local adjacente à APDL, denominado DA, e outro local, afastado da APDL, distante pelo menos mil metros da margem do rio Doce, denominado controle - C.

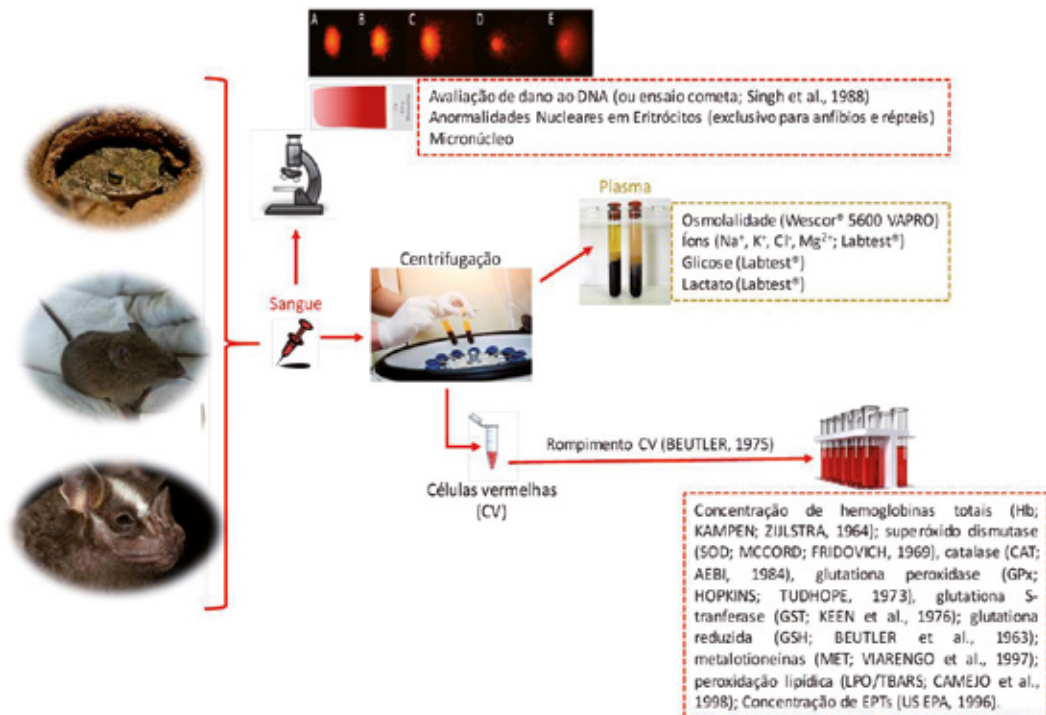
Figura 23 – Imagens de exemplares de fauna silvestre avaliados. a): *Rhinella* sp (sapo cururu), espécie representativa dos anfíbios; b): *Akodon montensis* (rato-do-mato), espécie representativa do mamífero de pequeno porte; c): *Artibeus lituratus*, espécie representativa dos morcegos.



Fonte: Lactec

Foram amostrados no máximo 10 indivíduos por espécie. Estes animais foram anestesiados e tiveram sangue retirado (no máximo 1% da massa corporal) para a utilização em diversas análises, conforme descrito no esquema da Figura 24. A definição do dano se deu por meio da comparação entre os resultados encontrados para os animais capturados na área adjacente à APDL (DA) em relação aos animais dos pontos controle. Além disso, foram comparados a estudos realizados previamente nos pontos de coleta (linha-base; quando existente) e também com dados disponíveis na literatura que avaliaram os mesmos biomarcadores em animais dos diferentes grupos de fauna expostos a contaminação por EPTs. Ressalta-se que os resultados aqui apresentados correspondem àqueles obtidos em duas fases de campo realizadas nas estações seca (junho/julho) e chuvosa (outubro/novembro) de 2018.

Figura 24 – Esquema de todas as análises realizadas no sangue retirado de cada um dos exemplares de fauna avaliados.



Elaborado por: Lactec.

3.2.5 ÁREAS PROTEGIDAS

As áreas protegidas consideradas para o diagnóstico abrangem as UCs e outras Áreas Naturais Protegidas, seguindo a definição da União Internacional para a Conservação da Natureza – IUCN (BORRINI-FEYERABEND *et al.*, 2012) alinhado com a legislação brasileira vigente, principalmente a Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação. Assim, considerou-se as seguintes tipologias de áreas naturais protegidas: UCs (proteção integral e uso sustentável) e suas respectivas Zonas de Amortecimento, quando aplicado, além de Reservas da Biosfera, Sítios Ramsar e Áreas de Proteção Especial de mananciais ou de patrimônio espeleológico e paisagístico, declaradas com base no art. 13, inciso I e art. 14 da Lei Federal nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. As Terras Indígenas também foram consideradas como áreas naturais protegidas, pois o direito dos povos indígenas às suas terras de ocupação tradicional configura-se como um direito originário, reconhecido nos termos da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988).

A avaliação do dano provocado nestas áreas foi realizada por meio do Sistema de Informação Geográfica, onde foi mensurada a extensão linear (km) e a área (hectares) das áreas protegidas que estavam dentro da APDL.

A classificação quanto à gravidade foi definida baseando-se na área afetada pela onda de lama, conforme mostra Tabela 11. As principais referências utilizadas para definir essa escala foram: Decreto

nº 6.660/2008, que regulamenta dispositivos da Lei nº 11.428/2006 (Lei da Mata Atlântica), a Lei nº 12.727/2012 que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, e a Resolução conjunta SEMAD/IEF nº 1.905/ 2013, que dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental no âmbito do Estado de Minas Gerais. Desta forma, foram elaboradas as escalas para subdividir a área afetada que encontrasse paralelo na legislação, e que indicasse padrões de alteração correspondentes a níveis de degradação toleráveis (pouco grave) e intoleráveis (grave e gravíssimo).

Tabela 11 – Dano decorrente do desastre do rompimento da barragem de Fundão da Samarco identificado nas Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas com seu respectivo indicador, escala e gravidade.

GRAVIDADE	ESCALA DO INDICADOR
Pouco grave	Área afetada pela onda de lama de até 10 hectares.
Grave	Área afetada pela onda de lama de 11 a 50 hectares.
Gravíssimo	Área afetada pela onda de lama maior que 50 hectares.

3.2.6 ATMOSFERA

Para o diagnóstico de danos à atmosfera, foram avaliados os dados de parâmetros atmosféricos medidos pelas estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova em Barra Longa, Gesteira e Paracatu de Baixo, nos anos de 2016 a 2018. Para a definição e o diagnóstico dos danos, como não havia linha-base disponível nas áreas estudadas, os dados obtidos foram avaliados quanto ao atendimento aos valores estabelecidos pela legislação ambiental aplicável e quanto à classificação do Índice de Qualidade do Ar (IQA) (Figura 25).

Figura 25 – Visão geral das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova em Barra Longa (estação Centro e estação Volta da Capela), Gesteira e Paracatu de Baixo.



Fonte: Lactec.

A definição da gravidade do dano à atmosfera foi baseada nos indicadores de concentração dos parâmetros atmosféricos monitorados e o seu atendimento aos valores estabelecidos na legislação ambiental e a classificação do IQA, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Definição das categorias de dano estabelecidas para avaliar o dano à qualidade do ar.

Categoria de dano	Definição
Grave	Valores que, apesar de estarem em conformidade com a Resolução CONAMA nº 003/1990*, em função da classificação regular do IQAr, afetam à saúde de pessoas pertencentes a grupos sensíveis, como crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas, as quais podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço, mas a população, em geral, não é afetada.
Gravíssimo	Valores que não estão em conformidade com a Resolução CONAMA nº 003/1990*, e que, de acordo com a classificação do IQAr: Inadequada: sinaliza que toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta, e que pessoas de grupos sensíveis podem apresentar efeitos mais sérios à saúde. Má: toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante, além de efeitos mais graves à saúde de pessoas de grupos sensíveis. Péssima: toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares e aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis. Crítica: toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares, além do aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

*Para o parâmetro $PM_{2,5}$, foi considerado como referência o valor guia estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2005).

** É válido ressaltar que os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 003/1990 foram estabelecidos em 1990 e são menos restritivos do que os valores preconizados pela Organização Mundial da Saúde em 2005 (WHO, 2005).

3.3 DANOS À SUPERFÍCIE

Os danos à superfície terrestre foram avaliados conforme suas especificidades temáticas, abrangendo paisagem, processos minerários, cavidades naturais e resíduos sólidos.

3.3.1 ALTERAÇÃO NA PAISAGEM

Considera-se como consequência deste desastre, a perda irreversível de patrimônio natural, ecológico e paisagístico, bem como a interrupção de atividades socioeconômicas espacialmente desenvolvidas neste território. Sendo os danos à paisagem local remetidos principalmente às percepções humanas, individuais e coletivas.

Este dano procura descrever os efeitos do desastre sobre o meio físico, mais especificamente àqueles correlacionados aos danos e alterações superficiais e suas relações com a paisagem. Os aspectos específicos, relacionados as alterações químicas, biológicas que envolvem os danos ocorridos na flora, na fauna, nos solos e nas águas, entre outros, dado o caráter multidisciplinar deste estudo, são tratados nos diferentes capítulos desse diagnóstico.

Estes danos físicos correspondem sobretudo a área atingida pela passagem e deposição da lama, ou APDL, que conforme descrito na Contextualização, corresponde a área onde houve erosão e posterior deposição em decorrência da passagem do fluxo de lama.

Cabe mencionar que não constam nessa descrição os danos socioeconômicos, cujas alterações na paisagem são muito mais drásticas e marcantes, dado que em alguns locais a lama invadiu as cidades, destruiu ruas, residências, escolas e praças. As pessoas, os animais e a natureza como um todo foram diretamente e irreversivelmente afetadas.

Destaca-se que o dano à paisagem foi muito mais acentuado no C1, que engloba também os afluentes Gualaxo do Norte e Carmo. Ao longo desses rios, houve intensa remoção e deposição de rejeitos, já que em vários locais o fluxo de lama extravasou a calha. Nos C2 e C3, embora menos expressivos, os danos à paisagem foram igualmente notados. Houve significativa alteração na água e expressiva mortandade de peixes. Em muitas áreas de planícies e nas ilhas fluviais, houve deposição dos rejeitos, afetando afluentes e lagoas. Todo este material, transportado pelo rio após o desastre, chegou a foz do rio Doce e adentrou o oceano na forma de uma extensa pluma de sedimentos, alterando também as condições na costa e no ecossistema marinho.

Figura 26 – Margens do rio Gualaxo do Norte com a remoção de solos e rochas e deposição da lama de rejeito.

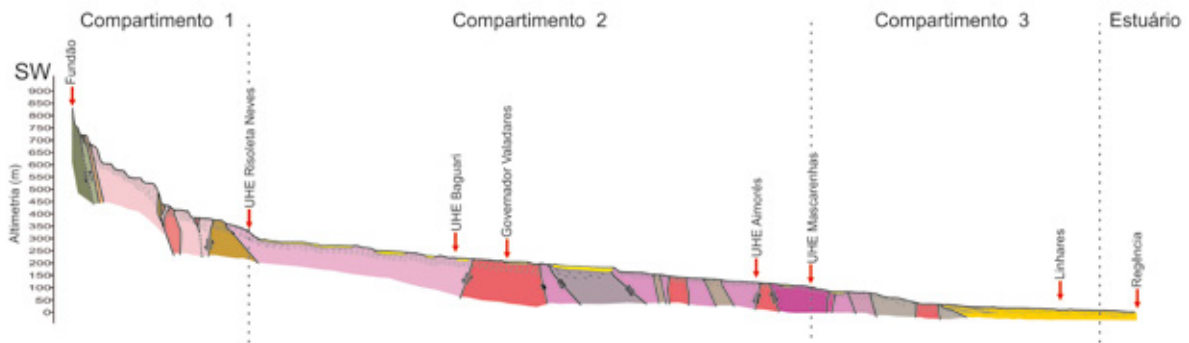


Fonte: Defesa Civil (SAADI; CAMPOS, 2015).

Para a escala de gravidade do dano da alteração da paisagem, foi considerada a área correspondente a APDL em um total de 28.082,34 ha, as quais representam as alterações mais severas causadas pelo rompimento da barragem de Fundão. Sendo assim esse dano é classificado como gravíssimo por apresentar área afetada acima de 1.000 ha nos compartimentos 1, 2 e 3 e com tendência a reduzir. Quanto a sua reversibilidade, foi considerado parcialmente reversível.

A fim de contextualizar e resumir os principais danos associados a paisagem, apresenta-se na Figura 27, o perfil longitudinal geológico-geomorfológico ao longo do rio e principais danos por compartimentos descritos na sequência.

Figura 27 – Perfil geológico-geomorfológico realizado ao longo do perfil do rio afetado pela lama de rejeito.



Elaborado por: Lactec.

C1 - Desnível topográfico de aproximadamente 500 m

- Presença de vales encaixados com perfil em “V”, associados a alta declividade;
- Dominam os processos erosivos sobre os de deposição;
- Ocorreram processos erosivos acentuados, com remoção da vegetação, de solos e localmente de rochas;
- Depósitos expressivos de rejeitos em áreas de planícies, principalmente em remansos, onde houve o retorno no fluxo para dentro de drenagens afluentes;
- Remobilização de sedimentos de fundo e alterações significativas na qualidade da água;
- Perda de biodiversidade e ecossistemas inteiros;
- Alagamentos e destruição do patrimônio espeleológico, arqueológico e de processos minerais em atividade;
- Parte significativa do fluxo de lama foi retido na UHE Risoleta Neves;
- Geração de grandes quantidades de resíduos, principalmente rejeito e vegetação (troncos de árvores), depositadas de forma inadequada.

C2 - Desnível topográfico de aproximadamente 200 m

- Declividades morfológicas menos acentuadas, vales apresentam perfil ligeiramente mais abertos, transição de “V” para “U”;
- Embora os processos erosivos ainda sejam dominantes, há quebra de gradiente hidráulico, e consequentemente há deposição de sedimentos;
- O fluxo de lama ficou restrito a calha do rio, entretanto afetou ilhas fluviais e áreas de proteção ambiental;
- Houve expressiva mortandade de peixes e alterações significativas na qualidade da água, associada a alta turbidez, aumento de sólidos em suspensão e baixa disponibilidade de oxigênio.

C3 - Desnível topográfico de aproximadamente 100 m

- Topografia suave a plana. Rio apresenta vales em forma de U" aberto. Rio em seu estado Senil;
- Dominam os processos de deposição sobre os de erosão. Presença de muitos bancos de areia, ilhas fluviais e lagoas;
- Alteração significativa da água devido à alta turbidez. Entrada do fluxo de lama em algumas lagoas. Neste compartimento houve deposição de rejeito nas margens e ao longo do canal praticamente até a foz do rio Doce, no distrito de Regência.

C4 e C5 – Zona Costeira e Marinha

- Chegada da pluma na região costeira. Alteração significativa da coloração e da qualidade da água;
- Mudança de salinidade favoreceu a precipitação / deposição de uma série de elementos sobre os sedimentos marinhos, juntamente com uma fina camada de rejeito;
- Ecossistema marinho e biodiversidade associada sofreram grandes alterações.

3.3.2 DANOS EM PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DE BENS MINERAIS

Com relação aos danos em processos de extração de bens minerais, foram identificados, no total, 469 processos minerários afetados. Desses processos com áreas requeridas, totalizando 146.226,01 ha, 34.174,2 ha estão inseridos dentro da APDL, o que representa 23,37% de área afetada. A maioria desses processos estavam em fase de autorização de pesquisa na época do desastre (Tabela 13), o que significa que estavam em fase de pesquisa para a qualificação e quantificação do bem mineral. Em relação à substância, a maioria dos processos minerários atingidos relacionava-se à extração de areia, seguido de ouro e argila. Entretanto, as áreas requeridas para água mineral tiveram mais de 67% de sua área afetada pelo desastre (Tabela 14).

Tabela 13 – Quantitativos dos processos DNPM atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas fases.

Fase / Quantitativos	Nº processos	Área inicialmente requerida (DNPM) em ha	Área afetada em ha	Área afetada em %
Processos afetados pela lama	469	146.226,01	34.174,25	23,37
Autorização de Pesquisa	296	111.253,32	27.296,88	24,54
Concessão de Lavra	7	1.301,58	200,45	15,40
Licenciamento	42	1.003,03	513,94	51,24
Requerimento de Lavra	66	9.561,48	3.235,75	33,84
Requerimento de Lavra Garimpeira	4	101,80	18,69	18,37
Requerimento de Licenciamento	19	647,15	337,01	52,08
Requerimento de Pesquisa	35	22.357,65	2.571,50	11,50

Tabela 14 – Quantitativos dos processos DNPM atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas substâncias.

Substâncias	Nº processos	Área inicialmente requerida (DNPM) em ha	Área afetada em ha	Alteração de área em %
Água Mineral	1	29,00	19,56	67,45
Areia / Areia industrial	277	30.456,61	10.240,30	33,62
Argila / Argila refratária / Argila vermelha	50	13.194,03	3.825,971	29,00
Bauxita	1	1.941,69	103,41	5,33
Diamante	4	7.988,78	291,79	3,65
Feldspato	1	97,00	3,67	3,78
Fe/ minério de Fe	22	25.063,02	1.169,90	4,67
Gema	4	101,80	18,69	18,37
Granito	46	21.598,44	2.128,53	9,86
Hematita	1	280,97	13,70	4,88
Ilmenita	2	2.198,35	820,68	37,33
Ouro / Minério de ouro	60	43.276,32	15.538,00	35,90

Este dano afetou os C1, C2 e C3, sendo considerado gravíssimo em todos eles em função de a área exceder mil hectares. O dano é considerado cessado, porém parcialmente reversível em função do transporte natural dos sedimentos.

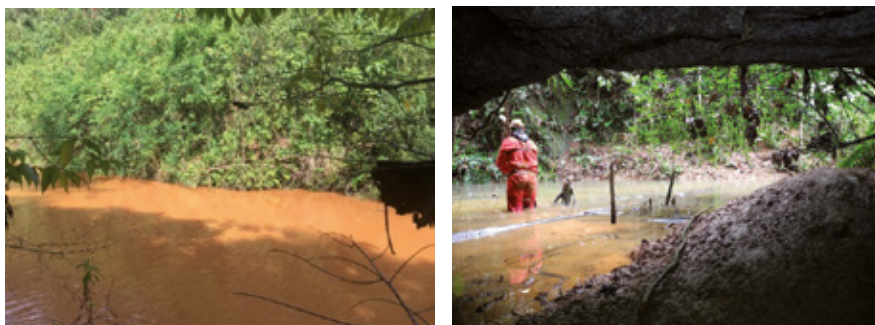
3.3.3 DANOS EM FEIÇÕES SUBTERRÂNEAS

Das 22 feições subterrâneas com potencial de terem sido afetadas pelo desastre, 14 foram consideradas atingidas por terem tido contato com a lama de rejeitos. Entretanto, destas, apenas duas são consideradas cavidades naturais, sendo que uma foi parcialmente atingida (Figura 28) e a outra totalmente soterrada (Figura 29), enquanto que cinco foram consideradas abrigos (Tabela 15). O abrigo CA-17, da Figura 30, foi também soterrado como ilustram as fotos.

Figura 28 – CA-14. Cavidade com desenvolvimento de cinco metros, não possui espeleotemas e foi atingida pela lama de rejeitos.



Fonte: Lactec.

Figura 29 – CA-12. Caverna atualmente encontra-se alagada.

Fonte: Lactec.

Figura 30 – CA-17. À esquerda, fotografia fornecida pela Samarco (26/02/2015), anterior ao alteamento da Barragem de Nova Santarém. À direita, imagem atual obtida pela equipe do Lactec na posição onde se encontrava o abrigo.

Fonte: Samarco e Lactec.

Tabela 15 – Tabela resumo das feições subterrâneas vistoriadas e avaliação dos danos.

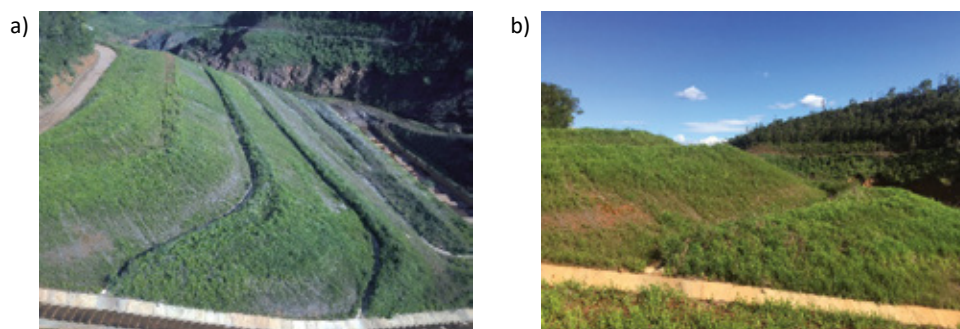
Grupo	Denominação	UTM E - LACTEC	UTM N - LACTEC	Avaliação	Consideração Final
Norte	CA-07	Não vistoriada	Não vistoriada	Atingida	Desconsiderada
	CA-08	660788	7763464	Atingida	Abrigo
	CA-09	Não vistoriada	Não vistoriada	Atingida	Abrigo
Centro Norte	CA-10	Não vistoriada	Não vistoriada	Atingida	Abrigo
	CA-11	660996	7763105	Atingida	Desconsiderada
	CA-12	661089	7763106	Soterrada	Caverna
	CA-13	661052	7763092	Atingida	Desconsiderada
	CA-14	661110	7763031	Atingida	Caverna
	CA-15	661100	7763015	Atingida	Abrigo
	CA-16	661090	7762996	Soterrada	Abrigo
	CA-17	661479	7762470	Atingida	Abrigo
Central	CA-18	661495	7762409	Atingida	Desconsiderada
	CA-19	661482	7762409	Atingida	Desconsiderada
Isolada	CA-20	661283	7762209	Não atingida	Abrigo
Isolada	SMD-01	662860	7762556	Não atingida	Abrigo

Além das duas feições subterrâneas, uma antiga mineração (Tabela 16 e Figura 31) foi submersa ou soterrada em função do desastre, em virtude das obras do barramento de Nova Santarém. Desta forma, conforme metodologia adotada, para essas três feições o dano foi considerado gravíssimo e irreversível. Já para as demais 11 feições, o dano foi considerado grave em função da lama de rejeito apenas ter passado por elas. Houve deposição de rejeito, mas as cavidades e/ou abrigos não ficaram permanentemente alagados, pois situam-se em cota topográfica ligeiramente mais elevada. A flora e a fauna destes ambientes, quando da passagem da lama, sofreram danos evidentes, entretanto, verificou-se condições para o retorno de sua ocupação, como é o caso da CA-14, na qual foram avistados morcegos e anfíbios.

Tabela 16 – Tabela resumo das feições subterrâneas vistoriadas e avaliação dos danos.

Grupo	Denominação	UTM E - LACTEC	UTM N - LACTEC	Avaliação
Demais cavidades cadastradas no CANIE e antigas mineirações	Fábrica Nova / Mina Santo Antônio	663084	7761110	Soterrada
	Casa Branca	621006	7764110	Não atingida
	Morada do índio	710987	7757101	Não atingida
	São Gonçalo I	711020	7757311	Não atingida
	São Gonçalo II	711017	7757067	Não atingida
	Mina Ouro Fino	664696	7762649	Não atingida
	Sete Salões	252070	7865474	Não atingida

Figura 31 – Fábrica Nova – Mina Santo Antônio. Localização do antigo sítio arqueológico correspondente às áreas da mineração Fábrica Nova. Atualmente o local encontra-se totalmente descaracterizado pelas bermas do talude construído à jusante da barragem de Santarém. a) Visão geral do local da antiga mina Santo Antônio / Fábrica Nova (foto com drone); b) Visão geral da região alterada pelas obras.

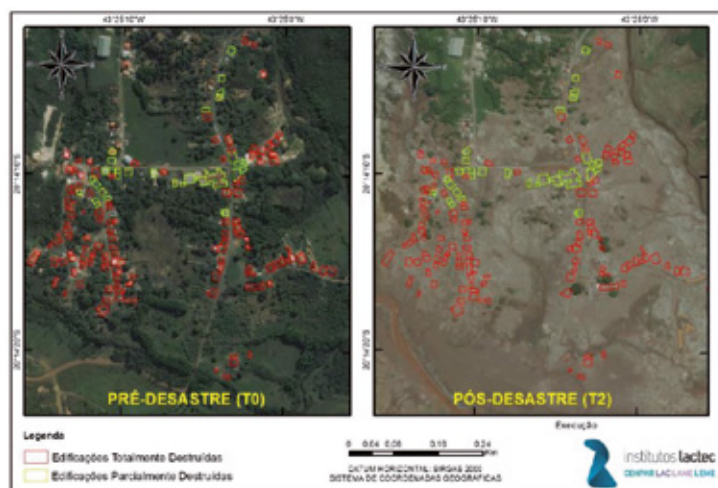


Fonte: Lactec.

3.3.4 ÁREAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A ação mecânica da passagem da lama proveniente da barragem de Fundão gerou outros tipos de resíduos sólidos na forma de resíduos florestais oriundos da destruição da vegetação ripária e resíduos de construção civil que foram originados pela devastação de estruturas civis. Estes resíduos, por sua vez, ficaram dispostos em diversos pontos dentro da APDL. Por exemplo, a Figura 32 expõe as áreas de geração de resíduos de construção civil do distrito de Bento Rodrigues.

Figura 32 – Exemplo das edificações impactadas pela onda de lama no distrito de Bento Rodrigues.



Execução: Lactec.

Para o dano em questão, a gravidade foi definida empiricamente através da área impactada pelos resíduos. Desta forma, considerou-se que o dano é grave para a geração de resíduos sólidos.

A avaliação da tendência e reversibilidade considerou o conjunto de ações emergenciais tomadas após o desastre e as demais atividades que estão em andamento nas áreas afetadas. Desta maneira, considera-se que a tendência do dano é reduzir, pois as atividades mitigatórias removerão uma grande quantidade destes resíduos gerados, dando a eles uma destinação correta conforme a legislação vigente. Já em relação a reversibilidade, considera-se que o dano é parcialmente reversível, pois, mesmo com as diversas ações paliativas, dificilmente as áreas serão totalmente recuperadas da defluência do desastre. Desta forma, o valor estimado da área para os diversos polígonos de remoção vegetal e das estruturas de construção civil impactadas no C1 estão disponíveis na Tabela 17.

Tabela 17 – Área de supressão vegetal e estruturas civis impactadas.

Classificação da área impactada		Área impactada (ha)
Supressão vegetal	Mata Nativa	283,8
	Vegetação Secundária	281,7
Construção civil	Edificações Parcialmente Destruidas	14,0
	Edificações Totalmente Destruidas	17,4
Área Total		596,9

3.3.5 AMPLIAÇÃO DE ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Nos períodos posteriores ao desastre, em virtude das ações emergenciais, muito dos rejeitos gerados pela onda de lama foram movimentados para áreas anteriormente não impactadas, ampliando o dano ambiental. Desta forma, por meio da avaliação de documentos oficiais, constatou-se que diferentes áreas foram afetadas pela movimentação, remoção e disposição desses resíduos sólidos. Na cidade de Barra Longa foram relatados, em documentos oficiais, a disposição em três áreas principais: Centro de Exposição, Campo de Futebol e Fazenda Vista Alegre (Figura 33). Já nas proximidades da UHE Risoleta Neves, foi mencionada a utilização de quatro áreas de disposição: Setor 4 e 5, Ecobags, Setor 8 e pilha Velho Soberbo, além do planejamento da utilização da Fazenda Floresta para este mesmo fim. Os valores estimados destas áreas de remoção e disposição de resíduos pelas ações após o desastre estão disponíveis na Tabela 18.

Figura 33 – Aterro Fazenda Vista Alegre: Imagem pré-desastre (esquerda) e pós-desastre (direita).



Execução: Lactec.

Tabela 18 – Estimativa das áreas de remoção e disposição de resíduos sólidos

Localidade avaliada	Área estimada (ha)
Centro de Exposições - Barra Longa/MG	1,96
Campo de futebol - Barra Longa/MG	0,88
Fazenda Vista Alegre - Barra Longa/MG	11,56
UHE Risoleta Neves - Rio Doce/MG	20,63
Área Total	35,03

Para este caso, o dano foi considerado grave, tende a aumentar e é parcialmente reversível pois, quando executados os diversos planos de manejo e disposição de rejeitos, novas áreas, anteriormente não impactadas, serão demandadas para a alocação destes, aumentado, mesmo que dentro dos parâmetros e normas previstas na legislação, o dano ambiental vinculado ao desastre.

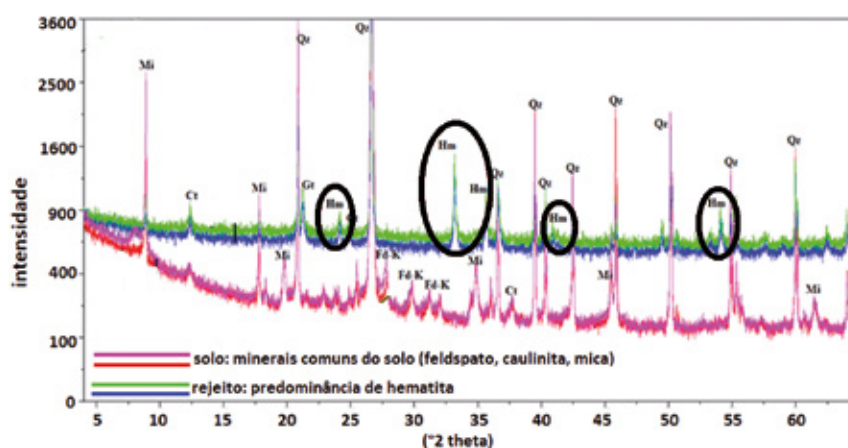
3.4 DANOS AOS SOLOS

A remoção de solos pela força da onda de lama e, posteriormente a deposição de rejeitos, provocaram drásticas alterações nas propriedades dos solos antes existentes. Os danos identificados para essa matriz incluem: alteração da composição do solo; aumento da densidade do solo; aumento dos processos erosivos; alteração da capacidade de suporte e deformabilidade; alteração da permeabilidade e fluxo de água; alteração da estabilidade de encostas; alteração da fertilidade e do potencial produtivo; contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos; e formação de Tecnossolo.

3.4.1 ALTERAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO SOLO

A análise da alteração da composição da fase sólida do solo se deu pela avaliação dos constituintes minerais e orgânicos do rejeito depositado no C1 (1.614 ha) em relação à linha-base e aos solos controle. Em relação à mineralogia, constatou-se que o rejeito depositado é composto, basicamente, por óxidos de Fe cristalinos (em especial a hematita, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) e por quartzo, enquanto que minerais aluminossilicatos comumente encontrados no solo, como a caulinita, foram verificados apenas como resíduos ou não foram observados (a exemplo do feldspato potássico e a mica (Figura 34). Essa mineralogia predominantemente hematítica do rejeito foi herdada do material de origem (Itabirito) do beneficiamento do Fe (SILVA *et al.*, 2006) e tem consequências negativas para o balanço de cargas do solo, uma vez que a hematita possui menor capacidade de troca catiônica (CTC) em relação à caulinita (MELO; ALLEONI, 2009).

Figura 34 – Difratograma de raio-X (picos de minerais) das amostras de solo controle (linha vermelha e rosa) e rejeito (linhas azul e verde). Legenda: Ct- caulinita, Mi- mica, Gt- goethita, Hm- hematita, Qz- quartzo, Fd-K- feldspato potássico. Os círculos destacam os picos de hematita no rejeito.



Elaborado por: Lactec.

No que diz respeito ao componente orgânico do solo, houve redução dos já baixos valores de carbono orgânico (CO) da linha-base ($0,88 \text{ dag.kg}^{-1}$) para teores extremamente baixos ($0,17 \text{ dag.kg}^{-1}$) (Figura 35). A Matéria Orgânica do Solo (MOS) é determinística para as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos e para o seu correto funcionamento no ambiente e, assim, o retorno dos teores de carbono aos níveis originais no rejeito depositado requer práticas de manejo de alta complexidade, indicando que ocorreu dano gravíssimo para a composição da fase sólida. Aliado a isso, tem-se a impossibilidade de retorno da condição inicial do solo em relação aos minerais das frações areia, silte e argila.

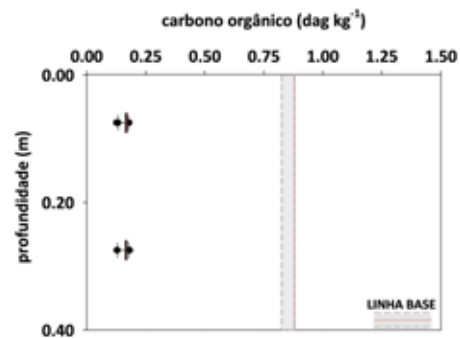
A alteração da composição mineralógica da fase sólida do solo é um dano permanente e, portanto, irreversível. No entanto, a diminuição da fração orgânica pode ser parcialmente revertida uma vez que aportes constantes de matéria orgânica ocorram e a vegetação seja continuamente mantida sobre o material. Apesar do dano ser considerado cessado, com o incremento da MOS, os efeitos desse dano ao solo tenderão a reduzir, uma vez que se espera uma contribuição das cargas negativas dessa fração em contrapartida à baixa CTC da hematita.

3.4.2 AUMENTO DA DENSIDADE DO SOLO

Diversas características físicas do material foram determinadas para o diagnóstico do dano de aumento da densidade do solo, em que se ressalta a modificação da distribuição granulométrica, densidade e macroporosidade no rejeito depositado no C1 em relação aos solos que representam a linha-base.

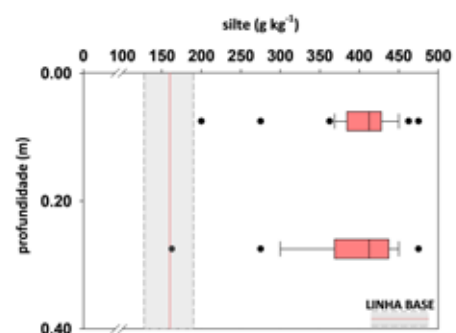
Os teores medianos de silte do rejeito foram 2,6 vezes superiores (413 g.kg^{-1}) ao encontrado antes do desastre (160 g.kg^{-1}) (Figura 36). O aumento nessa fração pode dificultar a aeração no rejeito, já que o silte se acomoda entre os espaços deixados pelas partículas de areia, especialmente em sendo as partículas compostas por óxidos de Fe, conforme discutido. Dessa maneira, o rejeito apresentou-se como uma matriz adensada devido à maior densidade aparente (ou densidade do solo) ($1,97 \text{ g.cm}^{-3}$) e menor proporção de macroporos ($0,07 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) em comparação aos mesmos parâmetros na linha-base ($1,51 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,2 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, respectivamente) (Figura 37).

Figura 35 – Teor de carbono orgânico de amostras de rejeito.



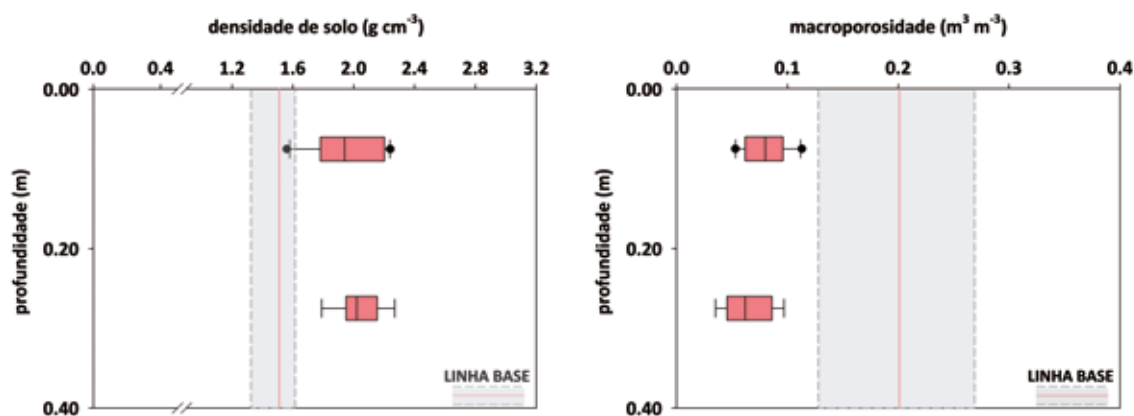
Elaborado por: Lactec.

Figura 36 – Teores de silte de amostras de rejeito.



Elaborado por: Lactec.

Figura 37 – Valores de densidade do solo e macroporosidade de amostras de rejeito.



Elaborado por: Lactec

O adensamento na matriz de rejeito, ocorrido em uma área de 1.614 ha, pode resultar na restrição do crescimento radicular da vegetação e aumentar a ocorrência de processos erosivos. O dano foi classificado como cessado e grave, no entanto, devido à capacidade de água disponível ter sido quatro vezes superior nesse material (227,5 mm) em relação à linha-base (51,7 mm) (devido ao incremento de silte em relação aos solos aluviais arenosos).

O enquadramento como dano grave foi baseado na necessidade de práticas de manejo de média complexidade para que o dano seja parcialmente revertido, tais como a manutenção da cobertura vegetal durante o período de baixa precipitação e o aumento do teor de matéria orgânica do solo pela adição de resíduos e de biomassa vegetal. Dessa maneira, devido à matéria orgânica ser responsável pela formação de agregados e estruturas no solo, haverá melhora na condição física geral da matriz, resultando na tendência de redução da densidade com o tempo.

3.4.3 AUMENTO DOS PROCESSOS EROSIVOS

Para avaliar o dano relacionado ao aumento dos processos erosivos foram realizados ensaios de erosão (*Inderbitzen*, *pinhole test* e *crumb test*) e modelagem computacional para o cálculo da perda de solo (*Universal Soil Loss Equation* – USLE). Grande parte dos processos atuam de modo conjugado a processos de transformação, adição e remoção de solo. A erosão natural ocorre lentamente e com essa ocorrência é possível a formação de novas camadas de solo, viabilizando a substituição de camadas de material erodido e/ou transportado. Já a erosão antrópica está diretamente ligada aos fatores de uso e ocupação do solo que causam alterações em paisagens, como é o caso do material depositado oriundo do rompimento da barragem de Fundão, que ocasionou a cobertura do solo. Buscou-se avaliar o aumento dos processos erosivos decorrentes da deposição de rejeito sobre o solo natural no C1.

Nos ensaios realizados foi possível classificar se o material depositado possui potencial para desagregação na presença de água (*Crumb test*), para causar erosão interna (*piping*) (*Pinhole test*) e/ou para provocar erosão por escoamento superficial (*Inderbitzen*).

De modo geral, os resultados dos ensaios indicaram que a deposição do rejeito sobre o solo natural contribuiu para o aumento dos processos erosivos (Figura 38). Foi verificado que a camada de rejeito depositada apresentou moderada dispersão. Portanto, independentemente do local, do

volume precipitado e da inclinação do talude, há potencial para ocorrência de erosão do material depositado sobre o solo natural.

Figura 38 – Registros fotográficos de processos erosivos nas áreas de deposição do rejeito (processos de erosão laminar e erosão em sulcos).



Fonte: Fundação Renova (2018).

Adicionalmente, a perda de solo nas sub-bacias dos rios Gualaxo do Norte, incremental do rio Carmo e incremental do rio Doce, aumentou devido à nova conformação da paisagem no período pós-desastre, ou seja, com a perda da vegetação presente na APDL do C1 e deposição de uma camada de rejeitos inconsolidada (área de 1.614 ha²). Esse incremento, de 10,7 t.ha⁻¹ ano⁻¹, modificou o potencial de erosão das sub-bacias de moderado (44,1 t.ha⁻¹ ano⁻¹ no período pré-desastre) para alto (54,8 t.ha⁻¹ ano⁻¹ no período imediatamente após o desastre) de acordo com a classificação da FAO (1980).

Este dano referente ao aumento dos processos erosivos pode ser classificado como grave, uma vez que causa a perda da camada fértil do solo e sua posterior desagregação, assoreamento de rios e lagos e é fonte potencial de contaminação de águas superficiais. Esses fatores implicam diretamente na instabilidade de encostas, podendo ocorrer o soterramento de casas e plantações, além do comprometimento da potabilidade da água devido a turbidez causada pelos sedimentos em suspensão.

A matéria orgânica do solo é um dos principais fatores capazes de amenizar esse dano, que tende a reduzir com o passar do tempo se a recomposição da fração orgânica do solo for restaurada. Nesse sentido, o dano pelo aumento dos processos erosivos pode ser parcialmente reversível se observadas práticas conservacionistas, se aportes de material orgânico ocorrerem de forma contínua no rejeito depositado e caso medidas de contenção do carreamento do material para o leito do rio sejam tomadas.

3.4.4 ALTERAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE E DEFORMABILIDADE DO SOLO

Para a avaliação do dano relacionado a alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo foram realizados ensaios geotécnicos de laboratório (índice de suporte Califórnia – CBR, e adensamento unidimensional).

Segundo o Método de projeto de pavimentos flexíveis, DNER 667/22:1981, podem ser utilizados como materiais para sub-base, materiais que apresentam CBR maior ou igual a 20 e expansão menor ou igual a 1%, como é o caso do rejeito analisado. A partir dos resultados obtidos em laboratório para capacidade de suporte e do ponto de vista geotécnico, o material de estudo (material depositado

2 Área de abrangência quantificada a partir da soma das áreas das classes de uso da terra inseridas na APDL, no C1: banco de areia, campo e pasto, ilha, vegetação nativa, reflorestamento e solo exposto.

sobre o solo natural) poderá ser utilizado como sub-base para pavimentos flexíveis. Entretanto, análises químicas para a avaliação da dispersão de material particulado se fazem necessárias.

Quando comparados os resultados obtidos com os valores de linha-base apresentados por Allonda (2017) e Pattrol (2017) constatou-se que os valores dos parâmetros dos ensaios de adensamento apresentaram um decréscimo quando comparados ao solo natural. Por exemplo, a tensão de pré-adensamento reduziu 25 kPa, e a redução de valores vinculados a estes parâmetros pode acarretar em recalques excessivos para um mesmo carregamento e um mesmo tipo de fundação. Portanto, se houvesse uma redução significativa neste valor seria necessária a construção de fundações mais robustas para não se ter recalques diferenciais nas estruturas.

De acordo com os critérios adotados, o dano foi classificado como pouco grave, uma vez que, os parâmetros de capacidade de suporte e deformabilidade foram pouco alterados, não havendo a necessidade de dimensionamento de reforços para fundações. Este dano encontra-se cessado e é irreversível.

3.4.5 ALTERAÇÃO DA PERMEABILIDADE E FLUXO DE ÁGUA NO SOLO

O dano referente a alteração da permeabilidade e fluxo de água no solo foi avaliado a partir da realização de ensaios de permeabilidade à carga variável com amostras de rejeito coletadas no C1.

Os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios foram comparados com resultados de ensaios realizados com amostras de solo pré-desastre. Para os ensaios de permeabilidade à carga variável no adensamento, para a obtenção do coeficiente de permeabilidade (k_v), os resultados foram apresentados por Pattrol (2017) e também foram apresentados no relatório de linha-base. Sabe-se que este é um dado secundário extraído do ensaio de adensamento unidimensional e deve ser avaliado considerando as condições de campo. Os resultados apresentaram valores médios de 10^{-6} cm/s, compatível com o tipo de amostra ensaiada e identificada nos perfis geológico-geotécnicos.

Os resultados dos ensaios realizados com as amostras de rejeito coletadas no C1 apresentaram valores médios de 10^{-4} cm/s, este aumento do coeficiente de permeabilidade, quando comparado aos valores de linha-base apresentados por Pattrol (2017) pode estar vinculado à composição granulométrica do rejeito. O rejeito possui elevada fração de silte e de areia, e estes materiais possuem diâmetros maiores do que argilas. Ainda, foi verificado no ensaio do furo de agulha (*Pinhole test*), que o material em questão possui características de formação de *piping* (erosão interna), o que pode criar caminhos preferencias para o fluxo de água no solo, aumentando assim o k_v .

De modo geral, os ensaios indicaram que a deposição de rejeito sobre o solo natural contribuiu para o aumento do coeficiente de permeabilidade k_v . Este dano do ponto de vista geotécnico, pode ser classificado como grave, uma vez que a taxa de infiltração/percolação de água no solo foi alterada em até 100 vezes. É um dano irreversível considerando que a remoção completa da camada de rejeito depositada é inviável e com o decorrer do tempo tende a reduzir, caso medidas de proteção do solo superficial sejam adotadas, senão, tende a aumentar devido a erosão interna.

3.4.6 ALTERAÇÃO DA ESTABILIDADE DE ENCOSTAS

O objetivo da análise de estabilidade de encostas é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Uma análise de estabilidade

visa verificar se um talude é estável a partir de um fator de segurança associado a uma superfície potencial de ruptura. O fator de segurança (FS) é definido como a relação entre as tensões cisalhantes atuantes e a resistência ao cisalhamento do solo.

A Tabela 19 apresenta os FS a serem encontrados de acordo com as condições de contorno do talude. O FS admissível (FS_{adm}) para uma determinada obra corresponde a um valor mínimo a ser atingido e varia conforme definido em projeto.

Tabela 19 – Fatores de segurança e respectivas condições de segurança.

Fator de segurança (FS)	Condição de contorno do talude
$FS < 1,0$	Talude instável, que sofrerá ruptura.
$FS = 1,0$	Condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura, também, condição adotada geralmente nos cálculos de retroanálise.
$FS > 1,0$ (pouco maior)	Condição estável, quanto mais próximo de 1,0 for o FS, mais precária e frágil será a condição de estabilidade do talude.
$FS > 1,0$ (muito maior)	Condição estável, quanto maior for o FS, menores serão as possibilidades de o talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas (percolação d'água, etc).

Fonte: Ferreira (2012).

Quando analisados os FS obtidos para as seções selecionadas ao longo do C1, para solos coesivos, foram obtidos valores da ordem de 0,993 a 30,12. E para solos não coesivos, valores da ordem de 0,192 a 8,682.

Como não existem dados de FS pretérito (linha-base) do C1, não foi possível uma comparação de resultados pré e pós-desastre. Este dano, de acordo com os critérios assumidos para sua classificação, é considerado pouco grave, uma vez que o rompimento do talude não se dá onde o rejeito foi depositado, mas nas cotas mais elevadas. Além disso, os valores de FS obtidos estão de acordo com o que estabelece a norma ABNT NBR 11682:2009.

3.4.7 ALTERAÇÃO DA FERTILIDADE E DO POTENCIAL PRODUTIVO DO SOLO

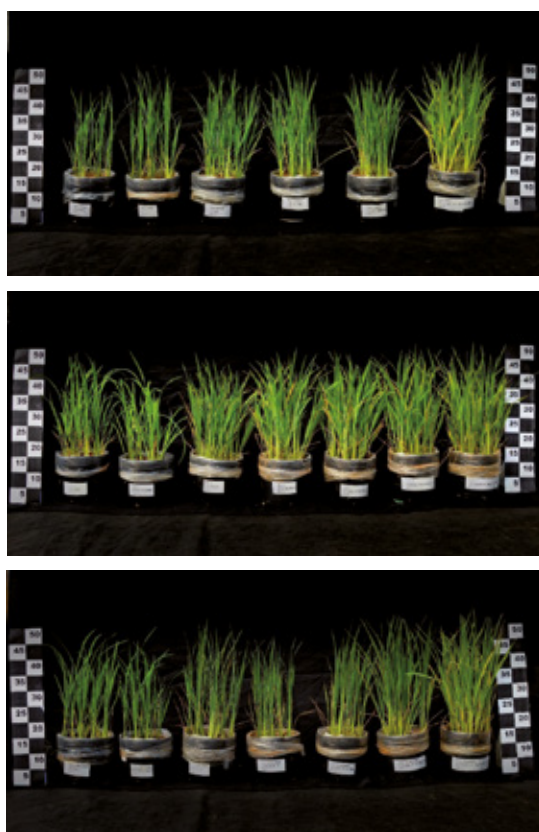
A deposição do rejeito no C1 resultou em danos às características químicas do solo em uma área de 1.571 ha³, como a redução dos já baixos teores de bases (como Ca e Mg) e da CTC, com predomínio de cargas positivas provenientes da hematita, conforme verificado pelo delta pH do rejeito (Tabela 20). No entanto, devido ao pH mais corrigido (com consequente ausência de alumínio trocável) e do teor de fósforo disponível ligeiramente superior no rejeito em relação à linha-base (Tabela 20), o potencial produtivo observado para essa matriz em condições controladas foi similar ao potencial produtivo do solo controle da região (Figura 39). Nesse caso, em que plantas de arroz foram cultivadas em casa de vegetação em solos controle, rejeito e rejeito em sistema inundado, somente quando N, K, Mg, Zn, Mo, Cu, B e P foram fornecidos às plantas, houve maior produção de biomassa aérea no solo controle em relação ao rejeito. O *status* nutricional de gramíneas coletadas em campo (C1, se desenvolvendo diretamente na APDL) e do próprio arroz cultivado em casa de vegetação corroboraram essa observação.

3 Área de abrangência quantificada a partir da soma das áreas das classes de uso da terra afetadas pela APDL, no C1: campo e pasto, vegetação nativa, reflorestamento e solo exposto.

Tabela 20 – Parâmetros de fertilidade e química do solo (valores médios) quantificados nas amostras de rejeito depositado, em relação à linha-base.

Parâmetro	CTC _{ef} cmol _c kg ⁻¹	delta pH	pH água	P mg kg ⁻¹
rejeito 0-20 cm	1,46	0,10	6,2	8,1
rejeito 20-40 cm	1,61	0,16	6,4	7,0
linha-base 0-40 cm	2,56	-0,65	5,9	4,3

Figura 39 – Plantas de arroz cultivadas em solo controle (acima), rejeito (meio) e rejeito em sistema inundado (abaixo). Da esquerda para direita: tratamento sem adição de nutrientes (para o rejeito foram considerados dois tratamentos: rejeito puro e rejeito com adição de cascalho); tratamento com N; tratamento com N+K; tratamento com N+K+Mg; tratamento com N+K+Mg+Zn; tratamento completo (N+K+Mg+Zn+Mo+Cu+B+P).



Fonte: Lactec.

Nesse sentido, o dano às características químicas e ao potencial produtivo do solo foi considerado pouco grave, cessado e parcialmente reversível, já que os nutrientes podem ser repostos via adubação orgânica e mineral e a fertilidade do rejeito pode ser construída se o teor de MOS for recuperado e mantido. A matéria orgânica tenderá a aumentar a CTC no rejeito, o que resultará na tendência de redução do efeito do dano de forma geral.

3.4.8 CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR EPTS

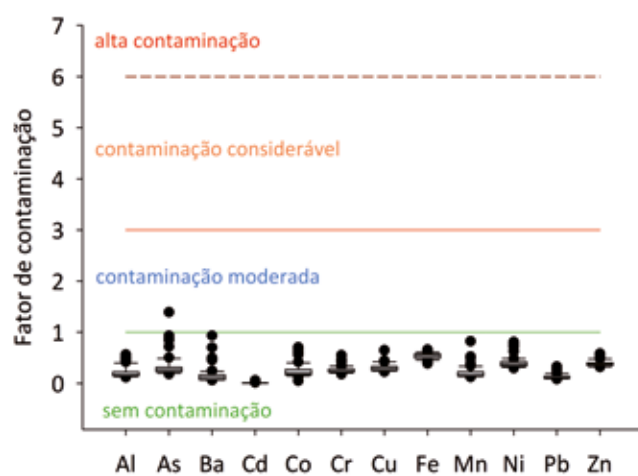
Não foi encontrado dano para os elementos Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Hg, Se, Sn e Zn, pois os teores quantificados não ultrapassaram os teores da linha-base e/ou valores de referência de qualidade (VRQs) para o solo, além de não resultarem em preocupação ambiental em relação à biodisponibilidade a curto (imediate) e médio prazo (meses a anos), e portanto, não apresentaram contaminação para o solo (Figura 40).

Adicionalmente, os teores dos EPTs mencionados, quantificados na biomassa vegetal das gramíneas, ficaram muito aquém dos limites máximos toleráveis para bovinos e os teores quantificados na biomassa de arroz variaram dentro do esperado, de acordo com teores de referência para a folha bandeira dessa espécie (Figura 41). O rejeito não mostrou alterações genotóxicas ou mutagênicas em plantas, tendo sido verificada apenas a possível contribuição do Mn do rejeito para a diminuição do índice mitótico das raízes de cebola (alteração da divisão celular).

Para Fe e Mn, no entanto, foi possível associar o aumento dos teores desses elementos na matriz solo à ocorrência do desastre, embora os mesmos não tenham ultrapassado a linha-base (Figura 40 e Figura 42). Tanto Fe quanto Mn apresentaram elevada disponibilidade no rejeito depositado entre Fundão e Risoleta Neves (C1), especialmente em condição de anoxia (falta de oxigênio no solo). De fato, isso foi observado tanto no experimento de condições controladas, em que mesmo uma cultivar tolerante à toxidez de Fe apresentou sintomas típicos de toxidez na condição do rejeito inundado, quanto em campo, já que os teores de Fe na braquiária cultivada no rejeito se apresentaram levemente acima dos teores máximos toleráveis para efeitos tóxicos em bovinos (Figura 43).

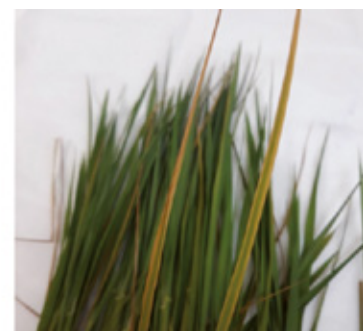
O Mn apresentou teores pseudototais no rejeito depositado acima do VRQ para a bacia do rio Doce e, devido a este ser preferencialmente reduzido em relação ao Fe em ambiente alagado, associou-se à diminuição em até 44% no índice mitótico de raízes de cebola (experimento de citogenotoxicidade) à maior disponibilidade de Mn pelo rejeito. Adicionalmente, os teores de Mn na biomassa do arroz cultivado no rejeito inundado foram até quatro vezes superiores aos teores da folha bandeira da espécie.

Figura 40 – Fator de contaminação de EPTs (teores pseudototais) no rejeito em relação à linha-base anterior ao desastre. Os elementos Ag, Sb, Hg, Se e Sn não possuem teores de linha-base e por isso não estão representados no gráfico.



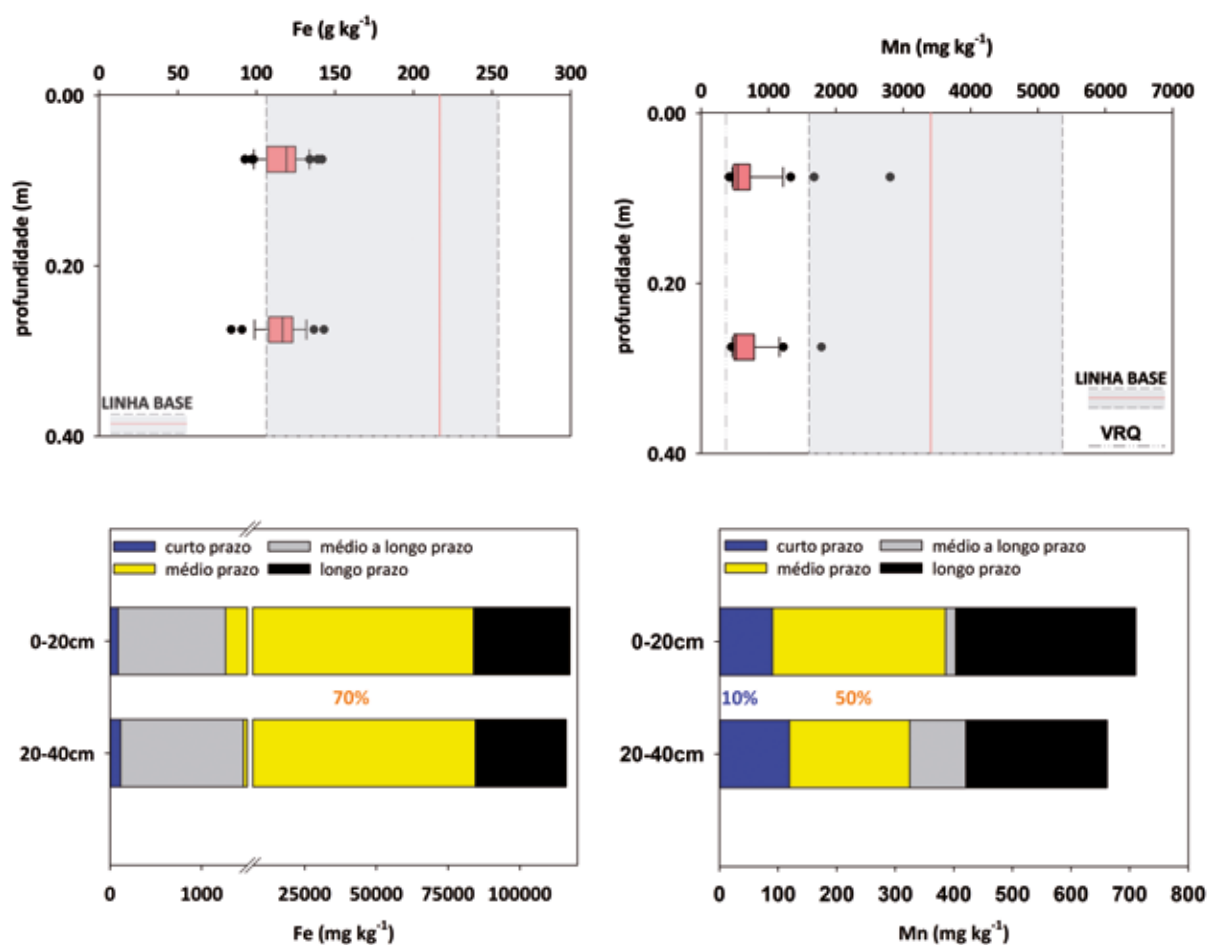
Elaborado por: Lactec.

Figura 41 – Sintoma de toxidez de Fe (coloração alaranjada) nas folhas de arroz (*Oryza sativa*) cultivado no rejeito em condição inundada.



Fonte: Lactec.

Figura 42 – Pannel superior: teores pseudototais de Fe e Mn de amostras de rejeito. Pannel inferior: frações (média) de Fe e Mn no rejeito.

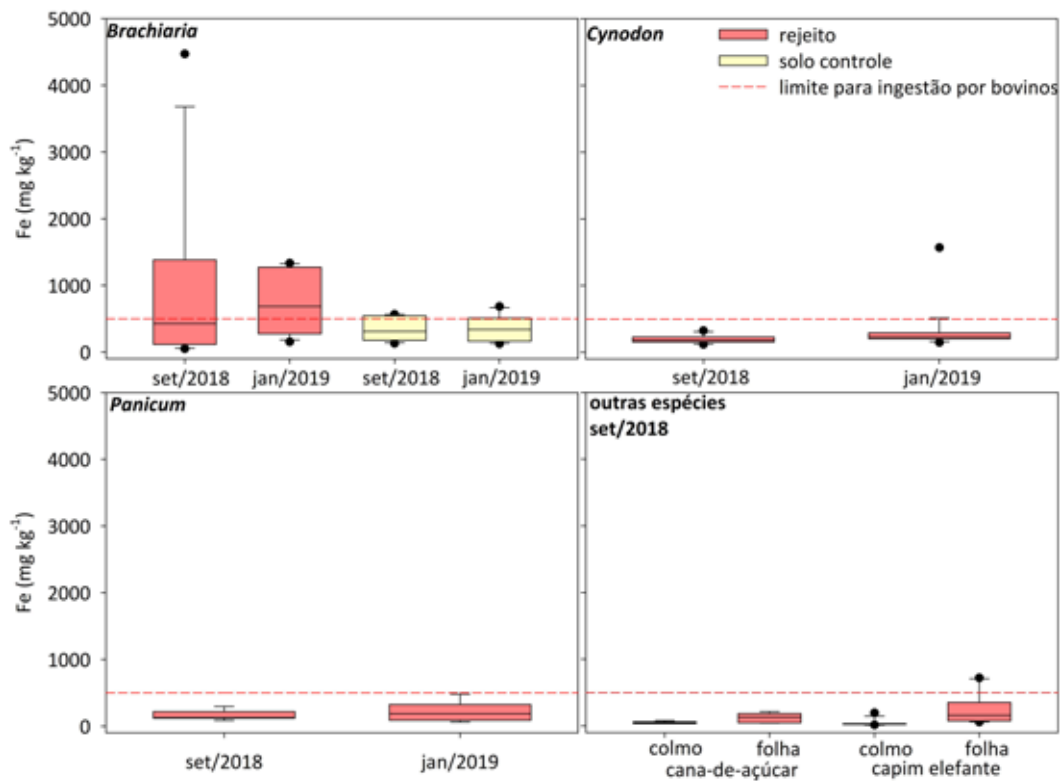


Elaborado por: Lactec.

A contaminação por Fe e Mn em decorrência do desastre, que ocorreu em uma área de 1.571 ha no C1, foi considerado um dano pouco grave e cessado, pois apesar das métricas mencionadas, os teores pseudototais não ultrapassaram a linha-base. Portanto, o enquadramento como dano pouco grave se baseou no fato de nenhum indicador desse dano ter sido alterado em relação à linha-base, mas estar alterado em algum grau em relação à interpretação técnica.

Além disso, Fe e Mn já são considerados elementos majoritários no ambiente edáfico (relativo ao solo) e são, adicionalmente, nutrientes de plantas, animais e seres humanos e a toxidez desses elementos é menos grave em relação à de EPTs que não tem função biológica (como o As, Cd, Pb, Cr etc.). Considerando que a camada de rejeito será mantida no ambiente, esse dano foi classificado como irreversível e seu efeito tende a aumentar com o tempo caso os bovinos se alimentem exclusivamente da braquiária cultivada no rejeito, considerando o efeito cumulativo de Fe e Mn no organismo (Figura 43).

Figura 43 – Teores de Fe em gramíneas desenvolvidas no rejeito (*Brachiaria*, *Cynodon*, *Panicum* e capineiras) e sobre o solo controle (*Brachiaria*).



Elaborado por: Lactec.

3.4.9 CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR EPTS DEVIDO ÀS AÇÕES EMERGENCIAIS PÓS-DESASTRE

Algumas ações emergenciais pós-desastre incorreram na disponibilização de EPTs advindos dos solos que foram retirados das áreas de empréstimo para recobrir planícies com deposição de rejeito em pontos isolados no C1 (Figura 44).

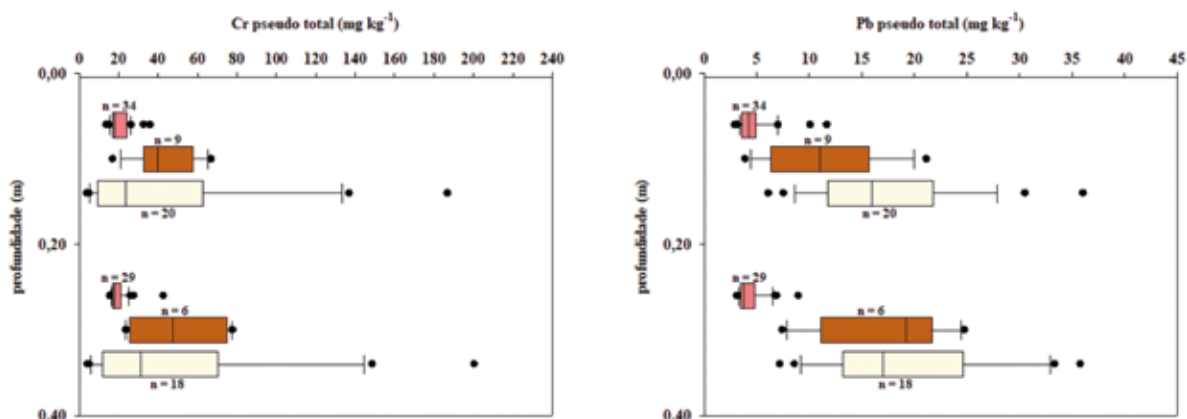
As amostras de misturas entre rejeito e solo apresentaram teores superiores de Al, Cr, Cu, Se, Sn e Pb em comparação aos teores do próprio rejeito (Figura 45), tendo ocorrido efeito deletério por essa prática. Especificamente para o Pb, os teores prontamente disponíveis foram 22 vezes superiores nas misturas em relação aos teores disponíveis das amostras puras de rejeito. Isso indica que, para alguns EPTs, essa ação emergencial foi mais prejudicial do que benéfica, pois expôs elementos que não estariam naturalmente acessíveis aos organismos em um curto período de tempo. Imagens de satélite foram utilizadas para quantificar as áreas em que solos de empréstimo foram adicionados acima das planícies de rejeito, tendo sido quantificada uma área de 37 ha para esse dano (Figura 46).

Figura 44 – Visualização, em campo, de uma camada de solo de áreas de empréstimo (indicada pela trena) depositado acima do rejeito.



Fonte: Lactec.

Figura 45 – Teores pseudototais de Cr e Pb de amostras do rejeito (em vermelho), dos solos controle (em amarelo) e de misturas (em marrom).



Elaborado por: Lactec.

Figura 46 – Imagens de satélite indicando a adição de solo de empréstimo sobre áreas de deposição de rejeito. Fotos: coordenadas: 20°16'48.57" S e 43°2'20.82" O, nas datas de 25/04/2016 e 09/08/2016, respectivamente.



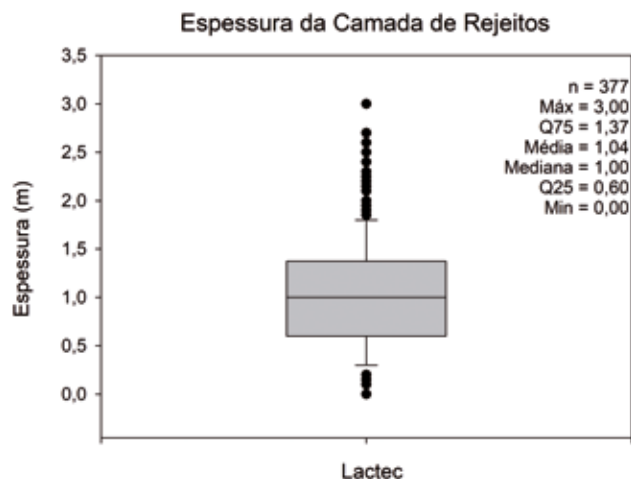
Fonte: imagens de satélite

Considera-se que a contaminação por EPTs devido às ações emergenciais é um dano cessado, uma vez que não estão previstas novas áreas para receber mais aportes de solos de áreas de empréstimo (foi uma ação emergencial e pontual). O dano é irreversível já que não é possível separar e retirar somente o solo depositado acima do rejeito, porém foi classificado como pouco grave, pois mesmo que as misturas possam ter aumentado os teores de alguns EPTs, ainda assim não promoveram aumento em relação à linha-base e aos VRQs. Novamente, o enquadramento como dano pouco grave foi baseado no fato de nenhum indicador desse dano ter sido alterado em relação à linha-base, mas estar alterado em algum grau em relação à interpretação técnica. Ademais, para alguns elementos a mistura com o solo diluiu os teores (Fe e Mn, por exemplo, que eram maiores no rejeito e que tiveram seus teores diminuídos quando misturados com o solo).

3.4.10 FORMAÇÃO DE TECNOSSOLO

Os demais danos aos solos mencionados convergiram para a formação de uma nova ordem de solo, os Technossolos. Os technossolos são solos de origem antrópica, em que de acordo com a classificação de solos da IUSS Working Group WRB (2015), apresentam uma camada cimentada, ou ainda 20% ou mais de artefatos (materiais manufaturados pelo homem, como o rejeito de mineração de Fe em questão, por exemplo) nos primeiros 100 cm do perfil. O diagnóstico desse dano foi realizado pela análise da profundidade da camada de rejeitos depositada no C1, totalizando uma área de 1.614 ha, em que pelo menos 75% de 377 amostras demonstrou ter havido uma espessura de ao menos 60 cm de rejeito (Figura 47), o que corroborou com a nova classificação desse substrato.

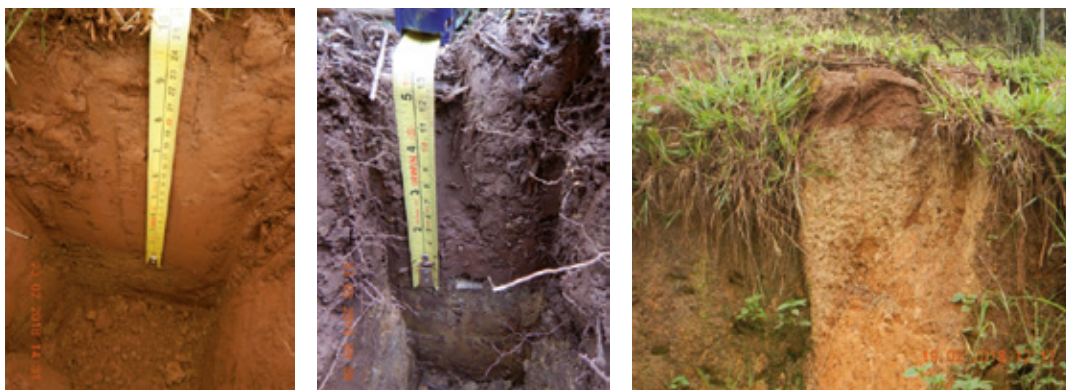
Figura 47 – Dispersão das medidas de espessura da camada de rejeito depositado e de mistura solo/rejeito ao longo da APDL dentro do C1.



Elaborado por: Lactec.

Esse foi considerado um dano gravíssimo ao solo pois, por mais que não haja a ordem de Technossolos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, essa nova camada de rejeitos substituiu ordens naturais de solo, como os Gleissolos, Neossolos Flúvicos e Cambissolos Flúvicos que haviam nas várzeas e que exerciam funções ecológicas específicas na paisagem (Figura 48), com impossibilidade de o solo retornar à condição inicial. O dano foi considerado irreversível uma vez que somente uma escala de tempo de centenas a milhares de anos possibilitará ao Technossolo sofrer processos pedogenéticos de forma a reconstituir os solos naturalmente pertencentes ao ambiente de várzea (solos aluvionares). Como foi advindo da ação mecânica de deposição do rejeito, pontualmente após o rompimento da barragem, foi considerado um dano cessado.

Figura 48 – Solos de várzea soterrados pelo rejeito no C1.



Fonte: Lactec.

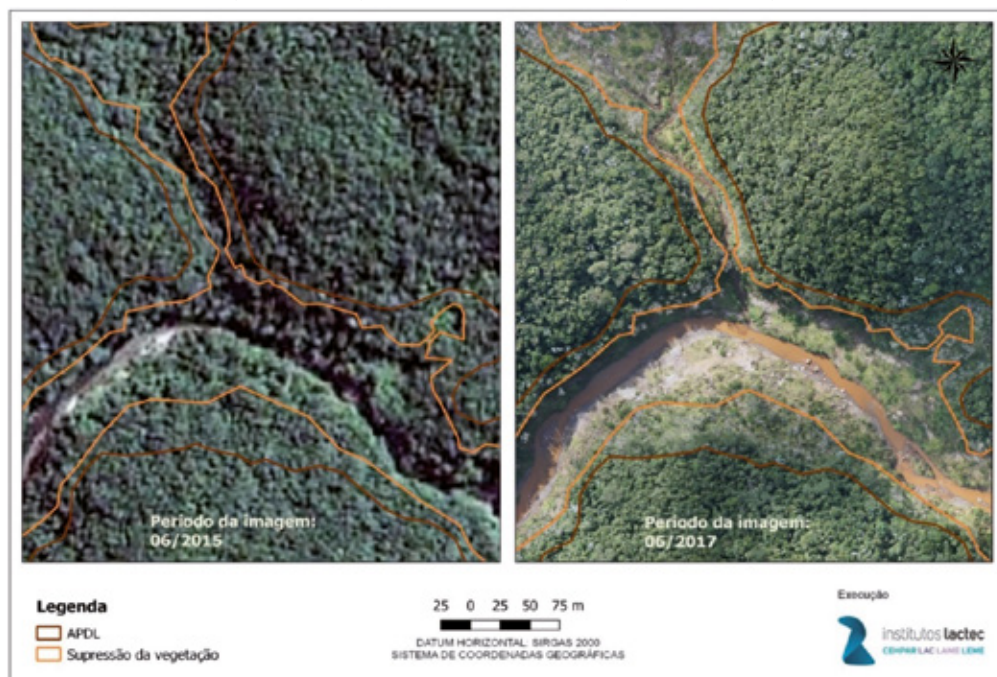
3.5 DANOS À VEGETAÇÃO

O principal dano à vegetação em função do desastre foi a supressão de mata nativa, o que gerou outros danos como a perda da biodiversidade, de recursos florestais madeireiros e não madeireiros, redução na capacidade de resiliência da floresta e aumento do efeito de borda. Já a execução de ações emergenciais e reparatórias implicaram em mais supressão devido à implantação de infraestruturas e a introdução e aumento de espécies exóticas.

3.5.1 SUPRESSÃO DE VEGETAÇÃO NATIVA CILIAR

A supressão da vegetação foi verificada pela passagem e deposição da lama nas matas ciliares. Após a comparação entre as imagens no pré e pós-desastre, verificou-se a supressão da vegetação nativa em duas formas: remoção mecânica pela passagem da onda de lama e mortalidade tardia pelo depósito de rejeitos no sub-bosque da floresta (Figura 49).

Figura 49 – Exemplo de áreas onde houve supressão mecânica (linha clara) e mortalidade tardia (linha escura).



Execução: Lactec.

O total de área suprimida foi de aproximadamente 859,4 hectares, divididos entre as quatro classes previamente estabelecidas, conforme Tabela 21 abaixo:

Tabela 21 – Quantitativo de área suprimida de acordo com a forma de supressão e classe de vegetação

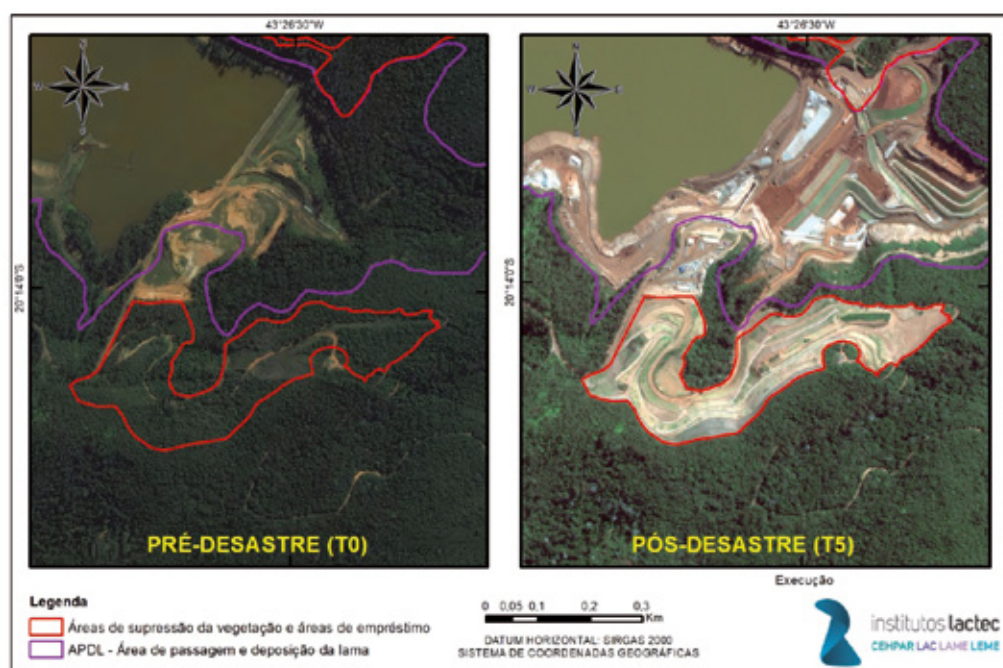
Classe	Remoção Mecânica (ha)	Mortalidade Tardia (ha)	Total (ha)	Porcentagem (%)
Mata Nativa	283,87	146,20	430,07	50,04
Vegetação Secundária Inicial	281,80	66,24	348,05	40,50
Várzeas	67,39	0,00	67,39	7,84
Campos Rupestres	13,89	0,00	13,89	1,62
TOTAL	646,95	212,45	859,40	100,00

Este dano foi considerado gravíssimo devido ao tamanho da área suprimida, porém está cessado e é reversível à medida em que as áreas se recuperem ou sejam contempladas com ações de restauração.

3.5.2 SUPRESSÃO DE VEGETAÇÃO NATIVA POR IMPLANTAÇÃO DE INFRAESTRUTURA

Este dano é referente a supressão de áreas de vegetação nativa para construção de vias de acesso, estruturas, obras emergenciais e reassentamentos, infraestruturas essas necessárias devido ao desastre. Destaca-se as intervenções na barragem de Nova Santarém, implantação das localidades de Nova Bento Rodrigues, Nova Paracatu de Baixo, Nova Gesteira e do barramento do rio Pequeno, próximo à lagoa Juparanã em Linhares (ES) (Figura 50).

Figura 50 – Exemplos de locais onde houve supressão de vegetação para implantação de infraestrutura, no caso, a barragem de Nova Santarém.



Através da comparação de imagens em diferentes tempos (de T0 a T5) foi possível calcular a área suprimida em função destas atividades para cada classe previamente estabelecida, conforme demonstrado na Tabela 22.

Tabela 22 – Quantitativo de áreas afetadas por classe de vegetação nativa.

Classe afetada	Reassentamentos (ha)	Obras Emergenciais (ha)
Mata Nativa	88,11	20,74
Vegetação Secundária Inicial	77,3	32,44
Campos Rupestres	-	4,32
Várzeas	5,78	2,78
Total	171,19	60,28

Este dano foi considerado parcialmente reversível, pois mesmo que ações compensatórias sejam tomadas para restaurar novas áreas, os locais onde as obras foram implantadas perderam para sempre sua cobertura vegetal. A supressão ocorreu nos C1 e C3, foi considerada grave e tende a aumentar à medida que novos locais venham a sofrer este tipo de alteração.

3.5.3 PERDA DE BIODIVERSIDADE DE FLORA

Para avaliar o dano de perda de biodiversidade da flora foi levantado o número de espécies de diferentes grupos botânicos afetadas pelo desastre (Figura 51). Na Tabela 23 abaixo está apresentado o quantitativo de espécies encontradas em cada grupo no C1 – local onde o dano foi verificado - com especial atenção para as espécies ameaçadas de extinção, endêmicas ou protegidas (CITES). As espécies de várzeas, macrófitas aquáticas e reófitas foram avaliadas ao longo de todo o rio devido ao fato de estarem em contato com a água permanentemente ou durante determinados períodos.

Tabela 23 – Total de espécies, espécies ameaçadas, endêmicas e protegidas por grupo

Grupo	Nº de Espécies	Nº Espécies Ameaçadas	Nº Espécies endêmicas	Nº Espécies protegidas
Arbóreas	170	7	-	-
Trepadeiras	128	-	-	-
Epífitas	28	-	-	11
Herbáceas Sub-Bosque	214	2	2	8
Vegetação Sec. Inicial	272	1	2	-
Campos Rupestres	209	2	8	9
TOTAL	1021	12	12	28

Figura 51 – Exemplos de espécies de flora encontradas nos levantamentos.



Fonte: Lactec.

Este dano foi considerado gravíssimo devido ao alto número de espécies afetadas, entretanto está cessado e é reversível à medida em que as espécies vegetais recolonizem os locais atingidos.

3.5.4 PERDA DE RECURSOS FLORESTAIS MADEIREIROS

O dano de perda de recursos florestais madeireiros foi avaliado por meio do inventário florestal, onde estimou-se o volume de madeira removido na passagem do rejeito (Figura 52). A amostragem do volume de madeira apontou uma média de 154,24 metros cúbicos de madeira por hectare, totalizando 120.015,69 m³, com um erro de aproximadamente 13%, conforme apresentado na Tabela 24, que demonstra também o intervalo de confiança para estes valores.

Tabela 24 – Estimativa do total de madeira suprimida

	Mata Nativa (ha)	Vegetação Secundária Inicial (ha)	Total (ha)	IC para o Total (m ³)
Remoção Mecânica	283,86	281,75	565,62	74.912,38 < x < 99.571,28
Mortalidade Tardia	146,20	66,24	212,45	28.137,51 < x < 37.399,53
TOTAL	430,07	347,99	778,07	103.049,89 < x < 136.970,82

Figura 52 – Aspecto dos fragmentos e do inventário florestal.



Fonte: Lactec.

O dano foi classificado como grave devido ao elevado volume de madeira removido, entretanto está cessado, e é considerado reversível se a floresta for restaurada e retornar às características que tinha antes do evento.

3.5.5 PERDA DE RECURSOS FLORESTAIS NÃO MADEIREIROS

Para avaliação da perda dos recursos florestais não madeireiros foram comparadas as espécies encontradas nos levantamentos com as categorias sugeridas por Crepaldi (2007) e Fundação Biodiversitas (2006), sendo elas: medicinal, ambiental, alimentícia, ornamental, construção, lenha, ritualística e tecnológica (Figura 53).

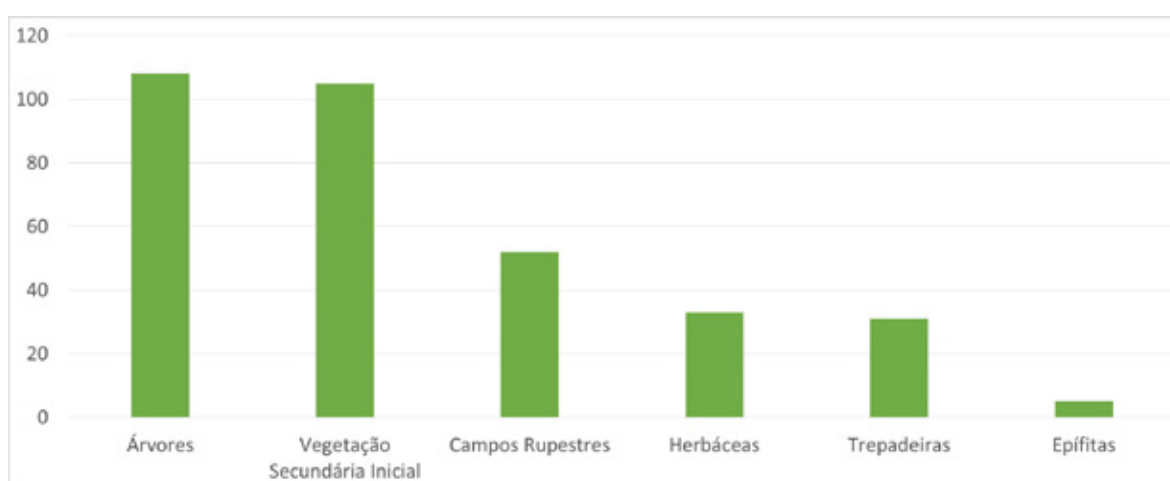
Figura 53 – Exemplos de espécies com usos e potencialidades conhecidos.



Fonte: Lactec.

De forma sintetizada, é possível afirmar que 486 espécies de potencial utilidade e que ocorrem no C1 foram afetadas pelo desastre, sendo que a maior porcentagem está concentrada em espécies com uso ambiental. Destaca-se que aproximadamente 64% das espécies arbóreas encontradas apresentam uso potencial para alguma finalidade, bem como grande número de espécies presentes na vegetação secundária inicial (predominantemente herbáceas e arbustivas) (Figura 54).

Figura 54 – Número de espécies com usos e potencialidades conhecidas por grupo.



Elaborado por: Lactec.

Este dano foi considerado gravíssimo devido ao grande número de espécies afetadas, entretanto está cessado e é reversível à medida que as espécies recolonizam os locais e venham a prover novamente os recursos ofertados.

3.5.6 REDUÇÃO NA CAPACIDADE DE RESILIÊNCIA DA FLORESTA

A redução na capacidade de resiliência da floresta foi avaliada por meio do estudo do banco de sementes, plântulas e serrapilheira acumulada no sub-bosque. Para esses ambientes, o desastre ocasionou danos diretos pela supressão dos ambientes florestais e consequente eliminação ou carreamento dos componentes de sub-bosque. A estimativa do número de espécies e do número de indivíduos está apresentada na Tabela 25 a seguir.

Tabela 25 – Número de espécies e estimativa do número de indivíduos encontrados nas avaliações do banco de sementes, plântulas e serrapilheira.

Estrato avaliado	Nº Espécies	Nº Indivíduos (estimado)
Banco de sementes/solos	20	660.000
Banco de sementes/serrapilheira	27	505.333
Banco de plântulas	184	107.583
TOTAL	231	1.272.916

No C1 foi encontrada uma maior proporção relativa de sementes de plantas arbóreas na serrapilheira, o que indica um ambiente mais conservado. Os resultados foram obtidos através de experimentos de germinação em casa de vegetação das amostras coletadas em campo (Figura 55).

Figura 55 – Amostragem do banco de sementes, plântulas e serrapilheira.



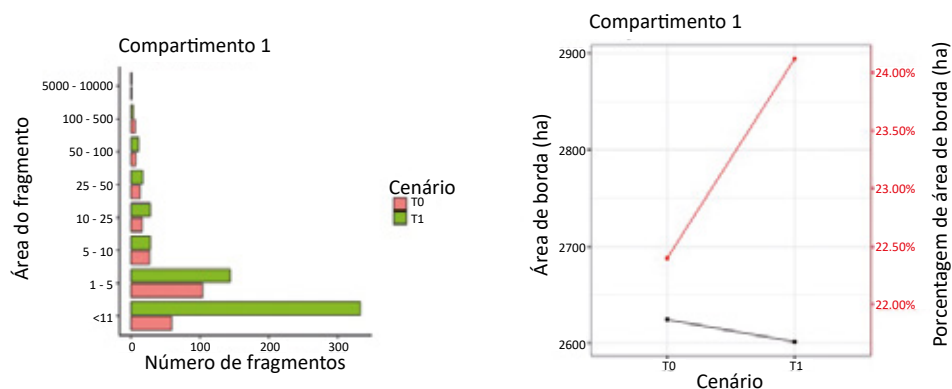
Fonte: Lactec.

Este dano foi considerado grave devido à importância dos elementos estudados para a restauração dos fragmentos florestais frente a algum tipo de perturbação. Entretanto o dano está cessado e é reversível, uma vez que o banco de sementes e plântulas tende a se reestabelecer com a restauração do ambiente.

3.5.7 AUMENTO DO EFEITO DE BORDA

A avaliação do dano de aumento do efeito de borda foi realizada por meio do cálculo das métricas de paisagem (áreas de borda e número de fragmentos) utilizando-se de imagens em T0 e T1. O número de fragmentos no C1 aumentou de 233 para 565, especialmente os fragmentos menores do que 1 hectare (Figura 56), o que indicou também uma perda de conectividade no ambiente.

Figura 56 – Relação entre o número de fragmentos, à esquerda, e proporção de áreas de borda, à direita, entre os cenários T0 e T1.



Elaborado por: Lactec.

Já no cálculo das bordas, verificou-se uma diminuição da área de borda entre os cenários, o que é decorrente da supressão da vegetação. Neste ponto é importante destacar que houve um incremento de 1,5% quando se verifica a proporção de áreas de borda no cenário T0 para o cenário T1 (Figura 56).

Este dano foi considerado pouco grave, entretanto destaca-se a importância da manutenção dos fragmentos para a biodiversidade. É parcialmente reversível e tende a aumentar com a intensificação do efeito de borda.

3.5.8 INTRODUÇÃO E AUMENTO DE ESPÉCIES EXÓTICAS

Para avaliar a introdução e aumento de espécies exóticas, as espécies encontradas nos levantamentos florísticos foram classificadas quanto à sua origem (nativas ou exóticas) e comparadas com as espécies utilizadas pela Fundação Renova nos processos de restauração florestal.

Das 15 espécies listadas, três tidas como exóticas foram encontradas nos levantamentos de campo, sendo elas *Crotalaria* spp., *Desmodium* spp. e *Lolium multiflorum* (Figura 57). Também foram encontradas espécies do gênero *Sorghum*, entretanto nenhuma delas é a mesma indicada na utilização dos plantios da Fundação Renova.

Figura 57 – Exemplo de espécies exóticas utilizadas nas ações de restauração.



Fonte: Lactec.

Este dano foi considerado grave devido à possível competição destas espécies com as espécies nativas, especialmente em ambientes sensíveis como os campos rupestres. O dano somente será reversível se a disseminação destas espécies for contida, e tende a aumentar à medida em que novas áreas em processo de restauração recebam espécies exóticas no plantio.

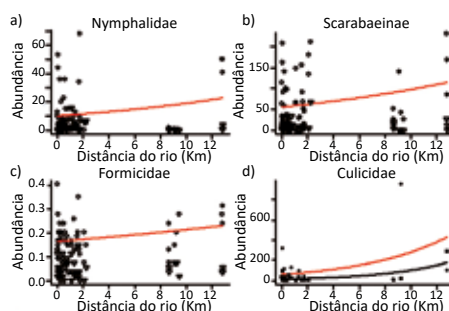
3.6 DANOS À FAUNA SILVESTRE

A passagem da onda de lama e a supressão da mata nativa afetaram também os animais que habitavam essas áreas, causando alterações nas populações e assembleias, aumento do estresse, perda de conectividade na paisagem, além da perda de habitat e da adequabilidade dos habitat remanescentes. O rejeito ainda disponível no ambiente causa prejuízos à saúde dos animais, além de elementos tóxicos estarem sendo bioacumulados.

3.6.1 ALTERAÇÕES NAS POPULAÇÕES FAUNÍSTICAS

O dano de alterações nas populações faunísticas foi decorrente da perda de qualidade ambiental nas margens dos rios, tanto devido à supressão vegetacional, quanto pelas alterações do solo pela deposição do rejeito. Dois grupos faunísticos indicaram perdas de abundância nas margens dos rios: insetos e mamíferos de grande porte. Para borboletas (Nymphalide) generalistas, besouros (Scarabeinae), formigas (Formicidae) que nidificam no solo e mosquitos (Culicidae) vetores e não-vetores de doenças, os dados indicam maior abundância em locais mais distantes das margens dos rios danificados (Figura 58).

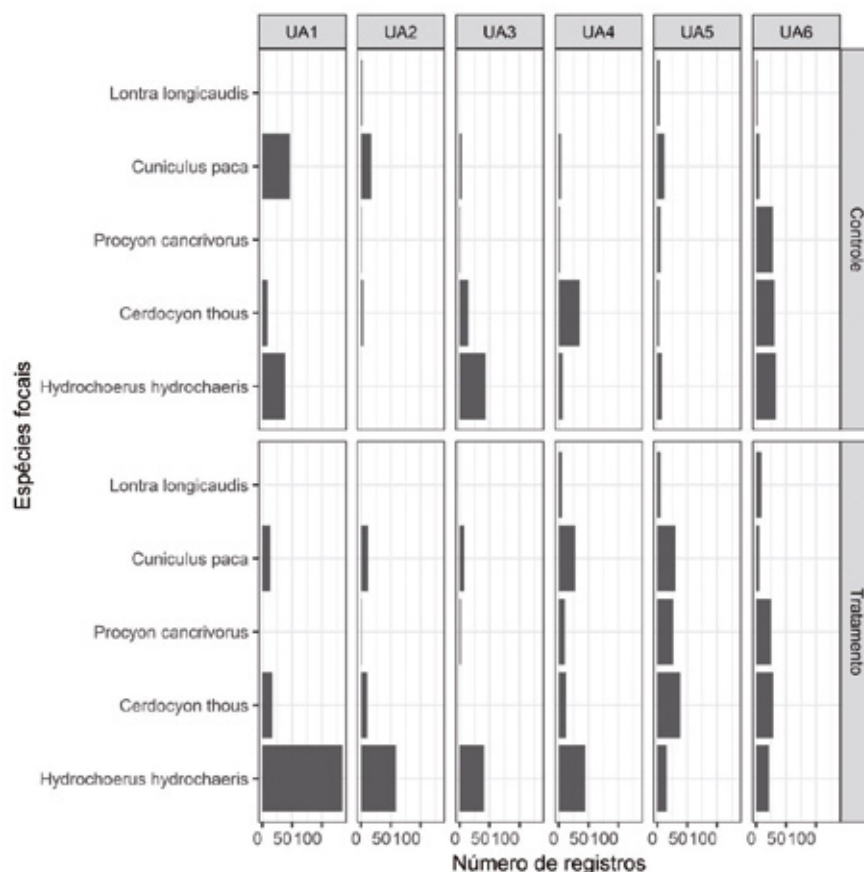
Figura 58 – Relação entre a abundância de insetos e a distância ao rio danificado na bacia do rio Doce, sendo (a) Borboletas – (Nymphalidae); (b) besouros – Scarabaeinae; (c) formigas – Formicidae; (d) mosquitos – Culicidae.



Elaborado por: Lactec.

Algumas espécies de mamíferos de grande porte aparentaram maior frequência de uso das margens dos corpos hídricos afetados em relação a áreas Controle. Foi o caso das capivaras no C1, acumulando número 3,4 vezes maior de registros em relação a pontos longe do rio afetado (Figura 59). Esta ocupação está relacionada à alteração da paisagem, de floresta a área aberta com predomínio de gramíneas exóticas. Para a paca o cenário foi inverso, com maior frequência da espécie nas áreas distantes do rio, demonstrando-se efeito negativo sobre a espécie.

Figura 59 – Abundância relativa de cinco espécies de mamíferos de grande porte nos sítios. Tratamento e Controle em cada uma das seis Unidades Amostrais (UA) ao longo do rio Doce: *Cerdocyon thous* (cachorro-do-mato), *Cuniculus paca* (paca), *Hydrochoerus hydrochaeris* (capivara), *Lontra longicaudis* (lontra) e *Procyon cancrivorus* (mão-pelada). O C1 é contemplado pelas UA1 e UA2.



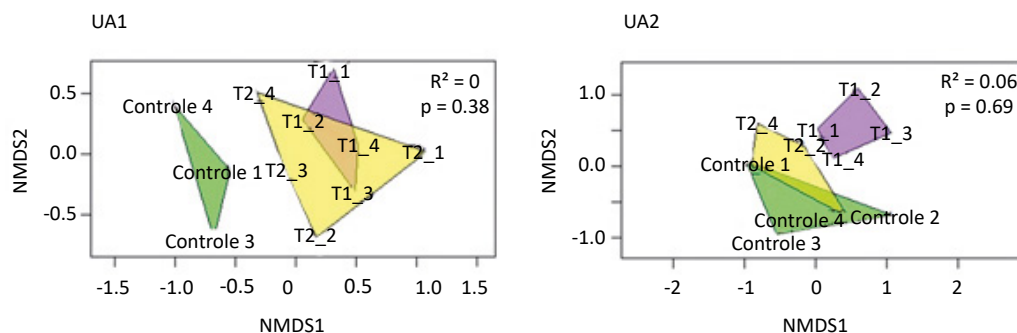
Elaborado por: Lactec.

Danos também foram encontrados para aves e morcegos, grupos nos quais o mesmo padrão foi detectado: maior abundância de espécies generalistas nas áreas que sofreram danos do desastre, e maior abundância de espécies florestais mais sensíveis em áreas distantes dos rios afetados. No conjunto dos indicadores avaliados, este dano foi considerado grave e disperso nos três compartimentos, embora com efeitos mais evidentes no C1. Foi considerado um dano cessado e reversível.

3.6.2 ALTERAÇÕES NAS ASSEMBLEIAS FAUNÍSTICAS

Similar ao dano envolvendo às populações, o dano de alterações nas assembleias faunísticas esteve associado à diminuição da qualidade dos recursos disponíveis aos animais nas margens dos rios. À exceção dos répteis, todos os grupos da fauna envolvidos no diagnóstico apresentaram alterações relacionadas ao desastre: insetos, anfíbios, aves, morcegos, pequenos e grandes mamíferos. No caso dos insetos, identificou-se menor riqueza de besouros e formigas que nidificam no solo nas margens dos rios, resultados que confirmam a predição de que a passagem do rejeito levou à perda da qualidade ambiental. Um dos grupos que chamou atenção neste caso foi o dos mosquitos vetores de doenças, que apresentaram menor número de espécies nas margens dos rios no C1. Outro grupo que apresentou danos nesse compartimento foi o de anfíbios, cuja composição de espécies mostrou-se diferente entre sítios Tratamento e Controle. Esta interpretação pode ser visualizada em um gráfico de ordenação (Figura 60): cada sítio amostral (T1, T2, Controle) está representado por um polígono colorido e estes polígonos não se sobrepõem quando o conjunto de espécies entre os sítios foi diferente, ou seja, as espécies que ocorreram em um sítio não são as mesmas do outro.

Figura 60 – Gráficos de ordenação construídos com dados das espécies de anfíbios do C1 (UA1 e UA2).



Elaborado por: Lactec.

As aves também indicaram ocorrência de danos nas assembleias. Especificamente, à medida que os ambientes se distanciam do rio Gualaxo do Norte (T1 – margem do rio; T2 – distância intermediária; Controle – distante do rio), encontrou-se maior proporção de espécies de alta e média sensibilidade. Nos ambientes afetados pelo rejeito houve predomínio de aves consideradas de baixa sensibilidade, ou seja, que se aproveitaram de áreas degradadas e passaram a dominar esses ambientes. Um exemplo pode ser resgatado da UA2, no C1, onde 80% das aves que ocorreram nos ambientes às margens do rio foram de baixa sensibilidade. No outro extremo de distância do rio, no sítio Controle, a proporção de espécies de baixa sensibilidade encontradas nesse ambiente atingiu cerca de 40% (Figura 61). Estes são indicativos de que os ambientes afetados pelo rejeito apresentaram condições ecológicas pouco adequadas para sua ocupação por grande parte das aves sensíveis da região.

Situações similares foram também encontradas nos diferentes grupos de mamíferos, a partir de outros indicadores. No caso dos mamíferos de pequeno porte, como roedores e marsupiais, assim como no caso dos morcegos, encontrou-se pequena ocupação (baixo número de animais) das margens dos rios; com relação aos mamíferos de grande porte, estes ambientes encontraram-se sujeitos a maior ocupação por espécies exóticas, especialmente bovinos e cães domésticos. Assim, além da menor qualidade dos recursos disponíveis à fauna nativa, houve ainda interferência negativa devido à maior circulação de animais não-nativos e potenciais fontes de doenças. No cômputo de todas as informações, este dano foi classificado de duas formas, sendo gravíssimo, reversível e cessado no C1; e pouco grave, reversível e cessado nos C2 e C3.

3.6.3 PIORA NAS CONDIÇÕES FÍSICAS DA FAUNA

O dano de piora nas condições físicas da fauna foi decorrente da diminuição da qualidade dos recursos disponíveis nas margens dos rios, presumivelmente afetando o estado de saúde dos organismos que ocupam essas localidades. Especificamente para este tipo de avaliação, analisou-se o estado de saúde de morcegos capturados ao longo do rio Doce, investigando padrões corporais saudáveis ao considerar: lesões ou deficiências de pele e boca, e infestação por ectoparasitos (moscas, ácaros e carrapatos). Cerca de 24% da população apresentou infestação por ectoparasitos, com índices menores durante a estação seca em relação à chuvosa. Na comparação entre os sítios Controle e Tratamento não houve diferença na prevalência geral de ectoparasitos, mas o grau de infestação foi distinto. Nas áreas mais próximas aos rios danificados foram encontrados mais indivíduos altamente infectados, ao passo que em áreas distantes desses rios os níveis de parasitismo eram baixos. Este padrão foi encontrado no C2 (Figura 62), mas no C1 a tendência também foi aparente – maior prevalência de morcegos com baixo grau de infestação nas áreas distantes do rio Gualaxo do Norte. Estes indicadores sugerem que os animais capturados nas áreas afetadas pelo desastre apresentaram maior grau de estresse, refletindo na maior carga de ectoparasitos devido às condições ambientais menos favoráveis dos locais onde vivem. Este dano foi considerado pouco grave, identificado apenas no C2, reversível e com tendência a diminuir.

Figura 61 – Proporção de espécies de aves encontradas nos sítios T1, T2 e Controle classificadas em cada categoria de sensibilidade a alterações ambientais: baixa (verde), média (amarelo) e alta (vermelho) sensibilidade.

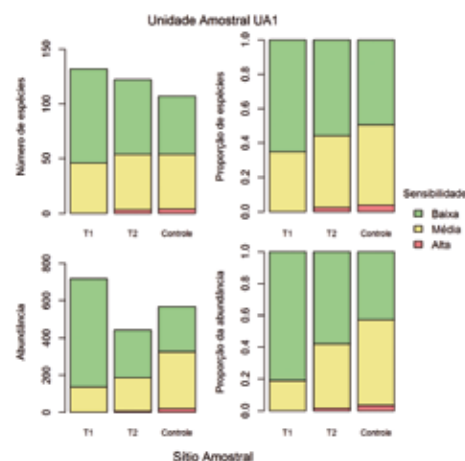
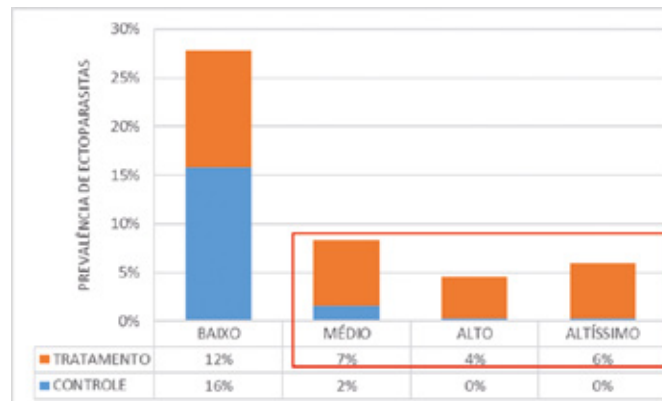


Figura 62 – Prevalência e grau de infestação de ectoparasitos em morcegos no C2. As barras alaranjadas indicam a proporção de animais parasitados e capturados nas áreas próximas ao rio Doce

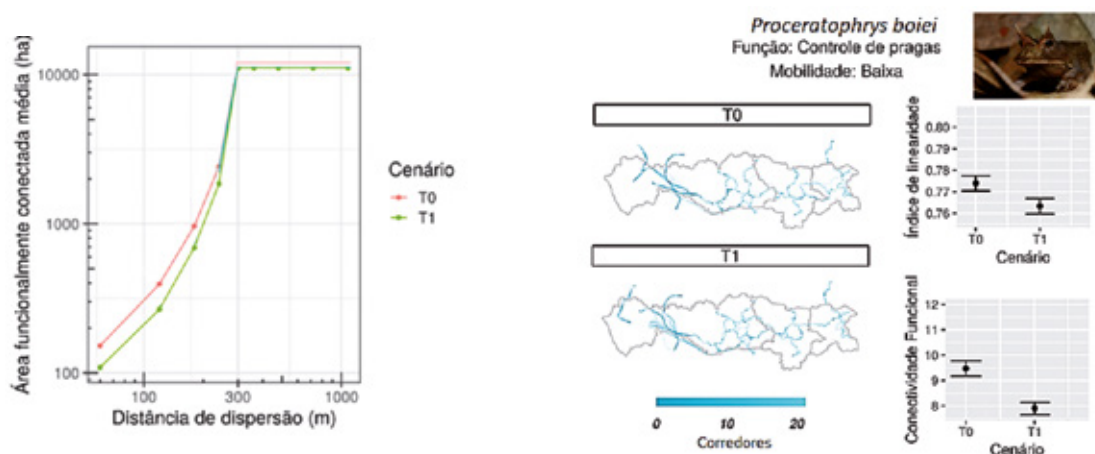


Elaborado por: Lactec.

3.6.4 PERDA DE CONECTIVIDADE NA PAISAGEM

O desastre teve grande efeito sobre as áreas disponíveis para a ocupação de organismos de baixa a média mobilidade: espécies com capacidade de deslocamento na matriz menor que 300m perderam até 40% de área em decorrência do desastre, que corresponde a cerca de 111 ha de área perdida (Figura 63). Com relação à conectividade funcional, foram obtidas três métricas para interpretar este dano do modelo: mapas indicando a frequência de seleção de rotas; o índice de linearidade, sendo maior em rotas mais próximas a uma linha reta; e o índice de conectividade funcional dos corredores, sendo maior quanto mais custoso percorrer determinado corredor. Todas as espécies da fauna sofreram perdas de conectividade funcional, diminuindo cerca de 15% após o desastre (Tabela 26). Considerando a natureza das alterações encontradas, o dano foi considerado gravíssimo e reversível, com ocorrência restrita ao C1 e já cessado.

Figura 63 – Resultados da análise de perda de conectividade funcional para a fauna. (À esquerda), área funcionalmente conectada média da fauna no C1 em função de diferentes capacidades de dispersão. À direita, resultados da análise de corredores ecológicos e perdas de linearidade e conectividade funcional para a espécie sapo-de-chifre (*Proceratophrys boiei*).



Elaborado por: Lactec.

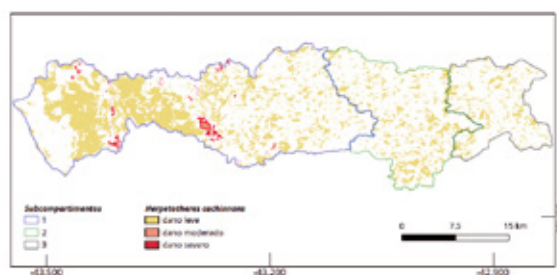
Tabela 26 – Modificação percentual do índice de conectividade funcional entre os cenários pré e pós-desastre (T1-T0); valores negativos indicam PERDAS de conectividade

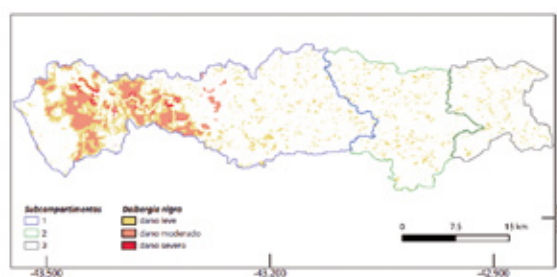
Espécie	Função ecossistêmica	Grau de mobilidade	T1-T0 (%)
<i>Herpailurus yagouaroundi</i> (Gato-mourisco)	Controle de pragas	Alta	-15,1
<i>Proceratophrys boiei</i> (Sapo-de-chifres)	Controle de pragas	Baixa	-16,7
<i>Glossophaga soricina</i> (Morcego)	Polinização	Alta	-14,7
<i>Melipona marginata</i> (Manduri)	Polinização	Baixa	-17,8
<i>Penelope obscura</i> (Jacuguaçu)	Dispersão de sementes	Alta	-15,8
<i>Cuniculus paca</i> (Paca)	Dispersão de sementes	Baixa	-16,8
<i>Spizaetus tyrannus</i> (Gavião-pega-macaco)	Predação de topo	Alta	-17,6
<i>Bothrops jararaca</i> (Jararaca)	Predação de topo	Baixa	-17,6
<i>Rattus rattus</i> (Rato-preto)	Vetor de doenças	Alta	-1,5
<i>Aedes scapularis</i> (Mosquito)	Vetor de doenças	Baixa	-13,5

3.6.5 PERDA DE QUALIDADE DOS HABITAT

Para a avaliação da perda de qualidade dos habitat em decorrência do desastre, são apresentadas as duas espécies representativas: o falcão acauã, *Herpetotheres cachinnans*, e o jacarandá-da-bahia, *Dalbergia nigra* (Figura 64). Para essa espécie de ave os modelos indicaram perdas de adequabilidade ambiental em diversos fragmentos nas proximidades da barragem de Fundão. Ali, identificaram-se perdas moderadas e severas, ao passo que nos demais setores do C1 predominaram perdas leves; estes efeitos, que se estenderam para além da APDL, ocorreram devido a fatores relacionados à paisagem como um todo, como perdas de conectividade. Os danos sofridos pela planta *Dalbergia nigra* foram também intensos e concentrados no primeiro terço desse compartimento. Identificou-se acentuado dano em inúmeros fragmentos florestais, com perdas entre 40% e 50% de adequabilidade ambiental a esta espécie. Perante a análise conjunta de todas as espécies terrestres (Tabela 27) o resultado desta análise apontou a ocorrência de danos em todas as espécies avaliadas, da fauna e da flora. Estes danos independeram, ainda, do grupo funcional, dos atributos fisiológicos ou da história natural destes táxons. A partir desse conjunto de informações o dano foi identificado somente no C1, e considerado gravíssimo, reversível e cessado.

Figura 64 – Mapeamento das perdas de qualidade dos habitat para as espécies acauã (*Herpetotheres cachinnans*, acima) e jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra*, abaixo) no C1.





Elaborado por: Lactec.

Tabela 27 – Estimativas de área total, em hectares, da perda de adequabilidade ambiental entre os cenários pré e pós-desastre das cinco espécies animais e duas espécies vegetais modeladas. As perdas foram classificadas em categorias quantitativas dessa métrica em perdas ‘leves’ (perdas menores de 20%), ‘moderadas’ (perdas entre 20% e 40%) ou ‘severas’ (perdas maiores que 40%).

Espécie	<i>Haddadus binotatus</i>	<i>Herpetotheres cachinnans</i>	<i>Mustelirallus albicollis</i>	<i>Lontra longicaudis</i>	<i>Cuniculus paca</i>	<i>Cupania vernalis</i>	<i>Dalbergia nigra</i>
Nome comum	rã-da-floresta	acauã	sanã-carijó	lontra	paca	camboatá-vermelho	Jacarandá-da-Bahia
Leves	1.042,12	1.056,99	1.075,07	1.106,92	987,04	994,87	757,13
Moderadas	63,84	6,02	32,22		118,66	14,66	170,95
Severas	1,28	31,94			1,28	19,94	19,05

3.6.6 COMPROMETIMENTO À SAÚDE DA FAUNA SILVESTRE

O comprometimento à saúde da fauna silvestre foi avaliado segundo cinco indicadores principais: osmorregulação, metabolismo, sistemas antioxidante e de biotransformação, indicadores não enzimáticos e genotoxicidade e mutagenicidade. Cada indicador possui biomarcadores específicos que são apresentados a seguir.

3.6.6.1 Prejuízos à osmorregulação (biomarcadores: osmolalidade e íons)

Claramente há uma forte influência sazonal, especialmente nos pontos DA (dentro da APDL), sobre às funções fisiológicas de equilíbrio da concentração de íons e do volume de água nas células (osmorregulação) dos diferentes grupos de fauna avaliados.

O grupo que apresentou o maior número de alterações osmorregulatórias foi a herpetofauna, com alterações nas concentrações dos íons Na^+ , Mg^{2+} e K^+ no C1 e Na^+ e K^+ no C3. Para os pequenos mamíferos, a alteração fisiológica foi muito pontual, houve apenas redução no íon K^+ dos animais capturados no ponto DA, no C2, na estação chuvosa. Morcegos foram os únicos que apresentaram alteração na osmolalidade plasmática e, apenas, nos animais capturados no ponto DA do C1 na estação chuvosa.

3.6.6.2 Prejuízos ao metabolismo (biomarcadores: glicose, lactato e proteína plasmática)

Para todos os grupos avaliados, os prejuízos ao metabolismo também foram influenciados pela sazonalidade, especialmente nos animais capturados nos pontos DA, com redução nas concentrações de lactato e proteína plasmática e aumento na disponibilidade de glicose no plasma, na estação chuvosa.

3.6.6.3 Alterações no sistema antioxidante e de biotransformação (biomarcadores: cat, sod, gpx e gst)

Assim como os marcadores já descritos, as enzimas de defesa do organismo (sistemas antioxidante e de biotransformação) sofreram alterações nos diferentes grupos de fauna. De modo geral, foi identificado aumento nas atividades das enzimas dos animais capturados nos pontos DA, na estação chuvosa e nos diferentes compartimentos.

3.6.6.4 Alterações em sistemas não enzimáticos (biomarcadores: GSH, MET, LPO)

Não foi identificada alteração na peroxidação lipídica (LPO) dos diferentes grupos de fauna avaliados. No entanto, as concentrações das proteínas GSH e MET foram alteradas, principalmente nos pontos DA dos C1 e C3 na estação chuvosa. Desses marcadores a GSH esteve reduzida em pequenos mamíferos e morcegos. Como essas respostas apresentam íntima relação aos processos de defesa contra a geração de maiores prejuízos aos organismos, essas alterações foram consideradas graves.

3.6.6.5 Genotoxicidade e mutagenicidade (biomarcadores: ensaio cometa, MN E ANES)

Todos os grupos de fauna avaliados apresentaram alterações de genotoxicidade e/ou mutagenicidade. A sazonalidade novamente foi o fator predominante e os animais capturados nos pontos DA foram os mais afetados.

Embora os resultados dos biomarcadores indiquem danos aos organismos, a análise de apenas duas campanhas não permitiu concluir sobre a gravidade, tendência de evolução ou reversibilidade destas alterações.

3.6.7 AUMENTO NA BIOACUMULAÇÃO - ALTERAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS

Os EPTs avaliados para verificação da alteração nas concentrações foram Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn e Zn. Poucas alterações puderam ser identificadas para anfíbios, no entanto, observou-se que os anfíbios capturados no ponto DA apresentaram as maiores concentrações de As, Hg e Se, no C3, na estação chuvosa, em relação aos capturados no ponto C (Tabela 28).

Para morcegos observou-se maiores concentrações de Se no C1 de ambas as estações e, de Fe no C3 da estação chuvosa quando comparados os organismos capturados no ponto DA em relação ao C. Na estação seca, no C3, os elementos Al, As, Ba, Hg, Mn e Pb apresentaram maiores concentrações nos indivíduos capturados no ponto DA, bem como os elementos Ba, Cd, Cu, Se e Zn nos indivíduos capturados no ponto C. Quando comparados os morcegos capturados no ponto DA entre os compartimentos, na estação seca identificou-se que os elementos As e Ba estavam em maiores concentrações no C3 em relação ao C1, porém, uma relação inversa foi identificada na estação chuvosa para o elemento As. Para os animais capturados no ponto C, os elementos Co, Cu e Se estavam em maiores

concentrações nos animais do C3 em relação ao 1, na estação seca, enquanto os elementos Cd e Fe estavam mais concentrados nos animais do C1 em relação ao 3, na estação chuvosa (Tabela 28).

Os pequenos mamíferos capturados na estação seca apresentaram maiores concentrações de Mn no C1, quando comparados os organismos capturados no ponto DA em relação ao ponto C. Quando comparados os pequenos mamíferos capturados no ponto DA entre os compartimentos, na estação seca, foi possível identificar aumento nas concentrações de As e Mn dos animais capturados no C1, em relação ao C2. Na estação chuvosa as maiores concentrações de As, nos C2 e C3, e Mn, no C2, foram observadas nos animais capturados no ponto DA em relação ao C1. Além disso, nos indivíduos do ponto C foi possível identificar maior concentração de As nos animais capturados no C2 em relação ao 1 (Tabela 28).

De maneira geral, a presença dos EPTs avaliados no sangue de todos os organismos da fauna terrestre representa um alerta de dano. Considerando que o sangue é um tecido de transporte de moléculas pelo corpo do organismo, o acúmulo de EPTs pode indicar a ocorrência de níveis mais severos de bioacumulação em outros órgãos, como o fígado e os rins, sendo, portanto, necessário o monitoramento destes grupos para a avaliação da tendência de evolução, bem como da gravidade dos prejuízos promovidos por eles para cada um dos grupos faunísticos avaliados.

Tabela 28 – Resumo das alterações encontradas nas concentrações de EPTs em amostras de sangue de exemplares da fauna silvestre

	Compartimento 1		Compartimento 2		Compartimento 3	
	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa	Seca	Chuvosa
 C						
DA						↑ As; Hg; Se
 C	↓ Co; Cu; Se	↑ Cd; Fe	NA	NA	↑ Ba; Cd; Cu; Se; Zn	↓ Cd; Fe
DA	↑ Se ↓ As; Ba	↑ Se			↑ Al; As; Ba; Hg; Mn; Pb ↑ As; Ba	↑ Fe
 C		↓ As		↑ As		
DA	↑ Mn ↑ As; Mn	↓ As; Mn	↓ As; Mn	↑ As; Mn		↑ As; Mn

Elaborado por: Lactec.

3.7 DANOS ÀS ÁREAS PROTEGIDAS

Treze áreas protegidas foram consideradas afetadas por estarem contíguas à APDL (Figura 65, Figura 66) e, portanto, sofreram alterações que resultaram em degradação da qualidade ambiental. O cálculo das extensões lineares e das áreas afetadas a partir do contato ou sobreposição com a APDL é apresentado na Tabela 29.

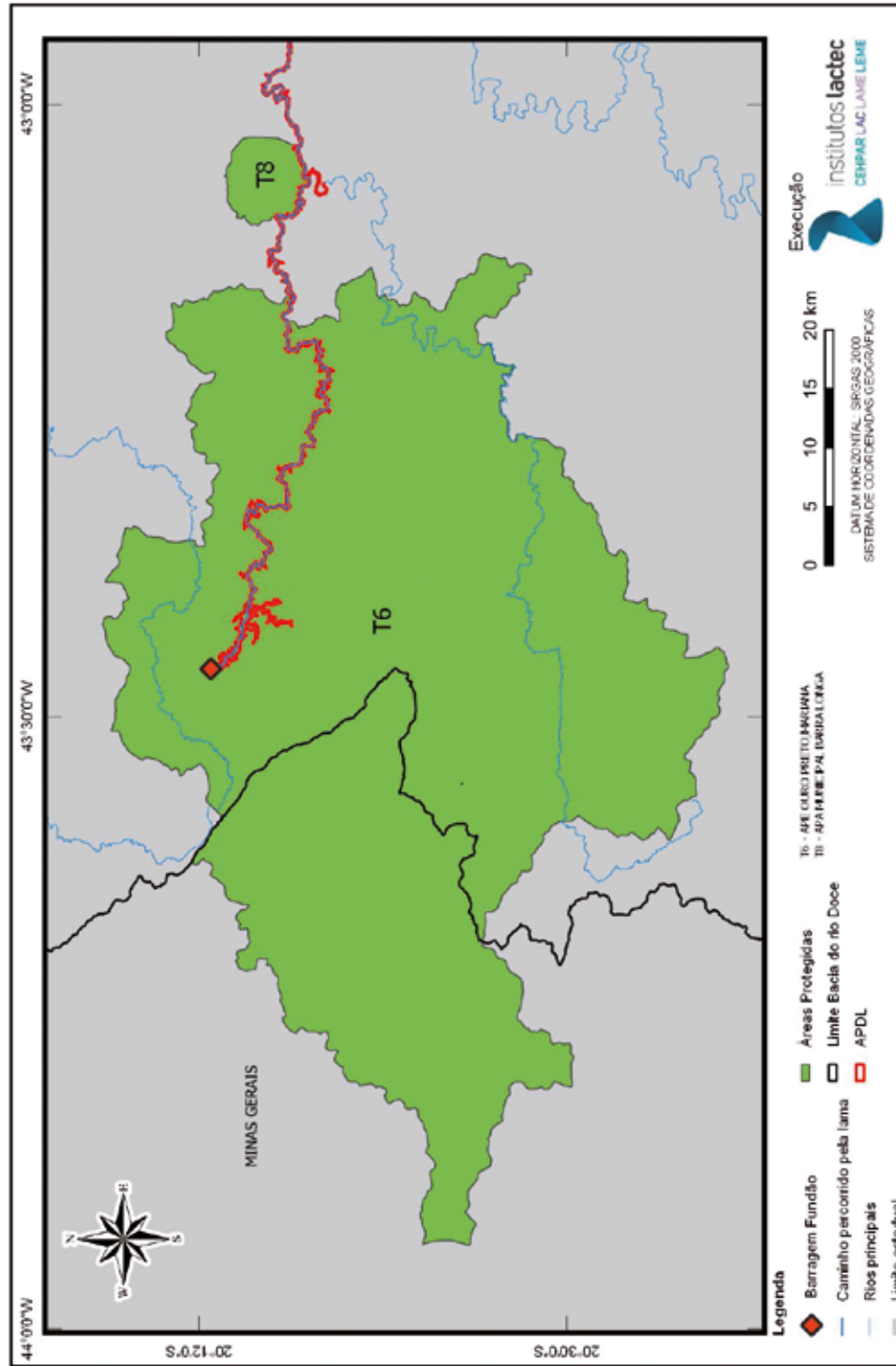
Tabela 29 – Relação das Unidades de Conservação e outras Áreas Naturais Protegidas afetadas pelo desastre, extensão linear (km) e área (ha) afetada pela onda de lama

NOME	EXTENSÃO LINEAR (km)	ÁREA AFETADA (hectares)
Área de Proteção Especial Ouro Preto / Mariana	121,66	1.322,34
Área de Proteção Ambiental Municipal Barra Longa	11,15	52,18
Área de Proteção Ambiental Municipal Dionísio	21,17	100,97
Área de Proteção Ambiental Municipal Córrego Novo	16,46	264,43
Área de Proteção Ambiental Municipal Pingo d'Água	6,21	29,44
Parque Estadual do Rio Doce	44,46	153,22
Área de Proteção Ambiental Municipal Bom Jesus do Galho	32,32	265,31
Área de Proteção Ambiental Municipal Lagoa Silvana	2,45	0,12
Área de Proteção Ambiental Municipal Santana do Paraíso	15,64	285,62
Área de Proteção Ambiental Municipal Belo Oriente	0,81	3,60
Parque Natural Municipal de Governador Valadares	1,43	0,12
Área de Proteção Especial Estadual Pico do Ibituruna	5,37	12,17
Área Indígena Krenak	7,40	0,01
TOTAL	286,53	2.489,53

Considerando as UCs e outras áreas naturais protegidas afetadas pela onda de lama e também localizadas na APDL, tem-se um total de 286,53 km lineares e 2.489,53 ha afetados pelo desastre.

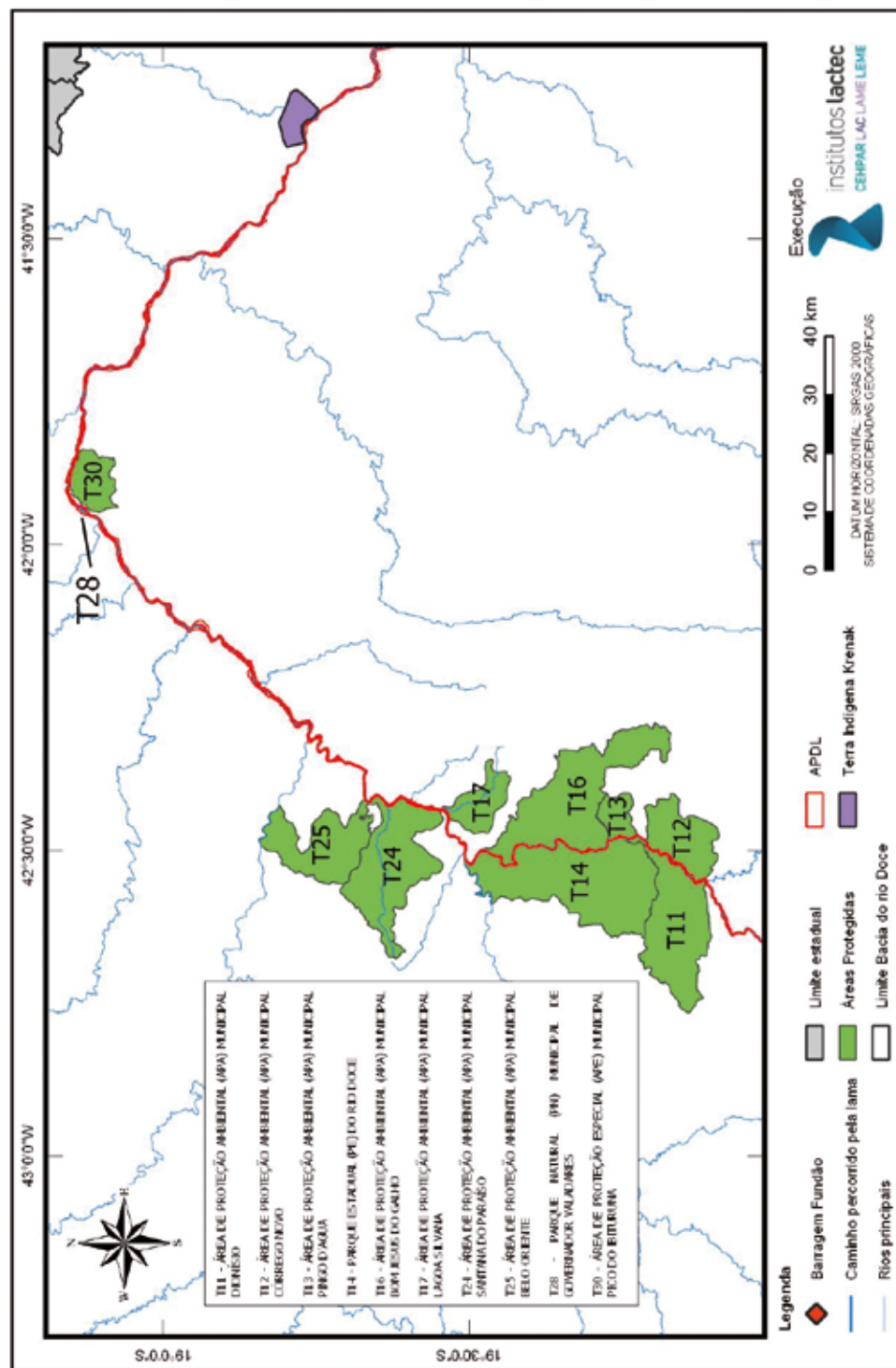
O desastre afetou uma Terra Indígena (TI Krenak), uma UC estadual de proteção integral (Parque Estadual do Rio Doce) e duas Áreas de Proteção Especial (APE Ouro Preto/Mariana e APE Pico do Ibituruna). Já na jurisdição municipal o dano foi evidente em uma UC de proteção integral (Parque Natural Municipal de Governador Valadares) e em oito UCs de uso sustentável, sendo todas Áreas de Proteção Ambiental (APA), a saber: APA Municipal Barra Longa, APA Municipal Dionísio, APA Municipal Córrego Novo, APA Municipal Pingo-d'Água, APA Municipal Bom Jesus do Galho, APA Municipal Lagoa Silvana, APA Municipal Santana do Paraíso e APA Municipal Belo Oriente.

Figura 65 – Áreas protegidas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo afetadas pela passagem e deposição da lama (parte 1).



Execução: Lactec.

Figura 66 – Áreas protegidas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo afetadas pela passagem e deposição da lama (parte 2).



Execução: Lactec.

As duas únicas UCs de proteção integral afetadas pelo desastre foram o Parque Natural Municipal (PMN) de Governador Valadares e o Parque Estadual (PE) do Rio Doce, sendo esta última a maior UC do estado de Minas Gerais e a primeira a ser criada pelo poder público em território mineiro. O PE do Rio Doce também é reconhecido como sítio RAMSAR, em razão de sua importância biológica para a conservação das áreas úmidas (outra tipologia de áreas protegidas), sendo responsável por abrigar e proteger inúmeras espécies da fauna e flora ameaçadas de extinção, raras, endêmicas da Mata Atlântica mineira, além de espécies migratórias. A passagem e deposição da lama de rejeito ao longo do curso do rio Doce, na porção correspondente à esta UC, provocou danos em 44,47 km de extensão linear, em área equivalente a 153,22 ha da UC. Além disso, foram encontradas diversas espécies de animais mortos na época do desastre, inclusive uma anta (*Tapirus terrestris*), maior mamífero terrestre brasileiro e ameaçado de extinção em nível nacional na categoria Vulnerável.

De um total de 22 áreas afetadas, incluindo as UCs, TI, e as Zonas de Amortecimento, as Reservas da Biosfera e suas zonas de transição e amortecimento, a avaliação do dano indicou que em 68% (n = 15) o dano foi classificado como gravíssimo (por possuírem área afetada maior que 50 hectares), para três áreas como grave (14% - onde a área afetada variou de 11 a 50 hectares) e para quatro destas o dano foi pouco grave (18% - onde a área afetada não passou de 10 hectares).

O dano tende a evoluir na APE Ouro Preto/Mariana e APA Barra Longa, localizadas no C1, assim como nos trechos correspondentes a Zona de Transição da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica e Zona de Amortecimento de ambas as reservas afetadas: RB da Mata Atlântica e RB da Serra do Espinhaço. Para as demais UCs e outras áreas naturais protegidas afetadas a tendência foi classificada como estabilizada. Quanto à reversibilidade, apenas duas áreas constam como irreversível, enquanto as demais foram classificadas como parcialmente reversível.

3.8 DANOS À ATMOSFERA

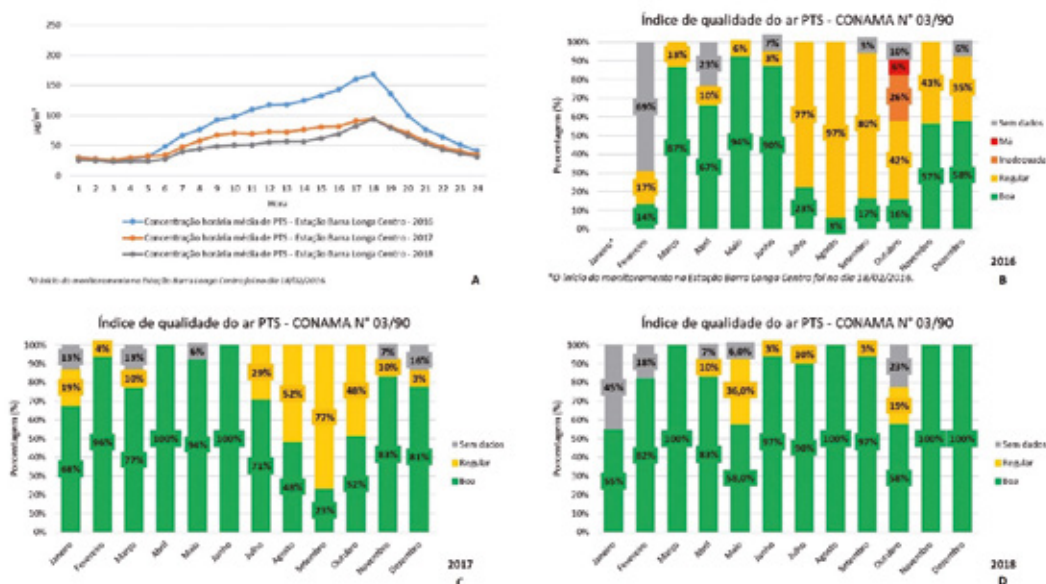
Os danos à atmosfera estão majoritariamente associados à ressuspensão de material particulado advindo do rejeito depositado. Desta forma é aqui apresentado na forma de um único dano de alteração da qualidade do ar.

3.8.1 ALTERAÇÃO DA QUALIDADE DO AR

O monitoramento da qualidade do ar em Barra Longa evidenciou alterações na concentração de partículas totais em suspensão (PTS) e partículas inaláveis (PM_{10}) no ano de 2016, em relação aos anos de 2017 e 2018, principalmente durante o período de seca na região, nos meses de abril a outubro. Para as partículas respiráveis ($PM_{2,5}$), no ano de 2017, as concentrações mais elevadas foram evidenciadas no período de seca, em comparação aos dados de 2018.

Para as PTS foram registradas no ano de 2016, dez violações ao padrão primário de qualidade do ar estabelecido pela Resolução CONAMA N° 003/1990, vigente na época, o que acarretou na classificação do Índice de Qualidade do Ar (IQAr) como inadequado e má. Nos demais dias, a qualidade do ar foi classificada como boa ou regular para as PTS (Figura 67).

Figura 67 – Análise dos dados obtidos para partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2018. a) Variação média diária. (b, c e d) Índice de Qualidade do Ar (IQAr) calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 003/1990.



Elaborado por: Lactec.

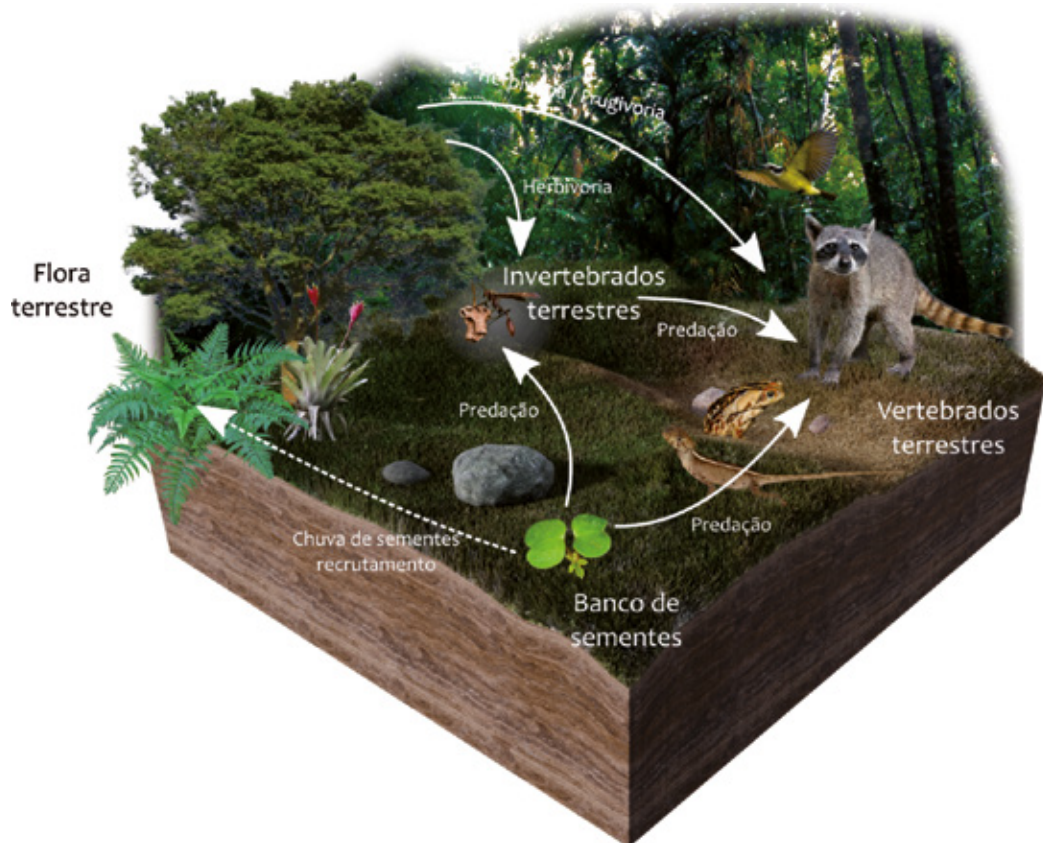
A concentração de partículas na atmosfera resultou na classificação do dano como gravíssimo, uma vez que pessoas de grupos sensíveis podem apresentar sintomas ou agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares e a população em geral pode ser afetada, dependendo da intensidade dessa concentração acima do padrão estabelecido e do tempo de exposição. Em relação a tendência desse dano, ocorrerá a redução da concentração de partículas na atmosfera, a partir do momento em que as partículas oriundas do solo e do rejeito depositado, não estejam expostas à ação do vento, caracterizando um dano reversível.

3.9 SÍNTESE DOS DANOS

Ao todo foram identificados 32 danos ao ambiente terrestre, englobando sete grupos temáticos envolvidos no diagnóstico (Figura 68). É inegável a importância de todos os elementos físicos e biológicos da região afetada, os quais sofreram danos de diferentes formas e intensidades ao longo do trajeto percorrido pela lama. O meio físico sofreu com perdas que variaram desde a alteração drástica na paisagem e influências sobre a qualidade do ar a aspectos ligados à interface de uso humano, como danos aos recursos minerários e situações relacionadas à disposição de resíduos sólidos. Aspectos biológicos também foram profundamente modificados pela supressão vegetacional e diminuição acentuada da qualidade dos habitat, assim como por danos em escala de paisagem, que afetaram a capacidade regional de deslocamentos da fauna. A contaminação dos diversos componentes ambientais

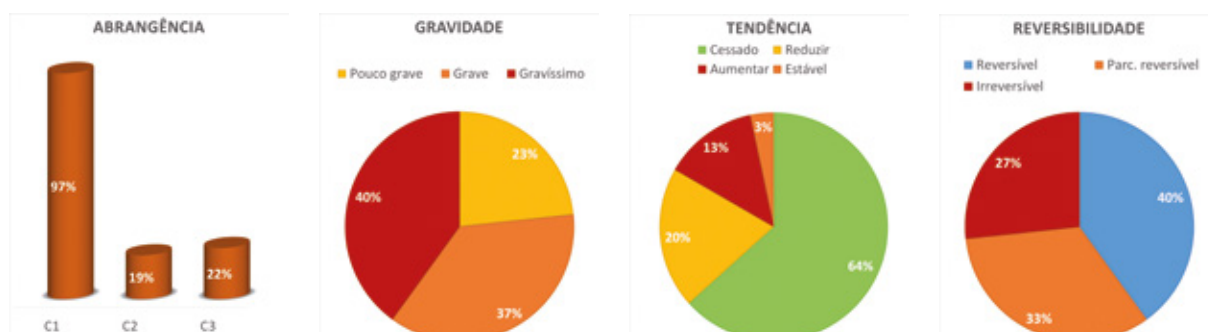
foi também uma das principais preocupações desde a ocorrência do desastre. Embora não tenha sido evidenciada a alteração da concentração de EPTs, em relação à linha-base, nos solos onde o rejeito tendeu a se depositar, foi constatada a tendência a bioacumulação destes para algumas espécies de fauna estudadas. Além disso, a permanência dos rejeitos no ambiente pode contribuir com a permanente disponibilização de EPTs para os corpos hídricos; ou mesmo para as águas subterrâneas, em regiões de fratura das rochas.

Figura 68 – Áreas temáticas do ambiente terrestre.



Elaborado por: Lactec.

Quanto à abrangência dos danos, a grande maioria se concentrou no C1 devido ao extravasamento da onda de rejeitos e à sua força mecânica. Nesse ambiente os danos foram majoritariamente graves ou gravíssimos, sendo boa parte considerados cessados. A maioria dos danos também foram considerados parcialmente reversíveis ou irreversíveis, o que remete a um cenário onde não será possível o retorno completo ao estado do ambiente antes do desastre. Na Figura 69 está representada a classificação dos danos ao ambiente terrestre e atmosfera quanto à sua abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade.

Figura 69 – Análise integrada para abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade para os danos.

Elaborado por: Lactec.

No contexto do ambiente terrestre, é fundamental compreender como as mudanças ambientais causadas geraram mudanças adversas em ecossistemas naturais e modificados, e em consequência, nas funções ecológicas e nos benefícios providos por eles aos seres humanos. Estas mudanças ambientais foram avaliadas por meio dos indicadores ao longo do diagnóstico e posteriormente comparadas com os principais serviços ecossistêmicos fornecidos pelo ambiente. Ao todo, 14 serviços ecossistêmicos foram elencados e tiveram sua provisão afetadas, sendo eles a provisão de madeira, provisão de produtos não madeireiros, provisão de recursos minerais, provisão de água para usos múltiplos, provisão de habitat, produção primária, biodiversidade, regulação da qualidade do ar, regulação do clima, controle de erosão, regulação do fluxo de águas e purificação das águas, regulação da qualidade do solo e regulação de desastres naturais.

Devido à sua magnitude e importância, a alteração na paisagem é possivelmente o dano mais significativo ao ambiente terrestre, visto que veio a desencadear uma série de outros danos. Ressalta-se ainda a importância de ações de recuperação que venham a restaurar o ambiente e os serviços ecossistêmicos por ele fornecidos. Dentre estas ações destaca-se a restauração florestal, dada a influência que esta prática vem a exercer nos demais elementos, como a recuperação dos solos, conectividade, fornecimento de habitat para a fauna e melhoria da qualidade do ar e da água.

4 AMBIENTE AQUÁTICO CONTINENTAL

O ambiente aquático continental corresponde, prioritariamente, aos rios, reservatórios e lagoas onde houve a passagem e a deposição da onda de lama, mas também pontos controles fora dessa área. Neste ambiente foram avaliados os componentes hidrológicos (ocorrência, distribuição e movimentação da água), qualidade de água e sedimentos, hidrogeologia das águas subterrâneas (interações químicas entre os componentes rochosos e águas confinadas em espaços subterrâneos), o abastecimento de água nos municípios afetados, bem como comunidades biológicas aquáticas: plâncton (fitoplâncton e zooplâncton), macroinvertebrados bentônicos (organismos associados ao sedimento de fundo dos rios e lagos), peixes, quelônios, flora e aspectos ecotoxicológicos dos organismos (Figura 70).

No contexto do desastre, o ambiente aquático recebeu a parte do rejeito oriundo do rompimento da barragem de Fundão que permaneceu na calha do rio. A onda de lama soterrou rios e alterou seus cursos naturais, causando a morte de organismos pela força mecânica, pelo soterramento ou por asfixia. A elevada quantidade de sólidos em suspensão no corpo hídrico também impediu ou dificultou a passagem de luz pela coluna de água o que afetou processos importantes de base da cadeia alimentar como a fotossíntese. Apesar de grande parte do rejeito ter sido retido pelo barramento da UHE Risoleta Neves, uma parte do mesmo transpôs esta barreira física e os danos se estenderam por todo o rio Doce chegando a sua foz. Toneladas de material potencialmente tóxico ocasionou uma perda de qualidade ambiental e riscos de contaminação a uma série de organismos da flora e da fauna ao longo de toda a APDL. Além disso, a energia despendida pelo evento provocou a ressuspensão de sedimentos contaminados com elementos potencialmente tóxicos, oriundos de décadas de mineração, e que também apresentaram riscos à biota como um todo. Além do trajeto principal da lama no ambiente fluvial, os rejeitos podem ter se estendido para as lagoas adjacentes ao rio Doce no Espírito Santo.

Os rejeitos que extravasaram a calha dos rios encontram-se depositados nas margens e devido ao alto potencial de erodibilidade deste material, e com a ocorrência de um grande evento chuvoso, (fato que ainda não foi observado desde o desastre), eles poderão ser novamente incorporados ao fluxo de água aumentando o potencial de causar danos. O mesmo ocorre para o material aprisionado no reservatório da UHE Risoleta Neves, pois na estação chuvosa (ou no caso de um processo de dragagem), este material pode ultrapassar o anteparo físico do barramento e ir para jusante reiniciando os efeitos prejudiciais aos ecossistemas.

Por fim, o comprometimento da qualidade de água, bem como a invasão das estações de tratamento pela própria lama, levou a paralização dos sistemas de abastecimento de água por vários dias em diversas cidades que utilizavam o rio Doce muitas vezes como sua principal fonte de captação.

Como o ambiente continental abrange todo o rio Doce e os principais tributários, conforme mencionado, é importante destacar que a região das cabeceiras destes rios engloba justamente as minerações que exploram o minério de Fe, dentro do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 70 – Síntese dos danos socioambientais do ambiente aquático continental.

Elaborado por: Lactec.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O ambiente aquático continental compreende toda a extensão do rio Doce e principais afluentes, desde a área da antiga barragem de rejeitos de Fundão (MG), até o limite com a região estuarina (ES). Além do ambiente fluvial (rios), também fazem parte do ambiente aquático continental as lagoas da planície flúvio-marinha, na região de Colatina e Linhares (ES) e também os reservatórios das UHEs, onde, devido ao barramento, o fluxo torna-se restrito. Esses ambientes estão representados na Figura 71.

Figura 71 – Características dos principais ambientes estudados, presentes nos compartimentos 1, 2 e 3.

Elaborado por: Lactec.

Para um melhor entendimento do ambiente aquático continental, os estudos realizados e os resultados aqui apresentados seguiram os três compartimentos já descritos, ao longo do rio Doce, conforme pode ser observado na Figura 72. Devido à presença dos barramentos das usinas hidrelétricas, o C2 foi subdividido em dois segmentos, sendo o C2A o segmento entre a UHE Risoleta Neves até a UHE Baguari e o C2B o segmento entre a UHE Baguari até a UHE Mascarenhas.

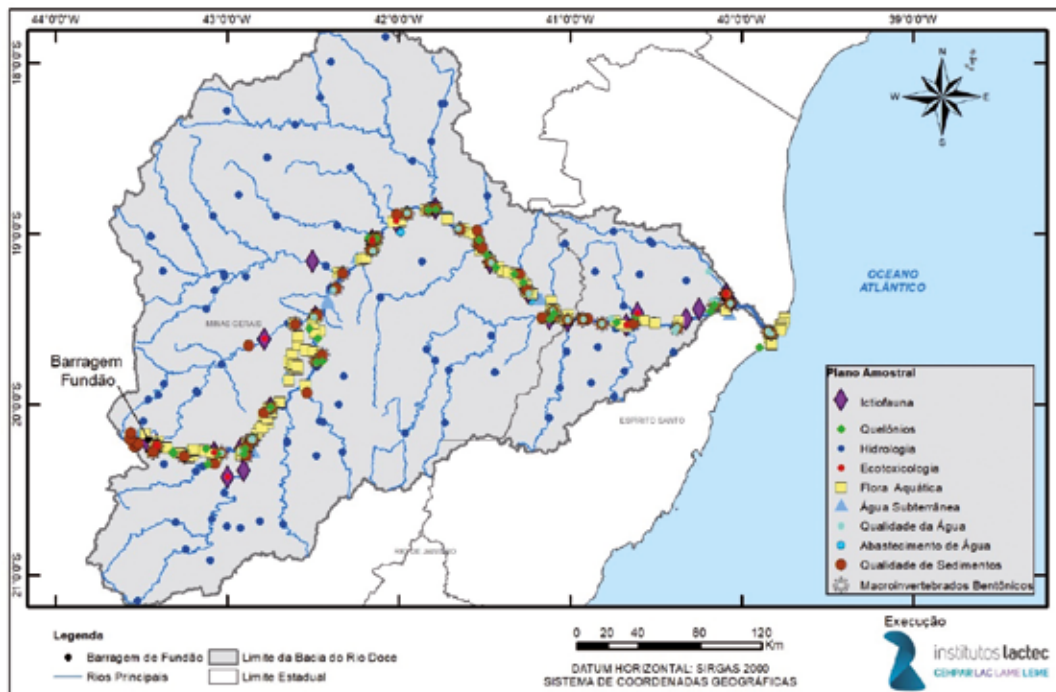
A malha amostral para os temas estudados no ambiente aquático continental é apresentada na Figura 73 e os detalhes de cada compartimento, nas Figuras 74, 75 e 76.

Figura 72 – Localização dos compartimentos do ambiente aquático continental ao longo do rio Doce.

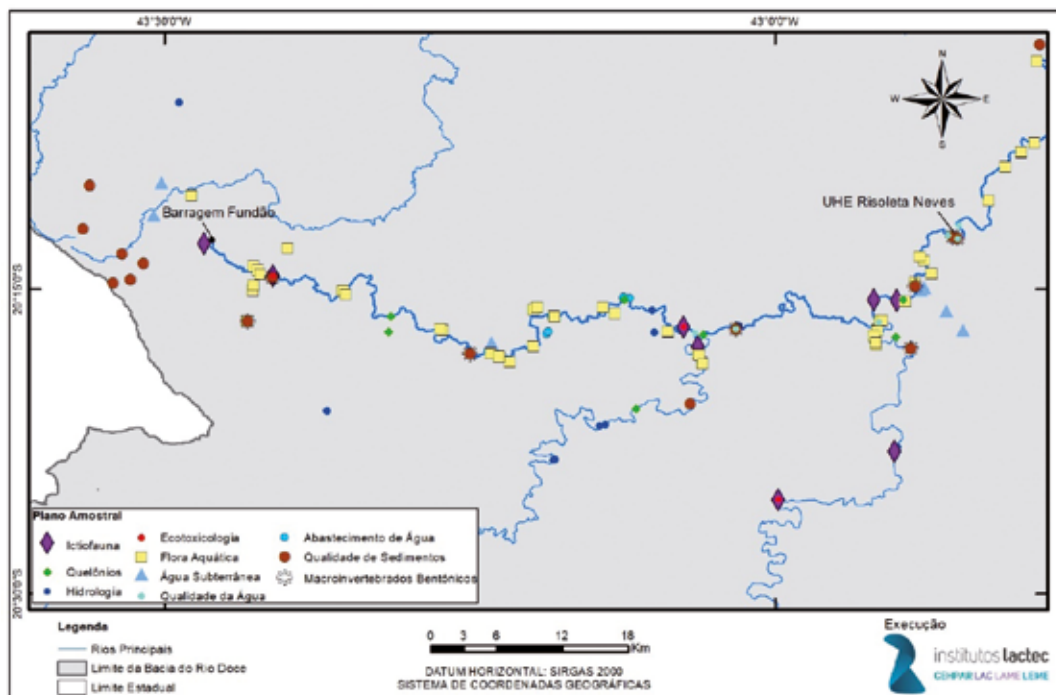


Execução: Lactec.

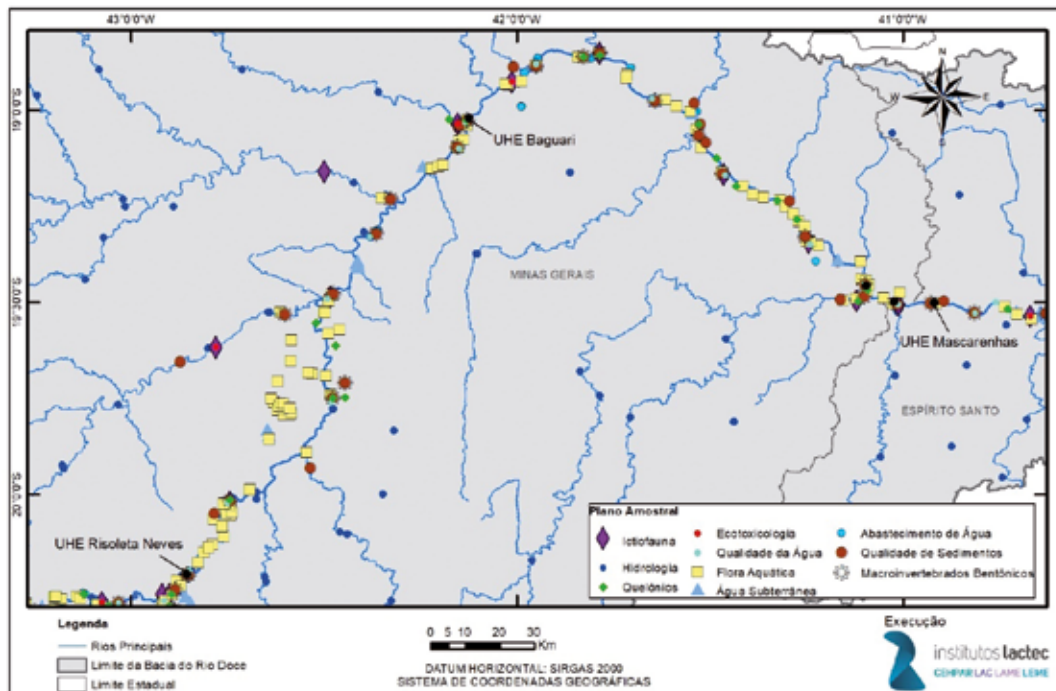
Figura 73 – Distribuição das estações amostrais dos estudos realizados no ambiente aquático continental, na bacia do rio Doce



Execução: Lactec.

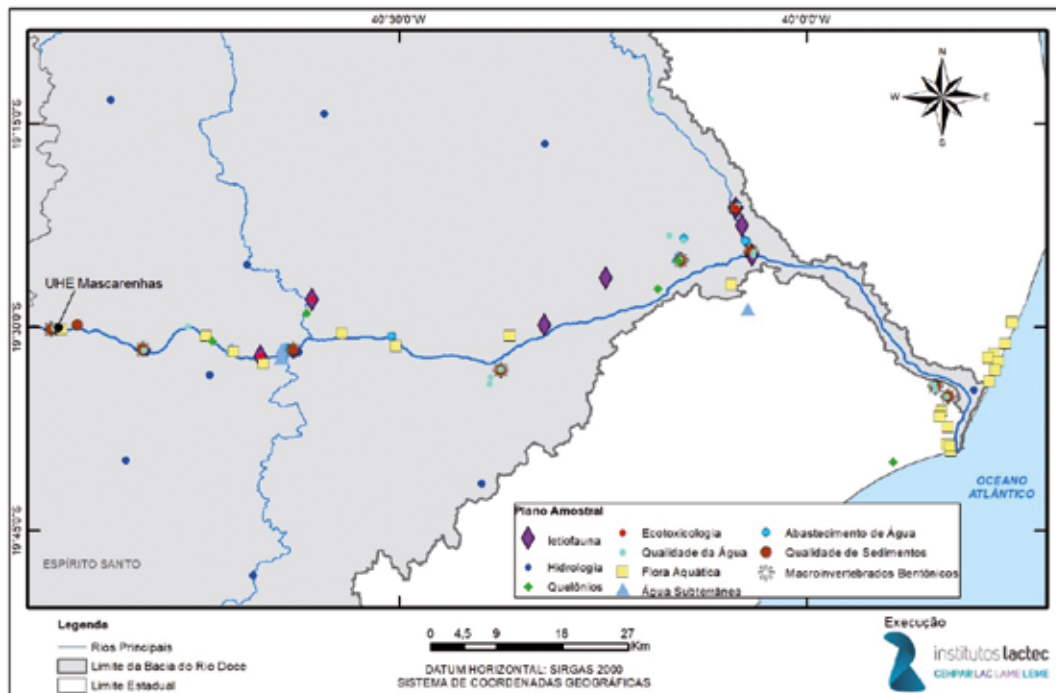
Figura 74 – Detalhe da posição das estações amostrais do C1

Execução: Lactec.

Figura 75 – Detalhe da posição das estações amostrais do C2, que engloba o C2A e 2B

Execução: Lactec.

Figura 76 – Detalhe da posição das estações amostrais do C3



Execução: Lactec.

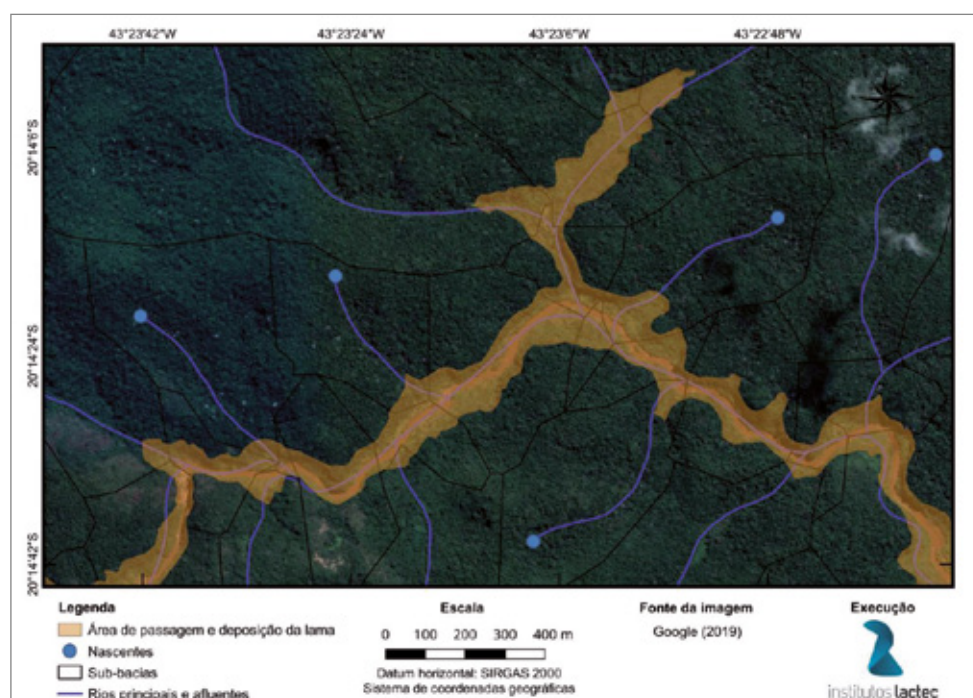
4.2 METODOLOGIA

Devido à grande diversidade de parâmetros, indicadores e componentes, cada área temática seguiu critérios independentes para mensuração dos danos e respectiva definição metodológica para escala de gravidade. Nos itens subsequentes, são apresentados os métodos de coleta e de análise dos dados de cada um dos componentes estudados no ambiente aquático continental, utilizados para a identificação e a quantificação dos danos decorrentes do desastre.

4.2.1 MORFOLOGIA DOS CURSOS D'ÁGUA

A água que precipita numa bacia hidrográfica chega até a calha do rio não só ao atingir diretamente o curso d'água, mas também após percorrer a área de drenagem da bacia.

Com a ocorrência do desastre, o material oriundo da barragem de Fundão atingiu a calha dos rios à jusante, afetando as sub-bacias de rios afluentes neste processo. Para avaliar o dano do desastre nas áreas de drenagem destes afluentes, foram consideradas todas as sub-bacias destes rios que desaguam no trecho fluvial mais afetado pela passagem da lama, da barragem de Fundão até a montante da UHE Risoleta Neves (C1). Na Figura 77 é possível ver um exemplo de área de drenagem afetada.

Figura 77 – Sub-bacia com indicação da nascente e área atingida pela lama.

Execução: Lactec.

Para as sub-bacias de interesse (trecho do C1) foi determinada a área de drenagem total e a área afetada pela passagem da lama. Com isso foi avaliada a proporção da área de drenagem das sub-bacias afluentes atingidas pela lama. Foi realizado, também, um comparativo entre a localização das nascentes existentes na área de estudo e a APDL, de modo a determinar se estas nascentes foram afetadas no processo.

Com o intuito de estabelecer uma definição clara para avaliar o dano, definiu-se a sua ocorrência percentual de no mínimo 10% de área afetada nas sub-bacias. Já a gravidade variou de acordo com o número de bacias que apresentaram pelo menos 10% de área afetada (Tabela 30).

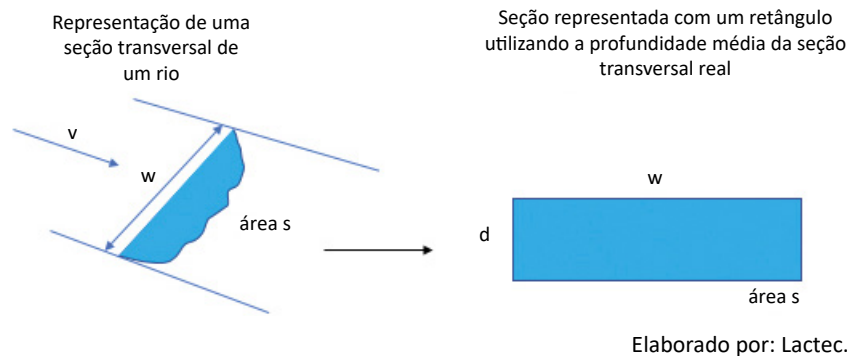
Tabela 30 – Classificação dos danos às áreas de drenagem das sub-bacias afluentes.

Categoria de dano	Critério para a classificação
Pouco Grave	Pelo menos 10% e menos do que 20% de todas as sub-bacias apresentaram dano.
Grave	Pelo menos 20% e menos do que 50% de todas as sub-bacias apresentaram dano.
Gravíssimo	Acima de 50% de todas as sub-bacias apresentaram dano.

Em ambientes naturais, existe um ajuste entre as condições de escoamento da bacia, a geometria e a composição dos canais fluviais. Como o trecho fluvial a montante da UHE Risoleta Neves sofreu alterações tanto na planície como nas formas e dimensões do canal natural, estes aspectos foram avaliados, buscando quantificar as modificações e avaliar a dinâmica pós-desastre.

A vazão de um canal (Q) é descrita pelo produto $s \cdot v$, 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 $Q = w \cdot d \cdot v$ (Figura 78).

Figura 78 – Relação entre variáveis representando a vazão de um rio: velocidade média na seção (v), largura (w) e profundidade (d) e área de seção transversal (s).



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 potenciais $w=a \cdot Q^b$, $d=c \cdot Q^f$ e $v=k \cdot Q^m$ (LEOPOLD e MADDOK, 1953).

Os coeficientes a , c e k e os expoentes b , f e m são ajustados empiricamente para cada conjunto de dados. Portanto, tendo em consideração que a vazão pode ser expressa por $Q=w \cdot d \cdot v$, a soma dos expoentes b , f e m será igual a uma unidade (LEOPOLD, 1994).

Neste sentido, as alterações nas relações de proporcionalidade entre vazão e largura, vazão e profundidade média ou entre vazão e velocidade média podem ser avaliadas ao longo do espaço ou do tempo pela comparação entre os expoentes b , f e m de diferentes conjuntos de dados.

Utilizando estações fluviométricas localizadas na bacia afluente à barragem da UHE Risoleta Neves foram realizadas: análise global da bacia (em relação aos expoentes b , f e m) e análise local, considerando apenas estações situadas na APDL.

Além destas duas análises, para uma avaliação mais ampla dos efeitos do rompimento no C1, foi realizado o mapeamento da largura dos canais em períodos distintos, a partir da vetorização de imagens de alta resolução fornecidas pela Fundação Renova: pré-desastre (imagens de 2015); imediatamente após o desastre (final de 2015); e outra situação pós-desastre mais recente (2017). A vetorização foi executada operando o *software* QGIS, na escala 1:2.000, utilizando-se o SRC Sirgas 2000 Fuso 23S (EPSG 31983). As medições de largura foram realizadas em seções transversais com espaçamento de 25 m, resultando em aproximadamente 4.300 medições em cada uma das três datas consideradas.

Os indicadores de dano foram definidos a partir das modificações na geometria hidráulica dos canais pela passagem e deposição da lama. A gravidade foi definida com base na alteração dos expoentes da largura comparando o período pré e o pós-desastre logo após o rompimento. A justificativa para o uso da largura do canal é a maior disponibilidade de dados, quando comparada com as demais variáveis. A definição utilizada está apresentada na Tabela 31.

Tabela 31 – Classificação dos danos à configuração da rede de drenagem

Categoria de dano	Critérios de classificação
Pouco Grave	Alteração dos expoentes da largura foi maior ou igual a 5% e menor do que 10%.
Grave	Alteração dos expoentes da largura foi maior ou igual a 10% e menor do que 20%.
Gravíssimo	Alteração dos expoentes da largura foi maior do que 20%.

Já a tendência e a reversibilidade do dano foram qualificadas com base na evolução da geometria hidráulica dos canais no período pós-desastre.

4.2.2 QUALIDADE DAS ÁGUAS

Para a avaliação dos danos à qualidade da água superficial, foram analisados dados de rios que fizeram parte do trajeto percorrido pela lama de rejeitos, bem como dos quatro reservatórios hidrelétricos situados na calha do rio Doce. Adicionalmente, em virtude da cheia de janeiro/2016, foram também avaliados os dados de qualidade de água de lagoas situadas no Espírito Santo, sendo que se deu destaque à lagoa Nova, por apresentar mais dados. Em relação aos rios, utilizaram-se dados provenientes do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG) e do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA/ES), complementados por dados da Fundação Renova e do Sanear Colatina. Para os reservatórios hidrelétricos foram analisados dados fornecidos pelas concessionárias de energia. E para a avaliação das lagoas, foram utilizados dados da Fundação Renova, do IEMA/ES e do Lactec.

Os danos avaliados na água foram o aumento das concentrações de sólidos e de EPTs e a redução das concentrações de oxigênio dissolvido. Para os rios e os reservatórios, foram realizadas comparações entre dados pós-desastre e pré-desastre, sendo que para os rios atingidos foi possível mensurar os danos, mas para os reservatórios, a avaliação foi descritiva, visto que não havia dados suficientes para a realização das análises estatísticas. Para as lagoas, dada a ausência de linha-base consistente, buscou-se avaliar a tendência da qualidade da água no período pós-desastre.

A avaliação do período pós-desastre englobou três anos a partir da data de rompimento de Fundão, sendo este intervalo de tempo dividido em cinco períodos: novembro/2015, dezembro/2015 a março/2016, abril/2016 a dezembro/2016, janeiro/2017 a dezembro/2017 e janeiro/2018 a dezembro/2018. Considerando-se os ambientes fluviais, a área avaliada seguiu a compartimentação (1, 2A, 2B e 3) conforme apresentado na Figura 72.

Para os rios, a gravidade dos danos foi classificada a partir da avaliação dos indicadores listados na Tabela 32:

Tabela 32 – Indicadores dos danos à qualidade da água superficial

Danos	Indicadores
Aumento das concentrações de sólidos na água	Turbidez (UNT), sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais (mg/L)
Diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido na água	Oxigênio dissolvido (mg/L)
Aumento das concentrações de EPTs (elementos potencialmente tóxicos) na água	Al dissolvido, As total, Ba total, Cd total, Pb total, Cu dissolvido, Cr total, Fe dissolvido, Mn total, Hg total, Ni total, Zn total (mg/L)

Antes da etapa de mensuração dos danos, os dados registrados nos primeiros meses pós-rompimento foram plotados em gráficos com diferentes intensidades de cor, relacionadas à ordem de valores das variáveis de qualidade de água analisadas, visando apresentar as alterações iniciais na qualidade de água provocadas pela passagem da lama de rejeitos.

Depois disso, seguindo para a etapa de mensuração dos danos, cada um dos dados do período pós-desastre foi classificado de acordo com as categorias apresentadas na Tabela 33. A classificação ocorreu para os dados de cada um dos indicadores e para cada uma das estações de monitoramento avaliadas. Sendo que a qualidade da água varia no sentido de que dados pós-desastre classificados na “categoria A” indicam uma condição melhor enquanto dados classificados na “categoria C” indicam uma condição pior.

Tabela 33 – Categorias de classificação dos dados de qualidade da água superficial.

Categoria de classificação dos dados	Descrição
Categoria A	Valores de acordo com os limites da classe 2 da Resolução CONAMA nº 357/2005 e dentro da variação histórica pré-desastre
Categoria B	Valores de acordo com a variação histórica pré-desastre, mas que não atenderam aos limites da classe 2, ou então, valores que extrapolaram a variação histórica pré-desastre, mas que atenderam aos limites da classe 2
Categoria C	Valores em desacordo com os limites da classe 2 da Resolução CONAMA Nº 357/2005 e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre

Os dados classificados de acordo com as categorias A, B e C foram então agrupados em cada um dos quatro compartimentos e cinco períodos de tempo aos quais estavam relacionados. De modo a subsidiar a mensuração dos danos à qualidade da água, para cada um dos indicadores dos danos verificou-se a categoria de classificação (Tabela 34) predominante em novembro/2015, visto que naquele mês esperaram-se as maiores alterações na qualidade da água doce, haja vista a passagem do grande volume da lama de rejeitos. Ressalta-se que para o dano de redução das concentrações de Oxigênio Dissolvido (OD) na água, avaliou-se um único indicador. A partir de novembro/2015, observou-se a tendência de evolução dos danos.

A gravidade dos danos foi estabelecida de acordo com a pior categoria registrada para pelo menos um de seus indicadores no mês de novembro/2015. Ou seja, se para o dano “aumento das concentrações de EPTs na água” ao menos um dos indicadores avaliados foi classificado, no mês de novembro/2015, na categoria C, o dano como um todo foi considerado gravíssimo no compartimento avaliado, mesmo que outro indicador tenha sido classificado na categoria A. A Tabela 34 apresenta os critérios para a definição da gravidade dos danos à qualidade da água, bem como sua interpretação.

Tabela 34 – Critério para definição da gravidade dos danos à qualidade da água superficial.

Gravidade	Critério	Interpretação
Pouco Grave	Todos os indicadores foram classificados na categoria A em novembro/2015	Dano que perdurou por um menor tempo em relação aos demais e/ou apresentou alterações menores em termos de magnitude em relação à linha-base.
Grave	Nenhum dos indicadores foi classificado na categoria C e ao menos um indicador foi classificado na categoria B em novembro/2015	Quando foi observada alteração em relação à linha-base, mas de acordo com os padrões legislados. Ou então, quando não se atendeu ao padrão legislado, mas essa condição já havia sido observada antes do rompimento.
Gravíssimo	Pelo menos um dos indicadores foi classificado na categoria C em novembro/2015	Indica alterações mais significativas em relação à linha-base, haja vista sua maior duração e magnitude.

A identificação das consequências do rompimento da barragem de Fundão na água subterrânea foi feita com base em dados primários de qualidade de água obtidos em 57 pontos amostrais distribuídos na vizinhança do curso dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, desde o município Mariana até Linhares. Os pontos amostrais foram estabelecidos principalmente em poços utilizados para o abastecimento de núcleos populacionais e consumidores individuais. Realizou-se um total de 56 análises contemplando, cada qual, 72 variáveis em 31 pontos amostrais em três campanhas de coleta entre novembro de 2017 e dezembro de 2018. Imagens das campanhas podem ser observados na Figura 79.

Possíveis danos à qualidade da água subterrânea foram avaliados pela comparação de sua composição química com a composição da água dos rios que conduziram o fluxo de rejeitos. Contaminantes presentes na água não se deslocam isoladamente, porém junto com toda a massa de água, assim sendo se um aquífero é influenciado pela água fluvial contaminada pelos rejeitos, a composição da água subterrânea tenderá a se assemelhar àquela do rio. Na impossibilidade de se estabelecer uma linha-base para a composição química da água subterrânea, pela precariedade de dados pré-desastre, os dados primários foram avaliados quanto a sua conformidade com as normas legais vigentes, estabelecidas nas resoluções nº 396 do CONAMA (BRASIL, 2008) e COPAM nº111 (MINAS GERAIS, 2011).

Figura 79 – Atividades de coleta: purga de poços, coleta de amostras, medições em campo e preparo de amostras para análises laboratoriais, ao fim de cada dia de coletas.

Fonte: Lactec.

O dano socioambiental em virtude da passagem da onda de rejeitos foi a alteração da qualidade da água dos mananciais utilizados para o abastecimento público, o que inviabilizou o tratamento da água. Consequentemente, as ETAs foram paralisadas, implicando em dificuldades de acesso à água potável pela população atingida e provocando insegurança hídrica nas respectivas localidades. Para mensurar este dano, foram realizadas visitas técnicas aos municípios afetados e suas estações de tratamento de água, aos pontos de captação nos mananciais afetados e avaliados os laudos de água tratada no período anterior e posterior ao desastre. Além disso, durante as visitas, foram entrevistados os gestores e responsáveis técnico das ETAs, de forma a serem obtidos dados relevantes, principalmente referente aos primeiros dias posteriores à passagem da onda de rejeitos.

Para a classificação como gravíssimo, considerou-se que a água potável segura é um direito básico indispensável para manter a dignidade de todos os seres humanos, devendo ser disponibilizada de forma física e financeiramente acessível, segura e culturalmente aceitável, como exposto no Relatório Mundial sobre Desenvolvimento de Recursos Hídricos das Nações Unidas de 2019 (WWAP, 2019). Desta forma, qualquer ação que impeça ou dificulte as populações de acesso a este recurso imprescindível para a sobrevivência, deve ser considerado como uma atitude gravíssima, devendo a ausência de água para o consumo humano ser mitigada o mais rápido possível para que as lesões decorrentes de sua privação não sejam prolongadas.

4.2.3 COMUNIDADES PLANCTÔNICAS

Dados sobre o fitoplâncton, ou microalgas, dos rios foram obtidos do monitoramento realizado pelo IGAM, IEMA e Lactec. Para os reservatórios, foram utilizados dados fornecidos pelas concessionárias de energia e Lactec. Para as lagoas, foram analisados dados obtidos pela Fundação Renova, Lactec e de literatura.

As alterações na comunidade de microalgas foram analisadas por meio da mudança na estrutura da comunidade: número de espécies (riqueza) e na quantidade (densidade) em que estas ocorreram antes e após o desastre; e da mudança na composição: frequência de ocorrência das espécies e perda das espécies comuns e constantes após o desastre. Os danos relacionados à comunidade fitoplanctônica tiveram sua magnitude mensurada de acordo com a escala apresentada na Tabela 35.

Tabela 35 – Classificação dos danos à comunidade fitoplanctônica.

Categoria de dano	Critério para a classificação
Pouco Grave	Houve alteração na composição ou estrutura da comunidade, mas o dano tendeu a cessar ou a diminuir com o tempo
Grave	Houve alteração na composição ou estrutura da comunidade, mas o dano tendeu a estabilizar ou aumentar com o tempo
Gravíssimo	Houve alteração na composição e estrutura da comunidade, mas o dano tendeu a estabilizar ou aumentar com o tempo

Os danos ao fitoplâncton nas estações de rio situadas no trecho capixaba (C3) e nas lagoas não puderam ser mensurados devido à escassez ou ausência de informações sobre as microalgas que ocorriam nestes locais antes e/ou após o desastre.

Para avaliar a tendência do dano e sua reversibilidade, foram selecionadas as espécies comuns ou constantes que ocorriam antes do desastre e, calculou-se a taxa de mudança na ocorrência destas espécies em diferentes períodos, sendo que cada período foi constituído por quatro campanhas de coleta do pós-desastre. Desta forma, observou-se a tendência do dano: se o dano cessou (a diferença nos valores diminuiu para próximo de zero), tendeu a diminuir (em relação ao primeiro período após o dano, as mudanças diminuíram, mas ainda não retornaram à zero), estabilizado (há alterações durante os períodos, mas em geral, as mudanças se mantêm constantes), ou tendeu a aumentar (em relação ao primeiro período após o dano as mudanças aumentaram).

Para avaliação e mensuração dos danos às comunidades zooplancônicas, foram analisados dados dos monitoramentos periódicos realizados nas usinas hidrelétricas Risoleta Neves (C1), Baguari (C2A) e Aimorés (C2B), disponibilizados através de laudos e planilhas de dados brutos. Os monitoramentos realizados pelos empreendimentos são trimestrais, contendo estações amostrais de rio e de reservatório, e foram avaliados para os fins desse diagnóstico, para o período de 2011 a 2018 nas estações localizadas dentro da APDL. Além desses monitoramentos, foram analisados outros dados secundários, e resultados de duas campanhas realizadas pelo Lactec após o desastre para coleta de dados primários. A avaliação da ocorrência e classificação do dano às comunidades zooplancônicas (Rotifera, Cladocera e Copepoda) foi realizada com base nos valores de riqueza e abundância, conforme Tabela 36.

Tabela 36 – Classificação do dano ao zooplâncton

Categoria de dano	Interpretação
Pouco grave	Valores máximos de riqueza de espécies e/ou abundância da comunidade reduziram, porém, menos do que 25% se comparando os resultados do monitoramento antes e após o desastre.
Grave	Valores máximos de riqueza de espécies e/ou abundância da comunidade reduziram, entre 25% e 50%, comparando os resultados do monitoramento antes e após o desastre.
Gravíssimo	Valores máximos de riqueza de espécies e a abundância da comunidade reduziram em 50% ou mais, comparando os resultados do monitoramento antes e após o desastre.

4.2.4 FLORA AQUÁTICA

Para a avaliação dos danos à flora aquática foram aplicadas as seguintes metodologias: comparação entre imagens de satélite pré e pós-desastre para mapeamento das áreas de várzea, que permitiu verificar quais destas áreas foram suprimidas pela passagem da onda de lama; levantamentos florísticos e fitossociológicos, que foram utilizados para quantificar e qualificar as espécies de macrofitas e reófitas presentes nestes ambientes; e comparação das espécies encontradas com listas oficiais e bibliografias, o que permitiu verificar quais destas espécies são protegidas, endêmicas, estão ameaçadas de extinção ou possuem algum tipo de uso e potencialidade conhecidos.

Para a classificação de gravidade do dano, a área suprimida foi o indicador prioritário. Quando não foi possível calcular esta área, o indicador utilizado foi o número de espécies afetadas, conforme consta na Tabela 37.

Tabela 37 – Escala de classificação dos danos à flora aquática.

Categoria de dano	Interpretação
Pouco grave	Tamanho da área afetada até 20 hectares ou menos de 50 espécies afetadas
Grave	Tamanho da área afetada de 20 a 100 hectares ou entre 50 e 200 espécies afetadas
Gravíssimo	Tamanho da área afetada maior que 100 hectares ou mais de 200 espécies afetadas

4.2.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para embasar a avaliação dos danos relacionados com a alteração da dinâmica do transporte de sedimentos ao longo do rio Doce foram utilizadas três metodologias: a primeira consistiu na análise gráfica e estatística de dados históricos pré e pós-rompimento de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e turbidez em pontos de monitoramento ao longo do trecho afetado; a segunda metodologia consistiu na análise das alterações das relações entre descarga sólida e descarga líquida (curvas-chave de sedimentos) também nas situações pré e pós-rompimento; e a terceira e última metodologia consistiu em gerar resultados de simulações matemáticas de concentração de sedimentos em suspensão usando um modelo hidrossedimentológico que não considerou o efeito do rompimento na produção de sedimentos da bacia na condição do pós-desastre (portanto, estimou qual seria a concentração natural de sedimentos caso o rompimento não tivesse acontecido). Os resultados desta simulação foram comparados com os dados observados de concentração de sedimentos na situação pós-desastre.

A estação 56539000 (Cachoeira do Óculos) no C2 e a estação 569945000 (Colatina) no C3 foram adotadas para verificação da gravidade do dano.

Para a qualificação do dano, nestes locais foram calculadas as médias dos valores históricos e valores naturais modelados de sedimentos em suspensão para o período pré-rompimento e as médias dos valores observados e valores naturais modelados de sedimentos em suspensão para o período pós-rompimento. Estes valores foram analisados usando o critério apresentado na Tabela 38.

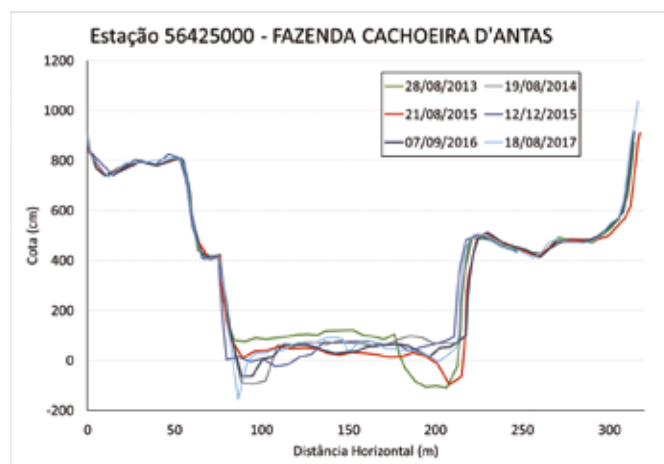
Tabela 38 – Categorias de danos associados ao transporte de sedimentos.

Categoria de dano	Interpretação
Pouco Grave	Ordem de grandeza das médias das concentrações de sedimentos e descargas sólidas no pós-desastre (3 anos hidrológicos após) iguais à ordem de grandeza do período pré-rompimento, mas com concentrações no pós-desastre superiores ao pré-desastre.
Grave	Ordem de grandeza das médias das concentrações de sedimentos e descargas sólidas no pós-desastre superiores à ordem de grandeza do período pré-rompimento.
Gravíssimo	Ordem de grandeza das médias das concentrações de sedimentos e descargas sólidas no pós-desastre superiores (em todos os 3 anos hidrológicos após o desastre) à ordem de grandeza do período pré-rompimento.

A deposição de rejeito ocorreu com intensidades diferentes ao longo de seu deslocamento até a foz do rio Doce. A quantidade de rejeitos depositada nos rios e reservatórios (assoreamento) foi medida conforme a região e a disponibilidade de dados pretéritos. No C1, onde houve a maior acumulação, a deposição foi medida por dados de perfurações e coletas de amostras realizadas logo após ao evento por duas empresas distintas, uma, que realizou as medições em 2016, e a outra, cujas medições foram efetuadas em 2017, totalizando mais de 80 perfurações em campo.

Nos outros compartimentos, foram avaliadas as seções dos rios monitoradas pela Agência Nacional de Águas (ANA) já que possuem uma série histórica relativamente grande. Na Figura 80 está apresentado um exemplo de sequência de medições de seções transversais para a localidade da estação 56425000 entre os anos de 2013 e 2017.

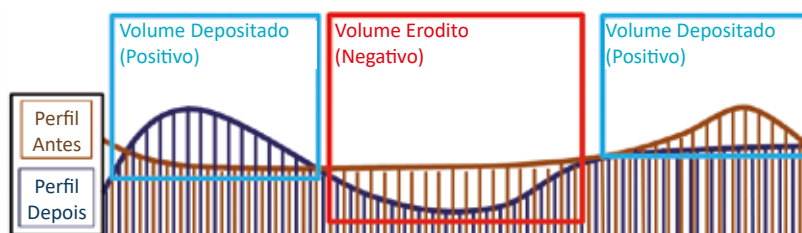
Figura 80 – Exemplo de sequência de levantamentos de sessões transversais.



Elaborado por: Lactec.

Nos reservatórios, as batimetrias de diferentes períodos foram comparadas, isto é, as diferenças na forma do terreno no fundo dos reservatórios antes e após o desastre foram medidas conforme ilustrado na Figura 81.

Figura 81 – Esquema representando duas seções batimétricas realizados em dois momentos diferentes. As diferenças positivas entre o levantamento mais atual (Perfil Depois) e o levantamento mais antigo (Perfil Antes) indicam o volume depositado e as diferenças negativas volume erodido



Elaborado por: Lactec.

A gravidade do assoreamento dos reservatórios foi classificada de acordo com a porcentagem do volume total do reservatório assoreado e a existência de mecanismos capazes de permitir o transporte de sedimentos. Como comparação, durante período da linha-base, o maior percentual médio anual de assoreamento nos reservatórios foi de 1,93% ao ano e o menor de 0,16%. As categorias de dano são apresentadas na Tabela 39.

Tabela 39 – Categorias de dano associadas ao assoreamento de reservatórios

Categoria de dano	Crítérios para classificação
Pouco grave	Assoreamento foi maior ou igual a 1% e menor do que 5%.
Grave	Assoreamento foi maior ou igual a 5% e com mecanismos que permitem o transporte de sedimentos no fundo.
Gravíssimo	Assoreamento foi maior ou igual a 5% e sem mecanismos que permitam o transporte de sedimentos no fundo.

O assoreamento dos rios foi identificado usando dois indicadores distintos: no C1 o indicador foi o volume de rejeito e no C2, a taxa de sedimentação.

No C1, o volume de sedimento anual produzido foi estimado por alguns estudos entre 0,99 e 1,04 hm³/ano (POTAMOS, 2017) e 1,05 hm³/ano (GEOPROJETOS e CVRD, 2000). Optou-se então por considerar o valor de 1 hm³/ano como referência, definindo como “Pouco Grave” se o volume de rejeito for correspondente a dois meses de aporte de sedimento e abaixo de cinco meses, “Grave” entre cinco e oito meses e “Gravíssimo”, acima de oito meses (Tabela 40).

Tabela 40 – Categorias de dano associadas ao assoreamento em rios - C1

Categoria de dano	Crítérios para classificação
Pouco Grave	Volume de rejeito correspondente a um valor acima de 2 meses de aporte natural de sedimento e abaixo de 5 meses: entre 0,16 hm ³ e 0,42 hm ³ .
Grave	Volume de rejeito correspondente a um valor acima de 5 meses de aporte natural de sedimento e abaixo de 8 meses: entre 0,42 hm ³ e 0,67 hm ³ .
Gravíssimo	Volume de rejeito correspondente a um valor acima de 8 meses de aporte natural de sedimento: acima de 0,67 hm ³ .

Nos C2 e C3, foi escolhido como base o conjunto de medições prévias de taxas de sedimentação e definidas as categorias de dano (Tabela 41) tendo como referência um teto para a média histórica do período pré-desastre considerando as estações disponíveis no rio Doce (cerca de 0,5 mm/dia).

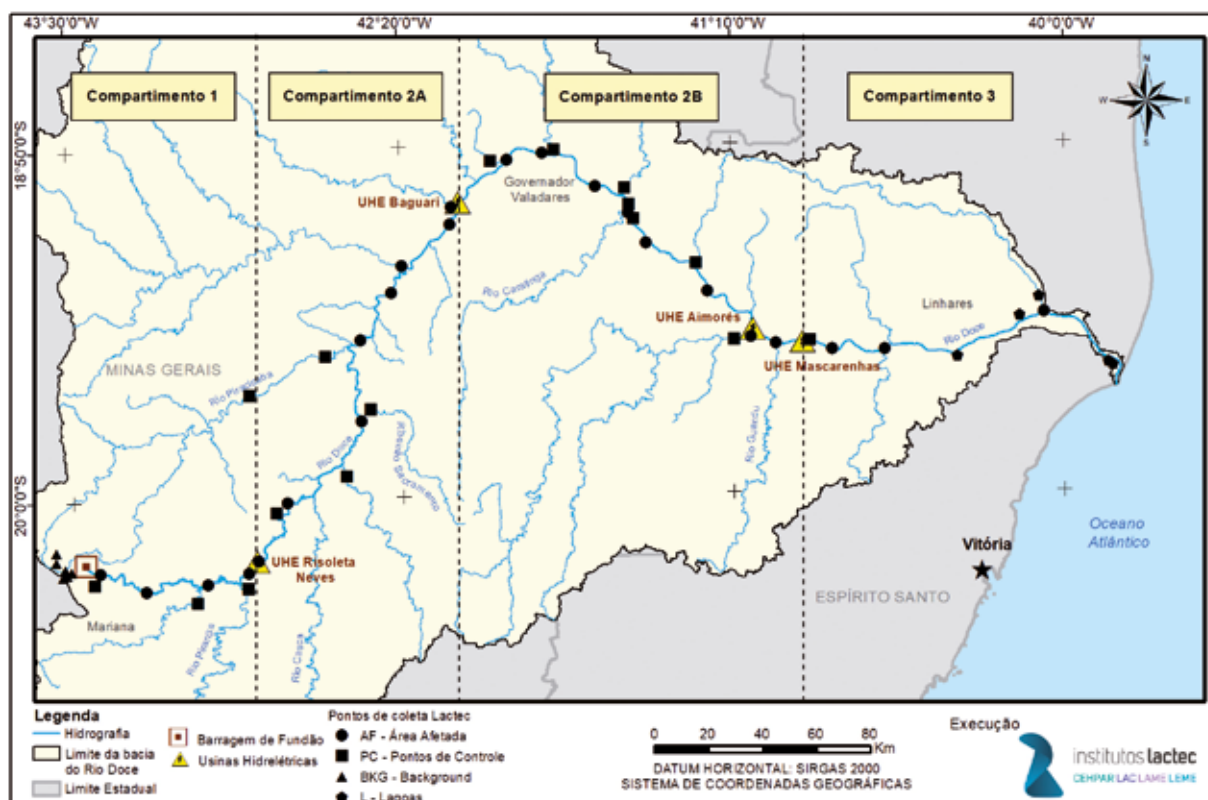
Tabela 41 – Categorias de dano associadas ao assoreamento em rios - C2 e C3.

Categoria de dano	Crítérios para classificação
Pouco Grave	Variação de espessura numa taxa acima de 1 mm/dia e abaixo de 2 mm/dia.
Grave	Variação de espessura numa taxa acima de 2 mm/dia e abaixo de 10 mm/dia.
Gravíssimo	Variação de espessura numa taxa acima de 10 mm/dia.

4.2.6 QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS

Na avaliação dos danos à qualidade dos sedimentos, foram mensuradas alterações da granulometria e na concentração de EPTs. Essa mensuração foi realizada com base na comparação de resultados de estudos anteriores ao rompimento da barragem e resultados de estudos realizados após o rompimento, elaborados tanto por outras instituições e pelo Lactec. Até agora, o Lactec realizou duas coletas após o rompimento da barragem de Fundão, em junho/18 e em janeiro/19 em 50 pontos distribuídos ao longo do rio Doce e seus tributários (Figura 82). As amostras de sedimentos foram coletadas com o auxílio dos equipamentos: concha de aço inox, draga tipo Petersen (Figura 83 A), tubo de acrílico com ponteira de aço (Figura 83 B) e testemunhador (Figura 83 C) e foram encaminhadas para análise granulométrica e quantificação das concentrações dos elementos analisados pelo método de ICP-OES.

Figura 82 – Compartimentos do rio Doce e a distribuição das estações amostrais.



Execução: Lactec.

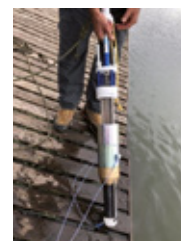
Figura 83 – Equipamentos utilizados na coleta.



A



B

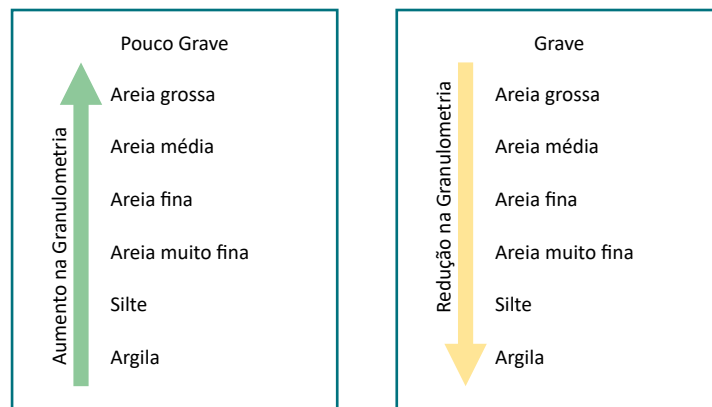


C

Fonte: Lactec.

O primeiro dano avaliado foi relacionado à alteração dos tamanhos dos grãos do sedimento (análise granulométrica). Como o rejeito da barragem possui grãos do tamanho de silte (de 0,062 mm a 0,0394 mm), que possui maior capacidade de reter EPTs, considerou-se que quando o tamanho do grão diminuiu, o dano é mais acentuado, sendo definidos conforme ilustrado na Figura 84 e Tabela 42.

Figura 84 – Classificação do dano para a análise granulométrica



Elaborado por: Lactec.

Tabela 42 – Interpretação da gravidade do dano da alteração da granulometria

Gravidade	Critérios para classificação
Pouco Grave	Aumento da granulometria no sedimento
Grave	Redução da granulometria no sedimento

Dos 53 parâmetros analisados, para avaliação do dano dos EPTs, foram elencadas as concentrações de: Al, As, Ba, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni e Zn, por estarem diretamente relacionadas à composição do rejeito de Fundão. A partir dos valores máximos obtidos na comparação dos trabalhos realizados previamente ao desastre, divididos por compartimentos, com o pós-desastre, as concentrações de EPTs foram classificadas como “sem alteração” ou “alterado”. Os limites do nível 1 da resolução CONAMA nº 454/2012 (BRASIL, 2012) e da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (*National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA), que estabelece concentrações que podem causar efeitos nocivos à vida aquática (BUCHMAN, 2008), assim como o fator de contaminação, foram utilizados de forma complementar na análise.

Para a determinação do fator de contaminação (FC), essas análises levaram em consideração pontos de coleta em áreas não afetadas pela lama de rejeito, denominados de pontos de controle e pontos de coleta nas áreas afetadas pela passagem e deposição da lama de rejeitos. Embora esse dano tenha sido estabelecido pela comparação entre os dados pré e pós-desastre, os resultados obtidos a partir do fator de contaminação, auxiliaram na interpretação da quantificação do dano atribuído.

Considerando o percentual de elementos alterados por compartimento analisado, o dano foi definido, como pouco grave quando as alterações desses 13 elementos ficaram entre 5% e 25%; grave com alterações entre 25% e 50% e gravíssimo com alterações superiores a 50%, conforme apresenta a Tabela 43.

Tabela 43 – Descrição da classificação da gravidade do dano referente ao aumento das concentrações de EPTs.

Categoria de dano	Critérios para classificação
Pouco Grave	EPTs classificados como alterados entre 5% e 25% no respectivo compartimento
Grave	EPTs classificados como alterados entre 25% e 50% no respectivo compartimento
Gravíssimo	EPTs classificados como alterados acima de 50% no respectivo compartimento

Para identificação e mensuração de dano na comunidade de macroinvertebrados bentônicos (invertebrados maiores de 0,20 mm que habitam os substratos de fundo de ambientes aquáticos) foram analisados dados de monitoramentos trimestrais realizados pelas UHEs Risoleta Neves, Baguari e Aimorés, entre 2011 e 2018 (de 09/12 a 03/18 nas estações da UHE Risoleta Neves, de 07/12 a 01/18 nas da UHE Baguari e de 03/11 a 06/17 nas da UHE Aimorés), conforme metodologia descrita em Visão Ambiental (2013) e Micra (2013, 2018). Os períodos anterior e posterior ao desastre foram comparados em 17 estações de amostragem de ambiente fluvial e três em reservatórios, sendo analisados indicadores da comunidade (riqueza, diversidade, densidade/número total de organismos) e índice biológico que classifica a qualidade ambiental (*Biological Monitoring Work Party*) (adaptado por JUNQUEIRA *et al.*, 2000). A escala de classificação de dano elaborada para os macroinvertebrados bentônicos encontra-se descrita na Tabela 44.

Tabela 44 – Classificação dos danos aos macroinvertebrados bentônicos

Categoria do dano	Critérios para classificação
Pouco grave	Redução no valor dos indicadores na maioria dos gráficos de séries temporais, sem aumento na proporção dos valores mínimos dos indicadores.
Grave	Redução no valor dos indicadores na maioria dos gráficos de séries temporais, com aumento na proporção dos valores mínimos dos indicadores.
Gravíssimo	Redução no valor dos indicadores na maioria dos gráficos de séries temporais, com aumento na proporção dos valores mínimos dos indicadores e diferença significativa na análise de comparações múltiplas (LSD de Fisher).

Os dados de macroinvertebrados bentônicos do monitoramento emergencial (ECONSERVATION, 2016) e do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimento (GOLDER ASSOCIATES, 2017) realizados pela Fundação Renova e dados produzidos pelo Lactec (segundo metodologia de CETESB, 2003 e 2012 e APHA, 2017) também foram estudados, entretanto esses estudos foram iniciados após o desastre, portanto não apresentam linha-base que possibilite a mensuração adequada do dano.

4.2.7 PEIXES

Foram definidos no ambiente fluvial um total de 26 pontos amostrais ao longo da bacia do rio Doce, abrangendo a calha principal e seus principais afluentes. Os pontos contemplam toda a extensão da passagem da lama até a foz, distribuindo-se pelos três compartimentos.

As coletas da ictiofauna tiveram seu esforço de pesca sistematizado (para cálculos de captura por unidade de esforço - CPUE). As amostragens quantitativas foram padronizadas com a finalidade de comparação de dados de abundância e esforço.

Para a amostragem foram utilizados os seguintes petrechos de pesca: redes de emalhe de tamanhos variando de 1,5 a 16 cm de entre nós, tarrafas, rede de arrasto manual e puçás (Figura 85).

Figura 85 – Métodos de coleta utilizados para a captura dos peixes: (a) rede de espera; (b) rede de arrasto; (c) tarrafa e; (d) puçá.



Fonte: Lactec.

Para a avaliação das alterações nos indicadores ecológicos e descrição dos danos, além dos dados de linha-base, foram considerados como valor de referência os resultados obtidos nas amostragens realizadas em 2016/2017 pela SAMARCO após o rompimento da barragem de Fundão, dados de monitoramento dos reservatórios das usinas hidrelétricas presentes na calha do rio Doce, que apresentaram a mesma abrangência espacial e os mesmos amostradores das coletas realizadas pelo Lactec. Também foram utilizados como referência dados de diagnósticos realizados na região do delta do rio Doce e várzeas litorâneas em Linhares, no Espírito Santo (CEA, 2001; CAL, 2001).

Além dos dados de linha-base e levantamentos de dados primários foi realizada uma modelagem matemática para a avaliação da alteração da dinâmica populacional da ictiofauna. Os modelos matemáticos consistem em expressões matemáticas ou regras de comportamento que podem ser usadas para descrever ou prever processos ecológicos (PASTOROK *et al.*, 2002). Esses modelos são ferramentas especialmente importantes quando testes experimentais são inviáveis, como no caso do desastre da Samarco. Diversos modelos populacionais têm sido utilizados para estimar o impacto de alterações ambientais sobre a dinâmica populacional de espécies de peixes (e.g. JAGER, 2001, BAGGIO *et al.*, 2018, BRITO *et al.*, 2017), mas que em sua maioria têm sido descritos para espécies e condições específicas.

Para a avaliação do dano no rio Doce foi desenvolvido um modelo matemático baseado em indivíduo (do inglês *Individual Based Model - IBM*) com o objetivo de estimar a dinâmica populacional esperada ao longo do tempo para populações de peixes da APDL, considerando: (a) as condições específicas encontradas nos trechos avaliados; e (b) cenários alternativos que simulam a recuperação ambiental da APDL, pressão de pesca e realização de peixamento. O modelo foi implementado para as espécies de Cascudo, *Hypostomus affinis*, e da Piranha-Vermelha, *Pygocentrus nattereri*.

Tais espécies foram selecionadas por apresentarem características biológicas, morfológicas e ecológicas distintas, permitindo um diagnóstico mais abrangente dos danos causados pela lama de rejeitos sobre a ictiofauna da APDL. Ainda, essas são espécies que apresentaram número de indivíduos coletados suficientes para as estimativas confiáveis dos parâmetros reprodutivos e de mortalidade.

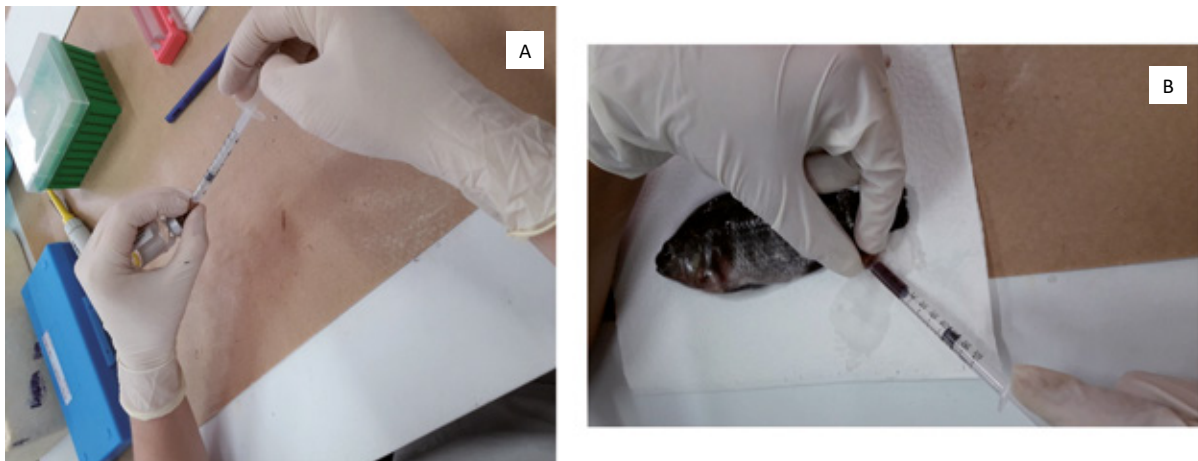
A classificação de gravidade sobre os danos à ictiofauna está sintetizada na Tabela 45.

Tabela 45 – Descrição da classificação da gravidade dos danos referentes à ictiofauna.

Categoria de dano	CrITÉRIOS para classificação
Pouco Grave	Indicadores ecológicos não apresentaram uma diminuição significativa em relação aos dados de linha-base ou apresentaram pequenas variações que segundo a bibliografia especializada não são intensas o suficiente para provocar danos irreversíveis à comunidade de peixes
Grave	Indicadores ecológicos revelaram uma diminuição em relação aos dados de linha de base ou uma indicação de estresse ambiental, porém com tendência de redução e sinais de retorno às condições anteriores ao desastre
Gravíssimo	Indicadores ecológicos, além de revelarem a existência de uma assembleia simplificada, dominada por poucas espécies de hábito generalista, também não apresentam sinais evidentes de redução

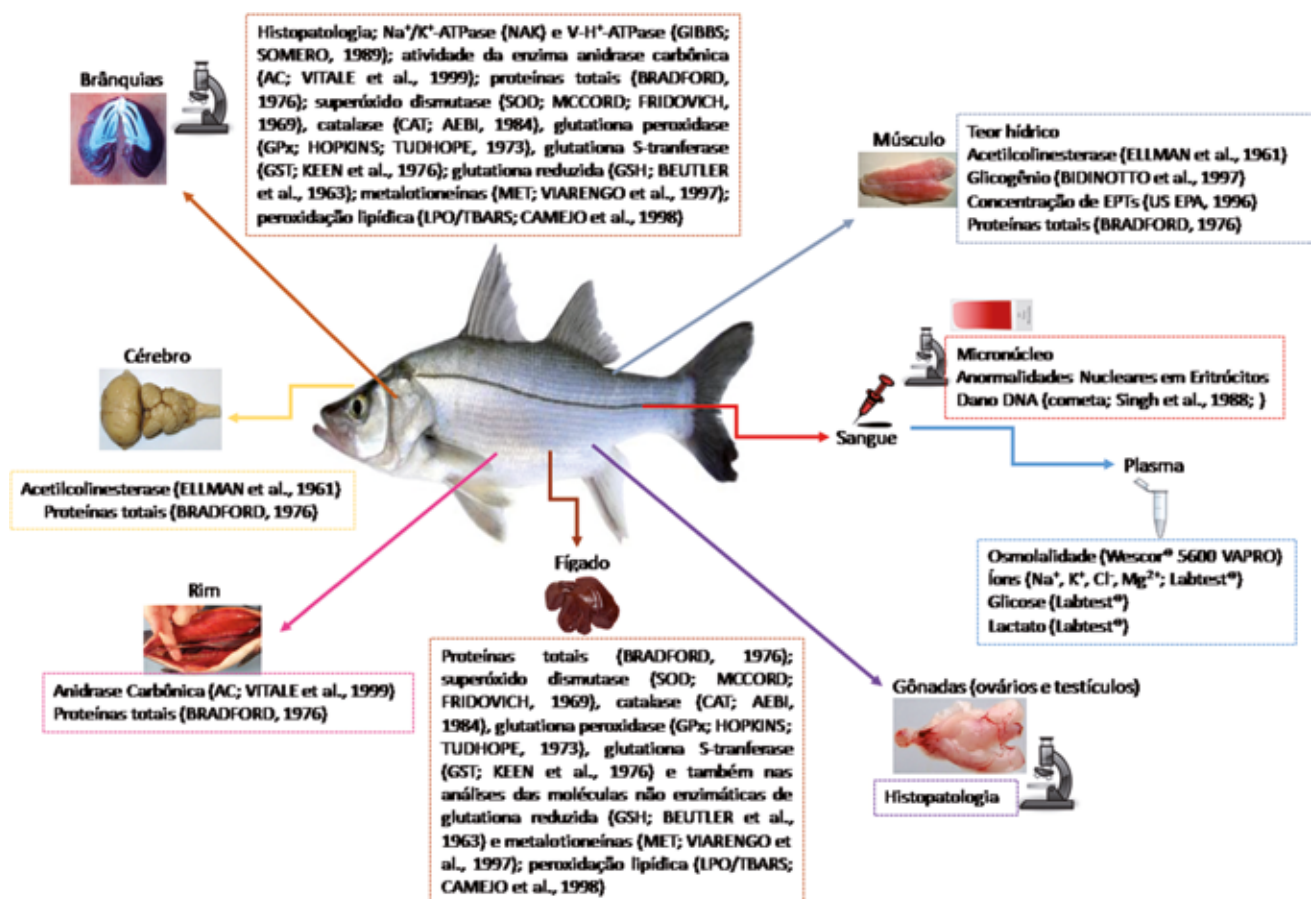
Para a avaliação ecotoxicológica da ictiofauna (peixes) de água doce foram definidos pontos distribuídos ao longo dos três compartimentos. Em cada um dos compartimentos foram estabelecidos três pontos, os quais foram escolhidos de modo a contemplar um local por onde houve a passagem ou deposição da onda de lama (DA), um ponto controle negativo (CN, livre de possíveis interferentes antrópicos diretos) e um controle positivo (CP). Foram considerados como controle positivo ambientes que além de degradados por fontes de contaminação antrópica (humana) apresentavam problemas de deterioração ou alteração das condições ambientais, aproximando-se das características locais previamente descritas para a região (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017 a, b). No C1 (Figura 72), além dos três pontos citados, foram amostrados os peixes no Dique S4. Foram amostrados, sempre que possível, 10 indivíduos de três espécies pertencentes a três diferentes hábitos alimentares (n total = 30 por ponto). As amostragens dos peixes foram realizadas através de metodologias de captura consagradas na área de ictiologia, respeitando os protocolos e petrechos adequados aos ambientes e tamanho dos indivíduos. Esforço adicional de captura, através de pesca com vara, foi empregado para complementação do número amostral e/ou para obtenção de espécies com hábito alimentar específico. Após captura os peixes foram anestesiados (total ausência de reações e estímulos de toque), medidos (comprimento total), pesados (peso total) e tiveram sangue retirado (Figura 86). Em seguida, tiveram tecidos retirados (brânquias, rim, fígado, músculo, cérebro, gônadas) para serem utilizados nas análises dos diferentes biomarcadores (genotoxicidade/mutagenicidade, metabólicos, fisiológicos, bioquímicos, moleculares, estruturais e para avaliação do aumento da concentração de EPTs) conforme resumido no esquema da Figura 87.

Figura 86 – a) Preparação da seringa com heparina para coleta de sangue; b) Obtenção de sangue



Fonte: Lactec.

Figura 87 – Esquema de todas as análises realizadas em cada um dos tecidos retirados dos peixes amostrados.



Elaborado por: Lactec.

Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente para o conjunto dos peixes capturados em cada um dos pontos e, também, para os peixes agrupados por ordem e por hábito alimentar. A definição do dano se deu através da comparação entre os resultados encontrados para os peixes capturados nos pontos diretamente afetados pela passagem da onda de lama (DA) em relação aos peixes capturados nos pontos controle positivo (condição de linha-base de cada um dos compartimentos) e controle negativo (livre da passagem da onda de lama). Além disso, foram comparados a estudos realizados previamente nos pontos de coleta (linha-base; quando existente) e também com dados disponíveis na literatura que avaliaram os mesmos biomarcadores em peixes expostos a contaminação por EPTs.

Os resultados ecotoxicológicos aqui apresentados correspondem àqueles obtidos em duas fases de campo realizadas nas estações seca (junho/julho) e chuvosa (outubro/novembro) de 2018. Portanto, os danos não serão classificados nesse momento, uma vez que para uma melhor conclusão é necessária a obtenção dos resultados de um ciclo sazonal completo, ou seja, um ano (= quatro campanhas).

4.2.8 QUELÔNIOS

Para o desenvolvimento do estudo referente aos quelônios dulcícolas, primeiramente foi realizado o levantamento dos dados secundários disponíveis na literatura especializada sobre o tema, no intuito de conhecer as espécies ocorrentes na região abrangida e, eventualmente, dados relacionados à parâmetros reprodutivos, dinâmica populacional ou ainda, informações a respeito de possíveis contaminantes presentes nos organismos.

Os dados primários foram obtidos por meio de amostragem em pontos pré-determinados ao longo da calha do rio Doce e seus tributários afetados (16), em alguns afluentes (9) e em ambientes lacustres (4). Os pontos amostrais localizados onde houve a passagem efetiva da pluma de lama de rejeitos foram consideradas áreas afetadas, enquanto que os pontos em afluentes e ambiente lacustre foram designados como controle.

Para as capturas de espécimes do grupo temático foram utilizadas redes de espera, armadilhas do tipo covo e puçás (Figura 88). Também foram realizadas buscas por registros de espécimes por meio de caminhamentos pelas margens dos corpos hídricos e em embarcações com motor de popa, no intuito de realizar censo populacional.

Os espécimes capturados passaram por biometrias (Figura 88D), foram marcados e, havendo condições, tiveram amostras de sangue e tecido coletadas para possibilitar análises sobre presença de contaminantes.

Figura 88 – Métodos de captura de quelônios: (a) rede de espera; (b) armadilha do tipo covão; (c) busca noturna. Em (d) mostra-se biometria em espécime de cágado-de-barbicha (*Phrynops geoffroanus*).



Fonte: Lactec.

4.3 DANOS À MORFOLOGIA DOS CURSOS D'ÁGUA

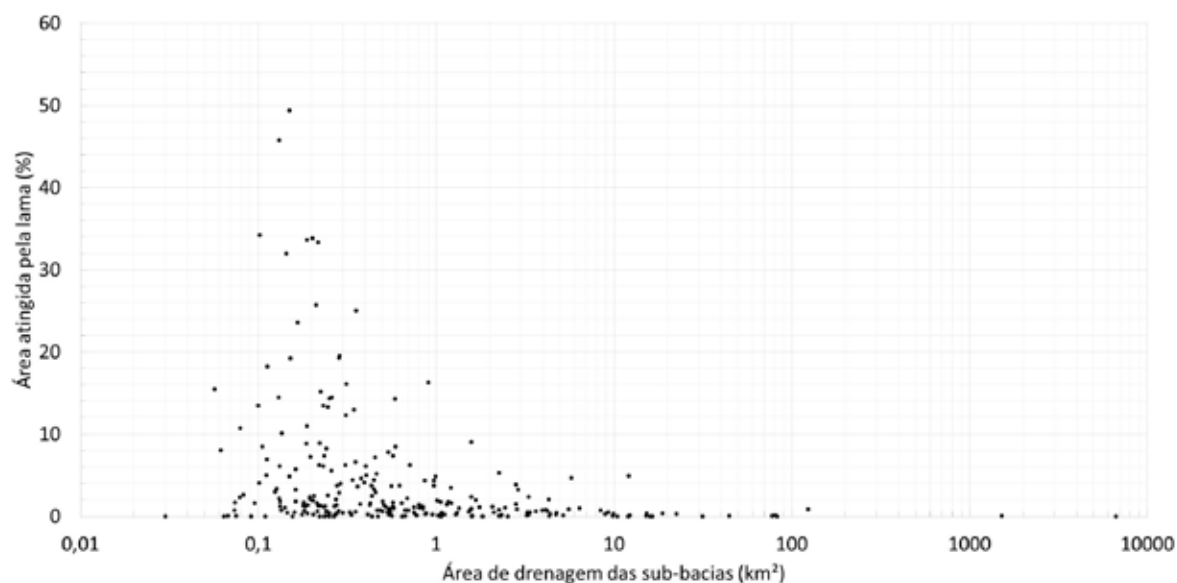
A força da passagem da onda de rejeitos e, posteriormente, sua deposição alteraram a morfologia (forma) dos cursos d'água, com maior intensidade no trecho até a UHE Risoleta Neves. Essas alterações incluem a área de drenagem e configuração da rede de drenagem dos cursos de água, além do soterramento de cavas e açudes.

4.3.1 ALTERAÇÃO NA ÁREA DE DRENAGEM DOS CURSOS DE ÁGUA

Considerando-se que a superfície da bacia hidrográfica atua na captação da água da precipitação e que a produção de água para o sistema fluvial é proporcional à área de drenagem da bacia, essa premissa foi utilizada para avaliar o dano provocado pela passagem e deposição da lama nas sub-bacias dos afluentes ao trecho considerado.

Na Figura 89 pode ser observada a proporção de área afetada pela passagem e deposição da lama em relação a área de drenagem total das sub-bacias dos 253 afluentes que desaguam no trecho entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves.

Figura 89 – Proporção da área atingida pela lama em relação à área de drenagem das sub-bacias.



Elaborado por: Lactec.

Destaca-se que nenhuma das nascentes mapeadas nos afluentes está localizada na APDL. Ou seja, as nascentes que dão origem aos afluentes do trecho considerado não sofreram danos com o desastre.

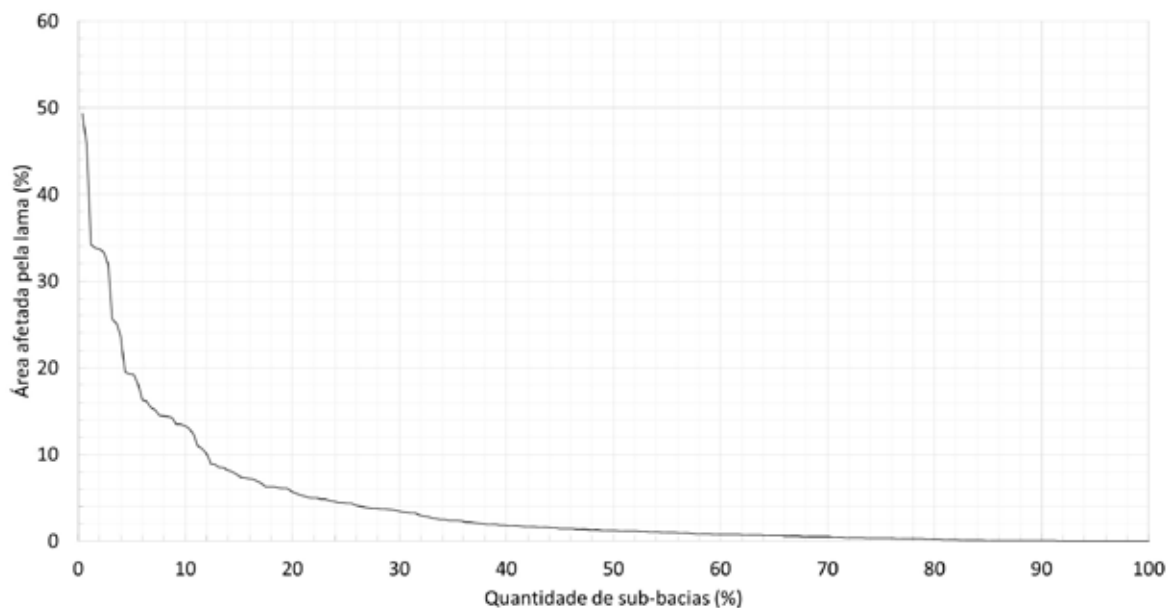
Embora os menores afluentes tenham uma proporção considerável da área de drenagem afetada, a parte atingida pela lama está localizada no trecho final das sub-bacias, nas áreas mais próximas da confluência com o rio principal. Como em nenhum caso a área afetada foi superior a 50% da área total da sub-bacia, as nascentes que naturalmente estão localizadas nas porções mais elevadas não foram atingidas.

No entanto, as águas dos rios não provem unicamente das nascentes e sim do conjunto do sistema fluvial. Não foram identificadas modificações nas características das sub-bacias que pudessem alterar a disponibilidade hídrica em termos quantitativos. Entretanto, em termos qualitativos, as áreas das sub-bacias afetadas pelo desastre apresentaram alteração. Ou seja, embora a quantidade de água disponível não tenha sido alterada, a qualidade da água nas regiões das sub-bacias que estão dentro da APDL ficou comprometida.

Com relação à abrangência do dano, este esteve restrito aos trechos finais dos afluentes e foram proporcionais à área atingida de cada sub-bacia. As porções das sub-bacias que não foram atingidas pela lama não sofreram nenhum dano e a disponibilidade hídrica permaneceu inalterada.

O dano foi considerado pouco grave de acordo com a metodologia proposta, uma vez que menos de 20% das sub-bacias tiveram pelo menos 10% de suas áreas de drenagem afetadas, conforme ilustrado na Figura 90.

Figura 90 – Proporção da área atingida pela lama em relação à quantidade de sub-bacias.



Elaborado por: Lactec.

As proporções de área afetadas pela lama nas sub-bacias não mudaram com o tempo, deste modo o dano foi considerado cessado e irreversível pois, embora as sub-bacias devam retornar naturalmente ao seu estado no instante do pré-desastre, o intervalo de tempo necessário para esta mudança é muito longo.

4.3.2 ALTERAÇÃO NA CONFIGURAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DOS CURSOS DE ÁGUA

A análise global (Tabela 46), considerando todas as estações na bacia afluente ao reservatório da UHE mostrou valores típicos para rios localizados em ambientes úmidos (expoente de largura b próximo de 0,5, expoente de profundidade f próximo de 0,4 e expoente de velocidade m próximo de 0,1) segundo Leopold e Maddok (1953). Alterações de 9,1% foram encontradas no expoente b .

Tabela 46 – Expoentes para elementos geométricos na bacia do rio Doce

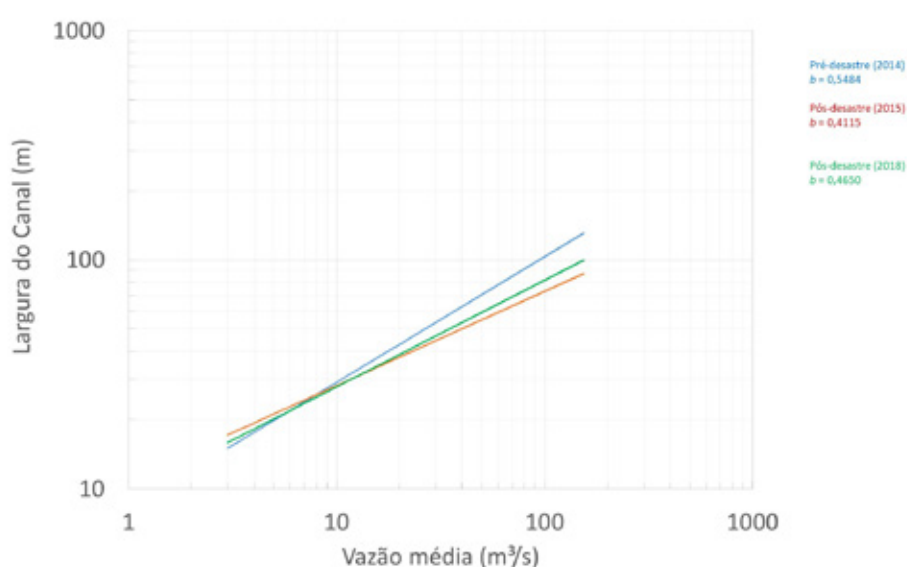
Expoente	Pré-evento	Pós-evento	Variação
b	0,4740	0,5169	9,1%
f	0,3189	0,3165	-0,8%
m	0,2070	0,1666	-19,5%

Considerando apenas a estação localizada dentro da APDL (56337000, localizada no rio Gualaxo do Norte) nos períodos de 01/01/2010 a 05/11/2015 (pré-desastre) e de 06/11/2015 a 30/11/2018 (pós-desastre) com resultados apresentados na Tabela 47, houve uma alteração significativa nos expoentes da velocidade e profundidade.

Tabela 47 – Expoentes dos elementos geométricos para a Fazenda Ocidente.

Expoente	Pré-desastre	Pós-desastre	Variação
b	0,028	0,027	-3,6%
f	0,300	0,511	70,3%
m	0,672	0,446	-33,6%

Neste local (estação 56337000) o sistema fluvial foi afetado pelo desastre, com modificações em características do canal que anteriormente estavam ajustadas às condições naturais deste ambiente. É razoável que variações na largura sejam pequenas, como apresentado na Fazenda Ocidente, pois estações fluviométricas são comumente localizadas em trechos menos sinuosos dos rios. No entanto, foi possível identificar variações significativas na largura do rio na terceira análise, considerando toda a calha do rio ao longo do C1 (Figura 91).

Figura 91 – Evolução da largura média do canal fluvial em relação a vazão média no trecho entre Fundão e UHE Risoleta Neves.

Elaborado por: Lactec.

Para a condição pré-desastre (Figura 91, linha azul) obteve-se um valor de 0,5484 para o expoente b . Este resultado é similar 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. Na condição imediatamente pós-desastre (Figura 91, linha vermelha) percebe-se uma redução pronunciada no valor do expoente b (0,4115), enquanto na condição pós-desastre mais recente (Figura 91, linha verde) nota-se que este mesmo expoente assume um valor intermediário (0,4650) entre as duas situações anteriores.

Essas variações significativas do expoente b reforçam que ocorreu uma perturbação no ajuste das características geométricas do canal fluvial no trecho analisado.

Estes resultados indicaram que o sistema fluvial foi afetado pelo desastre, com modificações nas características do canal pela passagem da onda de rejeito. Como anteriormente o sistema fluvial estava ajustado às condições naturais do ambiente em termos regionais, essa nova configuração

pós-desastre poderá ser modificada ao longo do tempo pela dinâmica hidrológica da bacia, quando da ocorrência de eventos extremos.

Com relação à abrangência do dano, este está associado ao trecho fluvial mais danificado pela passagem e deposição da lama, a jusante da barragem de Fundão e a montante da UHE Risoleta Neves. Este trecho tem extensão de aproximadamente 109 km e envolve um segmento do córrego Santarém, quase a totalidade do rio Gualaxo do Norte, Carmo e um segmento do rio Doce. Como as maiores alterações do expoente da largura ficaram acima de 20% na condição imediatamente após o desastre (cerca de 25%, de 0,5484 para 0,4115), o dano foi considerado gravíssimo, de acordo com a Tabela 33.

Quanto a tendência e a reversibilidade do dano, os resultados indicaram que a geometria hidráulica do canal fluvial no trecho considerado vem sofrendo ajustes no período pós-desastre e tende a retornar às condições existentes anteriores ao desastre. Entretanto este retorno demandará um tempo muito longo de modo que foi considerado um dano irreversível.

4.3.3 SOTERRAMENTO DE CAVAS E AÇUDES

O fluxo de lama de rejeitos que passou pelo rio Doce e extravasou para fora da calha soterrou parcialmente ou completamente cavas, açudes e lagoas marginais pré-existentes.

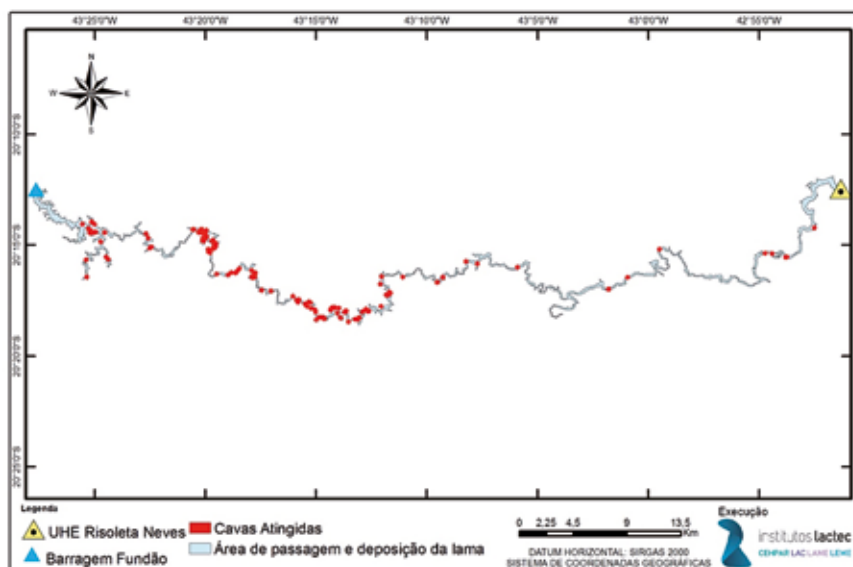
As feições atingidas foram identificadas por meio de avaliação visual de imagens orbitais, considerando os limites da APDL. Esse levantamento foi realizado apenas no C1, entre a antiga barragem de rejeito de Fundão e a UHE Risoleta Neves.

Independente da origem destas feições, elas desempenham um serviço ecossistêmico de grande relevância para a preservação, reprodução e manutenção da biota aquática. Durante os períodos de cheias dos rios esses ambientes se conectam com os rios e com a diminuição da vazão perdem a ligação (ARAÚJO *et al.*, 2002). Nestes locais ocorrem altas taxas de ciclagem de nutrientes e de produção primária (LIMA *et al.*, 2010).

Uma das principais funções ecológicas destas feições está relacionada à reprodução e desenvolvimento dos peixes. Estes ambientes servem como viveiros naturais para as espécies, sendo de suma importância para a sua sobrevivência (ARAÚJO *et al.*, 2002). As feições são colonizadas pelos peixes quando estão ligadas aos rios, sendo importantes para o recrutamento das populações (GODINHO e GODINHO 2003; LIMA *et al.*, 2010). A variação no nível dessas lagoas durante o ano provoca alterações estruturais nas assembleias de peixes, pois os ovos, larvas e juvenis sofrem influências diretas do nível da água (LIMA *et al.*, 2010). Essas características desse tipo de ambiente são um dos fatores mais importantes para a manutenção da biodiversidade de peixes (LIMA *et al.*, 2010). A permanência de algumas espécies nesses ambientes está associada a existência de variações entre as espécies quanto as estratégias de vida, essas variações são de densidade, biomassa e diferentes níveis tróficos explorados (ZEUG *et al.*, 2005).

Após as análises foram contabilizadas um total 161 feições afetadas, sendo 115 classificadas como antrópicas, 36 como naturais e 10 indefinidas (Figura 92).

Figura 92 – Localização das cavas atingidas pela lama de rejeito entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves.



Execução: Lactec.

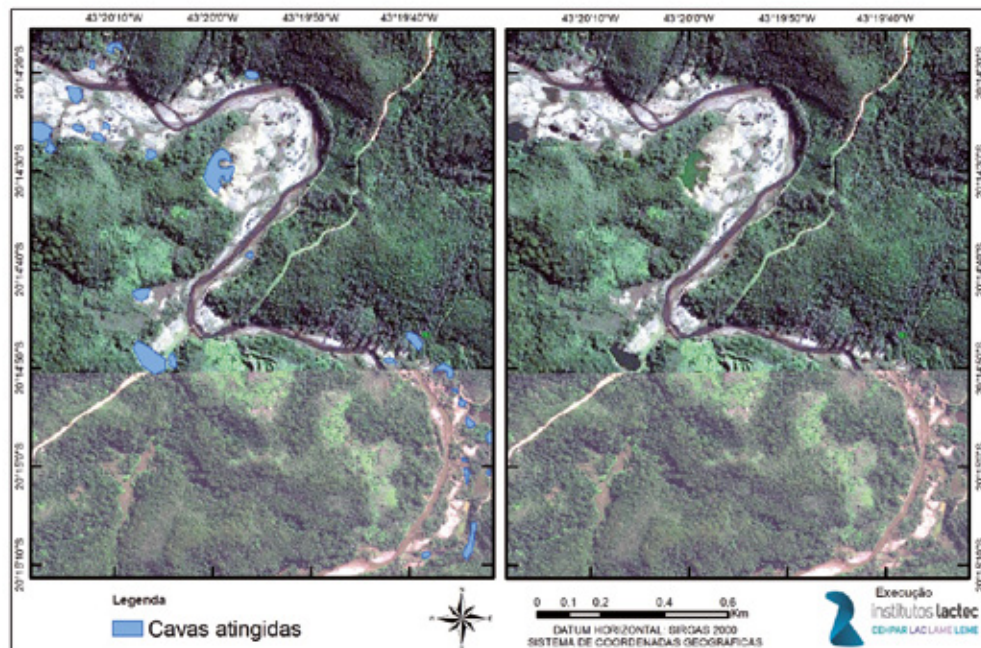
A Tabela 48 apresenta, de forma resumida, os quantitativos em área e a classificação resultante do processo de mapeamento e análise de imagens orbitais.

Tabela 48 – Quantitativos das cavas atingidas pela lama de rejeito.

Quantitativo / classificação	Antrópico	Natural	Indefinido	Total
Unidade	115	36	10	161
Área em m ²	63.283,92	13.107,96	4.906,42	81.298,32
Área em ha	6,3283	1,3107	0,4906	8,1298

A Figura 93 mostra, de forma esquemática, o mapeamento de algumas dessas feições em uma área situada à jusante de Bento Rodrigues e à montante de Barra Longa.

Figura 93 – Exemplo de uma área com o mapeamento da área afetada e seu correspondente ao lado.



Execução: Lactec.

A perda ou redução dessas feições causa danos diretos a estrutura da comunidade íctica, pois houve perda dos locais de desova, berçários, áreas de desenvolvimento e de proteção contra predação. Esse dano provoca redução na taxa de recrutamento das espécies, acarretando na redução da diversidade da comunidade íctica, sendo um efeito de grande gravidade uma vez que esses locais foram extintos. Esse dano é classificado como gravíssimo e considerado irreversível.

4.4 DANOS À QUALIDADE DAS ÁGUAS

O volume de rejeitos despejado nos corpos hídricos alterou sobremaneira a qualidade das águas na região, afetando seus usuários e a vida aquática. A redução do OD aliado ao aumento da concentração de sólidos e EPTs na água são os danos imediatos advindos do desastre. Entretanto, destaca-se também a dificuldade no tratamento da água bruta para abastecimento público, amplificando ainda mais a extensão dos danos.

Ressalta-se que neste capítulo não serão apresentados danos às águas subterrâneas, uma vez que os mesmos não foram confirmados. Os resultados obtidos até o momento estão apresentados no capítulo 4.10.1.

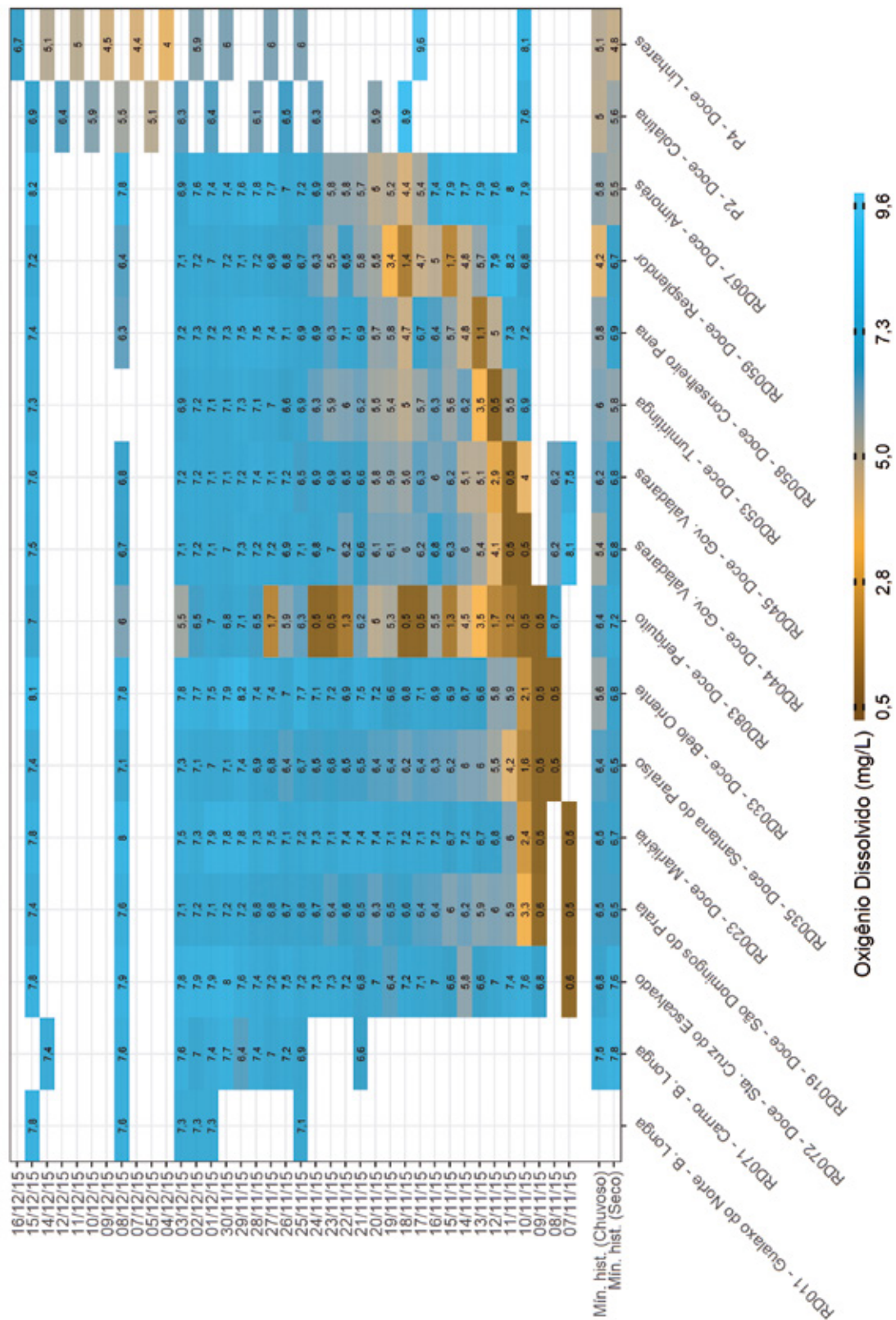
4.4.1 REDUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) NA ÁGUA

Com a passagem da lama, notou-se decréscimo nas concentrações de OD na água superficial, inclusive, com registro de valores abaixo de 1 mg/L até o município de Tumiritinga (MG). Contudo, as próprias características hidrodinâmicas dos rios atingidos favoreceram a reaeração do meio e, portanto, a introdução de oxigênio no meio líquido, amenizando o dano. Em todas as estações localizadas em Minas Gerais, por exemplo, as concentrações já se apresentavam de acordo com o limite legislado no final de novembro/2015. Desse modo, considerou-se que este dano foi cessado. Esse dano apresentou menor duração em relação aos outros identificados, visto que em um menor intervalo de tempo já foram verificadas concentrações de oxigênio atendendo ao mínimo legislado (5 mg/L), e dentro da escala de gravidade o dano foi considerado pouco grave. Porém, os baixos valores registrados nos primeiros dias após o rompimento configuraram um cenário anóxico letal para a grande maioria das espécies de peixes e outros componentes da biota local.

Nos reservatórios hidrelétricos, onde a água fica represada por mais tempo, no primeiro monitoramento pós-desastre (entre dezembro/2015 e janeiro/2016) foram observadas concentrações de OD abaixo dos mínimos históricos pré-desastre, de modo geral. Na lagoa Nova, foram detectados valores de OD inferiores ao limite legislado no primeiro mês de monitoramento após a cheia de janeiro/2016, sendo que com o tempo, o referido limite passou a ser atendido.

Na Figura 94 estão apresentadas as concentrações de OD nos rios atingidos pela lama ao longo dos municípios de Barra Longa (MG) e Linhares (ES), entre novembro/2015 e dezembro/2015. Valores de OD mais críticos foram representados por meio da cor marrom.

Figura 94 – Concentrações de OD na água ao longo da APDL (novembro/2015 a dezembro/2015)



Elaborado por: Lactec.

4.4.2 AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS NA ÁGUA

Este dano foi avaliado a partir de três indicadores: turbidez (UNT), concentração de sólidos dissolvidos totais (mg/L) e de sólidos suspensos totais (mg/L) na água. Nos primeiros dias após o rompimento, chegaram a ser registrados valores de turbidez entre 400.000 e 600.000 UNT entre a barragem de Fundão e a barragem da UHE Baguari (C1 e C2A), ultrapassando os máximos históricos pré-desastre entre 1,5 mil e duas mil vezes, sendo o limite legislado de 100 UNT. Para os valores de sólidos suspensos totais, nos mesmos compartimentos, foram registrados valores de até 300.000 mg/L, ultrapassando o máximo histórico em até 1,3 mil vezes, sendo o limite da classe 2 de 100 mg/L. Para os sólidos dissolvidos totais, a concentração máxima registrada a partir do desastre foi de 2.110 mg/L, no município de Conselheiro Pena (MG), ultrapassando o máximo histórico em 16 vezes, sendo o limite legislado de 500 mg/L.

Em novembro/2015, os indicadores turbidez e sólidos suspensos totais foram classificados na categoria C, conforme metodologia, enquanto que para os sólidos dissolvidos totais a classificação foi na categoria B. Desse modo, o dano foi considerado gravíssimo.

Com o aumento da distância em relação à barragem de Fundão, a ordem de grandeza dos valores de turbidez e de sólidos suspensos totais diminuiu, mas ainda em situação distante do que se observava antes do evento de rompimento. Ao longo do tempo, os valores também tiveram sua ordem de grandeza reduzida, tanto nos rios quanto nos reservatórios hidrelétricos. Contudo, é importante mencionar que mesmo no ano de 2018 foram registrados valores superando a linha-base, mas não na frequência como ocorrido logo após o rompimento. Portanto, esse dano tendeu a reduzir. Na lagoa Nova, logo após a cheia de janeiro/2016, registrou-se turbidez de 531 UNT, sendo que com o tempo os valores diminuíram, estando de acordo com o limite legislado.

A turbidez elevada da água, ilustrada na Figura 95, pode comprometer ou impedir o tratamento das águas para fins de abastecimento público, além de diminuir a transparência e a luminosidade na coluna da água dos corpos hídricos, afetando a biota aquática.

Figura 95 – Rio do Carmo, a montante da confluência com o rio Piranga, em 28/09/2015 (foto à esquerda) e em 03/12/2015 (foto à direita).



Fonte: Visão Ambiental (2015 a, b).

4.4.3 AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS NA ÁGUA

No tocante ao dano relacionado ao aumento da concentração de EPTs na água, com a passagem da lama de rejeitos, as alterações foram mais expressivas para os indicadores Fe dissolvido, Mn total e Al dissolvido, ao longo de todos os compartimentos avaliados. Tais elementos apresentaram-se em maior proporção na caracterização do rejeito. Para o Pb total, nos C 1 e C3, as alterações também foram mais expressivas. A maior parte dos resultados desses indicadores foi classificada, para o período de novembro 2015, na categoria C. Desse modo, o dano foi considerado gravíssimo.

Com o passar do tempo, concentrações não tão elevadas quanto às registradas logo após o desastre passaram a ocorrer, de modo que o dano tendeu a reduzir. Apesar disso, para esses indicadores, ainda no ano de 2018 foram observados ao longo dos compartimentos valores superando os máximos históricos pré-desastre e os limites legislados, em algum momento, o que indica que as condições de linha-base ainda não foram retomadas.

As alterações relacionadas ao As total, Cd total, Cu dissolvido, Hg total e Ni total foram menores em termos de intensidade e duração quando em comparação com os indicadores Fe dissolvido, Mn total, Al dissolvido e Pb total. Contudo, estes indicadores também apresentaram elevação de valores, inclusive superando os máximos históricos pré-desastre. Assim, mesmo que por um tempo menor, a elevação da concentração desses elementos na água pode ter sido suficiente para que causasse alterações na biota, dado ainda seu potencial tóxico.

Para se ter uma ideia das alterações ocorridas, a Tabela 49 apresenta em quantas vezes o limite legislado chegou a ser ultrapassado em algum local da APDL, no ano de 2015, após o rompimento da barragem de Fundão, para os indicadores analisados. Por exemplo, para o Mn total, o valor máximo registrado foi de 936 mg/L, o que corresponde a um valor 9.360 vezes superior ao limite legislado de 0,1 mg/L. Essa situação ocorreu no município de Marliéria (MG) no dia 07/11/2015. A tabela a seguir também mostra a classificação dos indicadores de acordo com as categorias A, B e C, em novembro/2015, por compartimento avaliado.

Tabela 49 – Classificação para cada EPT e alterações em relação ao limite legislado

Indicador	Gravidade por compartimento	Nº de vezes em que chegou a superar o limite legislado
Al dissolvido	Categoria C (1, 2A, 2B e 3)	320
As total	Categoria A (1, 2A, 2B e 3)	10
CD total	Categoria A (1, 2A, 2B e 3)	34
Pb total	Categoria C (1 e 3)	165
	Categoria B (2A)	
	Categoria A (2B)	
Cu dissolvido	Categoria A (1, 2A, 2B e 3)	75
Cr total	Categoria A (1 e 2)	57
	Categoria B (3)	
Fe dissolvido	Categoria C (1, 2A, 2B e 3)	107
Hg total	Categoria A (1, 2A, 2B e 3)	4,4
Mn total	Categoria C (1, 2A, 2B e 3)	9.360
Ni total	Categoria A (1, 2A, 2B e 3)	90

Nos reservatórios hidrelétricos (UHE Risoleta Neves, UHE Baguari e UHE Aimorés), para o Fe dissolvido e o Mn total, os valores das medianas do período pós-desastre (novembro/2015 a dezembro/2018) passaram a ser maiores do que as do pré-desastre, indicando alterações nesses ambientes também. A UHE Mascarenhas não possui série histórica consistente para EPTs.

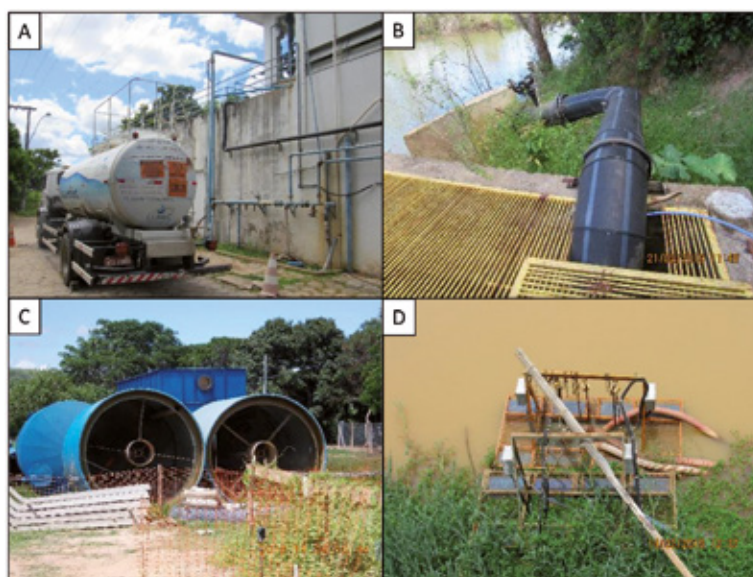
Em particular para a lagoa Nova, localizada no município de Linhares (ES), a partir do início do seu monitoramento em fevereiro/2016, foram observadas concentrações elevadas de EPTs em desconformidade com a legislação. Estes valores elevados não voltaram a ocorrer ao longo do restante do período analisado (até o final do ano de 2018). Todavia, não há dados de outras cheias semelhantes à de janeiro/2016 para que seja possível afirmar se são características que ocorrem naturalmente em períodos de cheia ou se tais valores foram decorrentes do desastre.

4.4.4 DANO AO USO DA ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO

O Sistema de Abastecimento de Água (SAA) é um conjunto de componentes que busca produzir e distribuir água a uma comunidade, em quantidade e qualidade compatíveis com as necessidades da população, para fins de consumo doméstico, serviços públicos e outros usos (TSUTIYA, 2006). Em virtude das alterações na qualidade da água dos rios Gualaxo do Norte, Doce e Carmo, os sistemas de abastecimento de água que dependiam destes rios como fonte de água bruta foram paralisados, pois as tecnologias presentes nas estações de tratamento não eram capazes de produzir água potável proveniente destes mananciais contaminados (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016).

Assim, entre os 39 municípios localizados ao longo dos rios afetados, 18 localidades tiveram seus sistemas de abastecimento diretamente inviabilizados temporariamente (Tabela 50), causando diversas adversidades na operação dos SAA como os exemplos apresentados na Figura 96 (IBAMA, 2016).

Figura 96 – Sistemas de abastecimento de água afetados: a) Caminhão-pipa alimentando a ETA de Mascarenhas- ES com água tratada proveniente da Sede Municipal; b) Nova adutora de água bruta da ETA Sede de Linhares; c) Materiais da nova ETA para ser instalada em Galileia e d) Ponto de captação de água no rio Doce da Sede de Colatina.



Fonte: Lactec.

Tabela 50 – Tempo de paralisação do fornecimento de água potável de cada localidade afetada.

LOCALIDADE	TEMPO DE PARALISAÇÃO
Barra longa – Distrito de Gesteira	N/D ⁽¹⁾
Belo Oriente – Distrito de Perpétuo Socorro	1 ano
Periquito – Distrito de Pedra Corrida	12 dias
Alpercata – Sede	10 dias
Governador Valadares – Sede	11 dias ⁽²⁾
Governador Valadares – Distrito de São Vítor	11 dias
Tumiritinga – Sede	60 dias
Tumiritinga - Distrito de S. Tomé do R. Doce	N/D ⁽¹⁾
Galileia – Sede	6 dias
Resplendor – Sede	Atualmente
Itueta – Sede	Atualmente
Aimorés – Distrito de Sto. Antônio do Rio Doce	Atualmente
Baixo Guandu – Sede	0 dias
Baixo Guandu – Distrito de Mascarenhas	Atualmente
Colatina – Sede	5 dias ⁽²⁾
Marilândia – Distrito de Boninsega	Atualmente
Linhares – Sede	0 dias
Linhares – Distrito de Regência	Atualmente

⁽¹⁾ Informação não disponível.

⁽²⁾ Tempo médio entre as ETAs da localidade.

Após as percepções obtidas durante as visitas e as análises dos resultados da água distribuída por esses SAA afetados, classificou-se o dano ao abastecimento público como gravíssimo, com tendência de redução e parcialmente reversível.

Logo após o desastre, a Samarco/Fundação Renova promoveu a distribuição de água para as localidades atingidas através de caminhões-pipa enquanto os SAA permaneceram desativados. Em algumas localidades, como Resplendor, Itueta, Sto. Antônio do Rio Doce, Boninsega e Regência, devido a diversos fatores, ainda permanece a distribuição de água de forma emergencial. Nos SAA que retornaram à operação, observou-se que a água proveniente do rio Doce está sendo tratada pelos sistemas de tratamento, porém há maiores dificuldades no tratamento nos períodos chuvosos, devido à elevação de turbidez. Os resultados dos laudos para os EPTs mostraram que, de forma geral, a qualidade da água tratada dos municípios, na maioria dos casos, atende os padrões estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde. Entretanto, é fundamental ressaltar que foram encontradas evidências de inconformidades em relação ao Valor Máximo Permitido (VMP) na água tratada para algumas substâncias, como, por exemplo, Fe, Al e Mn.

4.5 DANOS ÀS COMUNIDADES PLANCTÔNICAS

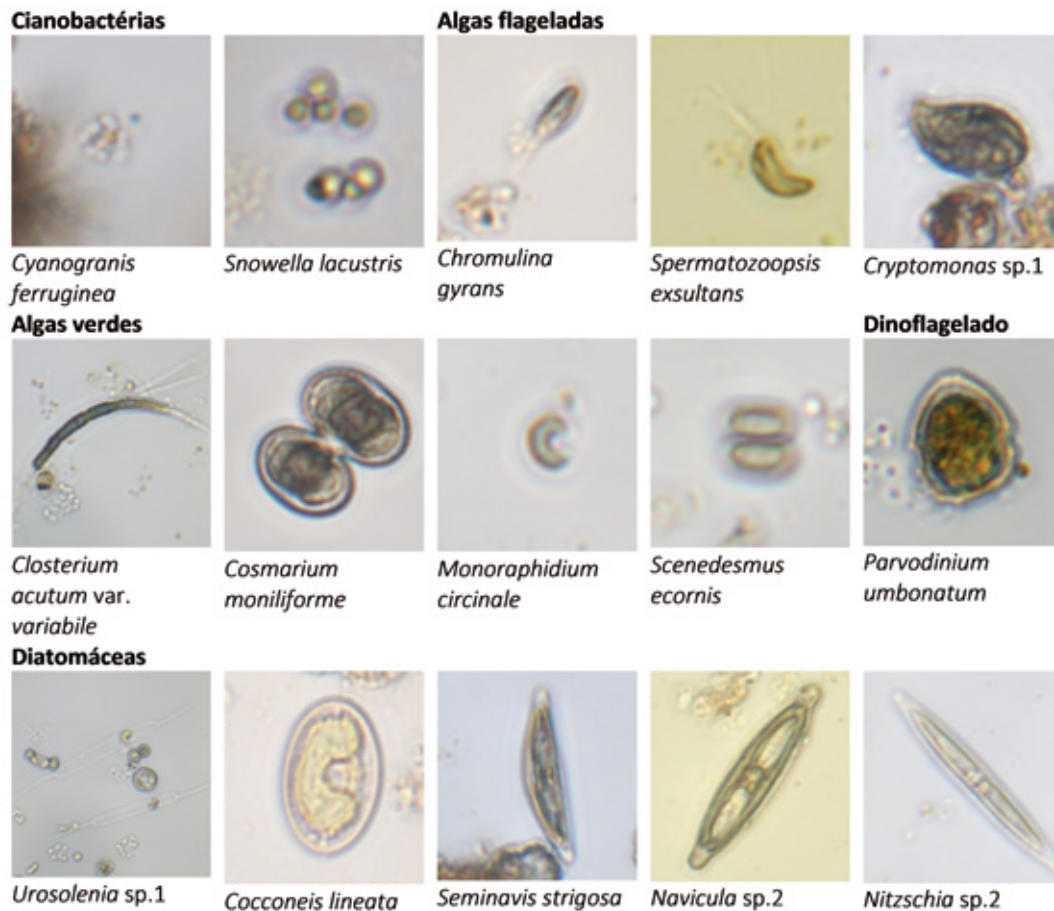
As comunidades planctônicas, aqui representadas pelo fitoplâncton (microalgas) e zooplâncton (animais microscópicos), são indicadores da qualidade da água, além de serem a base da cadeia alimentar no ambiente aquático. O desastre afetou profundamente as duas comunidades e, por consequência, toda a cadeia trófica nos corpos d'água onde houve a passagem e deposição da lama.

4.5.1 ALTERAÇÃO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

O dano à comunidade fitoplanctônica foi considerado gravíssimo e irreversível para os rios e reservatórios avaliados, pois ocorreram alterações na composição e na estrutura da comunidade de microalgas, e esta mudança apresentou tendência de estabilidade ou de aumento, ou seja, a comunidade formada após o desastre está se mantendo constante ou ainda se alterando em resposta ao evento, sem tendência ao retorno das condições originais.

Logo após o desastre (dezembro/2015-janeiro/2016), observou-se um dano agudo sobre o fitoplâncton, com ausência ou diminuição drástica no número de espécies e densidade de organismos. A passagem da lama de rejeitos pela calha do rio Doce e alguns tributários ocasionou a elevação da turbidez da água pelo aumento das partículas em suspensão. Com isso, houve o estabelecimento de uma nova comunidade de microalgas após o desastre (Figura 97), formada especialmente por organismos de crescimento acelerado e mais aptos a sobreviver em condições de menor luminosidade. Entretanto, estas espécies pioneiras provavelmente serão substituídas sucessivamente por outras à medida que a comunidade procure atingir sua estrutura e composição originais. Ressalva-se que, a depender da intensidade da perturbação do meio, a comunidade tenderá a se reconstruir mais lentamente e poderá não voltar a suas condições naturais. Assim, é possível que o fitoplâncton apresente alterações futuras em resposta ao dano sofrido com a passagem da lama de rejeitos.

Figura 97 – Ilustração de alguns representantes do fitoplâncton encontrados nos ambientes aquáticos continentais.

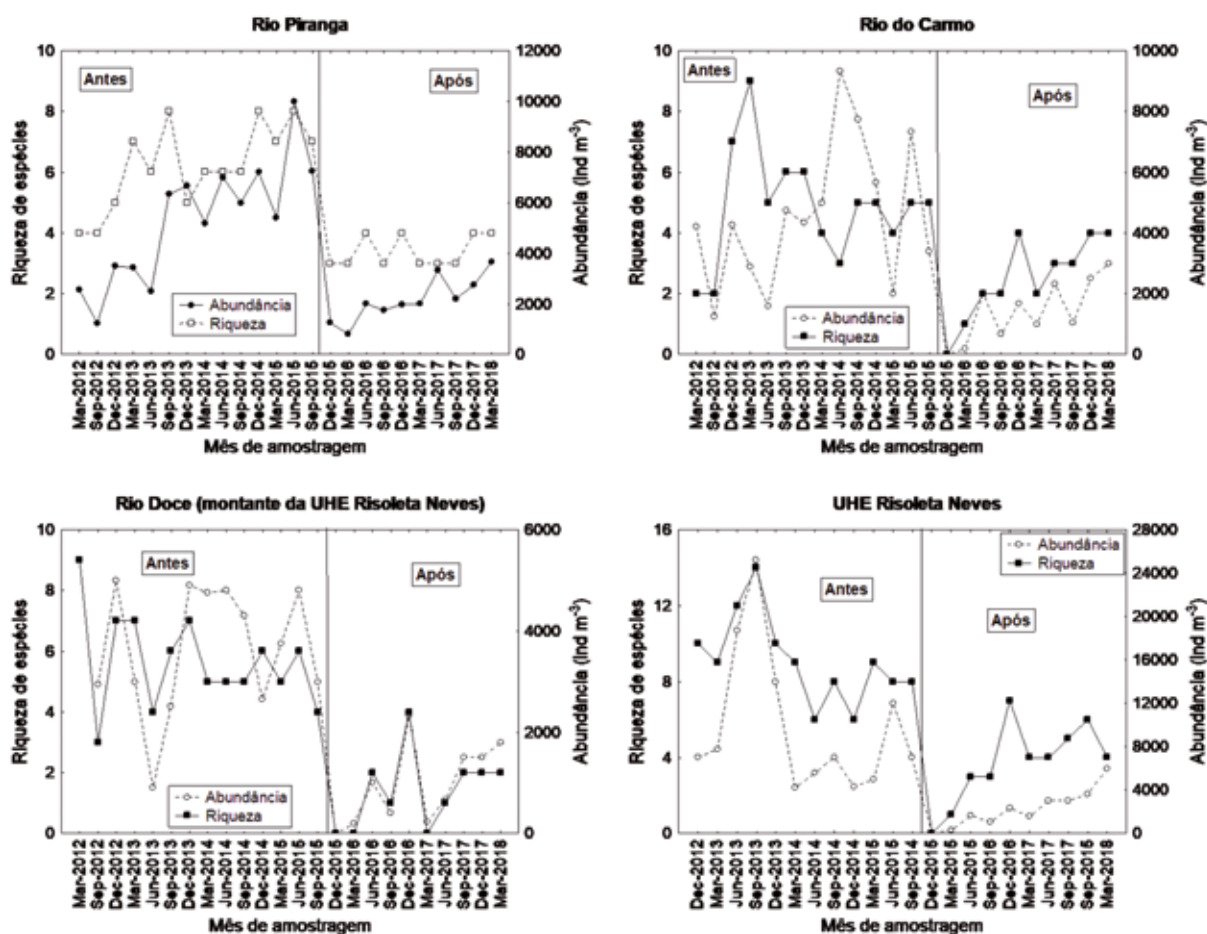


Fonte: Lactec.

4.5.2 ALTERAÇÕES NAS COMUNIDADES ZOOPLANCTÔNICAS

Os resultados apontaram que, no C1, a riqueza e abundância do zooplâncton reduziram drasticamente no momento logo após o desastre, chegando a haver a ausência de organismos em algumas estações amostrais (Figura 98). Dados das campanhas do Lactec e de estudo realizado por GIAIA (2016) corroboraram a informação. O valor máximo de riqueza, nas estações de rio, reduziu em 60% e de abundância em 98%. Para a estação de reservatório da UHE Risoleta Neves, houve redução do valor máximo em 50% para a riqueza e 76% para a abundância. Portanto, o dano nesse compartimento é gravíssimo, irreversível e com tendência de aumento se as condições ambientais continuarem como o observado. Embora esses organismos possuam uma elevada capacidade de suportar as alterações ambientais, a ausência de fontes de espécies, como tributários com maior biodiversidade, pode não permitir a manutenção e o estabelecimento de novas populações.

Figura 98 – Riqueza e abundância registrada em diferentes estações amostrais no C1. A linha vertical, em cada gráfico, representa o momento do desastre. Dados obtidos do monitoramento da usina hidrelétrica Risoleta Neves.



Elaborado por: Lactec.

Para o C2A, de cinco estações de rio do monitoramento da UHE Baguari, duas delas apresentaram redução da abundância, com valor máximo de 16% e 68% abaixo daquele encontrado antes do desastre. Para a estação de reservatório da UHE Baguari houve redução de menos de 25% da riqueza de espécies, e entre 25% e 50% na abundância dos indivíduos. Dessa forma, considerando o pior cenário observado nesse trecho, o dano foi considerado grave, parcialmente reversível e com tendência de redução. No C2B houve redução de mais de 50% da abundância em todas as estações de amostragem do ambiente fluvial, e da riqueza de espécies na maioria das estações. Dessa forma, o dano foi considerado gravíssimo e estabilizado. O dano nesse compartimento foi considerado irreversível, pois não há indicativos, até o momento, de retorno dos valores àqueles encontrados na linha-base, porém, espera-se que o ambiente volte a alcançar um equilíbrio ecológico. Já para a UHE Aimorés o dano foi considerado grave, parcialmente reversível e com tendência de estabilização, já que o valor máximo de riqueza reduziu mais de 50% e de abundância menos que 25%. No C3 havia poucas informações de monitoramentos do zooplâncton, e por isso o dano não foi classificado, porém, os dados existentes para esse compartimento sugerem alterações mais brandas se comparado aos demais compartimentos, com a tendência de recuperação da biota.

Na Figura 99 é possível observar algumas espécies que ocorreram nas estações amostrais da ADPL nos monitoramentos do Lactec, após o desastre.

Figura 99 – Exemplos de espécies zooplanctônicas que ocorreram nas estações da APDL nos monitoramentos do Lactec, após o desastre. da esquerda para a direita: Rotífera, Cladocea e Copepoda. *Kellicottia bostoniensis* (rotífero) é uma espécie invasora.



Fonte: Lactec.

Em geral, espera-se no futuro o restabelecimento da comunidade em toda a APDL caso as condições ambientais se tornem mais favoráveis à recolonização do ambiente. No entanto, o cenário ambiental após o desastre dificilmente será equivalente ao cenário anterior, especialmente nos C1 e C2. Medidas de mitigação e restauração dos ecossistemas poderão e deverão auxiliar o cenário futuro.

4.6 DANOS À FLORA AQUÁTICA

A lama de rejeitos que atingiu os corpos d'água e as regiões das várzeas suprimiu parte da vegetação presente na região, além da perda dos recursos vegetais e a biodiversidade nesse local.

4.6.1 SUPRESSÃO DE VEGETAÇÃO NATIVA

A passagem da onda de rejeito suprimiu ambientes de vegetação com influência fluvial (várzeas) dentro do C1. O dano foi calculado através do mapeamento das áreas de várzea que foram removidas. No total foram computados 67,39 hectares desta vegetação, valor este que corresponde a 7,84% do total de formações nativas suprimidas neste compartimento (Figura 100).

Figura 100 – Aspecto das áreas de várzea estudadas.



Fonte: Lactec.

Este dano ocorreu no C1, foi considerado grave devido à perda em área da vegetação suprimida, entretanto está cessado e a tendência é de que as espécies gradualmente recolonizem estes ambientes, sendo, portanto, reversível.

4.6.2 PERDA DA BIODIVERSIDADE DE FLORA

Este dano foi verificado com base no número de espécies de flora aquática e ribeirinha afetadas pela passagem da lama. Para isso foram consideradas as espécies de reófitas, macrófitas aquáticas e vegetação de várzeas (Figura 101). Pelo fato destes grupos estarem permanentemente em contato com o rio, para o cálculo deste indicador foram avaliadas as espécies presentes nestes ambientes ao longo de todos os compartimentos.

A Tabela 51 a seguir apresenta um resumo do número total de espécies encontradas por grupo, bem como as ameaçadas de extinção, endêmicas ou protegidas.

Tabela 51 – Resumo do quantitativo de espécies encontradas por grupo.

Grupo	Nº de Espécies	Nº Espécies Ameaçadas	Nº Espécies Endêmicas	Nº Espécies Protegidas
Reófitas	31	0	0	0
Macrófitas Aquáticas	215	0	0	1
Várzeas	289	2	0	3

Figura 101 – Aspecto da vegetação aquática encontrada nos locais de estudo.



Fonte: Lactec.

Este dano ocorreu nos três compartimentos e, devido ao número de espécies afetadas, foi considerado gravíssimo. Entretanto está cessado e é reversível à medida que as espécies recolonizam os ambientes.

4.6.3 PERDA DE RECURSOS FLORESTAIS NÃO MADEIREIROS

Este dano foi oriundo da quantificação de espécies afetadas pelo desastre que possuem potenciais utilizações reconhecidas em bibliografias (Figura 102). Para definir as classes e potencialidade de uso humano, foi adaptada uma classificação combinando as categorias sugeridas em FUNDAÇÃO BIODIVERSITAS (2006) e Crepaldi (2007). A quantidade de espécies encontradas e classificadas por grupo encontra-se discriminada na Tabela 52.

Tabela 52 – Usos e potencialidades das espécies de flora aquática encontradas.

UTILIZAÇÃO	GRUPO		
	Várzeas	Reófitas	Macrófitas
Medicinal	88	6	68
Alimentício	39	1	26
Construção	8	0	0
Ambiental	9	0	1
Ornamental	27	2	16
Ritualístico	4	1	2
Lenha	5	0	2
Tecnológico	20	0	7

Figura 102 – Exemplos de espécies com usos e potencialidades identificados.



Fonte: Lactec.

Este dano ocorreu nos três compartimentos, foi considerado gravíssimo devido ao número de espécies afetadas, entretanto está cessado e é reversível à medida em que estas espécies recolonizam as áreas e os recursos sejam novamente disponibilizados no ambiente.

4.7 DANOS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE DOS SEDIMENTOS

A grande quantidade de rejeitos disponibilizados aos corpos d'água afetou diretamente a dinâmica de transporte de sedimentos ao longo do rio Doce, provocando assoreamento do canal do rio e dos reservatórios hidrelétricos existentes ao longo do trecho de passagem da lama de rejeitos.

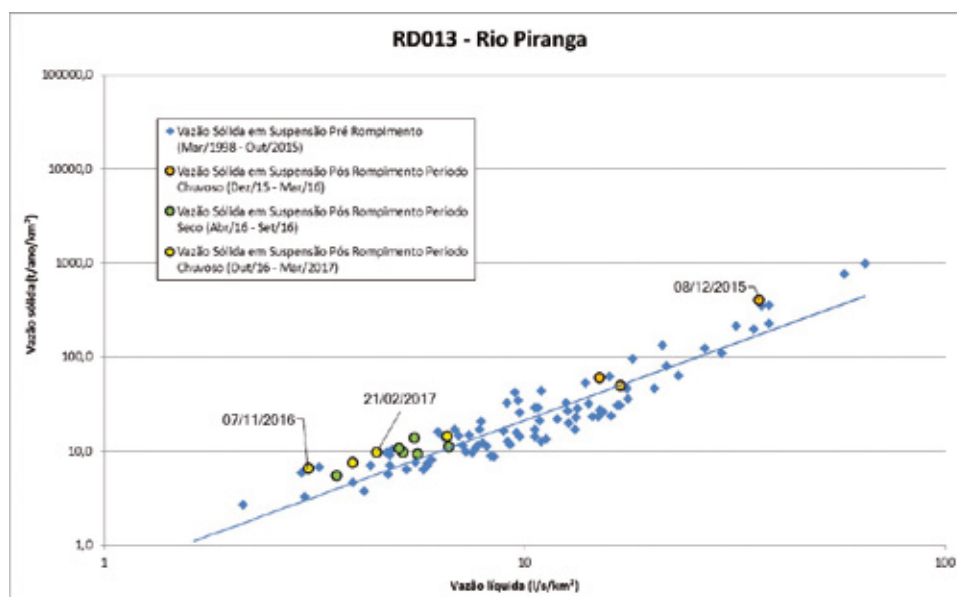
4.7.1 ALTERAÇÃO DA DINÂMICA DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS AO LONGO DO RIO DOCE

Inicialmente foi verificado se houve alteração na dinâmica de transporte de sedimentos nos afluentes do rio Doce, sendo que nenhum afluente apresentou uma diferença considerável se comparado com os dados históricos. A grande distância das estações de monitoramento até a sua foz com o rio Doce (57 km no caso da estação RD013, Figura 103) pode ser a causa disso.

No rio Doce, os postos mais próximos ao local do rompimento, mesmo localizados a jusante do reservatório da UHE Risoleta Neves, apresentaram valores altos com uma leve tendência de baixa nas medições mais recentes (período seco e chuvoso 2016/2017), como é o caso da estação RD023 (Figura 104), localizada entre os municípios de Marliéria e Pingo d'Água.

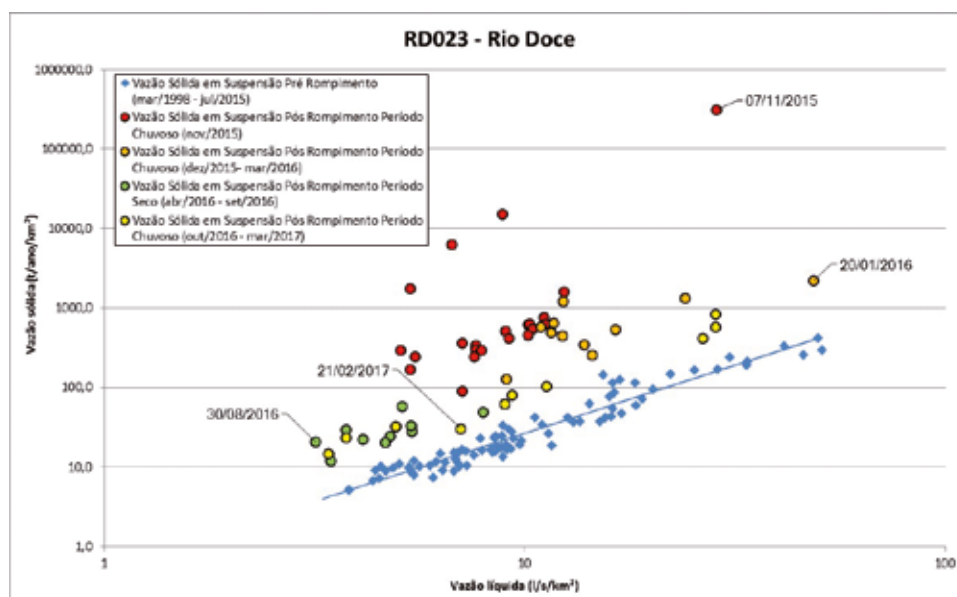
À medida que foram analisados dados mais a jusante no rio Doce, percebeu-se uma tendência de aproximação com a linha de tendência natural nos períodos seco e chuvoso dos anos de 2016 e 2017, ou seja, os dados mais recentes. Este é o caso da estação RD044 (Figura 105), localizada em Governador Valadares.

Figura 103 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD013.



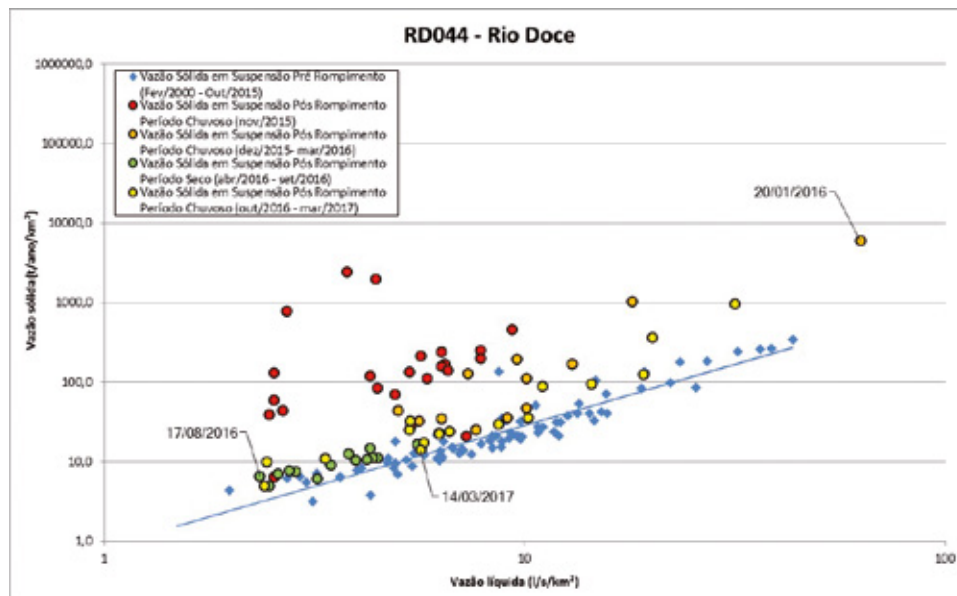
Elaborado por: Lactec.

Figura 104 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD023.



Elaborado por: Lactec.

Figura 105 – Alterações no transporte de sedimentos na estação RD044.



Elaborado por: Lactec.

A partir da análise dos resultados apresentados de curvas de vazão sólida, observa-se:

- Os afluentes do rio Doce nos pontos monitorados podem ser considerados como não afetados pelo evento de rompimento nos locais de medição analisados;
- Um aumento nas descargas sólidas logo depois do rompimento, seguido de uma diminuição temporal, com valores de descarga sólida menores desde 2016 até a atualidade. Esta tendência de diminuição da concentração foi notada seja a estação do IGAM ou da ANA.

Observaram-se acréscimos importantes no aporte de sedimentos às estações, variando de 17,6% a 1695,3% no período pós-desastre. Valores estes considerando a aplicação das curvas chaves de sedimentos à série histórica de vazões. Mesmo considerando que podem ter ocorrido possíveis manobras de comportas para liberação de volume de depósitos de fundo anteriores ao rompimento, estes valores caracterizaram uma magnitude de outra ordem de grandeza.

Em relação a tendência verificada, todas as análises sugeriram que as quantidades de sedimentos transportadas pelo rio Doce estão diminuindo ao longo dos últimos anos desde a ocorrência do rompimento até a atualidade. Inclusive muitos pontos já demonstraram valores de concentração de sólidos em suspensão similares aos observados no período pré-desastre ou similares à faixa natural sugerida pela modelagem. Os trabalhos de Magris *et al.*, (2019) e Rudorff *et al.*, (2018) também sugeriram esta tendência de retorno a um estado natural. Esta tendência provavelmente é observada devido às ações de recuperação realizadas em algumas partes da bacia (para diminuir a erosão e o aporte de materiais depositados nas planícies) e certamente à consolidação (deposição) ou à remoção natural dos sedimentos que vem ocorrendo na bacia pela própria ação do ciclo hidrossedimentológico.

Assim, a tendência verificada para este dano foi que ele tende a reduzir, na medida em que os sedimentos depositados pelo rompimento vão sendo imobilizados ou removidos pelos processos de erosão e transporte de sedimentos que ocorrem nas áreas afetadas.

Na mesma linha, este dano pôde ser considerado parcialmente reversível com o tempo, uma vez que a ação do ciclo hidrossedimentológico tende a restabelecer as concentrações naturais com o passar do tempo. Todavia, a data exata de quando o dano poderá ser considerado totalmente cessado não pode ser precisada no momento, uma vez que grandes eventos chuvosos, grandes cheias ou até processos antrópicos devem mobilizar parte de sedimentos que não foram consolidados ou removidos ainda.

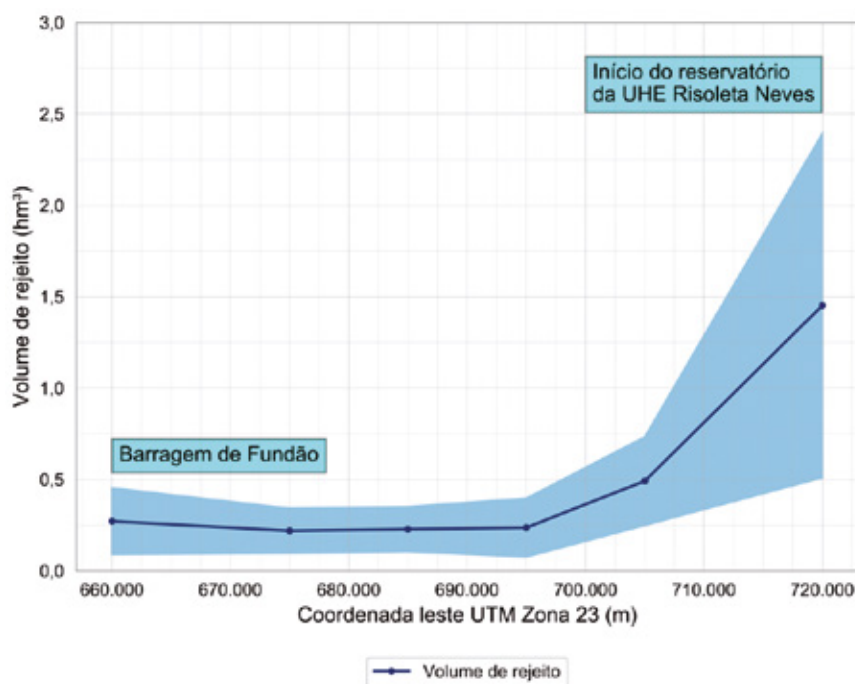
Portanto, dadas as alterações verificadas e os critérios adotados, o dano foi qualificado como grave.

4.7.2 ASSOREAMENTO DO CANAL DO RIO

O volume total de rejeitos depositados no interior do rio, na área que abrange o C1, foi de 2,90 hm³, podendo variar de 1,13 hm³ a 4,67 hm³. O valor estimado por Golder Associates (2016) para a mesma região foi de 2,8 hm³ e 3,7 hm³ usando dois métodos distintos. A espessura média de todos os trechos resultou em $0,63 \pm 0,46$ metros de rejeito, já o resultado obtido por Golder Associates (2016) foi de 0,65 metros. A Figura 106 mostra graficamente a variação do volume acumulado do rejeito de montante para jusante.

O assoreamento do rio no C1 foi considerado gravíssimo já que o acúmulo foi maior do que 0,67 hm³. Em relação a tendência, foi classificado como tende a reduzir já que o sedimento tende a ressuspender, sendo propagado ao longo do rio e se acumulando em regiões de fluxos mais calmos como os reservatórios. O dano foi considerado parcialmente reversível já que existe uma complexidade muito grande para identificar e retirar o rejeito de toda a calha do rio.

Figura 106 – Variação espacial do volume de rejeito depositado na calha do rio (C1).



Elaborado por: Lactec.

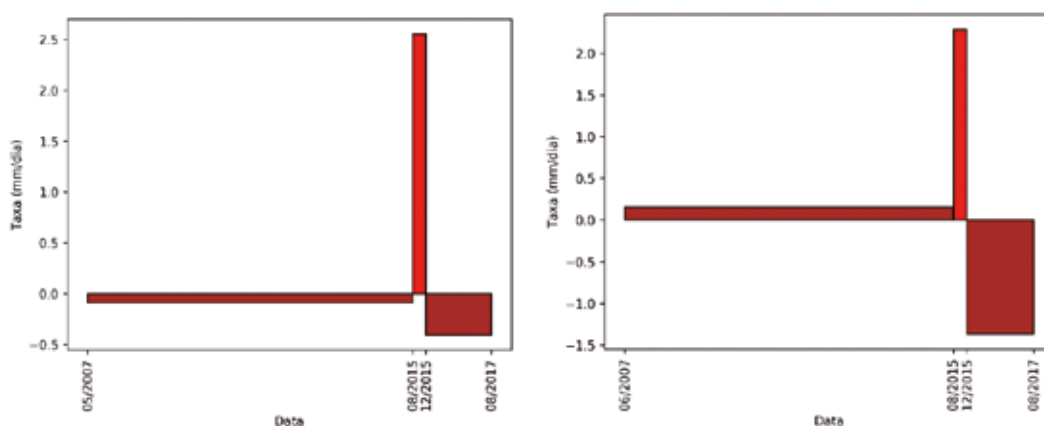
Na Figura 107 estão apresentados os resultados das estimativas das taxas de erosão/sedimentação para os C2 e C3. Valores positivos significam deposição e valores negativos significam erosão no intervalo analisado. De uma forma geral as estações Fazenda Cachoeira Dantas (56425000) e Colatina (56994500) apresentaram uma taxa maior de deposição no leito no período de ocorrência do rompimento, possivelmente relacionado com o evento (Figura 107). A deposição durante o evento foi mais pronunciada em comparação com as séries históricas nas estações Fazenda Cachoeira Dantas (56425000) e Cachoeira dos Óculos (56539000), situadas mais próximas do local de ocorrência do rompimento. Já em Colatina, no trecho final do rio Doce, o valor de deposição encontrado não foi expressivamente maior do que valores históricos visualizados.

Nos períodos subsequentes ao intervalo do rompimento, todas as estações mostraram a ocorrência de taxas de erosão (valores negativos) condizentes com os valores históricos, porém levemente superior. A abrangência verificada para o dano foi todo o rio Doce nos C2 e C3.

Em relação a tendência verificada, como foram mantidas as taxas de erosão do rio Doce após o rompimento, não é possível afirmar que este sedimento vai ser totalmente retirado em algum momento. Mesmo que os períodos subsequentes ao rompimento indiquem ocorrência de erosão. É possível sim que trechos do rio tenham atingindo uma nova condição estável considerando estes sedimentos que se depositaram. Inclusive análises que são apresentadas para o dano anterior sugerem que as quantidades de sedimentos transportadas pelo rio Doce estão diminuindo ao longo dos últimos anos desde a ocorrência do rompimento até a atualidade, chegando a números na mesma ordem dos valores pré-desastre. Assim, a tendência verificada para este dano é de que ele está estabilizado.

Esse dano foi considerado grave. O sedimento depositado pode ser removido ao longo do tempo ou ser incorporado ao sistema na forma de depósitos. E isto pode acontecer em diferentes trechos do rio. Por isto este dano pode ser considerado parcialmente reversível.

Figura 107 – Sumário dos resultados da análise da variação da espessura dos depósitos usando dados observados de seções transversais, C2 (Fazenda Rio Dantas) na esquerda e C3 (Colatina) na direita. A barra vermelha refere-se ao período em que ocorreu o desastre.



Elaborado por: Lactec.

4.7.3 ASSOREAMENTO DOS RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS

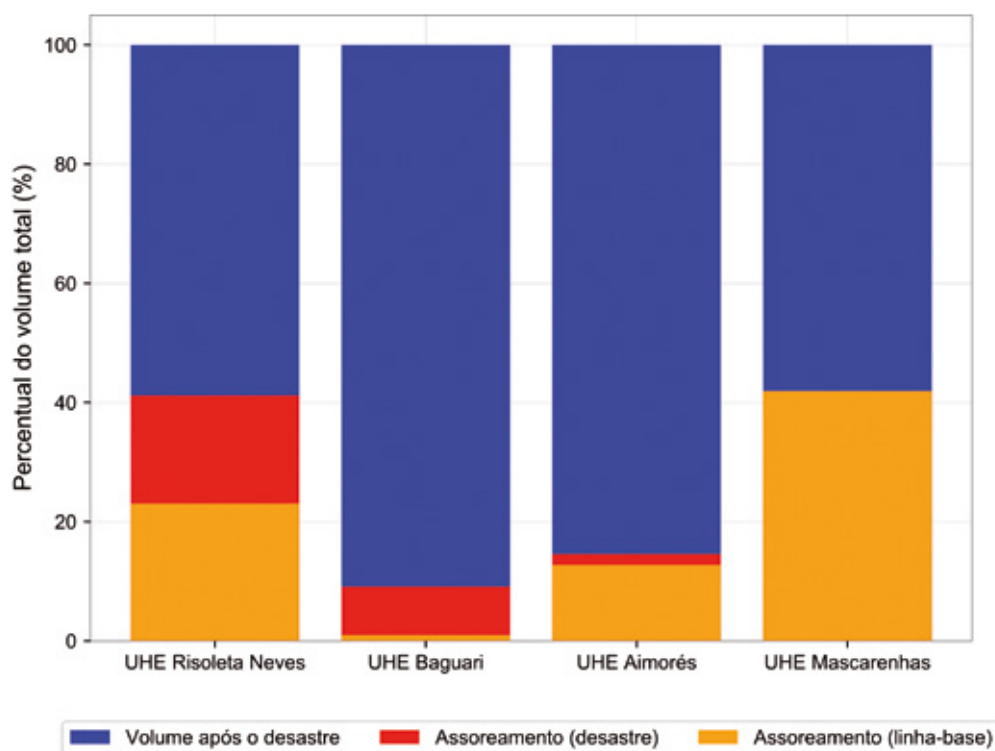
O resultado da avaliação do assoreamento dos reservatórios foi o volume de rejeito acumulado excluindo-se a deposição “natural”. Para fins comparativos, os dados de assoreamento estão apresentados na Figura 108 em termos de porcentagem do volume total do reservatório no início de sua operação. Adicionalmente, nesta Figura pode ser observado o volume assoreado no período pré-desastre.

A UHE Risoleta Neves teve 18% do seu volume total assoreado pelo desastre, a UHE Baguari teve 8% e a UHE Aimorés 2%. Este decaimento nos valores era esperado já que os reservatórios estão ordenados de forma que o reservatório mais próximo da barragem de Fundão é apresentado por primeiro. No caso do reservatório da UHE Mascarenhas, o reservatório já se encontrava com nível de assoreamento alto e o último levantamento batimétrico após o desastre indicou erosão no reservatório ao invés de assoreamento. Não é possível afirmar com certeza o motivo dessa erosão.

O dano foi classificado como gravíssimo na UHE Risoleta Neves (C1) pelo fato de praticamente todo o volume útil do reservatório ter sido assoreado e inutilizado inicialmente para a geração de energia. O dano de assoreamento do reservatório da UHE Baguari foi considerado grave (C2) e da UHE Aimorés pouco grave (C2) pela menor magnitude do assoreamento e pelo fato do arranjo destas usinas permitir o transporte de sedimentos para jusante do barramento em futuras vazões extremas.

O dano de assoreamento nos reservatórios foi classificado também como tendendo a reduzir e parcialmente reversível.

Figura 108 – Porcentagem do volume assoreado em relação ao volume total do reservatório.



Elaborado por: Lactec.

4.8 DANOS À QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS

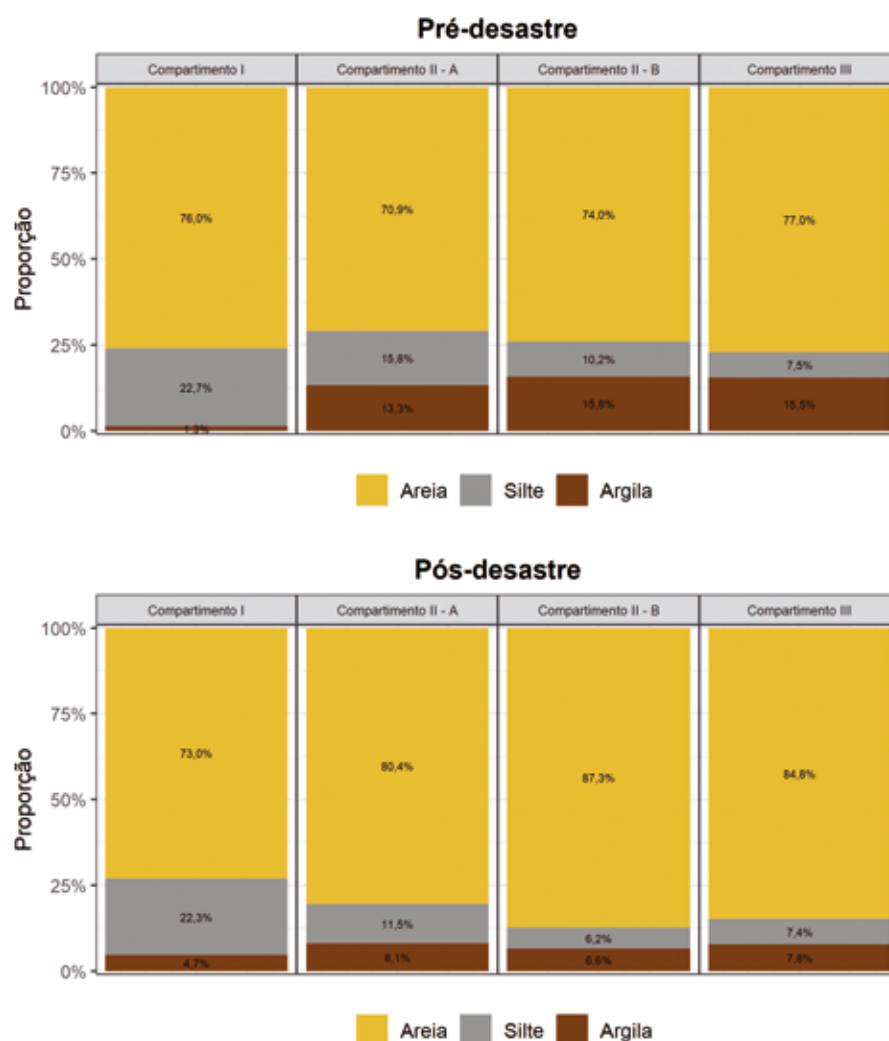
Os sedimentos que permanecem no fundo dos corpos d'água possuem papel fundamental na disponibilização de EPTs à água e, consequente, à fauna aquática. Deste modo, a alteração na composição granulométrica e o aumento da concentração de EPTs no sedimento em função do desastre, afetou diretamente a dinâmica de metais na água e a comunidade de macroinvertebrados bentônicos que vivem no sedimento.

4.8.1 ALTERAÇÃO NA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SEDIMENTO

Com o advento do desastre, além da remobilização dos sedimentos já depositados ao longo da calha do rio, houve também o transporte e deposição das frações granulométricas associadas ao rejeito. Na Figura 109 são apresentados os gráficos relativos aos dados de granulometria no período pré e pós-desastre. No pré-desastre, observa-se que a quantidade de partículas na fração areia é predominante em todos os compartimentos, com valores próximos ou acima de 70%. No que se refere as frações dos sedimentos finos, silte e argila, exceto para o C1, onde o percentual de argila é muito baixo (1,3%), as distribuições são relativamente semelhantes, com percentuais variando de 15% a 7% para o silte e de 13% a 15% para a argila nos demais compartimentos.

Já no período pós-desastre, verifica-se que no C1 houve o aumento da quantidade da fração argila em 3,4% e uma diminuição de 0,4% na fração silte e 3% na fração areia. No C2A a fração argila diminuiu em 5,2%, 4,3% na fração silte e houve um aumento da fração areia de 9,5%. Para o C2B a fração argila diminuiu em 9,2%, 4% na fração silte e houve um aumento da fração areia de 13,3%. Por fim no C3 a fração argila diminuiu em 7,7%, 0,1% na fração silte e o aumento da fração areia foi de 7,8%. Com base nesses quantitativos, para o C1 o dano foi considerado grave pois houve uma redução da granulometria e pouco grave nos demais compartimentos uma vez que houve alteração, porém com aumento na fração areia. A síntese da classificação do dano é apresentada na Tabela 53.

O aporte de lama de rejeito no interior da calha dos rios afetados, promoveu um maior transporte das frações finas (argila e silte), resultando assim uma sedimentação da fração areia.

Figura 109 – Gráfico das frações dos sedimentos no pré-desastre e pós-desastre.

Elaborado por: Lactec.

Tabela 53 – Síntese dos resultados da classificação do dano sobre a alteração da composição granulométrica.

Compartimento	Resultado da análise	Classificação do dano
C1	Redução da granulometria	Grave
C2A	Aumento da granulometria	Pouco grave
C2B	Aumento da granulometria	Pouco grave
C3	Aumento da granulometria	Pouco grave

4.8.2 ALTERAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE EPTS NOS SEDIMENTOS

Abaixo estão apresentados os resultados obtidos para o dano relativo à alteração da concentração de EPTs nos sedimentos. Este dano, conforme mencionado, foi definido a partir da comparação com os dados anteriores e posteriores ao desastre, agrupados por compartimento. Para cada amostra de sedimentos, foram analisados 53 parâmetros físicos e químicos, dos quais, optou-se em apresentar apenas aqueles que tiveram alterações relevantes em relação aos dados de linha-base. Desta forma, identificou-se que 13 elementos apresentaram alterações químicas, descritos na metodologia. Abaixo segue descrição da classificação por elemento, subdivididos por compartimento, conforme Figura 72.

Para o Al, foram identificadas alterações no C2B e C3. O FC indicou contaminação considerável a elevada no C1 e C2A e moderada no C2B. Para o As, foram identificadas alterações no C2A e C3, porém o FC mostrou contaminação elevada para os três compartimentos, sendo ligeiramente mais acentuada no C1 (FC=180). O elemento Ba apresentou alteração apenas no C3 e o FC foi classificado como moderado para o C2B e C3. Para o Cd a alteração ficou no C2A, C2B e C3 e o FC indicou contaminação elevada no C2A e C2B. O Pb, elemento com mobilidade relativamente alta quando exposto ao meio, os valores do pós-desastre ficaram acima do máximo histórico no C2B e C3 e o FC indicou contaminação elevada para o C3 e moderada para o C2A e C2B. Para o Co as alterações das concentrações e o FC elevado foram identificados apenas no C3. O Cu foi classificado como alterado no C2B e C3 e dados referentes ao FC indicam contaminação elevada também nesses compartimentos. Já para o Cr, esse elemento apresentou alteração apenas no C2B, porém o FC indicou contaminação considerável no C2B e C3. O Fe, um dos elementos mais abundantes no rejeito, foi classificado como alterado no C2A, C2B e C3 e o FC indicou contaminação elevada no C3. O Mn apresenta-se associado aos depósitos de Fe e suas concentrações também são elevadas no rejeito. Foi verificada alterações no C2A e C3 e o FC indicou contaminação moderada no C2A. Para o Hg foram identificadas alterações em todos os compartimentos e o FC não foi realizado em virtude de os resultados estarem abaixo do LQ para as amostras analisadas. Por fim o Ni e o Zn tiveram as alterações no C2B e C3 e o FC indicou contaminação elevada no C2A, C2B e C3 e contaminação considerável para o C2B e C3, respectivamente.

A Tabela 54 resume as classificações das alterações para cada elemento analisado, subdividido em compartimentos. Com base nessa classificação das alterações dos EPTs, de acordo com a metodologia, o dano foi classificado como pouco grave para o C1, grave no C2A e gravíssimo no C2B. Para o C3, embora tenha sido realizada a métrica de comparação, em virtude da quantidade de estudos nessa região, número de dados inferior a 5, o dano não foi classificado nesse compartimento, conforme apresenta a síntese dos resultados na Tabela 55.

Tabela 54 – Classificações das alterações por elementos em cada compartimento respectivo.

	C1	C2A	C2B	C3	
Al					
AS					Sem alteração
Ba					Alterado
Cd					
Co					
Cr					
Cu					
Fe					
Hg					
Mn					
Ni					
Pb					
Zn					

Elaborado por: Lactec.

Tabela 55 – Síntese do dano sobre a alteração da concentração de EPTs nos sedimentos.

Compartimento	Resultado da análise em % de elementos alterados (acima do máximo histórico)	Classificação do dano
C1	7,69	Pouco grave
C2A	30,76	Grave
C2B	76,92	Gravíssimo
C3	92,30	Sem classificação (n≤5)

4.8.3 ALTERAÇÃO NA COMUNIDADE DE MACROINVERTEBRADOS BENTÔNICOS PRESENTES NO SEDIMENTO

De maneira geral a comunidade de macroinvertebrados bentônicos no rio Doce foi composta por grupos resistentes a alterações ambientais, relacionados a ambiente alterado com baixa qualidade. As larvas de inseto (Chironomidae) assim como as minhocas aquáticas (Oligochaeta), se destacaram por estarem presentes na maior parte das estações amostrais estudadas em vários casos com grandes densidades (Figura 110). Esses grupos são considerados tolerantes e generalistas, apresentam espécies resistentes a altos níveis de poluição e reduzido oxigênio dissolvido (JOHNSON; WIEDERHOLM; ROSENBERG, 1993).

Figura 110 – Fotos de macroinvertebrados a) Chironomidae, b) Oligochaeta.

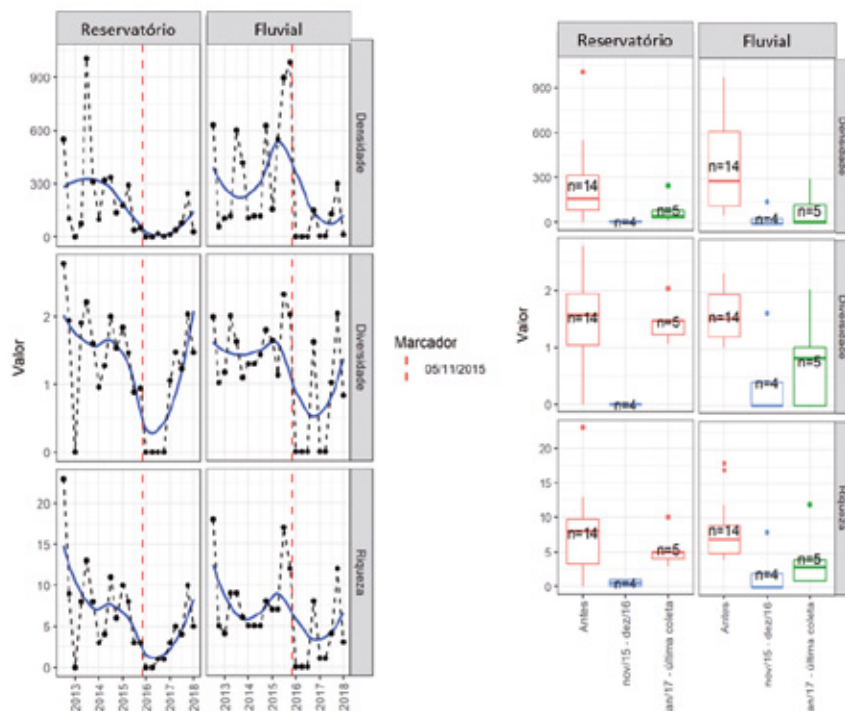
Fonte: Lactec.

Nas análises realizadas com os dados de monitoramento de macroinvertebrados bentônicos, executados pelas UHEs, foi possível observar de maneira geral queda nos indicadores das comunidades após o rompimento da barragem de Fundão, indicando que houve alteração na comunidade de macroinvertebrados em decorrência do desastre.

A queda nos valores dos indicadores foi mais acentuada nos primeiros meses após o desastre. Depois desse período foi observado melhora nos valores dos indicadores, em alguns casos. No ambiente fluvial, no C1 e nos reservatórios hidrelétricos os indicadores chegaram a valores próximos aos de antes do desastre. No C2A, em ambiente fluvial, foi observada melhora nos indicadores, entretanto, não se igualaram a valores da linha-base (Figura 111). No C2B não foi possível verificar expressiva melhora nos resultados dos indicadores após os primeiros meses do desastre. Para o C3 não existem dados de linha-base, portanto não foi possível quantificar o dano.

Tanto nas estações de reservatório quanto nas de ambiente fluvial o dano foi classificado como grave no C1 e gravíssimo no C2, em todos os casos o dano foi classificado como parcialmente reversível e apresentando tendência a reduzir.

Figura 111 – Exemplo de resultados do C2 em ambiente fluvial e reservatório: à esquerda, série temporal de cada um dos indicadores analisados (a linha pontilhada vermelha indica a data do desastre, a linha azul captura a tendência dos dados); à direita, box plots das comparações múltiplas pelo teste LSD de Fisher.



Elaborado por: Lactec.

4.9 DANOS AOS PEIXES

Os peixes retrataram as alterações drásticas no ambiente aquático causadas pelo rompimento da barragem de Fundão. A mortalidade significativa de peixes nos corpos d'água afetados foi o primeiro dano, sendo seguido pelas alterações na composição e estrutura da comunidade, aumento da riqueza e abundância de espécies de peixes exóticos, redução da diversidade genética, alteração da dinâmica populacional, aumento do estresse e alterações nas condições corporais e/ou de saúde, e aumento na bioacumulação.

4.9.1 MORTANDADE DE PEIXES NOS CORPOS D'ÁGUA AFETADOS

A passagem da lama de rejeitos pelo rio Doce provocou a morte de 21.616 indivíduos (carcaças), pertencentes à 16 espécies, totalizando 10.898,88 kg de peixes. Esse valor pode estar subestimado devido a não possibilidade de todos os espécimes que vieram a óbito terem sido encontrados. O levantamento foi realizado pela empresa Brandt Meio Ambiente contratada pela Samarco Mineração S.A.

Dentre as 16 espécies encontradas as mais representativas (maior número de carcaças) foram o cascudo-viola (*Loricariichthys castaneus*), o tucunaré (*Cichla* spp.), a tilápia (*Oreochromis niloticus*), o cascudo (*Hypostomus affinis*) e o curimba (*Prochilodus* spp.).

Destas 16 espécies, 12 estão em situação de ameaça de extinção, segundo a Portaria do Meio Ambiente nº 445/14 e/ou Deliberação Normativa do COPAM nº 147/2010, e 11 são consideradas endêmicas da bacia do rio Doce (VIEIRA, 2010) (Tabela 56, Figura 112 e Figura 113).

Tabela 56 – Lista de espécies ameaçadas e endêmicas registradas presentes no relatório “Mortandade de peixes na Bacia do rio Doce após rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues (Mariana/MG), em 05/11/2015 (DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016).

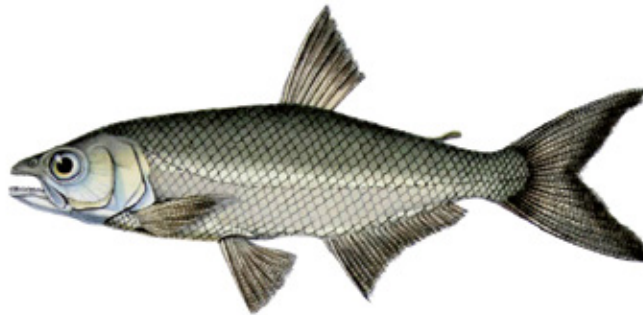
Espécie	Nome popular	Ameaçada	Endêmica
<i>Australoheros ipatinguensis</i>	Acará		x
<i>Awaous tajasica</i>	Amboré	x	
<i>Brycon devillei</i>	Piabanha	x	x
<i>Brycon opalinus</i>	Pirapitinga	x	
<i>Centropomus spp</i>	Robalo	x	
<i>Delturus carinotus</i>	Cascudo-Lage		x
<i>Deuterodon pedri</i>	Lambari		x
<i>Genidens genidens</i>	Caçari	x	
<i>Henochilus wheatlandii</i>	Andirá	x	x
<i>Leporinus thayeri</i>	Piau	x	
<i>Lophosilurus alexandri</i>	Pacamã	x	
<i>Oligosarcus solitarius</i>	Lambari-Bocarra		
<i>Pareiorhaphis nasuta</i>	Cascudo	x	x
<i>Parotocinclus doceanus</i>	Cascudo		x
<i>Parotocinclus planicauda</i>	Cascudo		x
<i>Phalloceros elachistos</i>	Barrigudinho		x
<i>Prochilodus vimboides</i>	Curimba	x	
<i>Steindachneridion doceanum</i>	Surubim	x	x

Figura 112 – Surubim do rio Doce (*Steindachneridion doceanum*). Exemplo de espécie endêmica ameaçada de extinção.



Fonte: Gavello (2005).

Figura 113 – Piabanha (*Brycon devillei*). Exemplo de espécie endêmica ameaçada de extinção.



Fonte: Wpclipart (2019).

Este dano ocorreu em toda a abrangência da porção fluvial do rio Doce e foi considerado como gravíssimo, sem sinais evidentes de retorno a valores observados na linha-base, embora seja considerado parcialmente reversível.

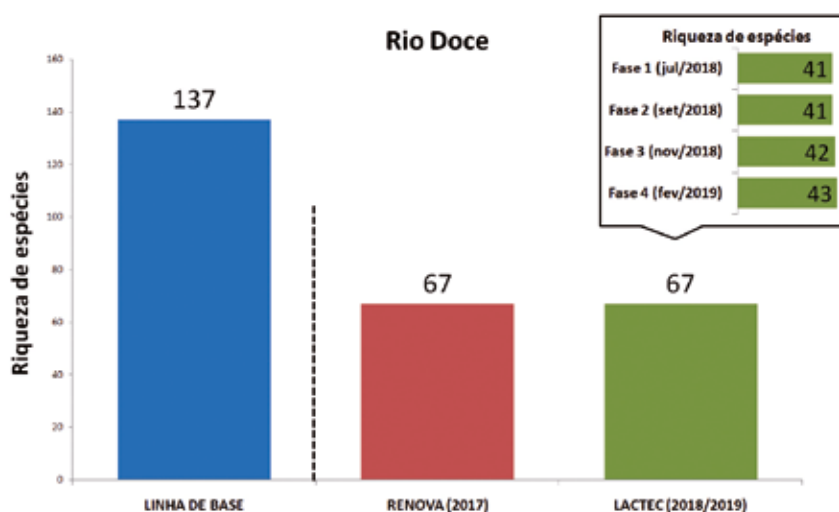
4.9.2 ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA DA COMUNIDADE DE PEIXES

O número e a diversidade de espécies e de grupos funcionais de peixes registrados nos ambientes amostrados na bacia do rio Doce apresentaram alterações significativas de valores, considerando como linha-base os levantamentos realizados com a mesma abrangência espacial.

Foi levantada por meio de dados primários e secundários a ocorrência de 137 espécies de peixes, distribuídas em 14 ordens e 33 famílias, sendo as ordens Characiformes (43,1%; 59 espécies), Siluriformes (31,4%; 43 espécies) e Cichliformes (8,8%; 12 espécies) as mais representativas. Considerando as famílias, as maiores riquezas são observadas para Characidae (19,7%; 19 espécies), Loricariidae (12,4%; 17 espécies), Cichlidae (8,8%; 12 espécies), Anostomidae (6,6%; 9 espécies) e Serrasalminidae (5,8%; 8 espécies).

O número de espécies obtido nas coletas de 2018 e 2019 pelo Lactec foi igual a riqueza registrada pela RENOVA em 2017 (Figura 114). Embora a comparação da riqueza seja dependente do protocolo amostral (WILLOT, 2001), os menores valores de riqueza registrados entre 2017 e 2018/2019 indicam que a degradação do ambiente aquático promoveu o estabelecimento de uma assembleia simplificada, dominada por poucas espécies de hábito generalista, típica de ambientes impactados (NORKKO *et al.*, 2002; HYLAND *et al.*, 2005).

Figura 114 – Riqueza da ictiofauna registrada no ambiente aquático continental do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – Fases 1, 2, 3 e 4) e secundários. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.



Elaborado por: Lactec.

Na área de abrangência do diagnóstico, a redução da riqueza e da diversidade da ictiofauna da bacia do rio Doce foi considerada como um dano gravíssimo, sem sinais evidentes de retorno a valores observados na linha-base, embora seja considerado parcialmente reversível.

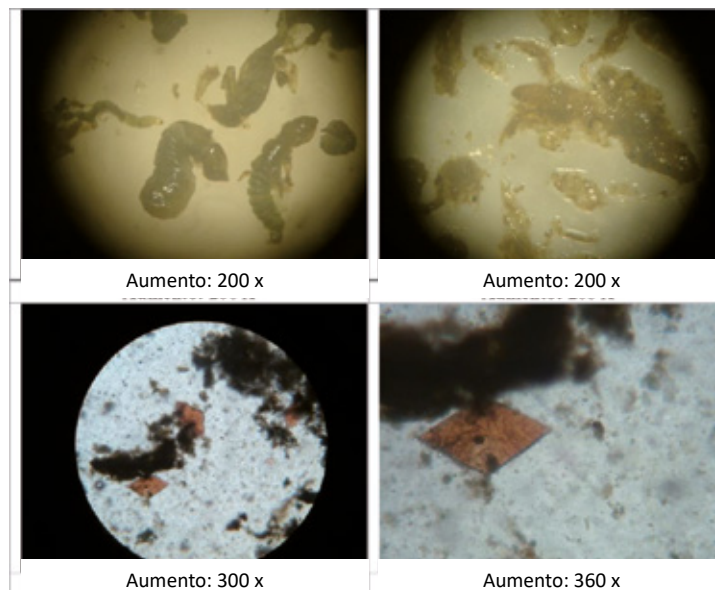
4.9.3 SIMPLIFICAÇÃO DA ESTRUTURA TRÓFICA DA ICTIOFAUNA

Foram levantadas espécies detritívoras, herbívoras, invertívoras bentônicas, onívoras, zoobentívoras, zooplancetófagas e ictiófagas na bacia do rio Doce.

As espécies invertívoras bentônicas, onívoras e ictiófagas tiveram maior riqueza e abundância em todos os compartimentos, em biomassa dominaram os ictiófagos, no C1 e C2, e os detritívoros e onívoros, no C3.

Nos estômagos analisados foi encontrada uma grande variedade de recursos alimentares com partículas minerais associados (Figura 115).

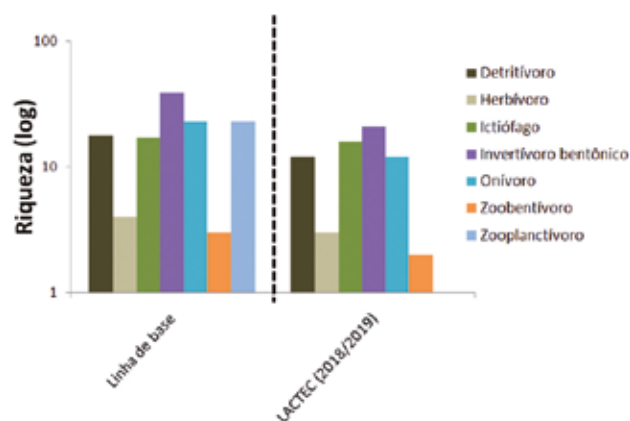
Figura 115 – Componentes (presas) da dieta de invertívoros bentônicos, com detalhe de partículas minerais associadas ao sedimento com rejeito de mineração encontrados nos tratos digestórios em 2018/2019 na bacia do rio Doce.



Fonte: Lactec.

Houve uma redução na riqueza de espécies invertívoras bentônicas, zoobentívoras e zooplanc-tívoras nas amostragens realizadas em 2018 e 2019 pelo Lactec comparadas com a Linha de Base (Figura 116).

Figura 116 – Proporção dos grupos tróficos (riqueza) registrados nas fases amostrais realizadas em 2018/2019 na bacia do rio Doce e na Linha de Base. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.



Elaborado por: Lactec.

A simplificação da estrutura trófica da ictiofauna foi resultado da redução da complexidade estrutural do sedimento e a consequente homogeneização do habitat provocada pelo aporte de lama e soterramento, com efeitos negativos sobre a diversidade de organismos bentônicos (presas).

Nos locais mais preservados da bacia do rio Doce foram encontradas maior riqueza e abundância de comunidades zoobentônicas, confirmando a influência das condições do habitat na distribuição dos organismos (MARQUES *et al.*, 1999; BARBOSA *et al.*, 2001; MORETTI e CALLISTO, 2005; SANTOS, 2014).

A simplificação da estrutura trófica foi considerada como um dano grave, com tendência de redução e parcialmente reversível, com ocorrência nos compartimentos continentais amostrados.

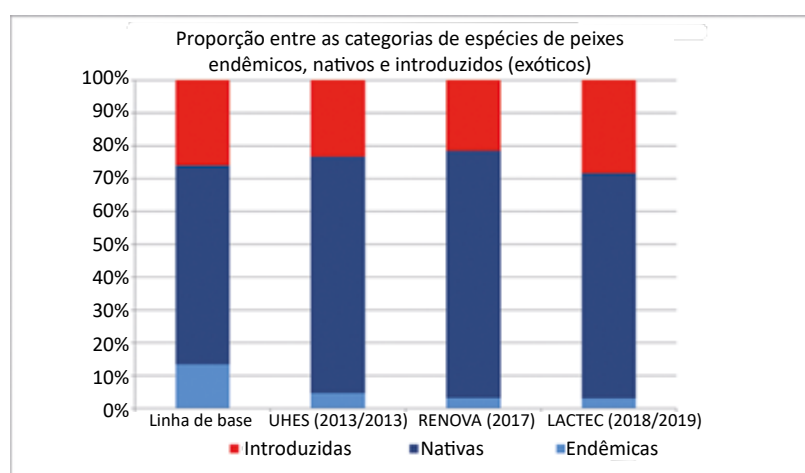
4.9.4 AUMENTO DA RIQUEZA E ABUNDÂNCIA DE PEIXES INTRODUZIDOS (EXÓTICOS)

O surgimento ou aumento de espécies exóticas e/ou introduzidas nos ambientes pode causar redução ou extinção de populações nativas. Esse fato se dá pela competição por alimentação, abrigo e a disseminação de parasitos (TAYLOR *et al.*, 1984). As alterações e a extinção das espécies podem causar danos irreversíveis ao ecossistema e aos recursos naturais (VITULE, 2009; CUCHEROUSSET e OLDEN, 2011). Os principais resultados da redução da biodiversidade são a redução dos recursos genéticos, a perda do potencial de fontes de alimentação e controle de doenças e a redução da estabilidade dos ecossistemas (KNAPP e MATTHEWS, 2000).

Nas amostragens realizadas pelo Lactec foram registradas 19 espécies de peixes introduzidas ou exóticas, com destaque àquelas originárias de outras bacias hidrográficas neotropicais (84,2%). A ocorrência dessas espécies nos ambientes aquáticos está relacionada com a introdução acidental (escape de aquicultura) ou intencional (“peixamento” de represas e lagos).

O número de espécies registradas pelo Lactec é 90% superior aos valores obtidos nos programas de monitoramento contínuos e abrangentes realizados nas UHEs Aimorés e Baguari (HOLOS ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 2007; SILVA *et al.*, 2012; BIOS CONSULTORIA E SERVIÇOS AMBIENTAIS, 2013) antes do rompimento da barragem de Fundão em 2015. A riqueza registrada em 2018/2019 é 35,7% maior do que os registrados pela Fundação Renova em 2017, cujas amostragens apresentaram a mesma abrangência espacial empregada pelo Lactec (Figura 117).

Figura 117 – Proporção entre as categorias de espécies de peixes endêmicos, nativos e introduzidos (exóticos) registrados nas fases amostrais realizadas em 2018/2019 na bacia do rio Doce, Linha de Base e programas de monitoramento das UHE Baguari e Aimorés. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.



Elaborado por: Lactec.

As espécies com mais registros nas amostragens do Lactec em 2018 e 2019 são Tucunaré (*Cichla kelberi*), Bagre-africano (*Clarias gariepinus*), Piranha-vermelha (*Pygocentrus nattereli*), Pacu (*Metynis lippincottianus*), Pacamã (*Lophiosilurus alexandri*) e Camboja (*Hoplosternum littorale*) (Figura 118).

Figura 118 – Espécies de peixes introduzidos (exóticos) registrados com maior frequência e biomassa nas fases amostrais realizadas em 2018/2019 na bacia do rio Doce.



Tucunaré
Cichla kelberi



Bagre-africano
Clarias gariepinus



Piranha-vermelha
Pygocentrus nattereri



Pacu
Metynis lippincottianus



Pacamã
Lophiosilurus alexandri



Camboja
Hoplosternum littorale

Fonte: Lactec.

O aumento na riqueza e abundância de peixes exóticos foi considerado como um dano grave, com tendência de redução e parcialmente reversível, com ocorrência nos compartimentos continentais amostrados.

4.9.5 REDUÇÃO DA DIVERSIDADE GENÉTICA DA ICTIOFAUNA

A redução no tamanho das populações provocada pela passagem da lama causou graves consequências para a sua diversidade genética. As severas reduções no tamanho das populações reduzem a diversidade genética, aumentam a deriva genética (processo evolutivo) e por fim prejudicam a capacidade adaptativa das espécies. Além disso, populações reduzidas apresentam maiores taxas de endocruzamento (cruzamento entre parentes próximos), o que diminui a capacidade de sobrevivência das populações mesmo em curto prazo.

Desta forma, essas espécies que apresentam redução no seu tamanho populacional e em sua diversidade genética são mais susceptíveis a eventos de extinção local e reduzida probabilidade de manutenção a longo prazo (FREELAND et al., 2011).

Para a avaliação da diversidade genética da ictiofauna foram escolhidas duas espécies de peixes de populações que vivem na APDL, sendo o mandi-amarelo, *Pimelodus maculatus*, e lambari-do-rabo-amarelo, *Astyanax bimaculatus*. *Pimelodus maculatus* é uma espécie de médio porte representante da grande família de Pimelodidae, habitando ambientes dulcícolas das bacias do rio Paraná, rio São Francisco e rio Doce (Figura 119). São animais bento-pelágicos e onívoros (FROESE e PAULY, 2019), além de apresentarem migração de grandes distâncias (CAROLSFELD *et al.*, 2003). Essa espécie é um importante recurso pesqueiro em diferentes bacias hidrográficas brasileiras.

Astyanax bimaculatus é uma espécie de pequeno porte amplamente distribuída ao longo do rio Doce em diferentes ambientes (e.g. reservatórios, rios, riachos, açudes e lagoas) (VIEIRA *et al.*, 2015) (Figura 120). Realizam migrações de pequenas distâncias, com atividade reprodutiva mais intensa durante a época chuvosa (CAROLSFELD *et al.*, 2003).

Considerando o desenho amostral definido, as análises de *Astyanax bimaculatus* indicaram que as populações dessa espécie presentes na APDL do C2 apresentaram redução na diversidade genética em comparação àqueles do controle, condizente com o dano esperado para essas populações em decorrência da lama de rejeitos do desastre da Samarco.

Para as populações de *A. bimaculatus* do C1 e *P. maculatus* dos C2 e C3 não foram encontradas diferenças significativas da diversidade genética entre as populações dentro da APDL e controle (Tabela 57). Isso sugere que essas populações não sofreram extensiva redução da diversidade genética decorrente do desastre ou sofreram recuperação de sua diversidade genética pela recolonização e/ou fluxo genético de outras populações da bacia do rio Doce.

Figura 119 – Exemplar de *Pimelodus maculatus*



Fonte: PlanetCatFish (SI).

Figura 120 – Exemplar de *Astyanax bimaculatus*



Fonte: PlanetCatFish (SI).

Tabela 57 – Cenários de danos e recuperação das populações de peixes de *Astyanax bimaculatus* e *Pimelodus maculatus* dentro da APDL

Espécie	Compartimento	Resultados	Cenário suportado
<i>Pimelodus maculatus</i>	2	Diversidade genética não significativamente menor na população dentro da APDL em comparação ao controle	A diversidade genética da população dentro da APDL não sofreu extensiva redução ou foi recuperada
	3	Diversidade genética não significativamente menor na população dentro da APDL em comparação ao controle	A diversidade genética da população dentro da APDL não sofreu extensiva redução ou foi recuperada
<i>Astyanax bimaculatus</i>	1	Diversidade genética não significativamente menor na população dentro da APDL em comparação ao controle	A diversidade genética da população dentro da APDL não sofreu extensiva redução, ou foi recuperada
	2	Diversidade genética significativamente menor na população dentro da APDL em comparação ao controle	A diversidade genética da população dentro da APDL sofreu extensiva redução e não foi recuperada

As diferenças encontradas entre as espécies podem ser explicadas pelas diferenças ecológicas entre elas. Enquanto *A. bimaculatus* é uma espécie de pequeno porte com migração de pequenas distâncias (CAROLSFELD *et al.*, 2003), *P. maculatus* representa uma espécie de médio porte com migração de longas distâncias (CAROLSFELD *et al.*, 2003). Populações de espécies mais vageis, como *P. maculatus*, tendem a ter maior fluxo genético entre suas populações quando comparadas àquelas menos vageis, como *A. bimaculatus* (WRIGHT, 1943). Portanto, o maior fluxo genético entre as populações de *P. maculatus* permite que a recuperação da diversidade genética de uma população impactada por alteração ambiental seja mais rápida em comparação àquelas espécies menos vageis. Consequentemente, a ausência de dano encontrado em *P. maculatus* das estações dentro da APDL provavelmente se deve à recuperação da diversidade genética após o desastre por outras populações da bacia do rio Doce.

A redução da diversidade genética foi classificada como grave, sendo parcialmente reversível desde que adotadas medidas que promovam a recuperação das populações.

4.9.6 ALTERAÇÃO DA DINÂMICA POPULACIONAL DA ICTIOFAUNA

O modelo matemático para a avaliação da alteração da dinâmica populacional foi implementado para as espécies de cascudo, *Hypostomus affinis*, e da piranha-vermelha, *Pygocentrus nattereri*.

O cascudo, *H. affinis* (Figura 121), é uma espécie de grande porte da diversa família de bagres Loricariidae, presente nas bacias dos rios Doce e Paraíba do Sul (FROESE e PAULY, 2019). É uma espécie bentopelágica que habita diferentes ambientes, desde riachos até reservatórios com fundos rochosos, arenosos ou lamosos (VIEIRA *et al.*, 2015), com hábito alimentar detritívoro. Seus ovos, grandes e pouco numerosos (DUARTE e ARAÚJO, 2002), e larvas são geralmente encontrados próximos à vegetação ripária (FROESE e PAULY, 2019). Essa foi uma das espécies com maior representatividade nas carcaças identificadas após a mortandade decorrente da passagem da lama de rejeitos (RT DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016).

Figura 121 – Espécimes de *Hypostomus affinis* (à esquerda) e *Pygocentrus nattereri* (à direita) coletados nas estações de coleta da bacia do rio Doce.



Fonte: Lactec.

A piranha-vermelha, *P. nattereri* (Figura 121), é uma espécie pelágica da subfamília Serrasalminae, família Serrasalmidae, encontrada em diferentes bacias sul-americanas, incluindo bacia do rio Amazonas, bacia do rio Paraná-Paraguai e bacias costeiras. Seu hábito alimentar é carnívoro predador. Sua reprodução ocorre ao longo de todo o ano, com picos nas estações chuvosas (VIEIRA *et al.*, 2015). Seus numerosos ovos são postos em ninhos na vegetação ripária. Sua estratégia reprodutiva pode ser ajustada de acordo com aspectos ambientais, como disponibilidade de nutrientes (DUPONCHELLE *et al.*, 2007), frequentemente apresentando territorialismo e cuidado parental (FROESE e PAULY, 2019).

Os resultados da dinâmica populacional adaptada para as condições da bacia do rio Doce suportam a extinção local na APDL a médio e longo prazo, nos anos 2023 e 2038, respectivamente, das populações simuladas de *H. affinis* e *P. nattereri*, sem recuperação natural das condições ambientais do rio Doce, e em 2023 e 2041 nos cenários com recuperação natural, respectivamente. As predições dessas extinções decorrem unicamente do aumento da taxa de mortalidade natural encontrada nas populações da APDL em comparação àquelas calculadas para as áreas controle (cenário pré-desastre).

Para a realização dessas simulações, a escolha das espécies considerou critérios morfológicos, ecológicos e reprodutivos. Primeiro, ambas as espécies se reproduzem e se desenvolvem na vegetação ripária (FROESE e PAULY, 2019), local bastante afetado pelo depósito da lama de rejeitos (RT DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016, FERNANDES *et al.*, 2016). Entretanto, o cascudo *H. affinis* é uma espécie de grande porte associadas ao fundo dos corpos d'água, enquanto a Piranha-Vermelha *P. nattereri* é uma espécie pelágica de médio porte (FROESE e PAULY, 2019). Assim, *H. affinis* é mais suscetível a alterações ambientais pela deposição de lama de rejeitos em comparação a *P. nattereri*, resultando em maiores taxas de mortalidade e consequente extinção local na APDL em um prazo mais curto. Além disso, enquanto *H. affinis* apresenta maior investimento no tamanho de seus ovos e consequente menor taxa de recrutamento, *P. nattereri* possui maiores investimento em número de ovos e taxa de recrutamento (QUEIROZ *et al.*, 2010). Portanto, as menores taxas de recrutamento por menor investimento em número de ovos e maiores mortalidades por estarem mais intimamente ligados aos depósitos da lama de rejeitos tornam *H. affinis* mais suscetível a extinções locais na APDL em tempos menores.

Os resultados são ainda mais preocupantes considerando o cenário de liberação da pesca na APDL. As simulações sem pesca utilizaram a taxa de mortalidade natural das populações de Pauly (1980), que considera todas as formas de mortalidade, exceto aquelas decorrentes de atividades pesqueiras. *Pygocentrus nattereri* e *H. affinis* são espécies de peixes frequentemente utilizadas para pesca nas bacias brasileiras (CAROLSFELD *et al.*, 2003).

Por fim, as simulações suportam que estratégias de melhoria das condições ambientais da APDL devem ser priorizadas, de modo a permitir a redução na mortalidade das populações, fator responsável pela extinção das populações de *H. affinis* e *P. nattereri* simuladas nesse estudo. Uma vez que consideramos as taxas de recrutamento do cenário pós-desastre iguais àquela do cenário pré-desastre, melhorias nas condições ambientais que tornem o recrutamento real das populações da APDL iguais às encontradas nas estações não afetadas da bacia (tributários) por si só não alterariam as previsões de extinção dessas populações. Assim, a melhoria das condições ambientais que reduzam a taxa de mortalidade natural das populações na APDL é fundamental para a manutenção dessas populações a longo prazo. Ademais, a manutenção da dispersão entre populações da APDL e fora da APDL e a realização de peixamentos também são fatores importantes, uma vez que permite a recomposição do tamanho populacional da APDL, depletada pelo aumento da mortalidade, via recrutamento e/ou recolonização de populações extintas localmente.

Esse dano é classificado como gravíssimo, mesmo sendo considerado parcialmente reversível.

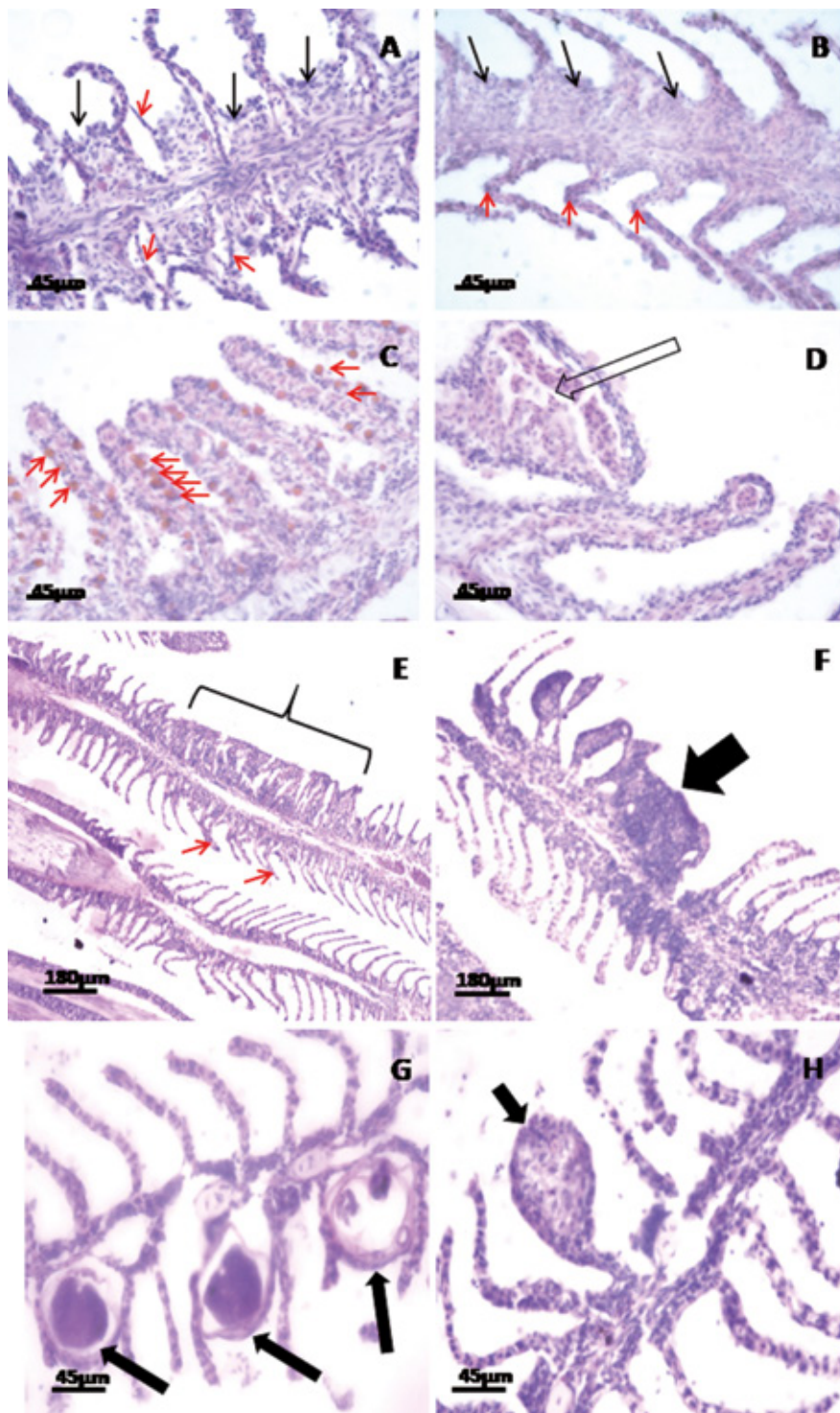
4.9.7 ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE DA ICTIOFAUNA

As alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna foram avaliadas segundo oito indicadores principais: estruturas e função das brânquias, funções fisiológicas (osmorregulação, respiração, excreção e equilíbrio ácido-base), metabolismo, estrutura e funções reprodutivas, sistema antioxidante e de biotransformação, sistemas não enzimáticos, genotoxicidade e mutagenicidade e neurotoxicidade. Cada indicador possui biomarcadores específicos que são apresentados a seguir.

4.9.7.1 Prejuízos às estruturas e função das brânquias (biomarcador: histopatologia de brânquias)

Todas as espécies de peixes capturadas nos diferentes pontos do ambiente de água doce apresentaram alterações na estrutura das brânquias, sendo a maioria das alterações observadas em ambas as estações do ano (hiperplasia, hipertrofia, fusão e desarranjo lamelar e aneurisma; Figura 122). Foi possível identificar que os peixes pertencentes à ordem Siluriformes, como bagres e cascudos, que geralmente apresentam o hábito alimentar omnívoro (generalista)/detritívoro e vivem no fundo, associado ao sedimento, apresentaram maior variedade e quantidade de alterações na estrutura das brânquias.

Figura 122 – Imagens representativas de cortes histológicos de brânquia de diferentes espécies de peixes que apresentaram alterações na estrutura das brânquias. a) Brânquia de *Geophagus brasiliensis* (acarará) com descolamento do epitélio lamelar (seta vermelha) e hiperplasia (seta preta); b) Brânquia de *G. brasiliensis* com indicação de alteração morfológica na disposição das lamelas (seta vermelha) e hiperplasia (seta preta); c) Brânquia de *Hoplosternum littorale* (tamoatá) com adesão de material (seta vermelha); d) Brânquia de *H. littorale* com aneurisma (seta = aneurisma); e) Brânquia de *Hoplias intermedius* (traíra) com indicação de região de hiperplasia lamelar e edema (chave) e de fusão lamelar (seta vermelha); f) Brânquia de *Hypostomus affinis* (cascudo areia) com indicação de hiperplasia e fusão lamelar (seta preta); g) Brânquia de *H. affinis* com encapsulamento de parasitas (seta preta); h) Brânquia de *H. affinis* com indicação de aneurisma (seta preta).



Fonte: Lactec.

4.9.7.2 Prejuízos às funções fisiológicas de osmorregulação, respiração, excreção e equilíbrio ácido-base

Foram identificadas alterações nas funções fisiológicas essenciais à manutenção do equilíbrio funcional (homeostasia) nas duas estações do ano avaliadas (seca e chuvosa), nos peixes capturados na porção continental (água doce). Os danos mais significativos foram identificados nos processos de osmorregulação (regulação na concentração de íons e na quantidade de água das células) e equilíbrio ácido-base (manutenção do pH do organismo), especialmente nos peixes capturados nos pontos DA. De modo geral, os peixes agrupados em todas as ordens e hábitos alimentares foram afetados, porém, no C1, essa alteração foi mais evidente nos peixes da ordem Perciformes.

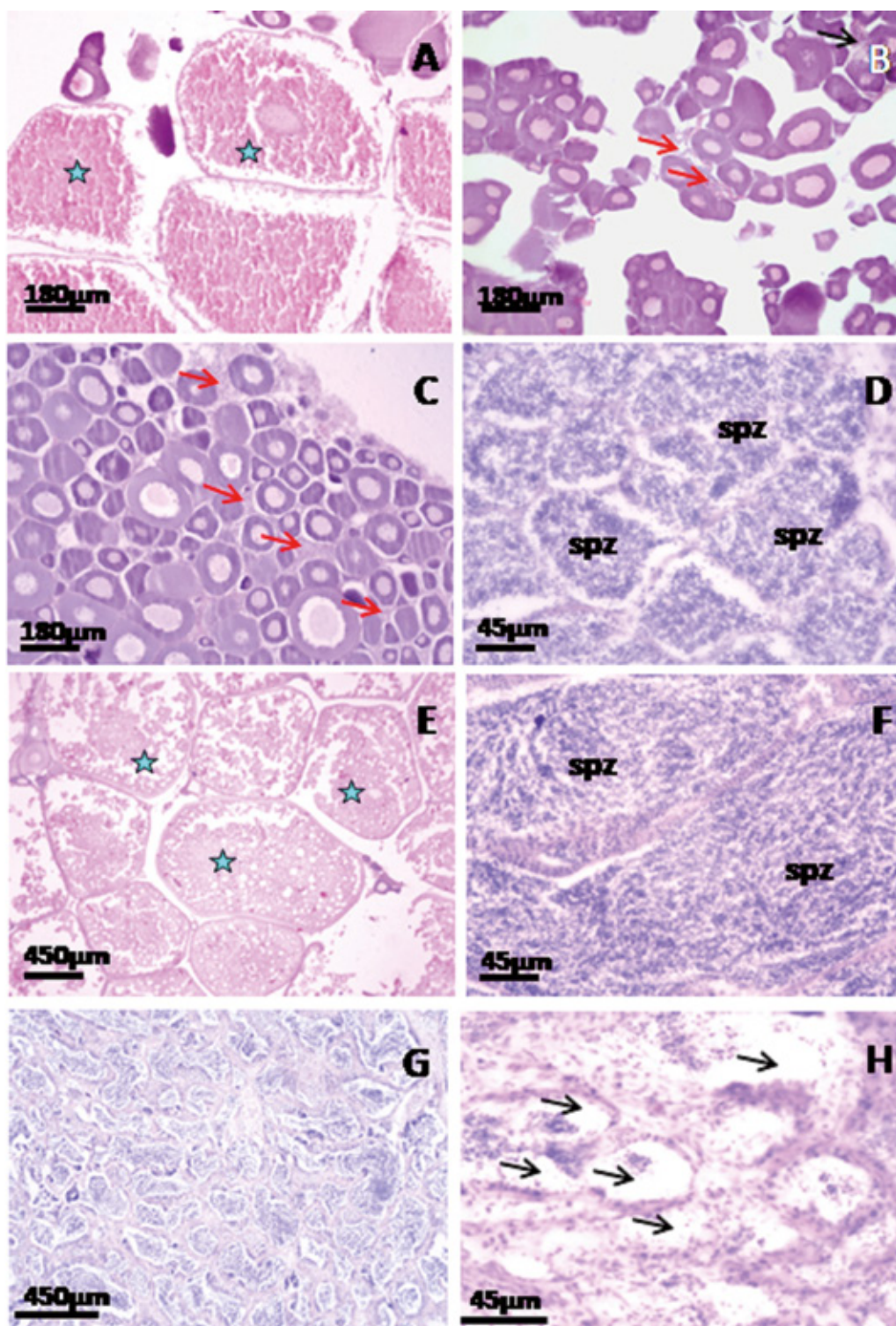
4.9.7.3 Prejuízos ao metabolismo (biomarcadores: glicose, glicogênio e lactato)

Foram identificados prejuízos ao metabolismo dos peixes de água doce. No C1 esses prejuízos foram maiores para as concentrações de lactato e glicogênio dos peixes capturados na estação chuvosa e, de forma mais marcante em Perciformes. No C2 e C3 os prejuízos ocorreram em todos os biomarcadores avaliados, especialmente nos peixes das ordens Characiformes e Siluriformes e em ambas as estações.

4.9.7.4 Prejuízos às estruturas e função reprodutiva (biomarcador: histopatologia de gônadas)

Nenhuma das espécies de peixes capturadas no ambiente continental apresentaram alterações nas estruturas reprodutivas femininas e masculinas, tampouco no desenvolvimento de gametas (óvulos e espermatozoides) de fêmeas e machos, respectivamente. Há a possibilidade de que essa ausência de alterações em estruturas reprodutivas seja uma estratégia reprodutiva que objetiva a manutenção da espécie no ambiente. No entanto, apenas com a continuidade no monitoramento é que será possível concluir se ocorrerão danos às estruturas reprodutivas dos peixes ao longo de toda a extensão continental acometida pelo desastre (Figura 123).

Figura 123 – Imagens representativas de cortes histológicos de estruturas reprodutivas (gônadas) saudáveis, de diferentes espécies de peixes. a) Ovários maduros de *Astyanax fasciatus* com a presença de folículos maduros (estrela azul); b e c) Ovários desovados de *Astyanax bimaculatus* e *Hoplosternum littorale* com indicação de folículos pós-ovulatórios (seta vermelha); d) Testículos maduros de *Geophagus brasiliensis* com a presença de grande quantidade de espermatozoides (spz); e) Ovários maduros de *G. brasiliensis* com a presença de folículos maduros (estrela azul); f) Testículos maduros de *Pimelodus maculatus* com a presença de grande quantidade de espermatozoides (spz); g) Testículo maduro de *P. nattereri*; h) Testículo esvaziado de *P. maculatus* com indicação de espaços que foram deixados pelos espermatozoides eliminados (setas pretas).



Fonte: Lactec.

4.9.7.5 Alterações no sistema antioxidante e de biotransformação (biomarcadores: CAT, SOD, GPx e GST)

De maneira geral todos os biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (sistemas de defesa do organismo) sofreram influência sazonal em ambos os compartimentos (1, 2 e 3) e tecidos (brânquia e fígado) avaliados, especialmente nos grupos DA e Dique S4 (DQ). No C1 o sistema mais afetado foi o antioxidante, com aumento de atividade enzimática no tecido branquial e redução no tecido hepático, respectivamente nas estações seca e chuvosa, principalmente quando avaliado o agrupamento por ordens. No C2, ambos os sistemas (antioxidante e biotransformação) foram afetados, tanto pela sazonalidade, quanto pela diferença existente entre os pontos e agrupamentos avaliados. Por fim, no C3 as respostas dos sistemas antioxidante e de biotransformação foram reduzidas, em ambos os tecidos, e especialmente nos animais capturados nos pontos DA na estação seca.

4.9.7.6 Alterações em sistemas não enzimáticos⁴ (biomarcadores: GSH, MET, LPO)

Todos os biomarcadores não enzimáticos apresentaram diferenças nos pontos DA e/ou DQ em relação aos pontos controle (CN e/ou CP) em ambos os compartimentos (1, 2 e 3) avaliados. Houve expressiva influência sazonal sobre o padrão de resposta dos biomarcadores de ambos os tecidos (brânquia e fígado) avaliados. As alterações mais expressivas foram observadas na estação chuvosa, exceto no C2 onde algumas alterações foram identificadas também para a estação seca. Especificamente para a GSH foi possível identificar uma inversão de padrão entre as respostas em cada tecido, por exemplo, houve aumento na atividade na brânquia na estação chuvosa acompanhado da redução na atividade hepática. Em relação às concentrações de MET e LPO, tanto nas brânquias quanto no fígado, de maneira geral, a MET esteve aumentada na estação seca, enquanto a LPO esteve aumentada na estação chuvosa, indicando forte correlação entre estas duas respostas. Todos os agrupamentos avaliados sofreram prejuízos, ao menos em um dos compartimentos avaliados, no entanto, destacam-se, no C1, os omnívoros e perciformes, no C2, os carnívoros, os characiformes e os siluriformes e no C3, os omnívoros e os siluriformes, os quais apresentaram mais alterações.

4.9.7.7 Genotoxicidade e mutagenicidade (biomarcadores: ensaio cometa, MN e ANEs)

De maneira geral, nos três compartimentos foram observados prejuízos nos marcadores de genotoxicidade e mutagenicidade, com proeminente aumento na estação chuvosa. Nos C1 e C2 as maiores alterações foram observadas nos peixes da ordem characiformes, enquanto no C3 quase todos os agrupamentos avaliados (omnívoros, carnívoros, characiformes e siluriformes) apresentaram alterações.

4.9.7.8 Neurotoxicidade (biomarcadores: AChE)

A neurotoxicidade foi observada nos indivíduos capturados nos pontos DA e/ou DQ em ambos os compartimentos da região aquática continental. Em especial destaque, a maior frequência de alterações foi observada na atividade da AChE cerebral, embora a AChE muscular também tenha sido afetada em alguns agrupamentos. Poucas diferenças foram observadas entre as estações, no entanto

4 Biomarcadores não enzimáticos são proteínas ou alterações em estruturas celulares

na estação chuvosa a neurotoxicidade foi mais evidente e de maneira geral os omnívoros foram os indivíduos que menos sofreram alterações nestes biomarcadores.

Todos os prejuízos e alterações observados nos biomarcadores, portanto nos indicadores utilizados na avaliação da condição de saúde dos organismos da ictiofauna, indicaram que as alterações ambientais estão promovendo danos a estes indivíduos. Ainda assim, apesar da severidade destes prejuízos, ainda não foi possível determinar a gravidade, a tendência de evolução e a reversibilidade dos mesmos, sendo necessária a manutenção do monitoramento destes parâmetros.

4.9.8 AUMENTO NA BIOACUMULAÇÃO

A bioacumulação é o aumento na concentração de elementos potencialmente tóxicos nos organismos. Os seguintes elementos foram analisados, considerando a caracterização química do rejeito que saiu de Fundão: Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn.

Esses 17 EPTs foram avaliados em tecido muscular de peixes de diferentes espécies capturadas ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre. Os resultados indicaram a presença de todos os elementos avaliados no tecido muscular dos peixes capturados nos diferentes compartimentos e pontos do ambiente continental, porém, obviamente, em concentrações variáveis entre os pontos controle negativo (CN), controle positivo (CP) e diretamente afetado (DA). No entanto, as maiores concentrações dos diferentes elementos estão presentes nos pontos acometidos pela passagem da lama de rejeitos (DA). Os elementos encontrados em maiores concentrações no tecido muscular de peixes capturados no C1 foram: Al, As, Ba, Cu, Fe, Hg, Mn e Zn; no C2 foram: Al, Ag, Ba, Cu, Fe, Hg, Mn, Se e Zn e, no C3 foram: Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Se e Zn. A comparação entre os resultados obtidos pelo Lactec e o único estudo de linha-base encontrado para o rio Doce (ANDRADE, 2003) demonstra que houve aumento nas concentrações em até duas vezes para Cr, 38 vezes para Cu, 25 vezes para Fe e de 10 vezes para Mn e Zn em relação aos valores previamente descritos. No entanto, destaca-se a ausência de linha-base para os elementos Ag, Al, As, Ba, Co, Hg, Sb, Se e Sn no rio Doce, os quais, como já mencionado, apresentaram elevadas concentrações. Apesar disso, quando a concentração média desses EPTs obtidas para os peixes capturados nos pontos controle negativo de cada um dos compartimentos são comparadas às concentrações médias obtidas para os peixes capturados nos pontos diretamente afetados, confirma-se que esses peixes possuem maiores concentrações de EPTs que os peixes capturados nos pontos controle.

A presença de EPTs no tecido muscular dos peixes avaliados pode indicar risco de exposição humana a estes contaminantes por meio do consumo destes indivíduos. No entanto, para os peixes, sabe-se que vários dos EPTs avaliados apesar de se acumularem no tecido muscular possuem outros órgãos como alvo de efeito tóxico e de deposição, sendo assim, a presença destes elementos no músculo dos indivíduos indica que estes outros órgãos, em especial as brânquias, o fígado e os rins, possivelmente apresentem concentrações ainda mais elevadas destes EPTs, o que corrobora com as alterações observadas nos biomarcadores avaliados em alguns destes tecidos.

4.10 OUTROS TEMAS ESTUDADOS

Algumas áreas temáticas e parâmetros estudados apontaram para alterações e degradação ambiental, mas não puderam ser associadas, até o presente momento, ao desastre. Alguns outros não indicaram alterações, porém os danos do desastre podem ainda não ter aparecido, ou podem não ter sido identificados por meio das análises realizadas. Dessa forma, nos itens subsequentes são apresentados os resultados desses levantamentos que, apesar de não caracterizarem, de forma direta, a ocorrência de dano, são de extrema importância para descrever a situação atual do ambiente, possibilitando acompanhamento e evolução das condições ao longo do tempo.

4.10.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Embora entenda-se que todas as águas que ocorrem abaixo da superfície possam ser chamadas de águas subterrâneas, para fins dos estudos realizados até o momento no diagnóstico de danos, foram consideradas águas subterrâneas apenas aquelas oriundas de aquíferos, ou seja, águas contidas em profundidade nos maciços rochosos, através de fraturas ou entre os poros.

As análises realizadas até o momento foram, portanto, em poços tubulares profundos, utilizados via de regra para o abastecimento público. Os poços rasos, tipo cacimba ou similares, que se utilizam da água do nível freático, não foram considerados nos estudos executados, pois além de não apresentarem dados de linha-base, não são devidamente cadastrados pelos sistemas de abastecimento, uma vez que sua utilização normalmente é para uso doméstico individual. Salienta-se também que estes poços rasos estão sujeitos a todo tipo de contaminação superficial, dado que devido à alta porosidade do solo, a circulação de água é praticamente livre.

Com base nas coletas e análises realizadas até o momento, conforme mencionado na metodologia, nos poços profundos, não foram constatados danos à qualidade química da água subterrânea que possam ser atribuídos ao desastre de Fundão. Este fato é compreensível em face das características dominantes de fluxo da água na bacia do rio Doce, onde o rio é alimentado em todo seu trajeto pelo fluxo subterrâneo. Concentrações de Fe e Mn em solução em muitas situações e de As em um caso, superaram os máximos permitidos pelas normas vigentes para água de abastecimento (BRASIL, 2008) (MINAS GERAIS, 2011), entretanto entende-se que estes valores elevados estão associados as características geológicas locais, dado que estas desconformidades foram detectadas em amostras de água de poços seguramente inacessíveis à água superficial influenciada pelos rejeitos.

No que se refere aos poços rasos, ou seja, poços que utilizam-se do nível freático, cabe mencionar que, caso estejam próximos de áreas onde houve deposição de rejeitos, devido às condições de permeabilidade dos solos formados pelas misturas de rejeito e solo natural (tecnossolo), que são relativamente elevadas, tanto as águas das chuvas como as próprias variações do nível freático, lixiviam e carregam materiais contidos nestes depósitos, dentre os quais EPTs, favorecendo desta forma eventuais contaminações.

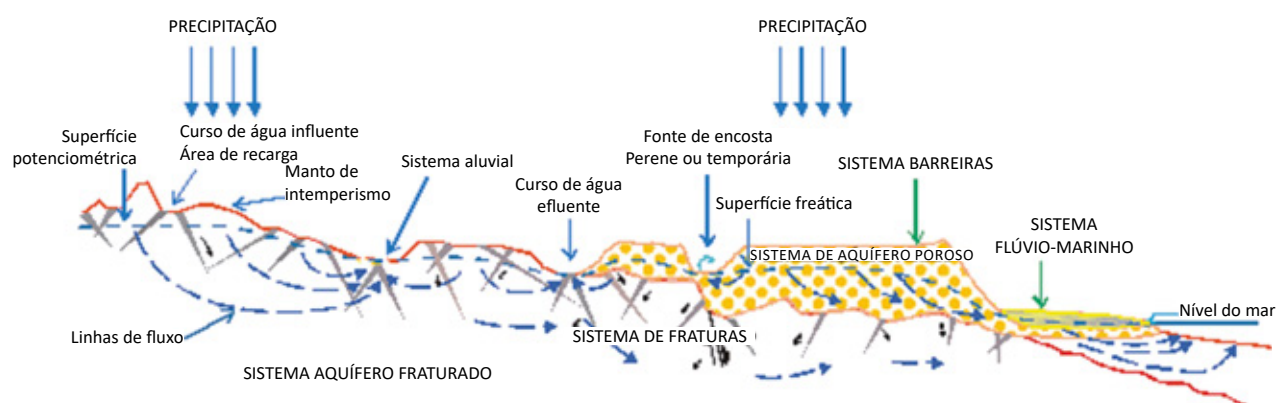
Ao contrário das águas presentes nos aquíferos, cujo fluxo é bastante lento, estas águas dos níveis freáticos estão expostas a vários tipos de contaminação.

Outro dano que está sendo considerado nos estudos hidrogeológicos é a eventual contaminação dos aquíferos devido a circulação de água através das discontinuidades geológicas (falhas e fraturas). Dado que praticamente toda a bacia hidrográfica do rio Doce é formada por aquíferos fraturados, a possibilidade de que as águas de infiltração, que permearam estes materiais depositados, misturas de solos e rejeitos, possam estar carreando também EPTs para as zonas mais profundas através destas fraturas, embora ainda não detectado, não está sendo descartada, principalmente porque o fluxo da água subterrânea é muito lento, ou seja, esta situação pode estar ocorrendo, mas não ter sido ainda identificada através das análises. Estudos de monitoramento que estão sendo executados podem eventualmente diagnosticar estas contaminações.

Para balizar estes estudos, foram realizados os traçados dos principais lineamentos geológicos sobre imagens de satélite e modelos SRTM. Além da análise de imagens orbitais, foram realizados também mapeamentos em campo, concentrados sobretudo nas áreas de cabeceira, próximos ao complexo Alegria, visando identificar os tipos de fraturamentos geológicos existentes. Estes dados foram correlacionados com os poços analisados, em especial aos dados de vazão, justamente visando analisar aqueles poços situados em zonas de fraturas e que apresentam vazões elevadas. Como mencionado, até o momento não foram identificadas alterações químicas nas águas dos poços analisados que possam ser atribuídas ao rompimento da barragem de rejeitos de Fundão.

Devido à pressão hidráulica, relativa ao nível médio da superfície da água destes aquíferos, denominada de nível potenciométrico, espera-se na verdade, que conforme a Figura 124 (CONSORCIO ECOPLAN-LUME, 2010), ocorra o inverso, ou seja, as fraturas funcionem com caminhos para a ascensão da água subterrânea, e não o oposto. Mas seguindo os critérios de prevenção, o Lactec segue monitorando estes poços no sentido de identificar eventuais alterações.

Figura 124 – Perfil hidrológico regional.



Fonte: Consórcio ECOPLAN-LUME (2010), modificado de IGAM (2008).

Um dano indireto infringido aos usuários da água subterrânea e constatado na Bacia Hidrográfica do rio Doce (BHRD) é a presença de poços inadequadamente locados, procurando atender à demanda de mananciais para substituírem as captações no rio Doce no período pós-desastre. Vários destes

poços emergenciais foram locados próximo a instalações de adução preexistentes, porém onde os aquíferos estão vulneráveis a contaminações antrópicas em sua área de recarga, como é o caso de núcleos urbanos.

4.10.2 QUELÔNIOS

Ao longo da calha do rio Doce são conhecidas, minimamente, quatro espécies de quelônios aquáticos. Nenhuma dessas espécies é considerada endêmica da bacia, não obstante o cágado *Phrynops geoffroanus* possa contar com um estoque genético específico que ainda demanda avaliação pormenorizada.

Durante os trabalhos de campo, três das quatro espécies foram registradas na região de estudo (cágado-de-barbicha - *Phrynops geoffroanus*, cágado-amarelo - *Acantochelys radiolata* e cágado-da-serra - *Hydromedusa maximiliani* – Figura 125), porém, dentre estas, apenas a primeira contou com registros em área afetada pelo desastre.

Figura 125 – Registro das espécies nas campanhas de campo, (da esquerda para a direita): indivíduo jovem de cágado-de-barbicha (*Phrynops geoffroanus*), indivíduo adulto de cágado-amarelo (*Acantochelys radiolata*) e espécime adulto de cágado-da-serra (*Hydromedusa maximiliani*).



Fonte: Lactec.

A perda de habitat ou da qualidade de habitat para este grupo temático mostrou-se severa no C1, onde a lama chegou de forma mais densa, causando intensa supressão da vegetação de galeria, gerando mais assoreamento e alcançando porções bastante altas das margens dos rios atingidos, principalmente no rio Gualaxo do Norte. As duas outras espécies foram registradas apenas em pontos-controle. Desta forma, não se descarta a possibilidade de que os efeitos do rompimento da barragem tenham afetado as populações de quelônios, em especial nos rios imediatamente a jusante da barragem. Entretanto, mesmo nas áreas controle os registros de tais espécies foram ainda pouco expressivos (apenas três registros para *H. maximiliani* e um para *A. radiolata*), dificultando a análise da magnitude do dano sobre as mesmas.

Em relação a *P. geoffroanus*, a espécie contou até o momento com 53 registros em sete localidades (sendo duas áreas-controle e uma observação oportunística em local distinto dos pontos amostrais). Em um dos pontos amostrais afetados pelos rejeitos (São José do Goiabal – pontos RD12 e RD13) foram encontradas duas ninhadas da espécie em três das campanhas, indicando recrutamento recente (Figura 126). Entretanto, tais pontos encontram-se nas proximidades da foz de afluentes do rio Doce, podendo este ser o motivo de tal recrutamento. Nos demais locais afetados os registros foram pontuais e isolados.

Quanto a *Rhinoclemmys* sp., esta espécie não foi registrada em campo, nem na área afetada, nem em áreas-controle. Aparentemente, trata-se de uma espécie rara, de difícil mensuração quanto a impactos como os ora avaliados.

Portanto, como resultado preliminar, foi possível constatar que a espécie cágado-de-barbicha (*p. geoffroanus*) foi registrada em várias áreas amostrais, inclusive áreas antropizadas e que foram diretamente afetadas pelo rejeito, tanto no rio Doce quanto no rio do Carmo, apresentando indivíduos jovens e filhotes, indicando recrutamento da espécie. Entretanto, no rio Gualaxo do Norte, apesar dos relatos de alguns moradores da região de terem avistado cágados no rio após o desastre (enquanto outros dizem nunca mais terem visto após o evento), ainda não foi confirmada a presença de espécies do grupo temático no ambiente. Apenas o cágado-da-serra (*H. maximiliani*) foi registrado na região de Monsenhor Horta, em afluentes, que podem proporcionar o aporte de espécimes ao rio Gualaxo do Norte no futuro.

Figura 126 – Indivíduo filhote de *P. geoffroanus* registrado na área amostral R 12, no rio Doce, município de Rio Casca (MG).

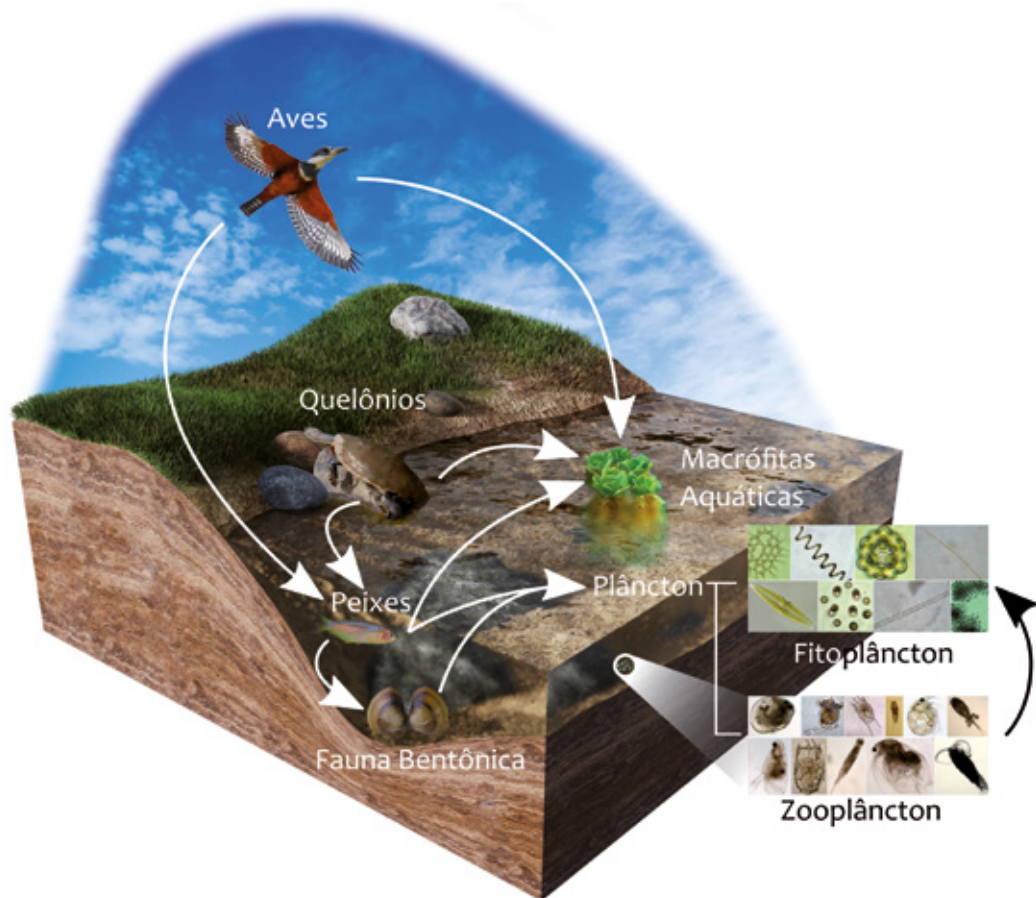


Fonte: Lactec.

4.11 SÍNTESE DOS DANOS

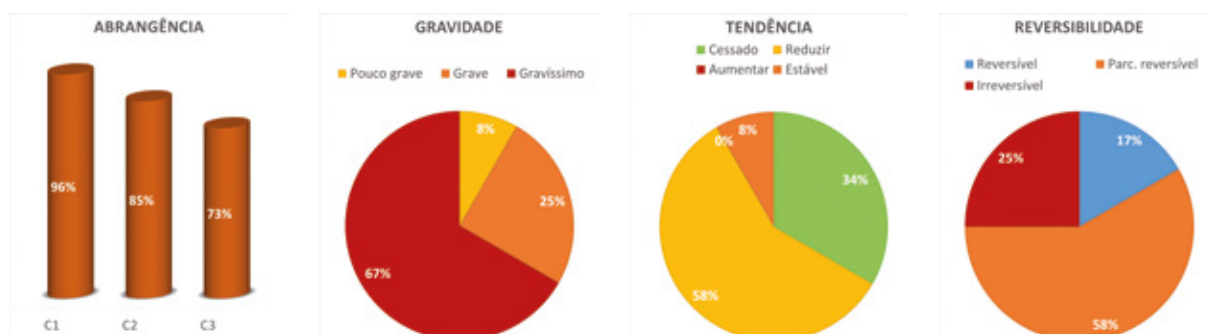
Foram identificados, ao todo, 26 danos no ambiente aquático continental que foram classificados de acordo com as diferentes áreas temáticas apresentadas na Figura 127. Basearam-se em diferentes métodos amostrais e análises, mas sobretudo utilizaram-se da comparação de dados anteriores ao desastre, denominados de linha-base, com os dados pós-desastre e suas interações. Devido à ausência ou limitação de dados de linha-base, algumas áreas temáticas não conseguiram caracterizar e mensurar os danos, como por exemplo, águas subterrâneas e quelônios.

Figura 127 – Áreas temáticas do ambiente aquático continental.



Elaborado por: Lactec.

Os danos foram classificados quanto sua abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade, conforme a Figura 128. Em geral, o desastre no ambiente aquático continental abrangeu principalmente os compartimentos 1 e 2. A maior parte dos danos foi classificado como gravíssimo e grave, com tendência a redução e parcialmente reversível. Isso remete a um cenário em que os ambientes foram afetados de forma tão significativa que dificilmente serão como antes do rompimento da barragem de Fundão. Poucos danos foram considerados cessados, o que significa que depois de anos, os danos decorrentes do desastre ainda persistem na região afetada.

Figura 128 – Gráficos de gravidade, tendência e reversibilidade geral para o meio aquático continental.

Elaborado por: Lactec.

Os estudos realizados ao longo do rio Doce indicaram que, mesmo após três anos do desastre, são ainda verificadas alterações químicas e físicas significativas em diversas matrizes analisadas. Embora se note uma tendência de redução para a maioria dos danos, verificou-se que no C2B, onde há a maior concentração de anomalias, residem ainda danos graves e gravíssimos para os sedimentos.

Importante destacar que associadas a este ambiente encontram-se diversas necessidades e demandas da sociedade. Estas demandas são chamadas de serviços ecossistêmicos, dentre os quais, pode-se mencionar o uso da água para abastecimento, irrigação, dessedentação animal, habitat, biodiversidade, além da pesca, geração de energia, uso em indústrias e no comércio. Além destes, devem ser mencionados àqueles de caráter sociocultural, com por exemplo a questão do valor estético, espiritual, turístico, educacional e histórico, que o rio exerce sobre as comunidades ribeirinhas, ou seja, qualquer mudança no suprimento destes serviços, afeta a sociedade e a biota em vários níveis e intensidades, muitas vezes de forma irreversível.

5 ZONA COSTEIRA E MARINHA

Após 17 dias do rompimento da barragem de Fundão, no dia 21/11/15, a lama de rejeitos minerais chegou à região estuarina do rio Doce e se dispersou no mar ao longo das adjacências de sua foz. Neste contexto, além do oceano, regiões de estuário, lagoas, praias e manguezais ao norte e ao sul também foram potencialmente afetados. Foram avaliados os componentes hidrológicos (intensidade e dispersão da pluma), qualidade de água e sedimentos desta região, comunidades aquáticas de fitoplâncton (microalgas marinhas), zooplâncton (animais microscópicos presentes na coluna da água), macroinvertebrados bentônicos (animais associados ao fundo marinho), ictiofauna (peixes), tartarugas marinhas (quelônios) e cetáceos (botos, golfinhos, baleias), além dos aspectos ecotoxicológicos associados às principais comunidades biológicas e áreas de proteção ambiental (UCs e outros tipos de áreas legalmente protegidas) (Figura 129).

A pluma de rejeitos se espalhou pela região costeira do Espírito Santo elevando as concentrações de sólidos suspensos e de elementos potencialmente tóxicos por uma grande extensão, tanto na água quanto no sedimento. Todo este processo comprometeu a saúde dos organismos, deixando-os expostos a esses elementos e às variações na qualidade do habitat. Além disso, ecossistemas importantes e notoriamente sensíveis como a vegetação de restinga (próxima à foz do rio Doce) e manguezais como o do rio Piraquê-açu e Mariricu, bem como as áreas de proteção foram avaliados para verificação de possíveis danos advindos do desastre.

Por fim, o comprometimento da atividade pesqueira no estado do Espírito Santo, tanto pela diminuição da riqueza e diversidade dos peixes quanto pela contaminação deste recurso alimentar foram explorados neste trabalho a fim de elucidar os danos provocados pela pluma de rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão.

Figura 129 – Síntese dos danos socioambientais na Zona Costeira e Marinha.



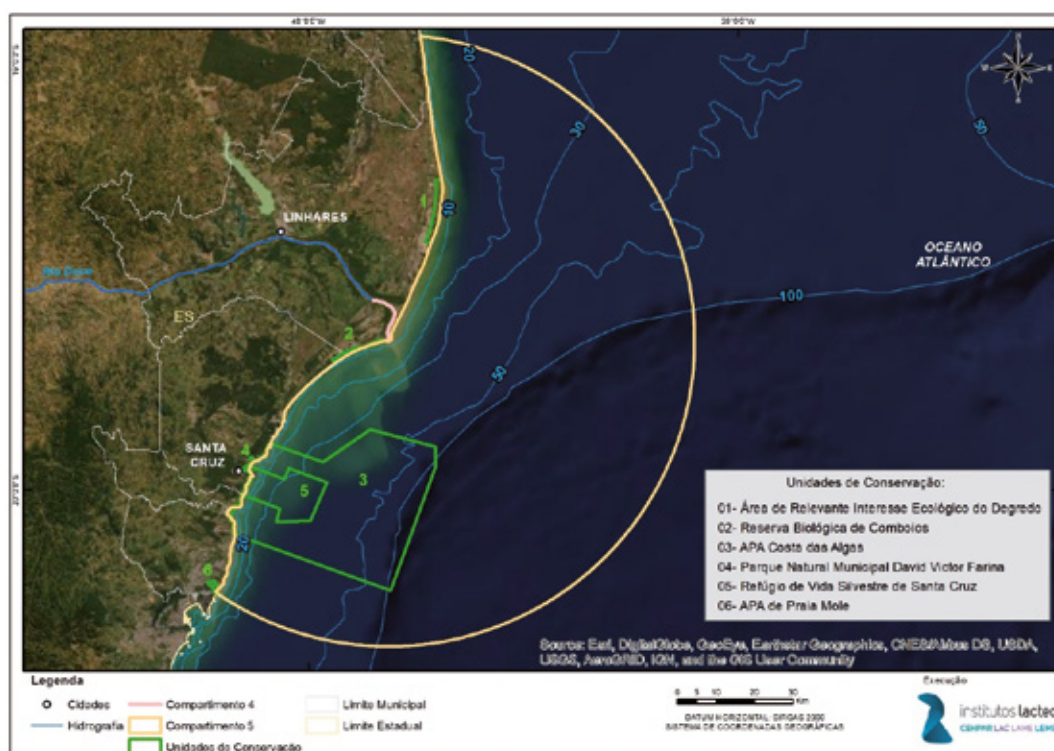
Elaborado por: Lactec.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de abrangência e os limites utilizados nesse estudo foram definidos considerando informações disponíveis no momento do planejamento do estudo (início de 2017), sobre a dispersão da pluma de sedimentos de maior intensidade que chegou à foz do rio Doce e região marinha, sendo definida através dos limites sul na região da APA Costa das Algas, Aracruz (ES) e norte pela foz do rio Mariricu, afluente do rio São Mateus, Linhares (ES).

A Zona Costeira e Marinha foi subdividida em duas grandes áreas (compartimentos). O C4 engloba o estuário do rio Doce, além da lagoa Monsarás e o estuário do rio Piraquê-açu (confluência com o rio Piraquê-mirim) e o C5 é composto pela porção marinha da área abrangida pelo diagnóstico, delimitado a partir da foz do rio Doce, por um raio de 80 km (Figura 130). Faz parte do C5, também, as faixas de praia arenosa e os manguezais. Ressalta-se que o banco dos Abrolhos foi tratado separadamente dentro do ambiente da Zona Costeira e Marinha.

Figura 130 – Mapa da área de estudo para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).



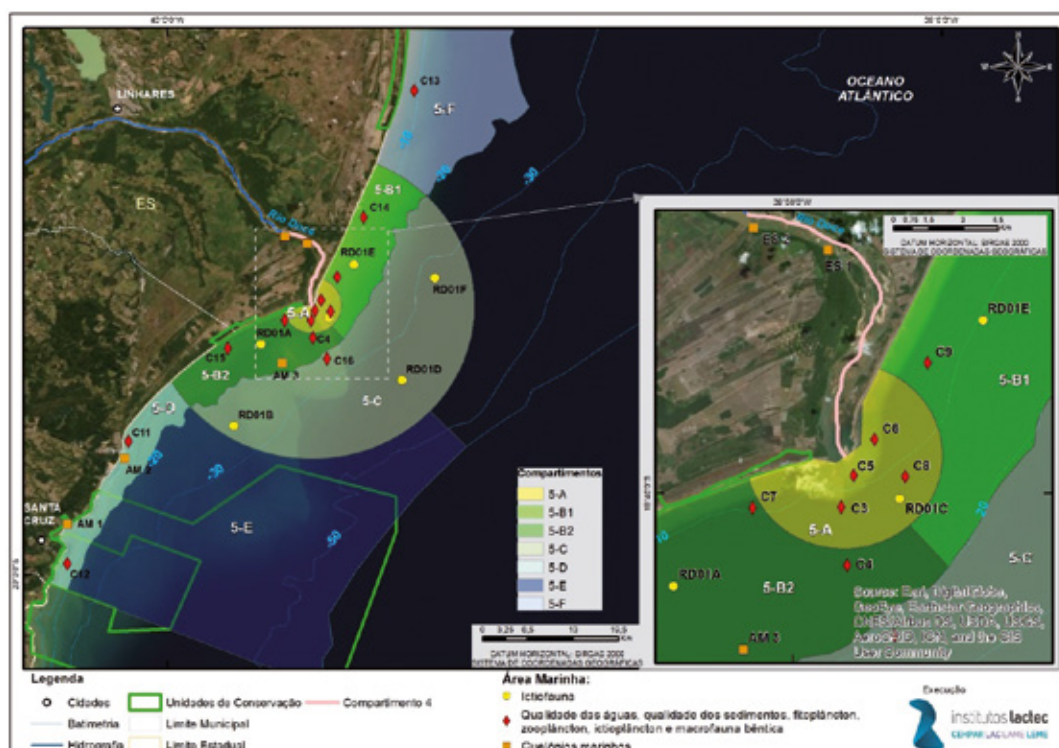
Execução: Lactec.

Visando facilitar a interpretação dos resultados e o entendimento dos danos e suas gravidades, foram definidos sub compartimentos de acordo com as distâncias a partir da foz do rio Doce e de acordo com as profundidades (Tabela 58 e Figura 131). Foram avaliadas, além disso, as faixas de praias arenosas dentro do limite norte e sul da área de estudo, os estuários do rio Doce e do rio Piraquê-açu, e os manguezais do rio Mariricu e do rio Piraquê-açu. Na foz do rio Doce não há manguezal verdadeiro, apesar de possuir algumas espécies vegetais típicas de mangue. Especificamente para a coleta de dados primários, as estações amostrais para cada grupo avaliado podem ser observadas na Tabela 58, Figura 132, 133 e 134.

Tabela 58 – Compartimentalização da Zona Marinha para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).

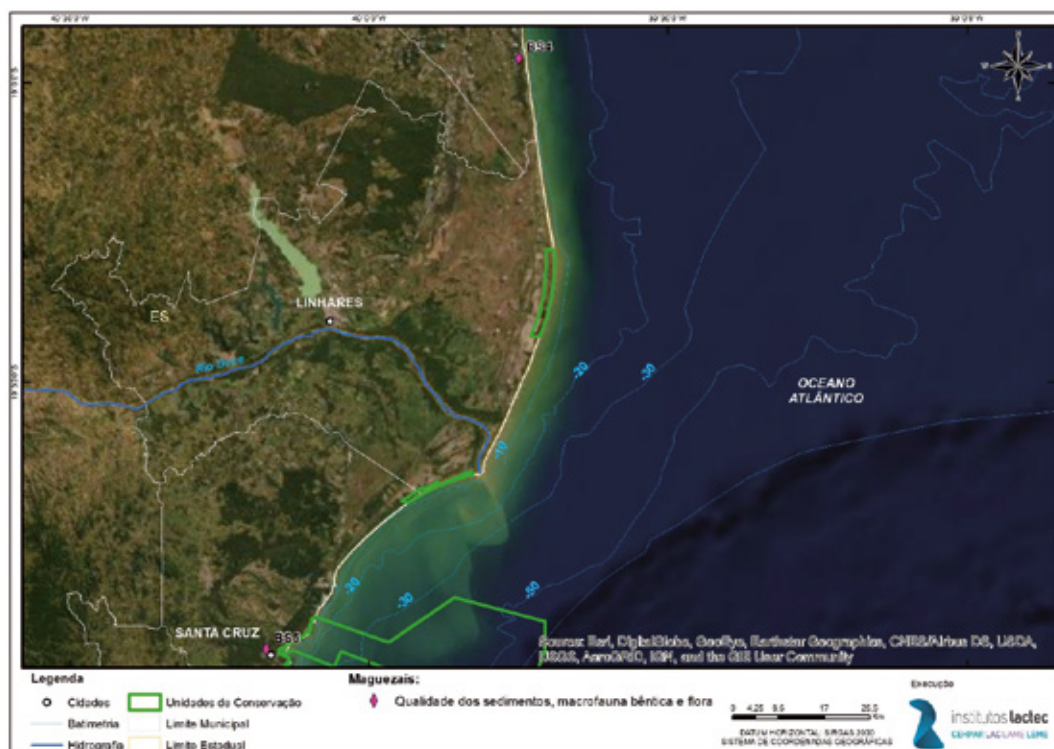
Profundidade do ponto	Compartimento				
	Raio <4 km da foz	Raio Entre 4 e 22 km da foz		> raio de 22 km da foz	
		Norte	Sul	Sul	Norte
<20 metros	5-A	5-B1	5-B2	5-D	5-F
Entre 20 e 50 metros		5-C		5-E	

Figura 131 – Compartimentalização e estações amostrais da Área Marinha para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão (MG).



Execução: Lactec.

Figura 134 – Manguezais avaliados para o diagnóstico dos danos à Zona Costeira e Marinha decorrentes do rompimento da barragem de Fundão(MG).



Execução: Lactec.

5.2 METODOLOGIA

Devido à grande diversidade de parâmetros, indicadores e componentes, cada área temática seguiu critérios independentes para mensuração dos danos e respectiva definição metodológica para escala de gravidade. A seguir apresentam-se os métodos de coleta e análise dos dados de cada um dos componentes estudados na Zona Costeira e Marinha, utilizados para identificação e quantificação dos danos decorrentes do desastre.

5.2.1 QUALIDADE DAS ÁGUAS

A avaliação dos danos à qualidade das águas foi realizada através de análise de dados secundários anteriores e posteriores ao desastre e de coleta de amostras realizada pelo Lactec.

Para a definição dos danos a qualidade das águas, os dados foram comparados com os limites máximos observados no período pré-desastre (P0) e com os padrões de qualidade das águas estabelecidos na legislação nacional (Resolução CONAMA nº 357/2005). Para o estuário do rio Piraquê-açu e a Lagoa Monsarás, devido a inexistência de dados pré-desastre nestes ambientes, buscou-se avaliar a tendência da qualidade da água no período pós-desastre. Os danos avaliados na água foram o aumento da concentração de sólidos, a redução das concentrações de OD e o aumento da concentração de EPTs. Foram analisados 37 EPTs, porém para a classificação do dano, foram selecionados 11 elementos que foram utilizados como indicadores, sendo eles: Al, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, V e Zn.

Os dados foram classificados de acordo com as definições da Tabela 59. Posteriormente, foi realizado um cálculo de proporção entre os dados classificados nas três categorias de alteração para cada um dos compartimentos e períodos de tempo. Para a classificação dos danos, levou-se em consideração os percentuais da classe de alteração mais significativa que predominou em um dos meses do período P1 (novembro/2015 a março/2016), visto que neste período ocorreram as maiores alterações na qualidade das águas estuarinas e marinhas. Apesar dos diferentes indicadores utilizados, a classificação final do dano levou em conta a categoria de alteração mais severa registrada para pelo menos um dos indicadores do dano.

Os dados classificados de acordo com as categorias A, B e C foram então agrupados em cada um dos compartimentos e períodos de tempo aos quais estavam relacionados. De modo a subsidiar a mensuração dos danos à qualidade da água, para cada um dos indicadores dos danos verificou-se a categoria de classificação (Tabela 60) predominante no período P1. A partir de P1, observou-se a tendência de evolução dos danos.

Tabela 59 – Definições utilizadas para classificação do dano.

Categoria de classificação dos dados	Descrição
Categoria A	Valores de acordo com os limites da classe 1 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salobras/ salinas e dentro da variação histórica pré-desastre
Categoria B	Valores de acordo com a variação histórica pré-desastre, mas que não atenderam aos limites da classe 1, ou então, valores que extrapolaram a variação histórica pré-desastre, mas que atenderam aos limites da classe 1
Categoria C	Valores em desacordo com os limites da classe 1 da Resolução CONAMA Nº 357/2005 para águas salobras/ salinas e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre

A gravidade dos danos foi estabelecida de acordo com a pior categoria de classificação para pelo menos um de seus indicadores no período de novembro/2015 a março/2016 (P1). Ou seja, se para o dano “aumento das concentrações de EPTs na água” ao menos um dos indicadores avaliados foi classificado, na categoria C, o dano como um todo foi considerado gravíssimo no compartimento avaliado, mesmo que outro indicador tenha sido classificado na categoria A. A Tabela 60 apresenta os critérios para a definição da gravidade dos danos à qualidade da água, bem como sua interpretação.

Tabela 60 – Critério para definição da gravidade dos danos à qualidade da água superficial.

Gravidade	Critério	Interpretação
Pouco grave	Todos os indicadores foram classificados na categoria A em relação ao P1.	Dano que perdurou por um menor tempo em relação aos demais e/ou apresentou alterações menores em termos de magnitude com relação à linha-base.
Grave	Nenhum dos indicadores foi classificado na categoria C em P1 e ao menos um dos indicadores foi classificado na categoria B no mesmo período.	Quando observada alteração em relação à linha-base, mas de acordo com os padrões legislados. Ou então, quando não se atendeu ao padrão legislado, mas essa condição já era observada antes do rompimento.
Gravíssimo	Pelo menos um dos indicadores foi classificado na categoria C em P1.	Indica alterações mais significativas em relação à linha-base, haja vista sua maior duração e magnitude.

5.2.2 COMUNIDADES PLANCTÔNICAS

Alterações na comunidade fitoplanctônica foram avaliadas para os ambientes estuarinos e marinho, sempre que possível, comparando as informações de linha-base com as de pós-desastre, como segue:

- Ambientes estuarinos: informações sobre as microalgas dos estuários dos rios Doce e Pirquê-Açu foram obtidas de literatura e pelo Lactec. E para a laguna Monsarás foram considerados os dados de literatura, do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimentos (PMQQS) da Fundação Renova e do Lactec.
- Região marinha: os dados de linha-base foram provenientes de relatórios de caracterização ambiental, realizados, principalmente, próximo a foz do rio Doce e em Aracruz. E os de pós-desastre, obtidos do monitoramento realizado pela UFES e pelo Lactec.

Os dados primários foram obtidos das campanhas realizadas pelo Lactec em julho/2018 e fevereiro/2019. Amostras de fitoplâncton foram coletadas na subsuperfície da água, acondicionadas em frascos de polietileno e fixadas com solução Lugol Acético (1%). Nos ambientes marinhos também foram obtidas amostras de profundidade com o auxílio de garrafa de Van Dorn, no limite da zona eufótica. A análise das amostras, para avaliação da riqueza de espécies e cálculo da densidade fitoplanctônica, foi realizada em microscópio invertido Olympus CKX41 em 600x, pela técnica de Utermöhl (1958) que prevê contagem dos organismos em cubetas de sedimentação. Valores de concentração de clorofila-a foram estimados com sonda multiparâmetro YSI EXO2 em campo.

O dano e tendência do dano à comunidade fitoplanctônica não puderam ser mensurados nos ambientes estuarinos devido a inexistência ou escassez de estudos de linha-base sobre as microalgas dos estuários avaliados, e o início tardio e descontínuo das amostragens após o desastre. Também, não foi possível mensurar os danos causados pela lama de rejeitos sobre a comunidade fitoplanctônica na região marinha próxima a foz do rio Doce, devido a indisponibilidade dos dados brutos dos parâmetros avaliados (densidade, riqueza e concentração de clorofila-a) nas estações de amostragem. Deste modo, as informações obtidas foram utilizadas para caracterizar as condições do local após o desastre, e sempre que possível, comparando com os dados de linha-base.

Para a comunidade zooplanctônica, as amostras foram coletadas utilizando uma rede típica para coleta de plâncton e posteriormente analisadas de forma qualitativa e quantitativa com auxílio de microscópio estereoscópico (lupa). Para a avaliação da estrutura da comunidade zooplanctônica, a análise estatística contemplou a Frequência de Ocorrência (indica o número de vezes que o organismo ocorreu nos pontos amostrais da área de estudo), Densidade (indica o número de organismos por volume de água filtrada pela rede de coleta), Abundância Relativa (indica o quanto a abundância de cada grupo contribuiu na abundância do zooplâncton total), Índices de Riqueza (afetado pelo número de indivíduos em função da sua densidade), Diversidade (afetado pelo número de espécies e a proporção em que elas se encontram no ecossistema em estudo) e Equitabilidade (mede quão uniformemente os indivíduos são distribuídos entre as espécies encontradas) e Análise de Cluster (análise multivariada de agrupamento que busca detectar possível associação na distribuição da comunidade).

Para a definição do dano relativo à comunidade zooplanctônica foram avaliados três indicadores: composição específica, densidade e concentração de EPTs.

Para o ictioplâncton não foi possível a identificação e quantificação de danos devido à falta de dados pré e pós-desastre.

5.2.3 DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS NO MAR

A determinação da área e quantidade de material depositado foi realizada através de simulações matemáticas de um cenário hipotético, onde não ocorreu o rompimento, para calcular a área e espessura de deposição esperada naturalmente e outro cenário incluindo os efeitos do desastre. Os dados ambientais utilizados na modelagem foram as informações oceanográficas, hidrológicas e meteorológicas do período do pré e pós-desastre. Para o cenário sem o desastre, adotou-se que a relação entre o fluxo de água e fluxo de sólidos (curva chave sólida) identificada na linha-base se manteve a mesma durante o período do desastre. Já no cenário com o rompimento da barragem de Fundão foi utilizada a concentração de sedimento em suspensão medida, assim incluindo os efeitos do desastre.

A gravidade do dano foi definida utilizando o fator de contaminação (FC) e adotado o critério de classificação proposto por Hakanson (1980) conforme é mostrado na Tabela 61. Neste caso, o FC é a proporção entre a espessura de sólidos depositado no cenário com desastre e a espessura do cenário sem o desastre.

Tabela 61 – Critérios de classificação da gravidade do dano.

Classificação	FC	Qualidade
Pouco Grave	<1	Baixa contaminação
Grave	1 a 6	Contaminação moderada
Gravíssimo	>6	Alta Contaminação

5.2.4 QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS

Para a avaliação dos danos à qualidade dos sedimentos foram coletadas amostras utilizando uma draga. Foram analisados os tamanhos de partícula do sedimento (granulometria) e a concentração de EPTs. Foram analisados 37 EPTs, porém para a classificação do dano, foram selecionados 13 elementos que foram utilizados como indicadores, sendo eles: Al, As, Ba, Cd, Pb, Co, Cr, Fe, Mn, Hg, Ni, V e Zn. Os dados levantados no pós-desastre foram comparados com os dados pré-desastre, que abrangem o período de 1992 a 2015 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017 a, b; 2018 b).

Os dados das concentrações de EPTs no sedimento foram classificados de acordo com as definições da Tabela 62 para cada um dos compartimentos definidos.

Tabela 62 – Definições utilizadas para classificação do dano.

Gravidade	Definição
Categoria A	Valores abaixo do limite do Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 ¹ e abaixo do máximo histórico ² pré-desastre.
Categoria B	Valores inferiores aos máximos históricos e superiores aos limites do Nível 1 ou então superiores aos máximos históricos e inferiores aos limites do Nível 1.
Categoria C	Valores acima do limite do Nível 1 da Resolução CONAMA Nº 454/2012 e acima do máximo histórico.

¹De forma complementar, para as variáveis que não apresentam padrões estabelecidos pelo CONAMA ou linha-base, foram utilizados padrões internacionais (BUCHMAN, 2008) - UET.

²Máximo histórico = piores valores já registrados na linha-base, concentração mais alta de EPTs registrada

Para a classificação da categoria de alteração de cada indicador, foram utilizados os dados do período P1 (novembro/2015 a março/2016), pois foi quando ocorreram as maiores alterações na qualidade do sedimento estuarino e marinho, de acordo com as seguintes definições:

- Pouco grave: Pelo menos 1/3 dos dados classificados como Categoria A; sendo que os dados classificados nas Categoria C e B não superaram 1/3 do total.
- Grave: Pelo menos 1/3 dos dados classificados como Categoria B, sendo que os dados classificados na Categoria C não superaram 1/3 do total;
- Gravíssimo: Pelo menos 1/3 dos dados classificados como Categoria C;

A despeito dos diferentes indicadores utilizados, a classificação final do dano levou em conta a categoria de alteração mais severa registrada para pelo menos um dos indicadores do dano, obedecendo a mesma analogia utilizada para o dano em relação ao aumento da concentração de EPTs na água.

Quanto à alteração da granulometria do sedimento no estuário do rio Doce, considerou-se que onde houve redução do tamanho dos grãos (aumento de silte e argila) o dano foi mais grave e onde houve aumento do tamanho dos grãos (aumento de areia), o dano foi menos grave. Este critério foi adotado devido a maior capacidade das partículas finas (silte e argila) em reter os EPTs. Na região da foz do rio Doce não foi possível classificar esse dano tendo em vista a falta de dados pré-desastre, assim como para o estuário do rio Piraquê-açu, Lagoa Monsarás, praias e manguezal ao norte e ao sul da foz do rio Doce.

Para a verificação nas alterações estruturais nas comunidades bênticas dos fundos inconsolidados os organismos foram amostrados de acordo com o ambiente estudado em 22 estações de coletas. Para os organismos de estuários (cinco estações de coletas) e marinho (13 estações) foram colhidas três réplicas amostrais com um pegador de fundo. Para a lagoa Monsarás o infralitoral foi amostrado com um pegador de fundo e colhidas três réplicas. As margens foram amostradas utilizando-se o equipamento surber para amostras quantitativas e realizadas três réplicas. Nos manguezais (duas estações) a infauna foi coletada através de um corer de 15 cm de diâmetro, as tocas de *Ucides cordatus* e presença de *Littoraria angulifera*, ostras e cirripédios foram registrados através da delimitação de áreas com 2m², ambos procedimentos foram replicados por cinco vezes e a epifauna coletada manualmente por 10 minutos. Nas praias (duas estações) os animais foram coletados no sub-, médio e supralitoral através de um corer de 20 cm de diâmetro com três réplicas em cada transecto (Figura 135).

As amostras de todos os ambientes foram fixadas em formalina a 4% e posteriormente no laboratório lavadas em água corrente. Os organismos foram separados e preservados em álcool 70%. Os animais foram contados e identificados até o menor nível taxonômico possível.

Para a verificação do dano nas comunidades bênticas foi realizado um levantamento bibliográfico de dados secundários que foram utilizados como linha-base.

Os valores dos índices ecológicos, composição, número de *taxa*, abundância, densidade e diversidade foram utilizados para as descrições e comparações entre os períodos analisados.

A constatação e a gravidade do dano foram determinadas de acordo com os valores dos índices ecológicos, caso fossem inferiores aos levantados nos estudos de linha-base foi dado como o dano constatado.

Para a caracterização da gravidade do dano foi levado em consideração a seguinte escala de magnitude do dano: para diminuição dos índices ecológicos em até 10% dos valores verificados na linha-base o dano foi classificado em pouco grave; para diminuição entre 11% a 50% foi classificado como grave; e gravíssimo apresentando diminuição dos índices ecológicos acima de 50%.

Além disso, foi realizado um levantamento dos estudos que abordaram o estado de saúde dos invertebrados bênticos de fundos inconsolidados pré e pós-desastre. Foram considerados estudos realizados de contaminação por EPTs e biomarcadores que pudessem constatar alterações fisiológicas e funcionais para os organismos.

Figura 135 – Fotos das coletas dos organismos bênticos de fundos inconsolidados na área de passagem da pluma de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG. a) Equipamento de coleta e estocagem das amostras de estuários e ambiente marinho; b) Método de coletas da infauna de manguezais; c): Método de coleta da infauna de praias e d) Lavagem das amostras em peneira de malha de 0,5 mm de diâmetro.



Fonte: Lactec.

5.2.5 PEIXES

Para a coleta dos peixes na área amostral da região marinha foram utilizadas redes de arrasto cônicas, operadas no fundo por embarcação de pesca da região (Figura 136). No ambiente estuarino as coletas foram realizadas com baterias de redes de emalhe de espera simples, arremessos de tarrafa, redes de arrasto manual e puçás. As campanhas de coleta foram realizadas em julho (P1), setembro (P2) e novembro (P3) de 2018 e fevereiro (P4) de 2019, e as estações de coleta podem ser visualizadas no item 5.1.

Para a avaliação das alterações nos indicadores ecológicos e descrição dos danos, além dos dados de Linha de Base atualizados, foram considerados como valor de referência os resultados obtidos nas amostragens realizadas em 2016/2017 pela CTA/SAMARCO após o rompimento da barragem de Fundão, que apresentaram a mesma abrangência espacial e os mesmos amostradores das coletas realizadas pelo Lactec. Também foram utilizados como referência dados de diagnósticos realizados na região do Delta do rio Doce e várzeas litorâneas em Linhares, no estado do Espírito Santo (CEA, 2001; CAL, 2001). Os danos foram classificados conforme Tabela 63.

Tabela 63 – Classificação dos danos aos peixes.

Gravidade	Critério
Pouco grave	Utilizada para àqueles que não apresentaram uma diminuição significativa em relação aos dados de linha-base e para àqueles que essas pequenas variações segundo a bibliografia especializada não são intensas o suficiente para provocar danos irreversíveis à comunidade de peixes.
Grave	Quando os indicadores ecológicos revelaram uma diminuição em relação aos dados de linha de base ou uma indicação de estresse ambiental, porém com tendência de redução e sinais de retorno às condições anteriores ao desastre.
Gravíssimo	Quando os indicadores, além de revelarem a existência de uma assembleia simplificada, dominada por poucas espécies de hábito generalista, também não apresentaram sinais evidentes de redução.

Figura 136– Métodos de coleta utilizados para a captura dos peixes.



Embarcação utilizada – ambiente costeiro



Rede de arrasto com portas



Rede de espera – ambiente estuarino



Elops saurus, ubarana

Fonte: Lactec.

5.2.6 ÁREAS PROTEGIDAS

As áreas protegidas consideradas para a zona costeira e marinha seguem as mesmas definições já apresentadas no ambiente terrestre. A avaliação do dano provocado nestas áreas foi realizada através de Sistema de Informação Geográfica, onde foi mensurada a extensão linear (km) e área (hectares) dos limites das áreas protegidas que foram atingidas pela pluma de rejeitos no mar.

A classificação quanto à gravidade foi definida baseando-se na escala do indicador, conforme mostra a Tabela 64. As principais referências utilizadas para definir essa escala foram: Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, Decreto nº 6.660/2008, que regulamenta dispositivos da Lei nº 11.428/2006 (Lei da Mata Atlântica) e a Lei nº 12.727/2012 que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Desta forma, foi realizada as escalas para subdividir a área afetada que encontre paralelo na legislação, e que indique padrões de alteração correspondentes a níveis de degradação toleráveis (pouco grave) e intoleráveis (grave e gravíssimo).

Tabela 64 – Dano decorrente do desastre do rompimento da barragem de Fundão da Samarco identificado nas Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas com seu respectivo indicador, escala e gravidade.

INDICADOR	ESCALA DO INDICADOR	GRAVIDADE
Unidades de Conservação ¹ Proporção entre a área afetada pela pluma de rejeitos e área total da UC (em %)	Superior a 50% da área da UC afetada	Gravíssimo
	Entre 25% e 50% da área da UC afetada	Grave
	Inferior a 25% da área da UC afetada	Pouco grave
Zona de Amortecimento ² Área afetada pela pluma de rejeitos (em hectares)	Maior que 50 hectares	Gravíssimo
	De 11 a 50 hectares	Grave
	Até 10 hectares	Pouco grave

1 – A verificação da magnitude do dano para este indicador considera que as alterações que provocaram dano referem-se à área afetada pela Pluma Intensa (15 - 504 mg/L) e Pluma Muito Intensa (> 504 mg/L). 2 – Para as Zonas de Amortecimento afetadas utilizou-se como indicador a área efetivamente afetada pela Pluma Intensa (15 - 504 mg/L) e Pluma Muito Intensa (> 504 mg/L). Para ambos os indicadores, a magnitude do dano quando a área foi afetada pelas classes Pluma Branda (1 mg/L - 2 mg/L) e Pluma Intermediária (2 - 15 mg/L) foi considerada pouco grave, independentemente da área total afetada.

A abrangência foi determinada a partir da localização da área afetada em relação aos compartimentos definidos: C4 e C5. Para a avaliação da evolução do dano, considerou-se para as áreas afetadas pela Pluma Branda e Pluma Intermediária, em geral, que o dano se encontra estável, visto que o evento foi cessado, mas os EPTs ainda se fazem presente no ambiente marinho. Já para as áreas afetadas pela Pluma Muito Intensa e Pluma Intensa foi considerado que o dano tende a aumentar, uma vez que novos eventos de chuva carrearão mais substância a essas áreas, ondem tendem a se concentrar.

Para a avaliação de reversibilidade, considerando as medidas de reparação até o momento adotadas, de caráter investigativo, emergencial ou em regiões específicas, o dano foi classificado como parcialmente reversível para as localidades afetadas pela Pluma Muito Intensa e Pluma Intensa, e reversível para as áreas afetadas pela Pluma Branda e Pluma Intermediária.

5.2.7 VEGETAÇÃO COSTEIRA

Para a elaboração do diagnóstico dos danos à restinga foi realizado o levantamento das espécies ocorrentes através de amostragem das plantas em uma determinada área, em 15 pontos próximos a foz do rio Doce. As restingas são comunidades vegetais únicas estabelecidas sobre as planícies litorâneas, e são frequentemente associadas a desembocaduras de grandes rios e/ou reentrâncias da costa brasileira. Os diferentes tipos de vegetação ocorrentes nas restingas brasileiras variam desde formações rasteiras, passando por formações arbustivas, abertas ou fechadas, chegando a florestas cuja altura das maiores árvores geralmente não ultrapassam os 20 metros (MENEZES-SILVA, 2002). A flora dos manguezais ainda não foi alvo de estudos devido à ausência desta formação na foz do rio Doce, sendo encontrada apenas na região de Barra Nova (São Mateus) e Aracruz. Além disso, a escassez de indicadores comparáveis dificultou esta avaliação.

5.2.8 QUELÔNIOS E MAMÍFEROS MARINHOS

Para a identificação de danos do rompimento da barragem de Fundão sobre os quelônios e mamíferos marinhos, foram utilizadas três abordagens: 1) modelagem de distribuição potencial de espécies com base no nicho ecológico; 2) coleta de dados primários; 3) análise de dados secundários.

Dentre os danos avaliados, o único dano identificado e passível de mensuração foi o de perda de qualidade dos habitats, obtido por meio da modelagem de nicho ecológico. Para a modelagem foram selecionadas duas espécies indicadoras do dano, para verificação de perda de adequabilidade ambiental: a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e o boto-cinza (*Sotalia guianensis*)⁵. Para ambas as espécies, inicialmente foi estimada a sua distribuição potencial (com base em registros de ocorrência) e sua relação com 17 variáveis físico-químicas relacionadas à batimetria, temperatura, salinidade e plano de curvatura (curvatura do relevo do fundo oceânico). Além disso, foram utilizadas variáveis com o objetivo de estimar a influência do desastre na distribuição das duas espécies, são elas: (i) absorção total, (ii) clorofila A, (iii) profundidade do disco de Secchi, (iv) sólidos suspensos e (v) turbidez. Como resultado, foram elaborados mapas de adequabilidade ambiental comparando os cenários pré-desastre (P0) e pós desastre (P1 – até março de 2016; P2 – entre março e dezembro de 2016). Para as áreas onde foi identificada a perda de adequabilidade, a intensidade das alterações foi classificada, considerando o período P1, e utilizadas para classificar a gravidade do dano conforme descrito na Tabela 65. Os cenários entre P2 e P1 foram utilizados para a avaliação da reversibilidade e tendência de evolução do dano.

Tabela 65 – Categorias do dano de perda de adequabilidade ambiental para mamíferos e quelônios marinhos.

Categoria	Descrição
Pouco grave	Alterações apenas de intensidade leve - perda inferior a 20% - para as duas espécies.
Grave	Alterações de intensidade moderada - perda entre 20 e 40% - para ao menos uma das espécies.
Gravíssimo	Alteração de intensidade severa - perda acima de 40% - para as duas espécies.

⁵ Além das duas espécies selecionadas para a modelagem, uma terceira espécie também foi utilizada, a pescada-foguete (*Macrodon ancylodon*). Porém, devido às particularidades da espécie, aos aspectos de adequabilidade do modelo, ela não foi utilizada em conjunto com as demais, e sim discutida no tópico da ictiofauna.

Os dados primários foram coletados utilizando diferentes métodos: a) para os quelônios, foi realizado o registro de animais vivos por meio de saídas embarcadas e censo populacional ao longo das praias, em áreas amostrais pré-definidas, registros de carcaças e análises de conteúdos estomacais, com avaliação de prováveis causas de óbito e, investigação de campos de algas macrófitas marinhas (utilizadas como alimento por *C. mydas*), incluindo a coleta de amostras para a avaliação da presença de EPTs (análises ainda em andamento); b) para os cetáceos, foi realizada a observação e registro de animais vivos, por meio de saídas embarcadas para detecção visual de animais e foto-identificação individual, quando possível, e também foi realizado o registro de carcaças de animais encalhados, e a dosagem de EPTs em seus tecidos (Figura 137).

Figura 137 – À esquerda, embarcação utilizada para amostragem de cetáceos; à direita, realização de necropsia em tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) encontrada morta em praia na APA Costa das Algas, em Aracruz/ES.



Fonte: Lactec.

Os dados secundários analisados referem-se a períodos anteriores e posteriores ao desastre e foram provenientes de diferentes fontes: (a) Projeto de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo - PMP/ES-RJ (executado pela Petrobras entre 2010 e 2016) (PETROBRAS, 2017); (b) Base de dados fornecida pelo Projeto TAMAR (2017); e (c) Monitoramento de cetáceos a bordo de navios-barcaça que realizam transporte de Eucalipto e derivados na rota costeira de Belmonte (BA) e Barra do Riacho (ES) (executado pela empresa Veracel Celulose entre 2011 a 2018) (BEZAMAT et al., 2015).

5.3 DANOS À QUALIDADE DAS ÁGUAS

A chegada da pluma de rejeitos na região costeira ocasionou a alteração de parâmetros da qualidade da água, com redução imediata da concentração de OD e aumento das concentrações de sólidos, e posterior aumento das concentrações de EPTs na água.

5.3.1 REDUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) NA ÁGUA

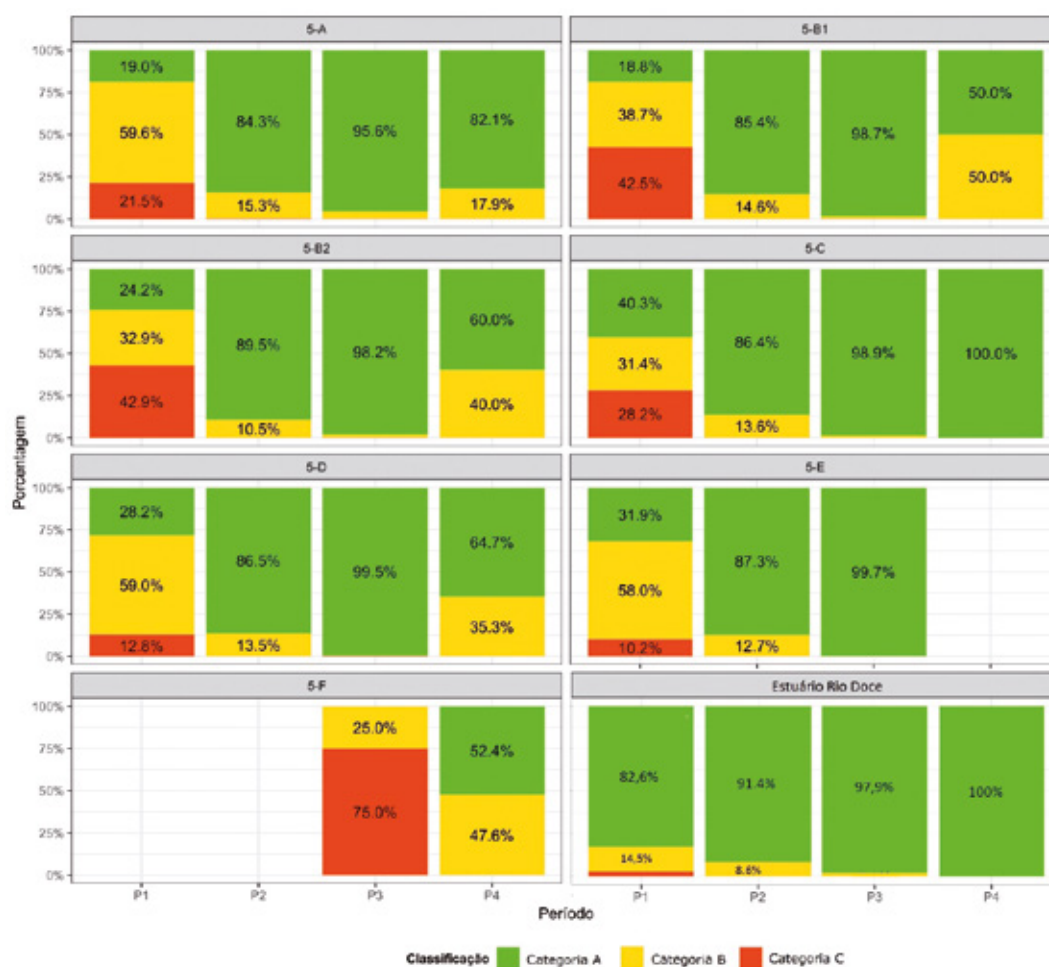
Com a chegada da pluma de rejeito ao estuário do rio Doce e região marinha, observou-se uma redução das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) nestes ambientes. No estuário, no período P1, entre novembro/2015 e março/2016, foram observadas concentrações frequentes de OD abaixo dos limites para águas salobras Classe 1 da Resolução CONAMA Nº 357/2005 (5 mg/L). Já na região marinha adjacente à foz do rio Doce, os dados apontaram para reduções mais significativas e persistentes neste ambiente, sendo observadas concentrações de OD abaixo dos limites da Classe 1 (6 mg/L) para águas salinas e do mínimo histórico observado (4,1 mg/L) em todos os compartimentos analisados, com valores mais reduzidos predominando nos compartimentos mais próximos a foz (5-A, 5-B1, 5-B2, 5-C).

Importante destacar uma possibilidade de superestimação nas medições de oxigênio dissolvido até 27 de fevereiro de 2016, realizado por Renova emergencial, que pode vir a influenciar a classificação dos danos com relação a este indicador, visto que a partir desta data foi alterada a metodologia de medição e praticamente não foram mais registrados dados abaixo dos mínimos históricos.

O dano foi considerado pouco grave no estuário do rio Doce e grave em todos os compartimentos do ambiente marinho. Ao longo do tempo observou-se que as concentrações de oxigênio dissolvido (Figura 138) retornaram para uma faixa de variação similar aos dados de linha-base, e majoritariamente de acordo com a classe 1 da Resolução CONAMA nº 357/2005, sendo este dano considerado cessado e totalmente reversível.

Nos outros ambientes avaliados, lagoa Monsarás e estuário do rio Piraquê-açu, foram observadas concentrações de OD abaixo dos limites da Resolução CONAMA Nº 357/2005 para águas salobras, principalmente na lagoa Monsarás que é um ambiente de menor hidrodinâmica, o que não favorece os processos de oxigenação da água, entretanto não é possível relacionar essas concentrações abaixo do limite ao desastre.

Figura 138 – Gráfico de barra com os dados de oxigênio dissolvido na região marinha classificados conforme a escala de alteração definida e agregados por compartimento e segmentação temporal. (P1 – novembro/2015 a março/2016; P2 – abril/2016 a dez/2016; P3 – 2017; e P4 – 2018).



Elaborado por: Lactec.

5.3.2 AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS NA ÁGUA

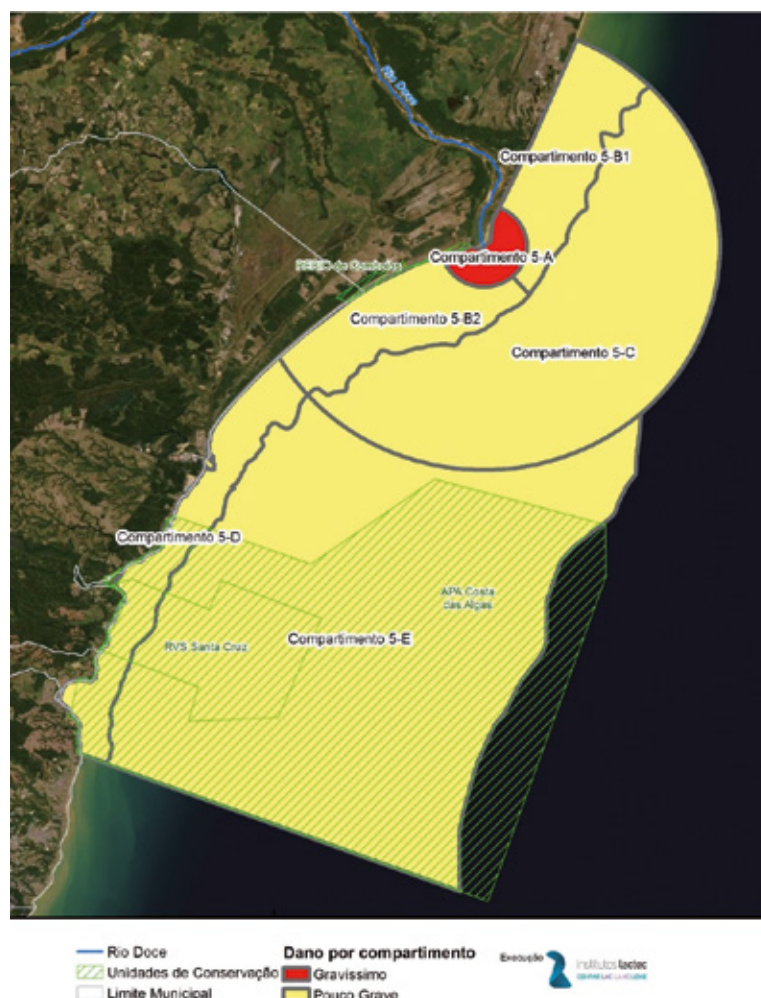
Após o desastre foi observado um aumento nos níveis de turbidez no estuário do rio Doce e na região marinha próxima à foz. Na região marinha, logo após o desastre, entre novembro/2015 e março/2016 (P1), chegaram a ser registrados valores de turbidez entre 1.000 e 5.140 UNT, de 10 a 50 vezes superiores ao máximo histórico ocorrente na região, principalmente nos compartimentos mais próximos à foz 5-A e 5-B1 (Figura 1), tanto em amostras de superfície como em amostras de fundo. Com o aumento da distância em relação à foz do rio Doce, a ordem de grandeza dos valores reduziu, mas ainda foram registrados níveis de turbidez de até seis vezes acima do máximo histórico (C5-C e C5-E, ver Figura 139).

No estuário do rio Doce também foram verificados valores de turbidez que superaram os máximos históricos, principalmente no período logo após o desastre (P1), onde foram registrados níveis de turbidez de até 4.110 UNT, superando o máximo histórico em aproximadamente oito vezes (Figura 140).

O dano foi considerado gravíssimo no estuário do rio Doce e no compartimento mais próximo a foz (5-A), e nos demais compartimentos foi considerado pouco grave (Figura 139). O dano tende a reduzir, mas ainda ocorre, visto que a descarga de sólidos e os níveis de turbidez ainda apresentam valores acima dos máximos históricos, podendo estar sendo influenciados pela ressuspensão de material oriundo do desastre, sendo assim considerou-se também que este dano é parcialmente reversível.

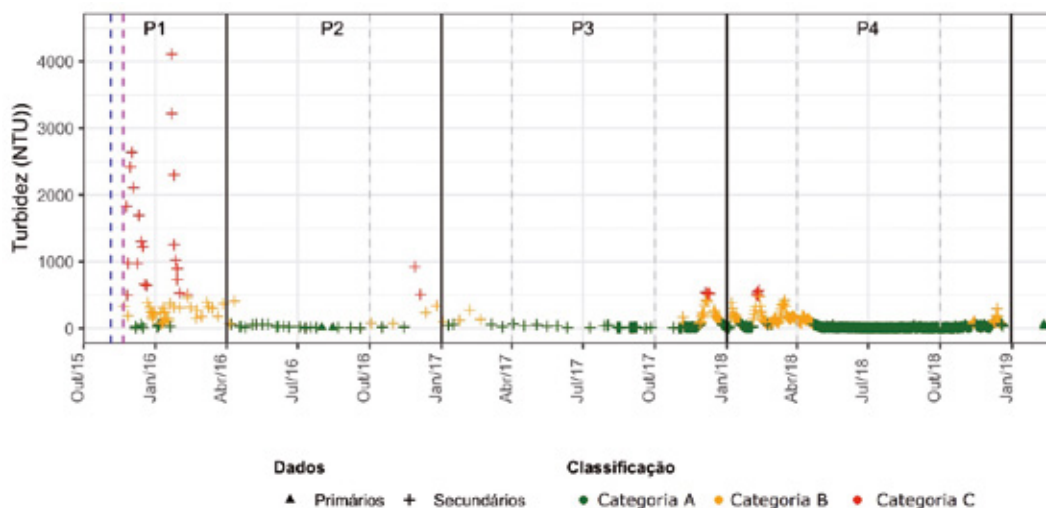
Para a Lagoa Monsarás e o estuário do rio Piraquê-açu foram observadas variações de turbidez ao longo do período pós-desastre, porém, as alterações não puderam ser relacionadas ao desastre devido à falta de dados nestes ambientes logo após a chegada da pluma de sedimentos.

Figura 139 – Classificação dos danos em relação ao aumento da concentração de sólidos nos diferentes compartimentos da região marinha avaliada.



Execução: Lactec.

Figura 140 – Classificação dos dados de turbidez pós-desastre no estuário do rio Doce e no compartimento marinho mais próximo a foz (5-A). Linhas verticais tracejadas indicam a data do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e a transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).



Elaborado por: Lactec.

5.3.3 AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE EPTS NA ÁGUA

Após a chegada da pluma de rejeitos na zona costeira foi possível observar que os indicadores do aumento da concentração de EPTs na água apresentaram valores que superaram os limites legislados nestes ambientes em diversas vezes, conforme pode ser observado na Tabela 66. O valor máximo de Hg total na região marinha, por exemplo, chegou a ser 4.410 vezes superior ao limite legislado.

No estuário do rio Doce, a alteração das concentrações de Al dissolvido e Fe dissolvido foram classificados na categoria C, ou seja, predominantemente superiores aos máximos históricos e aos limites definidos pela legislação ambiental no período P1 (novembro/2015 a março/2016). Os indicadores Cd total, Pb total, Mn total, Cu dissolvido, Cr total, Hg total, Ni total e Zn total, apesar de terem apresentado concentrações acima dos máximos históricos, as alterações foram classificadas na categoria A ou B, pois essa situação ocorreu por pouco tempo. Portanto, o dano em relação ao aumento da concentração de EPTs no estuário do rio Doce é gravíssimo, visto que alguns indicadores apresentaram alterações de concentração na categoria C.

Na região marinha, diferentemente dos ambientes fluviais e estuarino, nenhum indicador apresentou concentrações predominantemente acima do limite legislado e do máximo histórico da linha-base. Alterações classificadas predominantemente na categoria B ocorreram apenas para o indicador Al dissolvido, nos compartimentos mais próximos a foz do rio Doce, porém este elemento não demonstrou ser um bom indicador do dano, visto que naturalmente as concentrações no entorno da foz do rio Doce estão acima do limite da Classe 1 do CONAMA. Para o restante dos indicadores, apesar de terem sido encontrados valores com potencial efeito negativo ao ambiente marinho e acima dos máximos históricos, principalmente nos compartimentos mais próximos da foz (5-A, 5-B1, 5-B2 e 5-C), estes ocorreram em uma parte muito pequena dos dados, sendo as alterações classificadas predominantemente na categoria A. Assim, a classificação final do dano com relação ao aumento da

concentração de EPTs, de acordo com a metodologia proposta, é pouco grave em todos os compartimentos da região marinha.

A maior parte dos indicadores que apresentaram alterações predominantemente classificadas na categoria A estão dentre os EPTs associados ao rejeito com maior potencial de efeito negativo a biota aquática, bem como apresentam a possibilidade de acumulação nos organismos e ao longo da cadeia trófica. Desta forma, mesmo que as alterações na qualidade da água tenham ocorrido em um intervalo de tempo mais curto, espera-se a ocorrência de danos a biota aquática devido ao aumento de concentração destes indicadores. Além disso, para todos os indicadores deste dano foi verificado que alterações ainda ocorrem nestes ambientes ou no ambiente fluvial a montante, podendo vir a influenciar as concentrações no estuário e na região marinha, porém tendem a reduzir tanto em magnitude quanto em frequência, e é parcialmente reversível.

Para o estuário do rio Piraquê-açu e na lagoa Monsarás foi verificado que alguns indicadores (Al dissolvido, Pb total, Cu dissolvido, Fe dissolvido, Mn total e Zn total) apresentaram concentrações acima dos limites legislados, porém essas alterações não apresentaram um padrão que pudesse ser relacionado ao desastre da Samarco, não sendo possível determinar se houve ou não dano nestes ambientes.

Tabela 66 – Categorias de classificação no estuário do rio Doce e região marinha para cada um dos indicadores definidos, e número de vezes em que as concentrações ultrapassaram o limite da classe 1.

Indicador	Estuário do rio Doce		Região marinha	
	Classificação da alteração	Nº de vezes ↑ Classe 1	Classificação da alteração por compartimento	Nº de vezes ↑ Classe 1
Al dissolvido	Categoria C	55	Sem classificação	2
As total	Categoria A	2	Categoria A	130
Cd total	Categoria B	8	Categoria A	202
Cu dissolvido	Categoria A		Sem classificação	
Cr total	Categoria A	96	Categoria A (5-A, 5-B1, 5-B2 e 5-C)	5
Fe dissolvido	Categoria C	33	Categoria A	29
Hg total	Categoria A	10	Categoria A	4410
Mn total	Categoria B	51	Categoria A	46
Ni total	Categoria A	8	Sem classificação	
Pb total	Sem classificação	6	Categoria A	74
Zn total	Categoria B	3	Categoria A	296

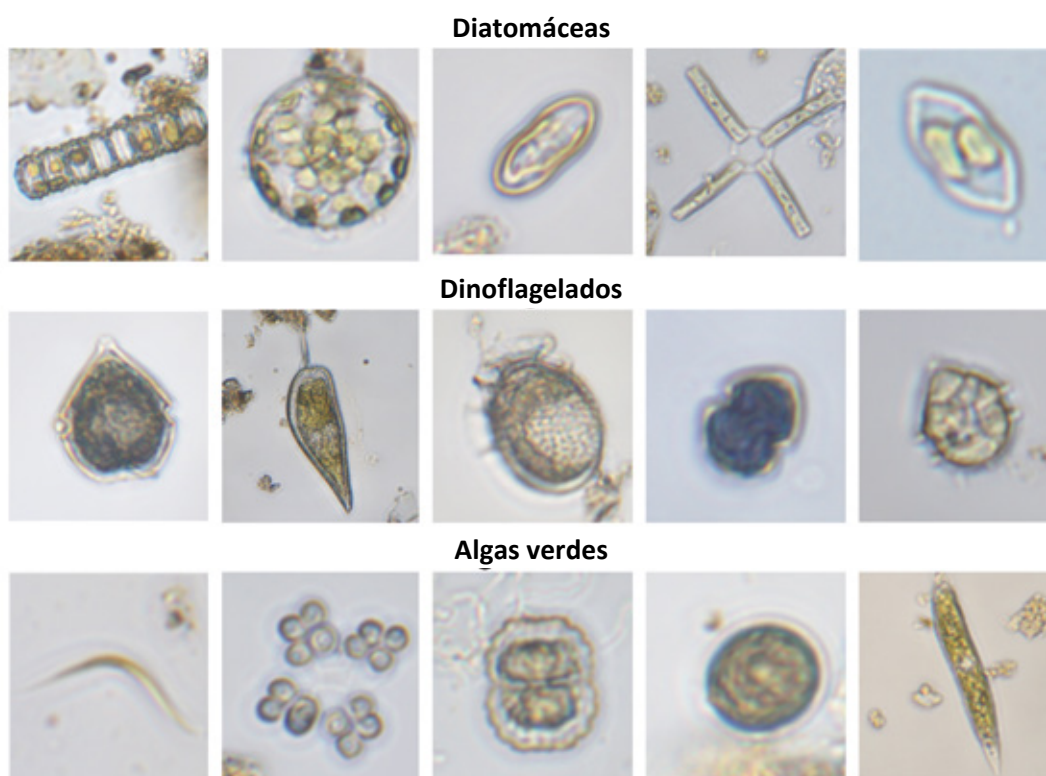
5.4 DANOS ÀS COMUNIDADES PLANTÔNICAS

Os danos relacionados à qualidade da água desencadearam alterações nas comunidades planc-tônicas por contato direto ou ingestão de partículas e de elementos potencialmente tóxicos. A seguir são descritos os danos às comunidades fitoplanctônica (microalgas) e zooplanctônica (animais microscópicos).

5.4.1 ALTERAÇÕES DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

A mistura da lama, rica em nutrientes (especialmente nitrato) e Fe, com as águas oligotróficas da plataforma continental promoveu o crescimento acelerado das células do fitoplâncton, especialmente de espécies nanoplânctônicas de clorofíceas e cianobactérias. Desta forma, em um primeiro momento, foram detectados aumento na densidade e biomassa do fitoplâncton e uma mudança na estrutura da comunidade ocasionada pelo desaparecimento de algumas espécies marinhas e predominância de organismos dulcícolas que vieram carregados pela lama. Posteriormente, o desenvolvimento das microalgas foi prejudicado pelo aumento da turbidez causado pela grande quantidade de partículas em suspensão na água. Assim, a abundância do fitoplâncton e as concentrações de clorofila-a e feo-pigmentos começaram a decair a partir de abril/2016, mas, ainda com valores elevados pela chegada contínua de rejeito e pelo aumento da pluviosidade. Nos últimos anos (2018 e 2019), a densidade e biomassa do fitoplâncton diminuíram, mas ainda acima dos valores de linha-base para clorofila-a. Além disso, a estrutura da comunidade permaneceu alterada e a riqueza de espécies abaixo do período pré-desastre (Figura 141).

Figura 141 – Ilustração de algumas espécies do fitoplâncton encontradas na região costeira do Espírito Santo.



Fonte: Lactec.

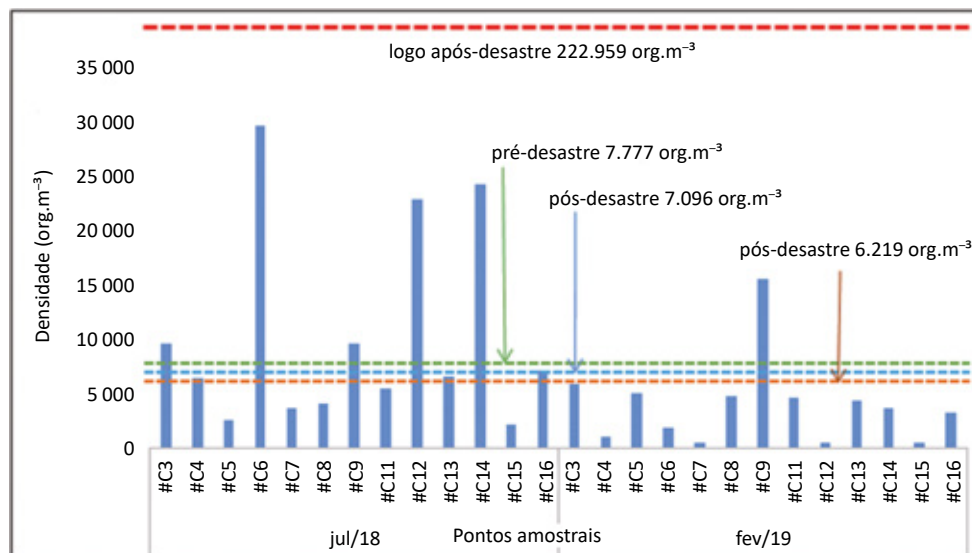
5.4.2 ALTERAÇÃO DA COMUNIDADE ZOOPLANCTÔNICA

Foi possível identificar três danos às comunidades zooplancônicas relativos à alteração na composição específica, alteração na densidade e aumento da concentração de EPTs. Todos eles foram tratados de forma qualitativa, e não puderam ser classificados quanto à gravidade devido à escassez de dados anteriores ao desastre e logo após a chegada da pluma ao mar.

5.4.2.1 Alterações na densidade e na composição das espécies do zooplâncton

Com a chegada da pluma de rejeitos à foz do rio Doce houve um aumento pronunciado da densidade de organismos zooplancônicos, com valores nunca antes observados na região. As densidades, que na média chegavam a $7.777 \text{ org. m}^{-3}$ (GUALANDI, 2007; AMARAL; FERREIRA; LOUREIRO FERNANDES, 2007; CPAIS, 2015; PETROBRÁS, 2015), alcançaram um pico de $222.959 \text{ org. m}^{-3}$ (UFES, 2017), cerca de 28 vezes acima da média encontrada no período pré-desastre. Do total de organismos, 80% consistiam de apenas duas espécies, *Oithona nana* e *Parvocalanus scotti*, que suportaram as alterações no ambiente e parecem ter tido vantagens sobre os demais organismos do zooplâncton. As densidades reduziram em período subsequente, atingindo média de $7.096 \text{ org. m}^{-3}$ entre 2018 e 2019, mas ainda não é possível afirmar que retornaram às condições de linha-base (Figura 142).

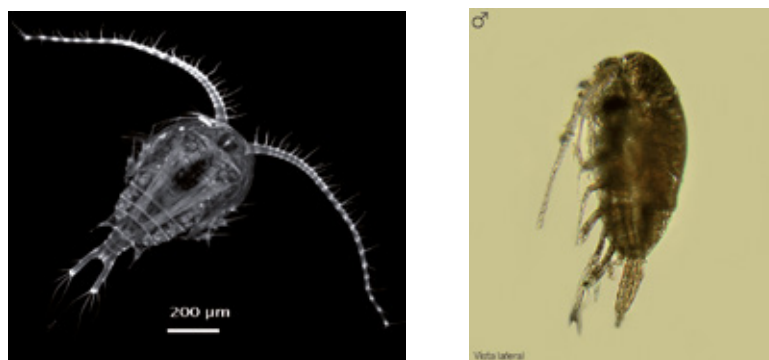
Figura 142 – Variação da densidade (org.m^{-3}) para o zooplâncton por ponto amostral (coluna azul) no Ambiente Marinho na foz do rio Doce (julho/2018 e fevereiro/2019 – DADOS PRIMÁRIOS) e zona costeira adjacente. Linha tracejada (DADOS PRIMÁRIOS) = azul – densidade média total pós-desastre (P2); Linhas tracejadas (DADOS SECUNDÁRIOS) = verde – densidade média total pré-desastre (P0); vermelha – pico de densidade logo após o desastre; marrom – densidade média total pós-desastre (P1 e P2).



O grupo Copepoda foi utilizado como indicador do dano da alteração da composição de espécies, por serem organismos importantes nos ambientes aquáticos e se mostraram dominantes no zooplâncton. Entre os períodos pré (P0) e pós-desastre (P1 e P2) foi constatada variação da ocorrência da frequência ou abundância de organismos, portanto a composição de espécies foi distinta. No total foram 24 espécies representativas em P0 (Figura 143), sendo que destas, seis não apresentaram alteração (foram representativas em P0, P1 e P2). As demais apresentaram alteração da representatividade

(frequentes e/ou abundantes) em P1 e/ou P2. Dentre as espécies representativas, aquelas menos frequentes, como *Clausocalanus furcatus*, *Nannocalanus minor*, *Parvocalanus crassirostris* e *Oithona hebes* podem se tornar muito frequentes na área de estudo, por isso merecem atenção em levantamentos futuros. Destaque para as espécies *Acartia lilljeborgi*, *A. tonsa*, *Calanopia americana*, *Corycaeus speciosus*, *Farranula gracilis*, *Mecynocera clausi*, *Nannocalanus minor*, *Oithona* c.f. *plumifera*, *O. similis*, *Oncaea venusta*, *Paracalanus parvus* e *Undinula vulgaris* que foram registrados somente durante o período pré-desastre (P0) e assim, seus registros futuros devem ser destacados.

Figura 143 – Algumas espécies representativas de Copepoda: a) *Temora styliifera*, no ambiente marinho; b) *Paracalanus quasimodo*, no ambiente de transição.



Fonte: (a) Culverhouse, et al. (2006); (b) Instituto de biologia da UFRJ (2019).

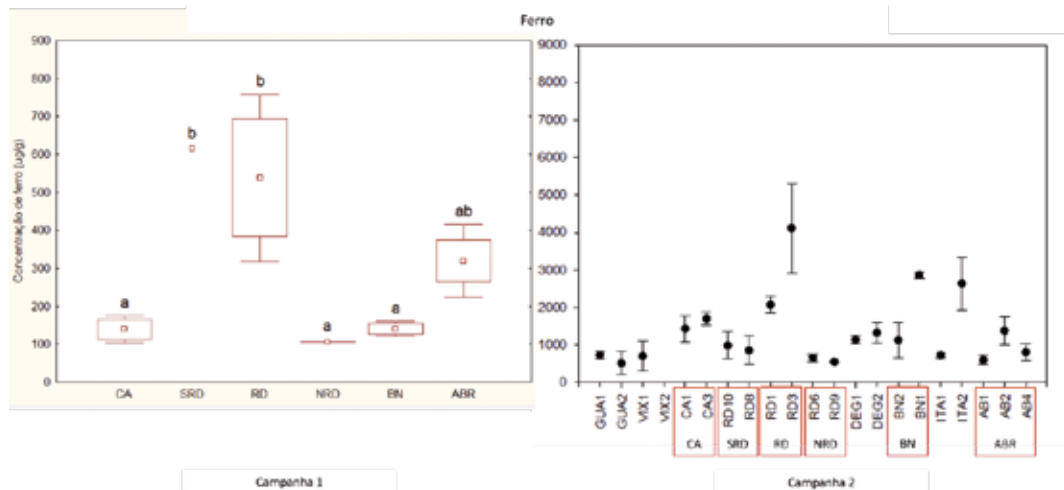
As alterações na densidade e composição do zooplâncton apontaram, especialmente no período logo após o desastre, para a resistência de poucos organismos a condições que são adversas a grande maioria das outras espécies que compõem a comunidade. Isso resulta na perda da biodiversidade (perda de espécies), levando ao desequilíbrio da comunidade o que pode refletir em toda a cadeia alimentar e assim, influenciar os níveis tróficos superiores, como por exemplo peixes, inclusive aqueles de interesse comercial.

5.4.2.2 Aumento da concentração de elementos potencialmente tóxicos – epts no zooplâncton marinho

Após o desastre, segundo resultados de ICMBio (2016) e FAURG (2016) foi observada a presença de EPTs como As, Cd, Cr, Fe, Mn e Pb em organismos zooplanctônicos no ambiente marinho, tanto ao norte quanto ao sul da foz do rio Doce. As concentrações dos EPTs no zooplâncton foram maiores nas amostras coletadas próximo à foz do rio Doce, assim como os níveis de lipoperoxidação (biomarcador de estresse). Estas concentrações, segundo autores, acompanharam os níveis encontrados na água, principalmente para As, Cr, Fe e Mn. Quando comparados os resultados de abril de 2016, com os de janeiro e fevereiro do mesmo ano, os autores observaram redução significativa para concentrações de As, Cd, Cr, Mn, Cu e Pb, especialmente aquelas obtidas na região da foz do rio. Como resposta, também foi observada redução dos níveis de lipoperoxidação. Por outro lado, foram observados aumentos significativos nas concentrações de Fe nas amostras de todos os pontos de coleta conforme pode ser observado na Figura 144.

Vale lembrar que o zooplâncton representa o elo entre os produtores primários (fitoplâncton) e consumidores, como os peixes, e com isso a bioacumulação observada pode alcançar os níveis mais elevados da cadeia trófica.

Figura 144 – Variação da concentração corporal de Fe nas amostras de zooplâncton. Os pontos são apresentados da esquerda para a direita, sentido Sul-Norte: Figura da esquerda refere-se a janeiro e fevereiro de 2016 e os dados estão expressos como média $\pm$ desvio e erro padrão; a Figura da direita refere-se a abril de 2016 e os dados estão expressos como média $\pm$ erro padrão. Retângulos vermelhos indicam o agrupamento de pontos que podem ser comparados com o período anterior.



Fonte: ICMBio (2016; p. 32-35); adaptado de FAURG (2016; p. 20-23).

5.5 DANOS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE DOS SEDIMENTOS

Devido as diferenças dos processos de transporte de sedimento entre ambientes fluviais e costeiros, uma parte do material em suspensão que vem dos rios tende a se depositar no fundo do oceano. Esta deposição ocorre naturalmente, porém, com composição e concentrações de sedimento distintas daquelas observadas com o desastre. A chegada de rejeitos na região costeira gerou um incremento da deposição de sedimentos, conforme descrito a seguir.

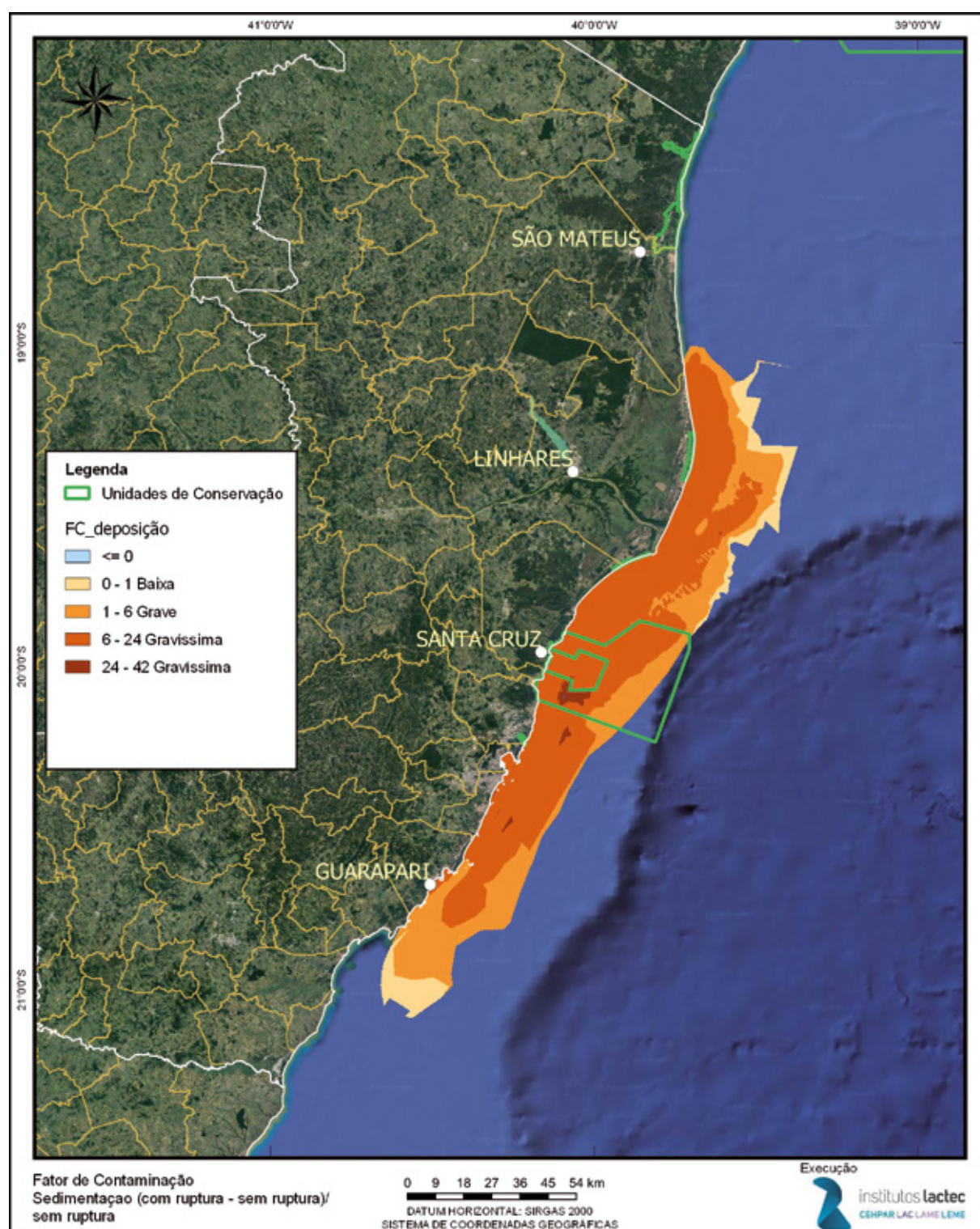
5.5.1 INCREMENTO NA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

Após o desastre observou-se camadas finas de sedimento/rejeito depositadas em regiões próximas a foz do rio Doce. Com o incremento desta deposição (com mais velocidade e com mais intensidade), ocorreu alteração da dinâmica sedimentar local o que pode prejudicar a vida aquática de organismos bentônicos ou organismos que vivem no fundo (corais etc.).

A Figura 145 apresenta a região do fundo do oceano afetada pela deposição da lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão calculada pela metodologia já descrita no item 5.2.3. A Figura mostra as regiões com o FC correspondente. FC igual a 1 significa que a deposição devido a ruptura foi igual a natural no mesmo período (ou seja, a deposição final dobrou), FC igual a 42 significa que a deposição devido a ruptura foi 42 vezes maior que a deposição natural do mesmo período. A extensão afetada foi aproximadamente de 80 km para norte da foz do Doce e 140 km para sul (aproximadamente até Guarapari) com largura aproximada de 25 km.

Em termos de dimensão absoluta a deposição extra devido à ruptura de Fundão foi em grande parte em torno de 1 mm sendo maior que 1 mm em torno de foz (até 35 km para norte e para Sul e 20 km para leste). Quanto mais próximo da foz a espessura aumenta chegando a valores próximos a 10 cm junto a foz.

Figura 145 – Fator de contaminação para a espessura do sedimento depositado, obtidos pela divisão entre a diferença de espessuras de depósito do cenário com desastre e sem desastre pela espessura do cenário de deposição natural.



Execução: Lactec.

O dano foi gravíssimo já que em praticamente toda área qualificada, a sedimentação decorrente do desastre foi no mínimo seis vezes maior ($FC=6$) do que a sedimentação típica. A sedimentação tende a reduzir já que a quantidade de sólidos suspensos e sedimentos presentes do rio Doce estão diminuindo ao longo do tempo. A circulação das correntes marinhas e demais interações do ambiente pode parcialmente locomover o material sedimentado para outras regiões próximas, se depositando novamente no leito marinho, portanto, o dano é considerado irreversível.

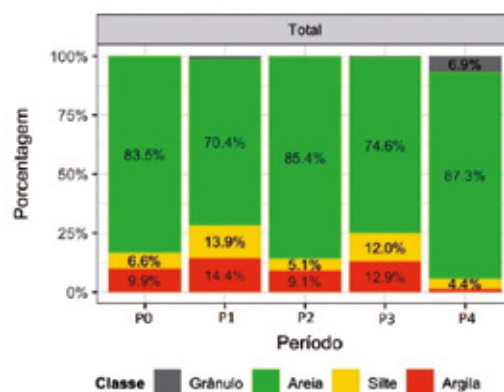
5.6 DANOS À QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS

O aporte de rejeitos oriundos do desastre da Samarco na região costeira e marinha causou uma alteração das características granulométricas do sedimento superficial, aumento da concentração de EPTs no sedimento e consequentemente efeitos prejudiciais aos organismos associados a esses habitat, chamados de comunidades bêmicas de fundos inconsolidados. Nesses animais foram observadas alterações em sua estrutura e também piora na condição de saúde e contaminação por EPTs.

5.6.1 ALTERAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DO SEDIMENTO SUPERFICIAL

No estuário do rio Doce, devido à deposição de partículas oriundas do desastre, as características granulométricas do sedimento do estuário no primeiro período pós-desastre (P1) apresentaram um maior percentual de partículas finas (silte e argila) em relação ao período pré-desastre (P0) (Figura 146), indicando um afinamento da granulometria ocasionado pela deposição de material no leito do estuário, dano considerado grave de acordo com a metodologia definida. No entanto, é possível verificar uma tendência de restabelecimento do ambiente em relação ao dano causado, visto que os percentuais de finos nos períodos subsequentes a P1 diminuíram ao longo do tempo, de forma que o dano tende a reduzir e foi considerado parcialmente reversível.

Figura 146 – Média das classes granulométricas das amostras nos períodos pré e pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce, desconsiderando resultados atípicos. (P0 – Pré-desastre; P1 – novembro/2015 a março/2016; P2 – abril/2016 a dezembro/2016; P3 – 2017; e P4 – janeiro/2018 a fevereiro/2019).



Elaborado por: Lactec.

Devido à ausência de dados brutos de sedimentologia do período pré-desastre, não foi possível quantificar as alterações da granulometria e consequente gravidade do dano na região marinha. Assim, este dano foi avaliado de forma qualitativa neste ambiente.

Os estudos pré-desastre identificaram um predomínio de sedimentos finos na foz do rio Doce (PETROBRAS, 2015; ALBINO e SUGUIO, 2010; QUARESMA *et al.* 2015), de características similares aos encontrados nos dados pós-desastre. Entretanto, a modelagem hidrossedimentológica (estudo da vazão do rio e da quantidade de sedimentos) realizada pelo Lactec (ver item 5.5.1) indicou que ocorreu uma deposição máxima de 10 cm de material após o desastre, bem como estudos de campo, realizados em março/2016, identificaram claramente a deposição de rejeito no leito marinho (GOLDER, 2016). Desse modo, é possível afirmar que ocorreu um dano relacionado à alteração da granulometria do sedimento superficial na região marinha, devido à deposição de material oriundo do desastre, que pode ter afetado os organismos bentônicos de fundos consolidados (sendo os organismos que vivem aderidos a estruturas fixas como rochas e corais) e inconsolidados (sendo os organismos que vivem em substratos móveis como areia e lama).

5.6.2 AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE EPTS NO SEDIMENTO

Para o estuário do rio Doce, apenas o indicador Mn apresentou alteração relativa ao aumento das concentrações de EPTs no sedimento classificada na Categoria C, ou seja, apresentou 1/3 dos dados acima do limite do nível 1 da Resolução CONAMA Nº 454/2012 e dos máximos históricos durante o período. A classificação de Categoria B foi observada para o indicador Fe (Tabela 67). Com relação aos demais EPTs avaliados (Ba, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb e Zn), as alterações foram classificadas como Categoria A (Tabela 68). Desse modo, considera-se que esse dano, no estuário do rio Doce, de acordo com a metodologia proposta, é gravíssimo e tende a reduzir. Ressalta-se que foram encontrados, para a maior parte dos EPTs (Al, As, Cu, Cr, Fe, Mn, Pb e Ni) valores acima do máximo histórico e da legislação, e que mesmo de forma pontual, podem ter sido suficientes para causar danos à biota aquática.

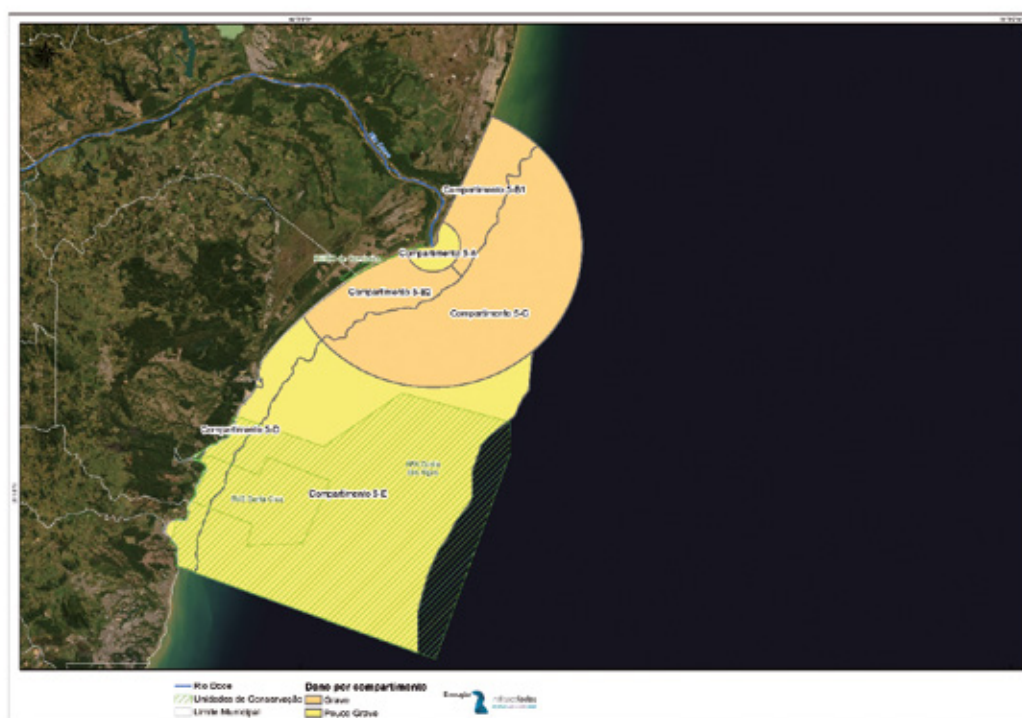
Quanto ao aumento das concentrações de EPTs no sedimento do ambiente marinho, alterações classificadas na Categoria B foram verificadas para os indicadores Al, As e Mn na maior parte dos compartimentos. Ressalta-se que o As e o Mn não demonstraram ser indicadores apropriados para a avaliação deste dano no ambiente marinho, visto que a classificação Categoria B para estes indicadores representa valores acima do estabelecido pela legislação ambiental, porém abaixo dos valores encontrados na região anteriormente, não sendo possível relacionar estes resultados única e diretamente com o rompimento da barragem do Fundão. Outros elementos, apesar de apresentarem a classificação grave e/ou gravíssima durante o período P1 (novembro/2015 a março/2016) e P2 (abril/2016 a dezembro/2016), ocorreram em proporções menos representativas em relação ao total de dados analisados. Dessa forma, as alterações das concentrações dos elementos Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Ni, Pb, V e Zn foram classificadas na Categoria A. Assim, a classificação final do dano com relação ao aumento da concentração de EPTs no sedimento é grave nos compartimentos próximos à foz (5-B1, 5-B2 e 5-C) e pouco grave nos compartimento mais próximo (5-A) e nos mais distantes (5-D e 5-E), conforme pode ser observado na Figura 147. Todos os indicadores deste dano apresentaram uma tendência de redução e foram considerados como parcialmente reversíveis.

Para os sedimentos da lagoa Monsarás, do estuário do rio Piraquê-açu, manguezais e praias analisadas observou-se que as variações na concentração dos diversos elementos químicos não podem ser diretamente relacionadas à ocorrência do desastre, não sendo possível afirmar que houve danos nestes ambientes, principalmente pela falta de dados no período logo após o desastre.

Tabela 67 – Classificação do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs no sedimento do estuário do rio Doce e da região marinha para cada um dos indicadores definidos, e número de vezes acima do limite legislado e do máximo histórico pré-desastre.

Indicador	Estuário do rio Doce			Região Marinha		
	Alteração por compartimento	Nº de vezes ↑ Linha-base	Nº de vezes ↑ Nível 1	Alteração por compartimento	Nº de vezes ↑ Linha-base	Nº de vezes ↑ Nível 1
Al (mg/kg)	Categoria A	27,6	2,2	Categoria B (5-B1, 5-B2 e 5-C)	4,9	1,4
				Categoria A (5-A, 5C, 5D e 5-E)		
Ar (mg/kg)	Sem classificação	16,4	3,2	Sem classificação	5	<
Ba (mg/kg)	Categoria A	<	1,2	Categoria A	6,9	7,3
Cd (mg/kg)	Categoria A	<	<	Categoria A	=	1,1
Cr (mg/kg)	Categoria A	=	=	Categoria A	1,2	3,4
Cu (mg/kg)	Categoria A	1,4	=	Categoria A	2,6	1,5
Fe (mg/kg)	Categoria B	1,5	28,4	Categoria A	10,6	2,7
Hg (mg/kg)	Categoria A	2,2	0,8	Categoria A	1,7	1,2
Mn (mg/kg)	Categoria C	10	9,3	Sem classificação	36	17,4
Ni (mg/kg)	Categoria A	3,3	5,1	Categoria A	2,9	4,4
Pb (mg/kg)	Categoria A	=	9	Categoria A	7	6
Zn (mg/kg)	Categoria A	1,5	0,8	Categoria A	4,9	1,4

Figura 147 – Classificação dos danos em relação ao aumento da concentração de EPTs no sedimento nos diferentes compartimentos da região marinha avaliada.



Execução: Lactec.

5.6.3 ALTERAÇÃO NA ESTRUTURA DAS COMUNIDADES BÊNTICAS DE FUNDOS INCONSOLIDADOS

Alterações na estrutura das comunidades bênticas de fundos inconsolidados foram verificadas em todos os ambientes estudados. Entretanto, apenas nos ambientes marinho e estuarino havia referências de linha-base que puderam ser comparadas ao período posterior ao rompimento da barragem de Fundão, em 2015.

Quando comparados os resultados obtidos nesse diagnóstico de danos com os valores registrados em literatura para o ambiente marinho foi possível verificar reduções das densidades (quantidade de invertebrados no sedimento), perda de *taxa* (tipo de organismo) e de diversidade ao longo dos anos após o desastre da barragem de Fundão. Os resultados mostraram que as características físicas e químicas do sedimento foram fatores importantes na distribuição dos organismos bênticos.

Para a descrição da linha do tempo, no ambiente marinho, com valores dos índices ecológicos foram utilizados os estudos desenvolvidos por Matthews-Cascon *et al.* (2018) - obtidos em dezembro de 2010 e julho de 2011, MARINHA DO BRASIL (2016) - referente às primeiras coletas realizadas após o rompimento da barragem, Bianchini *et al.* (2019) - coletas realizadas em setembro e outubro de 2018 e os resultados das duas campanhas realizadas nesse diagnóstico de danos. Os valores médios de riqueza passaram de 19,5 e 18,2 *taxa* em 2010 e 2011, para 4,25 em 2015 após o desastre e 3,36 e 9,30 em 2018 e recentemente em 2019, para 4,24 representando 22% do valor inicial. As diversidades em 2010 e 2011 foram 3,28 e 3,37 respectivamente, 1,26 em 2015, 1,37 e 1,36 em 2018 e 1,66, 50% do valor inicial, em fevereiro de 2019. As densidades (m^2), em 2010 e 2011, eram 6964,5 e 5115,0

respectivamente; em 2015, 14750,0 e, em 2018 e 2019, 239,3 e 329,5 (4% do valor inicial). Os valores das densidades dos grandes grupos taxonômicos Polychaeta, Mollusca, Crustacea e a categoria Outros, que reúne os demais grupos agrupados, reduziram em mais de 50% do valor inicial da linha-base.

Poucos estudos foram realizados nos estuários da costa do Espírito Santo (BERNARDINO *et al.*, 2016; ZALMON *et al.*, 2011; NALESSO *et al.*, 2005; GOMES *et al.*, 2017). Os resultados desse diagnóstico foram comparados com os resultados de Gomes *et al.* (2017) realizados em 2015 e da COPPE (2017) que apresenta os resultados dos impactos após nove meses da ruptura da barragem de Fundão. Os resultados apresentados na linha do tempo se referem a estações localizadas na foz do rio Doce. Todos os índices ecológicos reduziram em mais de 50% do valor inicial da linha do tempo. O número total de taxa variou de 19 antes do desastre, 12 logo após o dia do desastre, 5 em julho de 2018 e 4 taxa em fevereiro de 2019. O índice de diversidade em 2015, antes do desastre, era de 1,40, logo após o desastre 0,61 e, em julho de 2018 e fevereiro de 2019, 0,42 e 0,12, respectivamente. As densidades dos grandes grupos taxonômicos passaram de 3490,0 (ind.m²) antes do desastre para 1250,0 logo após o desastre e 505,8 em julho de 2018 e 65,9 em fevereiro de 2019. As abundâncias relativas dos grandes grupos taxonômicos polychaeta e Crustacea diminuíram após o desastre e de Chironomidae (larvas de mosquitos) aumentaram após o desastre na região da foz do rio Doce.

Para esses dois ambientes o dano foi considerado gravíssimo por apresentar os índices ecológicos reduzidos abaixo de 50% do valor da linha-base. Com relação a reversibilidade há possibilidade de que as comunidades venham a ser recuperar através da recolonização de espécies que apresentam estoques de larvas presentes em locais menos afetados pelo desastre, desta forma foi caracterizado como parcialmente reversível. Nos dois ambientes apresenta tendência de redução.

Para o ambiente praial, diante dos resultados obtidos nesse estudo e nos demais estudos analisados concluiu-se que as características estruturais das comunidades bênticas das praias arenosas foram afetadas pela passagem da pluma de rejeitos oriunda do desastre da barragem de Fundão. Um aspecto importante a salientar foi que Bianchini *et al.* (2019) constatou que os metais associados ao ao rompimento da barragem de Fundão estão disponíveis para a assimilação dos animais e registrou efeitos fisiológicos e de bioacumulação nas espécies bênticas das praias.

Já nos manguezais do estuário do rio Piraquê-açu foi constatada a diminuição das densidades da macroinfauna (animais enterrados no sedimento) de 5819 e 1590,0 (ind.m²) registrados em 2013 para 1129,9 em 2019. Os valores das densidades de tocas do caranguejo-uçá variavam no litoral do Espírito Santo de 0,37 tocas.m⁻² na APA Costa das Algas, em Aracruz a 5,00 tocas.m⁻² na Baía de Vitória, em Vitória. Os valores médios (2,7 a 3,3 tocas/m⁻²) registrados nesse estudo encontram-se dentro do intervalo registrado para o estado e para os estuários estudados antes do desastre da barragem de Fundão (PROJETO CARANGUEJO, 2007; GOES *et al.* 2010; CONTI e NALESSO, 2010; BROMENSCHENKEL, 2016). Contudo, resultados importantes com contaminantes foram registrados por Bianchini *et al.* (2019) que mostraram níveis elevados de metais presentes em tecidos de caranguejos apontando a contaminação dos manguezais, segundo autores, pelo rejeito associado ao rompimento da barragem de Fundão. A grande preocupação é que nos dois manguezais amostrados foram observadas armadilhas do tipo “redinha” demonstrando que a população continua utilizando o recurso como fonte alimentar. Para

conhecermos a verdadeira condição em que um recurso se encontra é necessária uma rede estruturada e permanente de coleta de dados no campo para obtenção de mais informações.

5.6.4 ALTERAÇÕES NA CONDIÇÃO DE SAÚDE E CONTAMINAÇÃO POR EPTS EM INVERTEBRADOS BÊNTICOS DE FUNDOS INCONSOLIDADOS

Apenas dois estudos que tratam do estado de saúde de invertebrados bênticos de fundos inconsolidados foram realizados na zona costeira e marinha do estado do Espírito Santo até a data do desastre da barragem de Fundão (MG). Esses estudos da linha-base foram realizados na região da Grande Vitória que fica fora da área de abrangência desse diagnóstico (SOUZA, 2002; JESUS *et al.*, 2006). Os outros estudos realizados com esse enfoque na área de abrangência do diagnóstico de danos foram realizados somente após o desastre da barragem de Fundão (MG).

No estudo realizado por Bianchini (2016) algumas espécies bênticas, de interesse econômica, como os camarões, foram utilizadas para análises de biomarcadores e concentrações de EPTs. Os resultados obtidos mostram que houve um crescente acúmulo dos EPTs Fe, Mn e Cr nos tecidos de camarões. Segundo o autor, a exposição dos organismos aquáticos a esses elementos pode causar vários distúrbios que provocam danos importantes como a bioacumulação e efeitos às biomoléculas, tais como lipídeos, proteínas e DNA desses organismos, além afetar as abundâncias e a dinâmica das populações bênticas.

Em trabalho realizado por Bianchini *et al.* (2019), no ambiente marinho, foram coletados no compartimento bêntico, em 25 estações, dois gêneros de camarões: *Xiphopenaeus kroyeri* (camarão sete-barba) e *Farfantepenaeus* spp. (camarão-rosa). Para as análises de contaminantes foram utilizados os tecidos de brânquias, hepatopâncreas e músculo. O acúmulo de EPTs foi maior nos tecidos de brânquias (Zn e As) e hepatopâncreas (Cr, Fe, Mn, Zn e As) quando comparados ao músculo. A bioacumulação de EPTs foi maior nas estações localizadas na foz do rio Doce e decrescendo nas estações mais ao norte e sul da foz. No ambiente praias foram realizadas coletas em 10 praias ao longo da costa do Espírito Santo. Foram amostrados poliquetas, anfípodos, o isópodo *Excirrolana* sp. e o caranguejo-fantasma *Ocypode quadrata*. Para as dosagens de bioacumulação foram coletados músculo, brânquias e hepatopâncreas dos caranguejos. Os demais animais foram processados inteiros. Além dos níveis de metais, foram avaliados os níveis de dois biomarcadores de efeitos e um de exposição. Os resultados mostraram que o padrão espacial de resposta do biomarcador de estresse utilizado (lipoperoxidação) coincide com os padrões observados de bioacumulação dos EPTs analisados (principalmente Cu, Fe, Mn e Hg) indicando que os elementos associados ao evento do rompimento da barragem de Fundão encontram-se disponíveis para assimilação pelos organismos analisados. Nos manguezais foram coletados exemplares de caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), guanhama (*Cardissoma guanhumi*) e de maria-mulata (*Goniopsis cruentata*) em oito estações de coleta. Foram realizadas determinações das concentrações de EPTs na biota e os resultados obtidos mostraram níveis elevados dos EPTs Cr, Fe e Mn em todos os tecidos dos caranguejos analisados. Na Figura 148 exemplos ilustrativos de algumas das espécies estudadas.

Figura 148 – Fotos dos animais bênticos utilizados pelas equipes para as análises de contaminação por EPTs e biomarcadores. a) *Mytella guyanensis*; b) *Ucides cordatus* e c) *Polychaeta*.

a)



Fonte: Lorena Campo (2016)

b)



Fonte: Valdiney Pimenta (SI)

c)



Fonte: The Trustees of the Natural History Museum, London (SI)

Como não havia literatura de linha-base para a comparação desse dano entre os tempos pré- e pós-desastre não foi possível relacionar os valores encontrados com o desastre da barragem de Fundão. Contudo, é importante salientar que os valores de EPTs registrados nos organismos bênticos e o comprometimento anatômico e fisiológico verificado demonstraram o comprometimento desses organismos e baixa qualidade ambiental. Consequentemente, além das espécies de peixes previstas na restrição da pesca, as espécies bênticas de interesse comercial precisam ser avaliadas quanto à sua restrição de consumo visando a garantir a saúde da população.

5.7 DANOS AOS PEIXES

Os peixes costeiros e marinhos também sofreram danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão. Houve redução da riqueza e diversidade de organismos, simplificação da estrutura trófica, diminuição na abundância de juvenis de espécies de interesse comercial, alteração nas condições corporais e/ou de saúde de indivíduos e aumento da bioacumulação de EPTs.

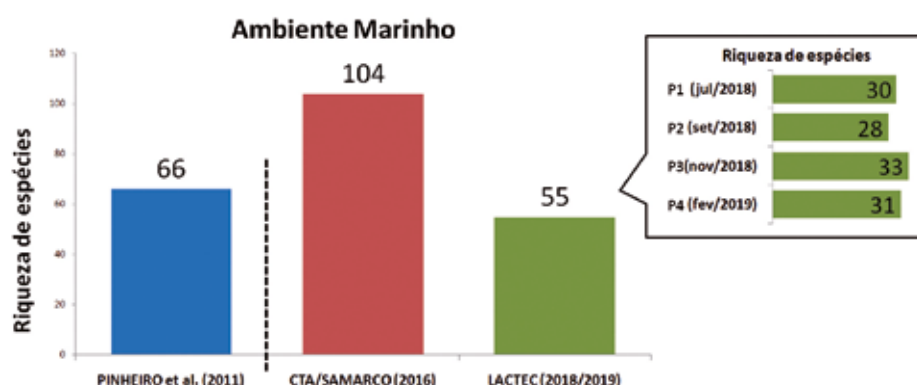
5.7.1 REDUÇÃO DA RIQUEZA E DIVERSIDADE DA ICTIOFAUNA DO AMBIENTE MARINHO ADJACENTE À FOZ DO RIO DOCE

O número de espécies e de grupos funcionais registrados para o ambiente costeiro amostrado na foz do rio Doce e para o ambiente estuarino apresentou uma redução significativa de valores, considerando como linha de base levantamentos com o mesmo método de amostragem e abrangência espacial.

No ambiente costeiro amostrado que foi atingido pela pluma de rejeitos de mineração, o número de espécies de peixes demersais (i.e. associados ao substrato marinho) obtido entre 2017 e 2018 representou 59,5% dos valores registrados pela CTA/SAMARCO (104 espécies) entre abril e dezembro de 2016 (Figura 149). Por outro lado, a riqueza observada foi bastante similar aos registros realizados em regiões que sofrem impactos constantes causados pela pesca comercial com redes de arrasto na plataforma rasa do Espírito Santo, como aqueles obtidos em Itaoca e Manguinhos entre 2003 e 2004 (PINHEIRO *et al.*, 2011).

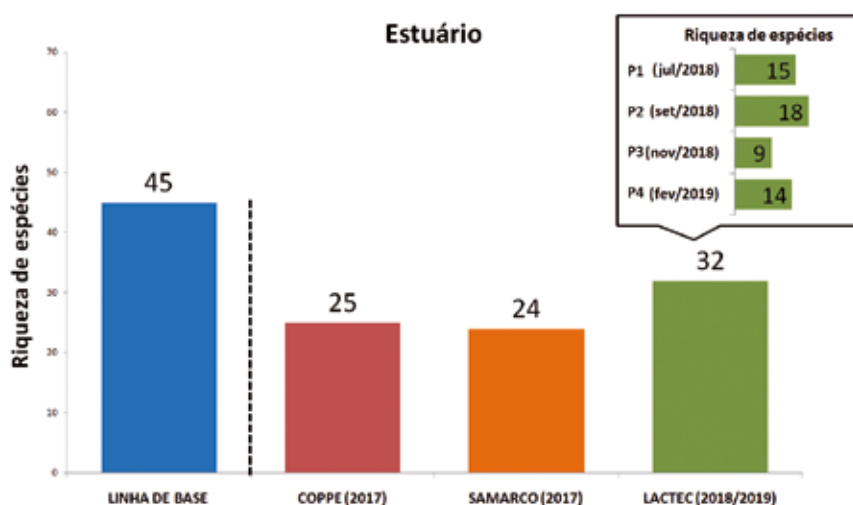
No ambiente estuarino, o número de espécies registradas nas coletas realizadas após o desastre apresentou valores menores que aqueles registrados na Linha de Base (45 espécies), a qual foi compilada tendo como referência estudos ambientais realizados na região do Delta do rio Doce e várzeas litorâneas em Linhares, no Estado do Espírito Santo (e.g. CEA, 2001; CAL, 2001) (Figura 150).

Figura 149 – Riqueza da ictiofauna registrada no ambiente marinho adjacente à foz do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – P1, P2, P3 e P4) e secundários. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.



Elaborado por: Lactec.

Figura 150 – Riqueza da ictiofauna registrada no estuário do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – P1, P2, P3 e P4) e secundários. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.



Elaborado por: Lactec.

A comparação das listas de espécies obtidas por meio de dados primários e pela linha de base também revelou distúrbios provocados no ambiente costeiro amostrado, ou seja, a composição das assembleias de peixes foi diferente entre dados obtidos antes (linha de base) e depois (amostragens realizadas entre 2018 e 2019) do desastre. As análises realizadas revelaram uma redução generalizada na variedade de organismos e a formação de uma comunidade simplificada, tanto no ambiente costeiro como estuarino, com predomínio de poucas famílias e de espécies oportunistas, observações típicas de ambientes degradados (TILMAN, 1996; HALL & GREENSTREET, 1998; WARWICK & CLARKE, 1998; CLARKE & WARWICK, 2001; WARWICK & LIGHT, 2002; LEONARD *et al.*, 2006; HEINO *et al.*, 2007).

Na área de abrangência do diagnóstico, a redução da riqueza (taxonômica e funcional) e da diversidade da ictiofauna costeira foi considerada como um dano gravíssimo, sem sinais evidentes de retorno a valores observados na linha de base, embora seja considerado parcialmente reversível.

A redução da riqueza (taxonômica e funcional) e diversidade da ictiofauna estuarina foi considerada como um dano grave, com tendência de redução e parcialmente reversível.

As análises realizadas por meio de curvas de dominância acumulada, tendo como base as amostragens realizadas pelo Lactec em 2018 e 2019, revelaram uma configuração típica de ambientes perturbados, tendo em vista o predomínio em número (abundância) e biomassa de espécies oportunistas nas fases amostrais realizadas na faixa de 5 km e entre 15-20 km da foz do rio Doce e no ambiente estuarino. Espécies oportunistas são resistentes e abundantes, sendo usualmente as primeiras a colonizar ambientes fisicamente impactados (ODUM, 2001).

No ambiente costeiro, a constatação foi resultado da dominância de poucas espécies de peixes marinhos nas amostragens, como *Stellifer rastrifer* (24,20% das capturas totais), *Stellifer brasiliensis* (14,64% das capturas totais) e *Cathorops spixii* (9,40% das capturas totais) (Figura 151). A ocorrência e dominância destas espécies oportunistas são frequentemente associadas à ambientes marinhos degradados (MISHIMA & TANGI, 1983; ARAÚJO *et al.*, 1998; ARAÚJO *et al.*, 2002; BARLETTA *et al.*, 2008; SCHMIDT *et al.*, 2008; ROCHA, 2009).

No ambiente estuarino, as condições observadas foram resultado da dominância das espécies de bagres *Genidens genidens*, *Pseudoauchenipterus affinis* e *Genidens barbatus*. O bagre *Genidens* (Figura 152) também foi a espécie mais abundante (73,6% das capturas) e mais representativa em termos de biomassa (72,8% das capturas) nas coletas realizadas pela SAMARCO em 2017. Este bagre é uma espécie generalista, que depende de estuários para realizar parte de seu ciclo de vida e é abundante e dominante em comunidades estuarinas (BARLETTA *et al.*, 2008; ANTUNES, 2010; VIEIRA *et al.*, 2010).

Figura 151 – Espécies de peixes demersais registradas nas amostragens realizadas pelo Lactec entre 2018 e 2019 no ambiente costeiro atingido pelo rejeito de mineração.



Stellifer rastrifer, 8,5 cm



Stellifer brasiliensis, 9,2 cm



Cathorops spixii, 24,5 cm

Fonte: Lactec.

Figura 152 – *Genidens genidens*, espécie de bagre registrada nas amostragens realizadas pelo Lactec entre 2018 e 2019 no ambiente estuarino atingido pelo rejeito de mineração.



Fonte: Lactec.

5.7.2 SIMPLIFICAÇÃO DA ESTRUTURA TRÓFICA DA ICTIOFAUNA

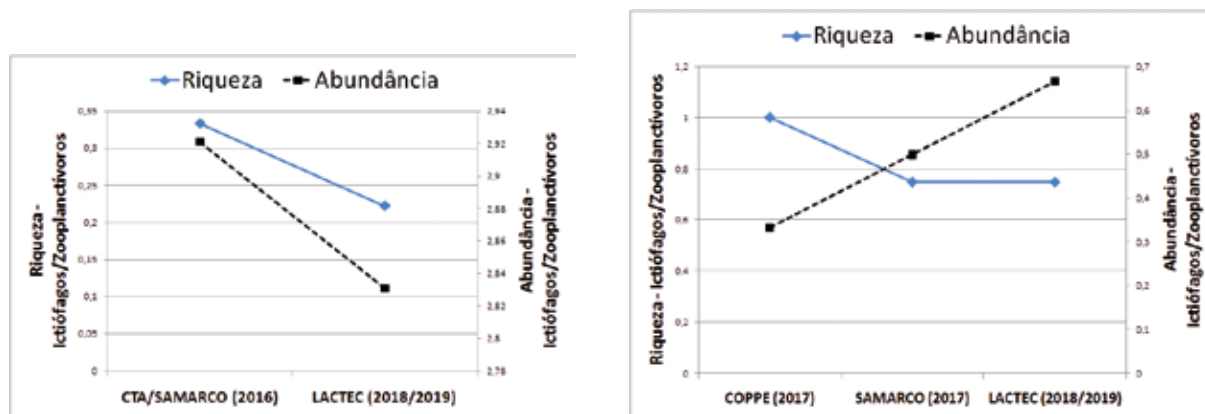
A degradação do ambiente provocada pelo aporte de lama, pelo aumento da turbidez da água e pelo soterramento dos organismos utilizados na alimentação dos peixes provocou alterações na disponibilidade de recursos (presas) e consequentemente na estrutura trófica da ictiofauna, ou seja, na forma de interação entre as diferentes categorias e dietas alimentares.

No ambiente costeiro foi observada uma diminuição na riqueza e abundância de espécies que se alimentam de organismos que ocorrem no substrato (zoobentívoras) e também daquelas que são filtradoras, ou seja, que se alimentam de organismos animais que vivem em suspensão na água (zooplantívoras). Já no ambiente estuarino foi registrada uma queda na abundância de herbívoros, ou seja, de peixes que se alimentam de vegetais e também de peixes que apresentam dieta variada (onívoros).

O indicador proposto por CADDY & GARIBALDI (2000) revelou uma diminuição na razão entre peixes ictiófagos (que se alimentam de outros peixes) e zooplantívoros entre os dados obtidos em 2016 (CTA/SAMARCO), 2017 (COPPE e SAMARCO) e 2018/2019 (LACTEC), indicando que foram observadas alterações nas relações tróficas no ambiente costeiro e estuarino (Figura 153) devido às mudanças ambientais.

A simplificação da estrutura trófica foi considerada como um dano grave, com tendência de redução e parcialmente reversível, com ocorrência nos locais costeiros e estuarinos amostrados.

Figura 153 – Relação entre a riqueza e abundância de peixes ictiófagos e zooplantívoros registrada nas fases amostrais de 2018 e 2019 (à esquerda) nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce e no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2017 pela SAMARCO/CTA no ambiente marinho e (à direita) no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela COPPE (2017) e em 2017 pela SAMARCO no ambiente estuarino.



Elaborado por: Lactec.

5.7.3 DIMINUIÇÃO DAS POPULAÇÕES DE ESPÉCIES DE PEIXES COSTEIROS DE INTERESSE COMERCIAL

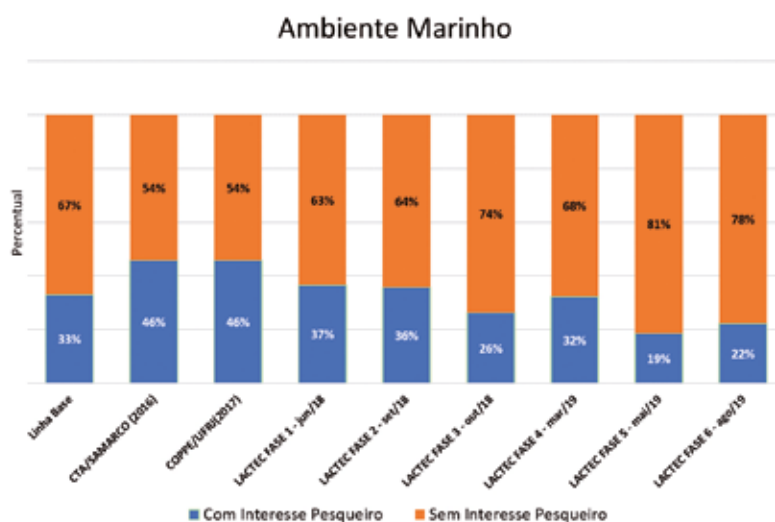
Considerando amostragens realizadas pelo Lactec em 2018 e 2019, a quantidade de espécies de interesse para a pesca registrada pelos arrastos no ambiente marinho adjacente apresentou uma diminuição em relação aos valores registrados na literatura utilizada para a composição da linha base, nas amostragens realizadas no ano de 2016 pela SAMARCO/CTA e nas amostragens realizadas no ano de 2017 pela COPPE/UFRJ.

A composição ictiofaunística registrada nos arrastos é representada, em sua grande maioria, por recrutas e juvenis de espécies comerciais, tradicionalmente capturadas na região, como as pescadas e o os bagres.

O dano proveniente do desastre, como a redução generalizada na riqueza da ictiofauna com concomitante aumento da abundância de organismos tolerantes e generalistas (muitos sem interesse comercial), aliado aos problemas existentes relacionados com a gestão das atividades de pesca (e.g. falta de regulamentação, fiscalização ineficiente, monitoramento descontínuo) pode piorar o cenário desta atividade e intensificar o dano sobre as comunidades de peixes costeiros.

Considerando os dados de linha base pré-desastre, obtidos por meio de dados secundários, foi levantado que 33% das espécies catalogadas para a região tem interesse para a pesca. Avaliando as amostragens realizadas pós-desastre, que apresentam uma riqueza de espécies menor do que as obtidas por meio dos dados secundários, a proporção de espécies com interesse pesqueiro teve uma redução ao longo do período amostrado. No ano de 2016 o percentual de espécies com interesse pesqueiro obtidos a partir dos dados da CTA/SAMARCO era de 46%, no ano seguinte em estudos da COPPE/UFRJ esse percentual se manteve em 46% (esse levantamento considerou peixes recifais, os quais não foram amostrados pela equipe do LACTEC). Nos levantamentos realizados pelo LACTEC durante as seis fases de campo demonstram uma variação no percentual de espécies de peixes com interesse pesqueiro, sendo a primeira fase com o maior percentual (37%) e a quinta fase com o menor percentual (19%) (Figura 154).

Figura 154 – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada no ambiente marinho adjacente à foz do rio Doce considerando o levantamento de dados primários (monitoramento – Fases 1, 2, 3, 4, 5 e 6) e secundários. Os dados da COPPE/UFRJ (2017) apresentam apenas a riqueza de peixes recifais.



Comparando todos os dados observa-se que houve uma redução no número de espécies de uma forma geral, o que consequentemente afetou a oferta de espécies com interesse para a pesca. Os dados do LACTEC comparados com os dados da CTA/SAMARCO demonstra que no ano de 2016, mais próximo do rompimento, os valores eram maiores e com o decorrer do tempo a oferta de peixes foi diminuindo.

Essa diminuição na proporção de espécies de peixes costeiros de interesse comercial foi considerada como um dano grave, com tendência de redução e parcialmente reversível, com ocorrência nos locais costeiros amostrados.

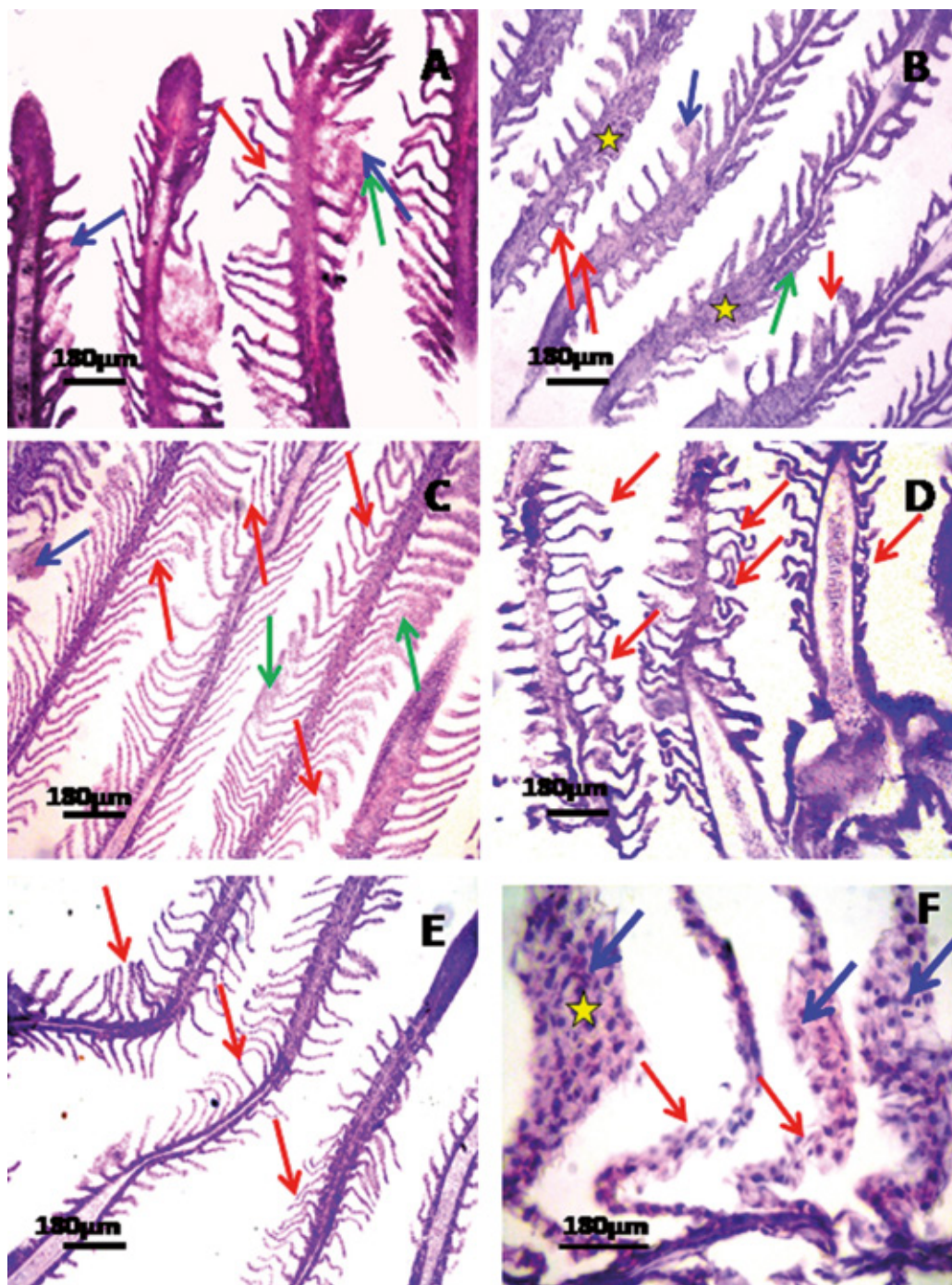
5.7.4 ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE DA ICTIOFAUNA

As alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna foram avaliadas segundo oito indicadores principais: estruturas e função das brânquias, funções fisiológicas (osmorregulação, respiração, excreção e equilíbrio ácido-base), metabolismo, estrutura e funções reprodutivas, sistema antioxidante e de biotransformação, sistemas não enzimáticos, genotoxicidade e mutagenicidade e neurotoxicidade. Cada indicador possui biomarcadores específicos que são apresentados a seguir.

5.7.4.1 Prejuízos às estruturas e função das brânquias em Peixes (biomarcador: histopatologia de brânquias)

Assim como já observado para o ambiente continental, todas as espécies de peixes capturadas nos ambientes estuarino e marinho apresentaram alterações na estrutura branquial. As alterações encontradas são muito similares às observadas nos peixes de água doce, tanto na estação seca quando na chuvosa (Figura 155). Do mesmo modo, também foi verificado maior dano em indivíduos que compõem a ordem Siluriformes, que inclui bagres e cascudos, os quais possuem maior contato com o sedimento. Embora algumas dessas alterações sejam passíveis de serem reversíveis, elas podem comprometer diferentes processos fisiológicos importantes para a manutenção da saúde dos peixes.

Figura 155 – Imagens representativas de cortes histológicos de brânquia de diferentes espécies de peixes, capturados nos ambientes estuarino e marinho, que apresentaram alterações na estrutura das brânquias. Presença de desestruturação do filamento branquial (seta vermelha), fusão de lamelas (seta verde), aneurisma (seta azul) e proliferação celular (estrela amarela) em peixes da espécie *Genidens genidens* a e b); *Pimelodus maculatus* c); *Pseudauchenipterus affinis* d); *Cathorops spixii* e) e *Conodon nobilis* f) capturados no estuário da Foz do rio Doce e região marinha adjacente.



Fonte: Lactec.

5.7.4.2 Prejuízos às funções fisiológicas de osmorregulação, respiração, excreção e equilíbrio ácido-base em Peixes (biomarcadores: osmolalidade, íons, teor hídrico, atividade específica das enzimas AC, NAK e H⁺-ATPase)

Tanto os peixes capturados no estuário quanto os capturados no mar apresentaram comprometimento das funções fisiológicas essenciais à manutenção da homeostasia nas duas estações avaliadas (seca e chuvosa), porém, de forma mais significativa na estação chuvosa. Os danos mais significativos foram identificados nos processos de osmorregulação e equilíbrio ácido-base. No ambiente estuarino foi possível verificar que organismos de hábito alimentar omnívoro foram os mais impactados, uma vez que apresentaram o maior número de biomarcadores afetados. No ambiente marinho o comprometimento das funções fisiológicas foi verificado para todos peixes capturados em ambas as distâncias avaliadas, porém, de forma mais significativa nos peixes capturados nos pontos mais distantes da costa (20 km) e para aqueles pertencentes à ordem Siluriformes.

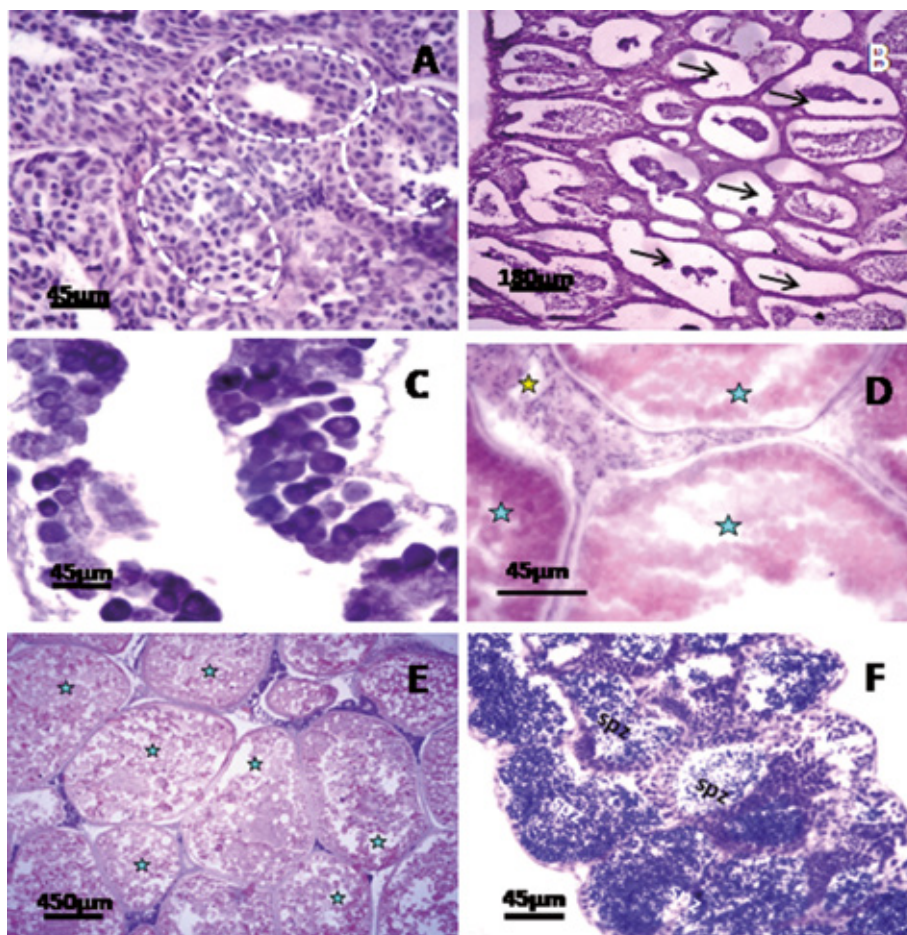
5.7.4.3 Prejuízos ao metabolismo em peixes (biomarcadores: glicose, glicogênio e lactato)

Foi identificado prejuízo ao metabolismo dos peixes estuarinos e marinhos. Para os peixes estuarinos, de hábito alimentar carnívoro, este prejuízo foi mais significativo na estação chuvosa. Para os peixes marinhos o comprometimento foi verificado para todos os organismos, independentemente da ordem, hábito alimentar ou distância avaliada.

5.7.4.4 Prejuízos às estruturas e função reprodutiva (biomarcador: histopatologia de gônadas)

Todas as espécies de peixes avaliadas, independente do ambiente (estuarino ou marinho), ordem e hábitos alimentares, não apresentaram alterações nas estruturas reprodutivas femininas e masculinas (Figura 156). Do mesmo modo, o desenvolvimento dos gametas (espermatozoides e óvulos) de machos e fêmeas também não apresentaram alterações. Esta ausência de alterações em estruturas reprodutivas pode estar relacionada a uma estratégia que objetiva a manutenção da espécie no ambiente.

Figura 156 – Imagens representativas de cortes histológicos de estruturas reprodutivas (gônadas) saudáveis de diferentes espécies de peixes. a) Testículo Imaturo de *Cathorops spixii* com túbulo seminífero contendo espermatogônias, circundado em branco pela linha pontilhada e b) Testículo Esgotado de *Cathorops spixii* com espaços deixados pelos espermatozoides após a eliminação (setas pretas); c) Ovário Imaturo de *Conodon nobilis* contendo ovócitos pré vitelogênicos em lamelas ovígeras organizadas; d) Ovário Semi-Desovado de *Conodon nobilis* contendo folículos maduros (estrela azul) e folículos pós-ovulatórios (estrela amarela); e) Ovário Maduro de *Cathorops spixii* repleto de folículos maduros (estrela azul); f) Testículo Maduro de *Conodon nobilis* com túbulos seminíferos repletos de espermatozoides (spz).



Fonte: Lactec.

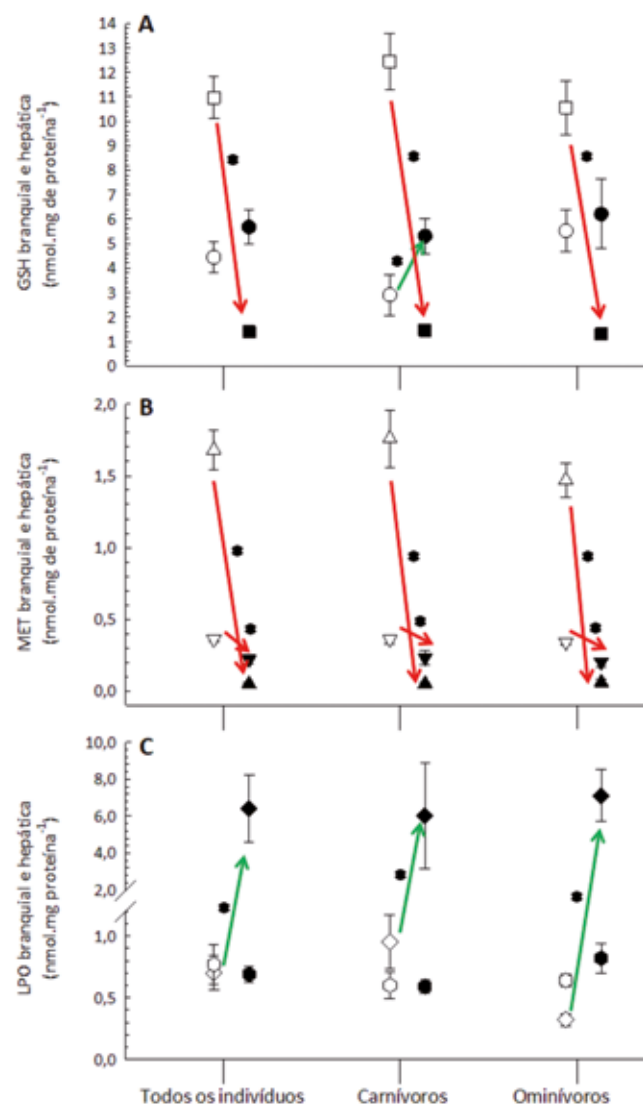
5.7.4.5 Alterações no sistema antioxidante e de biotransformação em Peixes (biomarcadores: CAT, SOD, GPx e GST)

Do mesmo modo que os outros sistemas descritos até o momento, os sistemas antioxidantes e de biotransformação (sistema de defesa do organismo) também foram mobilizados tanto nos peixes estuarinos quanto marinhos. Algumas enzimas que compõem estes sistemas apresentaram redução, enquanto a maior parte delas apresentaram aumento. Nos peixes marinhos a mobilização destes sistemas ocorreu independentemente dos pontos avaliados.

5.7.4.6 Alterações em sistemas não enzimáticos em Peixes⁶ (biomarcadores: GSH, MET, LPO)

Tanto os peixes estuarinos quanto os marinhos apresentaram alterações nos sistemas não enzimáticos (Figura 157). Na estação chuvosa os peixes estuarinos apresentaram menor concentração de metalotioneína (MET; branquial e hepática), grupo de proteínas envolvidas no processo de ligação a metais, e na glutathiona reduzida (GSH; branquial), envolvida tanto com respostas antioxidantes quanto com ligações a metais. Essa redução foi acompanhada do aumento nos níveis de danos em lipídios (LPO) no tecido branquial dos peixes, independentemente do hábito alimentar desses animais. Nos peixes marinhos, especialmente nos pertencentes a ordem Perciformes, também foi identificada redução na MET e GSH, porém, sem alteração nos níveis de LPO de brânquias e fígado.

Figura 157 – Gráfico exemplificando as alterações que ocorreram nos sistemas não enzimáticos de peixes estuarinos capturados na Foz do rio Doce na estação seca (símbolo branco) e chuvosa (símbolo preto) do ano de 2018. Setas vermelhas e verdes indicam redução e aumento das respostas, respectivamente. Quadrados, triângulos para cima e losangos representam resultados dos biomarcadores nas brânquias enquanto círculos e triângulos para baixo representam resultados dos biomarcadores no fígado.



Elaborado por: Lactec.

6 Biomarcadores não enzimáticos são proteínas ou alterações em estruturas celulares.

5.7.4.7 Neurotoxicidade (biomarcadores: AChE)

Não foi identificada, através da análise dos peixes capturados nas duas campanhas realizadas, neurotoxicidade (efeitos tóxicos sobre as funções neurológicas) para os peixes capturados no estuário. Para os peixes marinhos houve alterações relacionadas a neurotoxicidade em todos os pontos amostrados, no entanto, de forma mais expressiva nos peixes capturados nos pontos mais próximos da costa (5 km).

5.7.4.8 Genotoxicidade e Mutagenicidade em Peixes (biomarcadores: ensaio cometa, MN e ANEs)

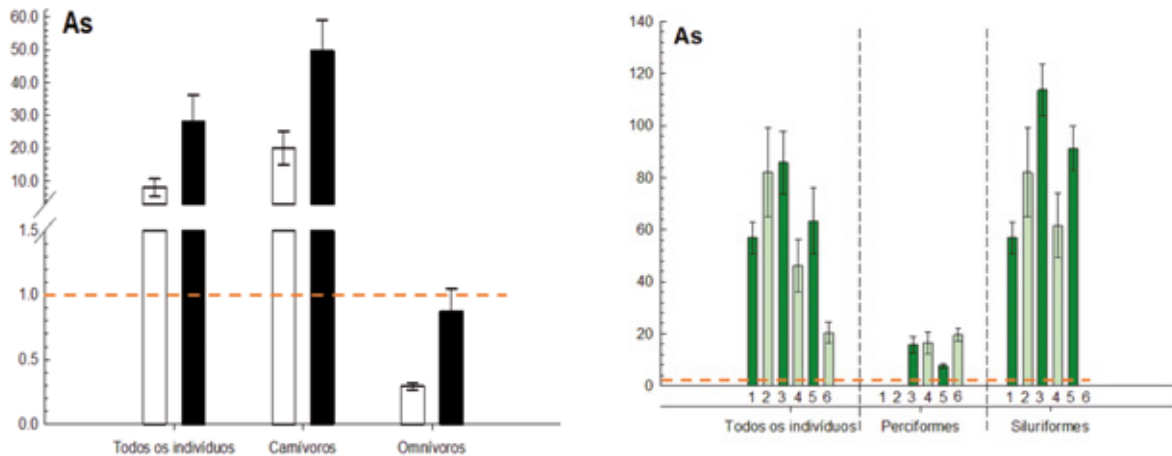
Houve aumento nos danos no DNA, aumento na frequência de anormalidades nucleares em eritrócitos (ANEs em hemácias) e redução na frequência de micronúcleos (MN) em peixes, especialmente de hábito alimentar carnívoro, capturados no estuário da foz do rio Doce na estação chuvosa quando comparados à estação seca. Poucas alterações nestes biomarcadores puderam ser identificadas em peixes marinhos e, estas quando presentes, também foram mais significativas na estação chuvosa.

Assim, como previamente descrito para a ictiofauna continental, todos os prejuízos e alterações observadas nos biomarcadores indicam danos aos organismos avaliados em decorrência das alterações ambientais observadas. Ainda assim, apesar da severidade destes prejuízos, ainda não foi possível determinar a gravidade, a tendência de evolução e reversibilidade dos mesmos, sendo necessária a manutenção do monitoramento destes parâmetros.

5.7.5 AUMENTO NA BIOACUMULAÇÃO

Foram avaliados os mesmos 17 EPTs que no ambiente aquático continental, os quais foram identificados tanto nos peixes estuarinos quanto nos marinhos. As maiores concentrações foram identificadas para os elementos Ag, Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Sb, Se e Zn, em relação a pelo menos um dos estudos de linha-base disponíveis (JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; PEREIRA *et al.*, 2010; SOUZA *et al.*, 2013; NIENCHESKI *et al.*, 2014; FAURG, 2016). Desses elementos, apenas quatro (As, Cd, Hg e Pb) possuem limites máximos estabelecidos pela legislação brasileira (ANVISA, 2013) e, dentre os elementos legislados, o As foi o que mais violou os limites máximos estabelecidos tanto no estuário (em ambas as estações) quanto no mar (estação chuvosa). Dentre as espécies que mais apresentam alterações nas concentrações de EPTs estão as que integram a ordem Siluriformes, ou seja, que possuem hábitos bentônicos, associados ao sedimento (como, por exemplo, bagres, cascudos e linguados), assim como as que possuem a carnivorina como hábito alimentar (Figura 158).

Figura 158 – Média da concentração de As (mg.kg^{-1}) determinada em peixes capturados (à esquerda) na Foz do rio Doce nas estações seca (coluna branca) e chuvosa (coluna preta) e (à direita) nos pontos marinhos próximos (5 km – 1, 3 e 5) e afastados (20 km – 2, 4 e 6) da costa, nas estações seca (colunas escuras) e chuvosa (colunas claras). Linha pontilhada em laranja corresponde aos limites máximos estabelecidos pela ANVISA.



Elaborado por: Lactec.

Assim como previamente mencionado para a ictiofauna continental, a presença de EPTs no tecido muscular dos peixes marinhos e estuarinos avaliados pode indicar risco de exposição humana a estes contaminantes por meio do consumo destes indivíduos. No entanto, para os peixes, sabe-se que vários dos EPTs avaliados apesar de se acumularem no tecido muscular possuem outros órgãos como alvo de efeito tóxico e de deposição, sendo assim, a presença destes elementos no músculo dos indivíduos indica que estes outros órgãos, em especial as brânquias, o fígado e os rins, possivelmente apresentem concentrações ainda mais elevadas destes EPTs, o que corrobora com as alterações observadas nos biomarcadores avaliados em alguns destes tecidos.

5.8 DANOS AOS QUELÔNIOS E MAMÍFEROS MARINHOS

O principal dano decorrente do rompimento da barragem de Fundão aos quelônios e mamíferos marinhos, identificado até o momento, foi a degradação dos seus habitats. Dentre os quelônios, a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) foi considerada indicadora desse dano pois frequenta a região de estudo ao longo de todo o ano, principalmente para alimentação dos juvenis. Já as espécies de mamíferos marinhos mais vulneráveis à degradação ambiental na área de estudo são os pequenos cetáceos costeiros, como o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e a toninha (*Pontoporia blainvillei*), pois são espécies residentes de áreas próximas da costa. As três espécies apresentam interesse para a conservação pelo status de ameaçadas de extinção, segundo a lista oficial brasileira.

5.8.1 PERDA DA QUALIDADE DOS HABITATS MARINHOS

Os resultados da modelagem de nicho ecológico para *C. mydas* e *S. guianensis* podem ser visualizados na Figura 159 e na Figura 160, e indicam áreas de perda de adequabilidade ambiental de intensidade leve a severa em áreas de 29.731 Km² e 18.973,00 km² respectivamente. Conforme a escala de gravidade, houve ocorrência de alterações de intensidade severa para ambas as espécies e, dessa forma, o dano de perda de qualidade dos habitats marinhos foi considerado gravíssimo.

Figura 159 – Resultado da modelagem de nicho que demonstra áreas de perda de adequabilidade ambiental no espaço temporal P1-P0 para *Chelonia mydas*.

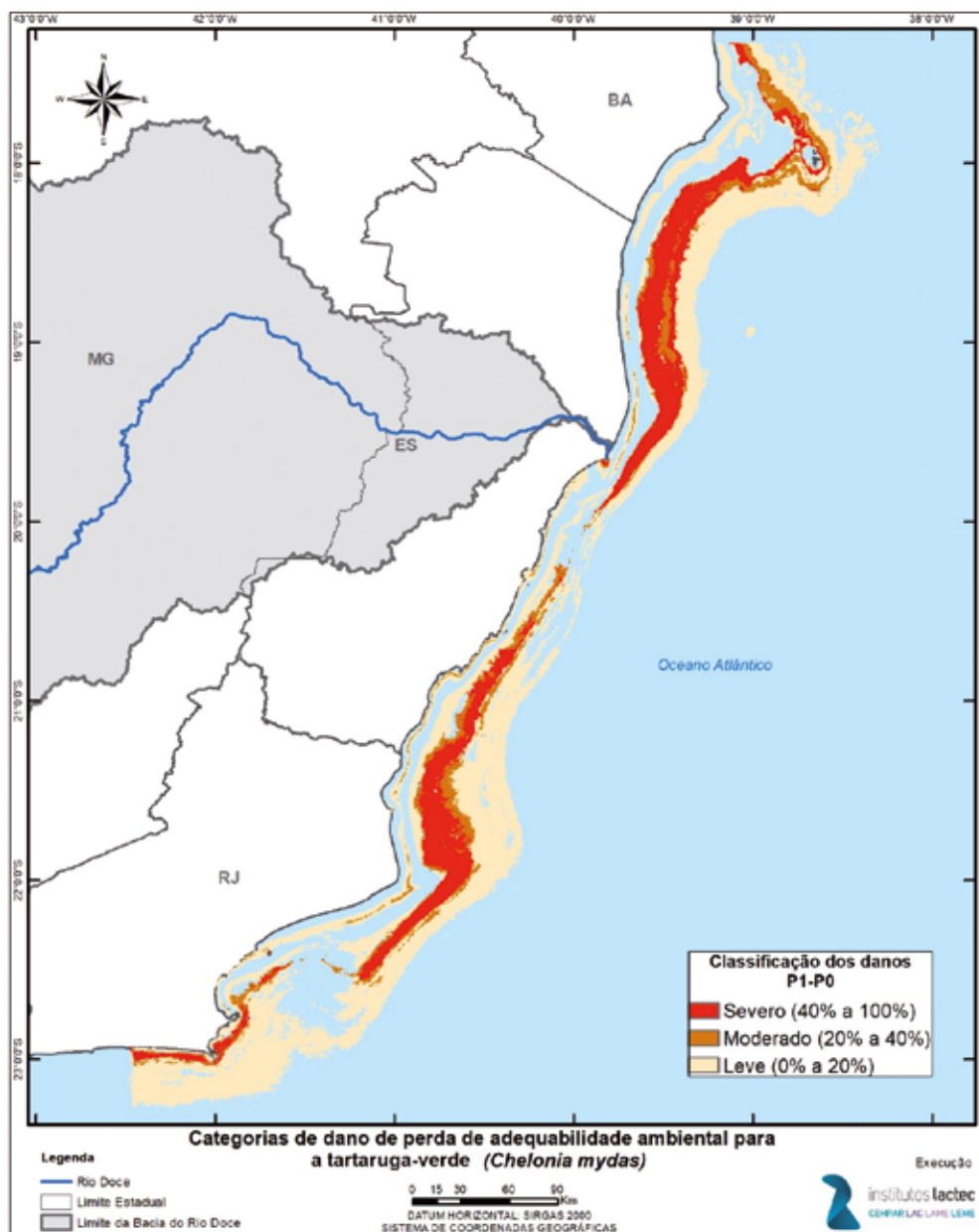
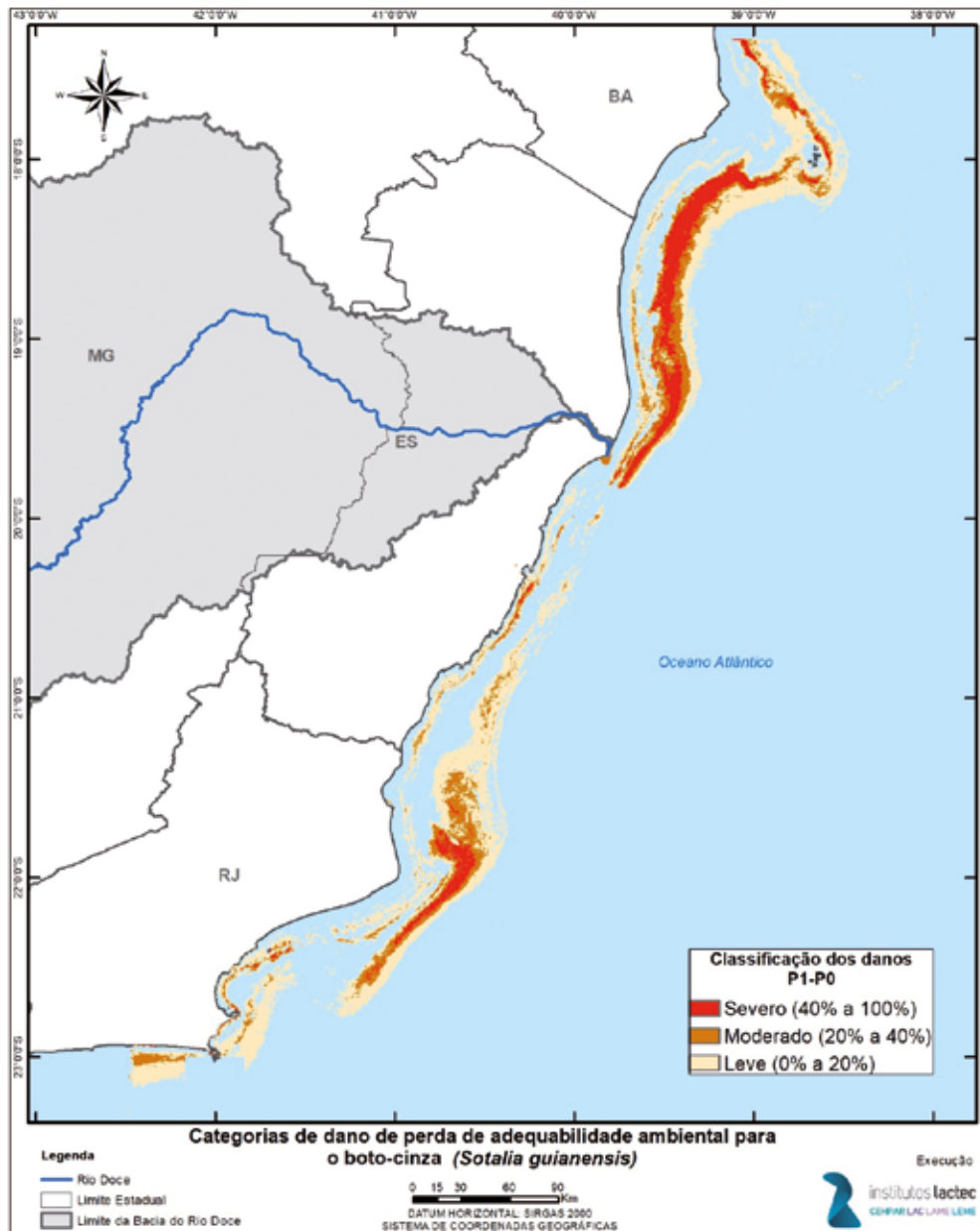


Figura 160 – Resultado da modelagem de nicho que demonstra áreas de perda de adequabilidade ambiental no espaço temporal P1-P0 para *Sotalia guianensis*.



É importante ressaltar que esses resultados não consideram de forma direta a presença de EPTs no ambiente e alguns outros parâmetros relevantes para esses animais (por limitações do método de modelagem) no contexto do desastre. Portanto, a gravidade do dano de perda de qualidade dos habitats pode ser ainda maior do que os resultados da modelagem sugerem, devendo ser avaliados em conjunto com os demais resultados obtidos em campo e descritos adiante.

Avaliando a perda de adequabilidade ambiental em P2, foi possível verificar que poucas áreas ainda apresentavam perda de qualidade dos habitats para as duas espécies indicadoras. Dessa forma, concluiu-se que o dano tendeu a reduzir e houve a sua reversão parcial, porém, novamente sem considerar os danos da bioacumulação de EPTs. Também é necessário considerar que eventos extremos de chuvas e cheias podem gerar novo declínio nas condições ambientais desses habitats, por meio de novo aporte de volume significativo de rejeitos, remobilizados pela maior vazão do rio. O ganho

de adequabilidade ambiental verificada com a modelagem em P2 se comparada a P1 sugere que os animais utilizavam, ou voltariam a utilizar a região nesse período, e estariam expostos aos danos relacionados à contaminação por elementos potencialmente tóxicos.

De fato, a ocorrência desses animais vem sendo observada ao longo do monitoramento, próximo à foz do rio Doce, em especial na APA Costa das Algas, que apresenta afloramentos rochosos e formações coralíneas que servem de substrato para as algas marinhas consumidas por *Chelonia mydas*. Devido ao processo de bioacumulação, pode ser esperado um aumento gradativo de danos relacionados à contaminação por EPTs para essa espécie nessa área. Entretanto, tal condição ainda demanda avaliações mais detalhadas.

Mesmo que eventuais novos aportes de rejeito não impliquem necessariamente em contaminação dos bancos de algas, há possibilidade do mesmo comprometer a qualidade do habitat de outras formas.

A ocorrência de espécimes juvenis de tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) em situação de forrageio (Figura 161), principalmente na APA da Costa das Algas, têm demonstrado uma densidade populacional média constante ao longo de todas as campanhas. Porém, aumentos da turbidez da água podem dificultar a visualização dos alimentos pelas tartarugas e, conseqüentemente, pode afastar espécimes da região, expondo-os a outros locais ou a deslocamentos fora de suas condições habituais e, assim, a outros tipos de danos. Nos espécimes com possibilidade de realizar necropsia, foi constatada morte por afogamento, provavelmente por interação com redes de pesca, inclusive no caso do indivíduo encontrado morto que apresentou fibropapilomatose, doença causada por vírus, mas que vem sendo associada à poluição dos oceanos. Já em relação aos parâmetros reprodutivos das tartarugas, não foram observadas alterações significativas e padronizadas nas taxas de desova e de nascimento de tartarugas marinhas que utilizam a região para reprodução que demonstrem um efeito direto do desastre. As taxas de encalhe e mortalidade apresentadas pelo programa de monitoramento PMP-BC/ES também não demonstraram uma relação direta com o desastre até o momento. Os números de encalhes apresentaram índices heterogêneos ao longo da costa, dentro da área de estudo, entre São Mateus e Aracruz, no Espírito Santo. Contudo, apesar de alguns pontos terem apresentado redução de encalhes, os últimos dados disponíveis mostram uma tendência de crescimento, o que reforça a demanda de um acompanhamento desses eventos.

Figura 161 – Indivíduo jovem de tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) registrado na área de estudo.



Fonte: Lactec.

Em relação aos cetáceos, a região marinho-costeira da foz do rio Doce foi identificada como habitat crítico do boto-cinza e da toninha, incluindo as águas mais turvas próximas da foz do rio. O boto-cinza (Figura 162) utilizava intensivamente esta região no período anterior ao rompimento da barragem de Fundão (ROSSI-SANTOS *et al.*, 2006) e continuou utilizando após a chegada da pluma de rejeitos ao mar até o período mais recente, área que foi monitorada por meio de saídas embarcadas. Devido à preferência, residência e fidelidade de uso destes habitats por esta espécie, a população de botos que usa a região da foz do rio Doce foi exposta à descarga de rejeitos. Resultados de dosagens de EPTs mostraram altas concentrações de elementos potencialmente tóxicos em tecidos de botos-cinza, aumento das concentrações em peixes que servem de presa para os botos e diminuição drástica de riqueza e abundância de macroinvertebrados bentônicos que são utilizados por estes peixes para alimentação na região, evidenciando a extensão dos danos para diferentes níveis da cadeia trófica.

Eventos de maior mortalidade de botos-cinza e toninhas com período compatível ao desastre também foram identificados. Estes eventos aconteceram em áreas ao norte do rio Doce, que foram justamente as que tiveram maior diminuição da qualidade ambiental após o desastre. O boto-cinza apresentou uma tendência significativa de aumento dos encalhes entre Barra Seca (ES) e Conceição da Barra (ES), com incremento de quase 170% no número de encalhes de 2015 para 2016 (Figura 163).

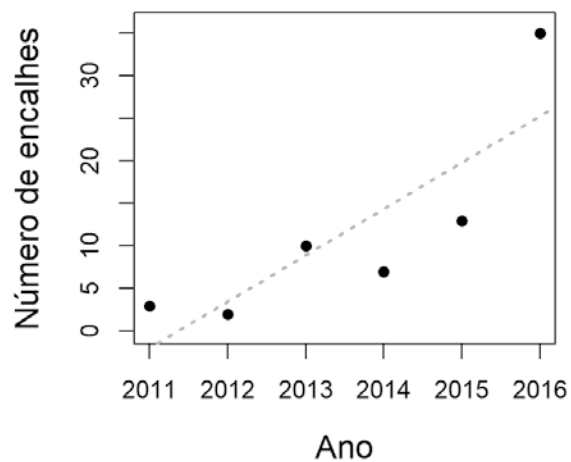
Considerando a grande longevidade das espécies dos grupos temáticos (maior que 30 anos) e os potenciais danos à saúde destes organismos resultantes da bioacumulação de EPTs, que podem refletir na dinâmica e viabilidade populacional, torna-se necessária a continuidade do monitoramento para a avaliação dos danos. A bioacumulação ocorre ao longo da vida, com os níveis de contaminantes aumentando com a idade. Assim, idealmente, estes animais de vida longa devem ser monitorados em longo prazo.

Figura 162 – Boto-cinza (*Sotalia guianensis*) registrado no monitoramento da região.



Fonte: Lactec.

Figura 163 – Número de encalhes do boto-cinza entre Conceição da Barra e Barra Seca (ES). Linha tracejada indica a tendência linear de encalhes.



Fonte dos dados: Petrobras (2017).

5.9 DANOS ÀS ÁREAS PROTEGIDAS

Dezesseis áreas protegidas foram consideradas afetadas por estarem contíguas à pluma de rejeitos e, portanto, sofreram alterações que resultaram em degradação da qualidade ambiental. Destas, uma área é a Terra Indígena (Figura 164) e 15 são UCs (Figura 165), sendo seis UCs do grupo de Proteção Integral e nove do grupo de Uso Sustentável.

Figura 164 – Terra Indígena (TI), do ambiente costeiro, afetada pela pluma de rejeitos decorrente do desastre da Samarco.

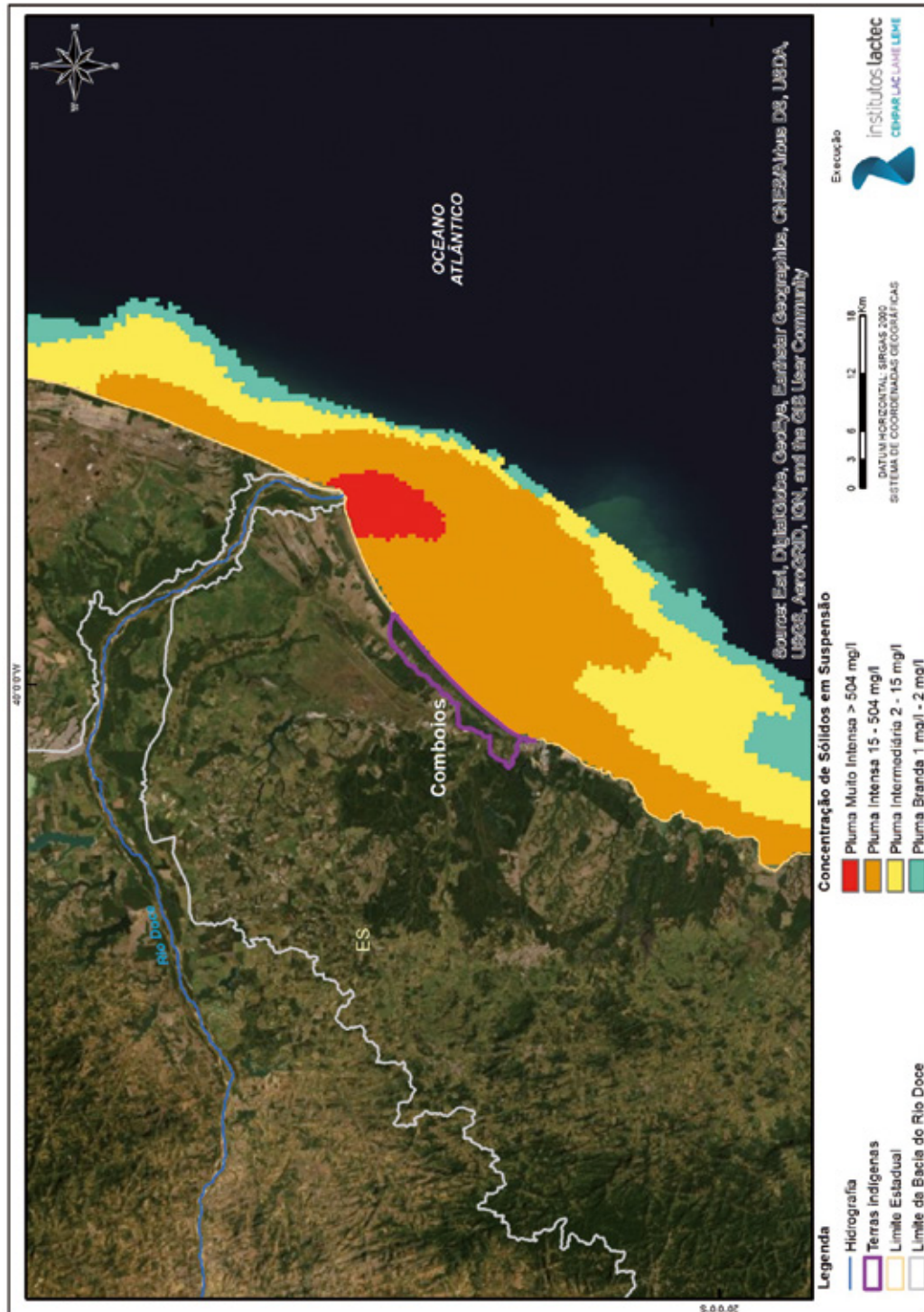


Figura 165 – Unidades de Conservação, costeiras e marinhas, afetadas pela passagem e deposição da lama (pluma de rejeitos) oriunda do desastre.

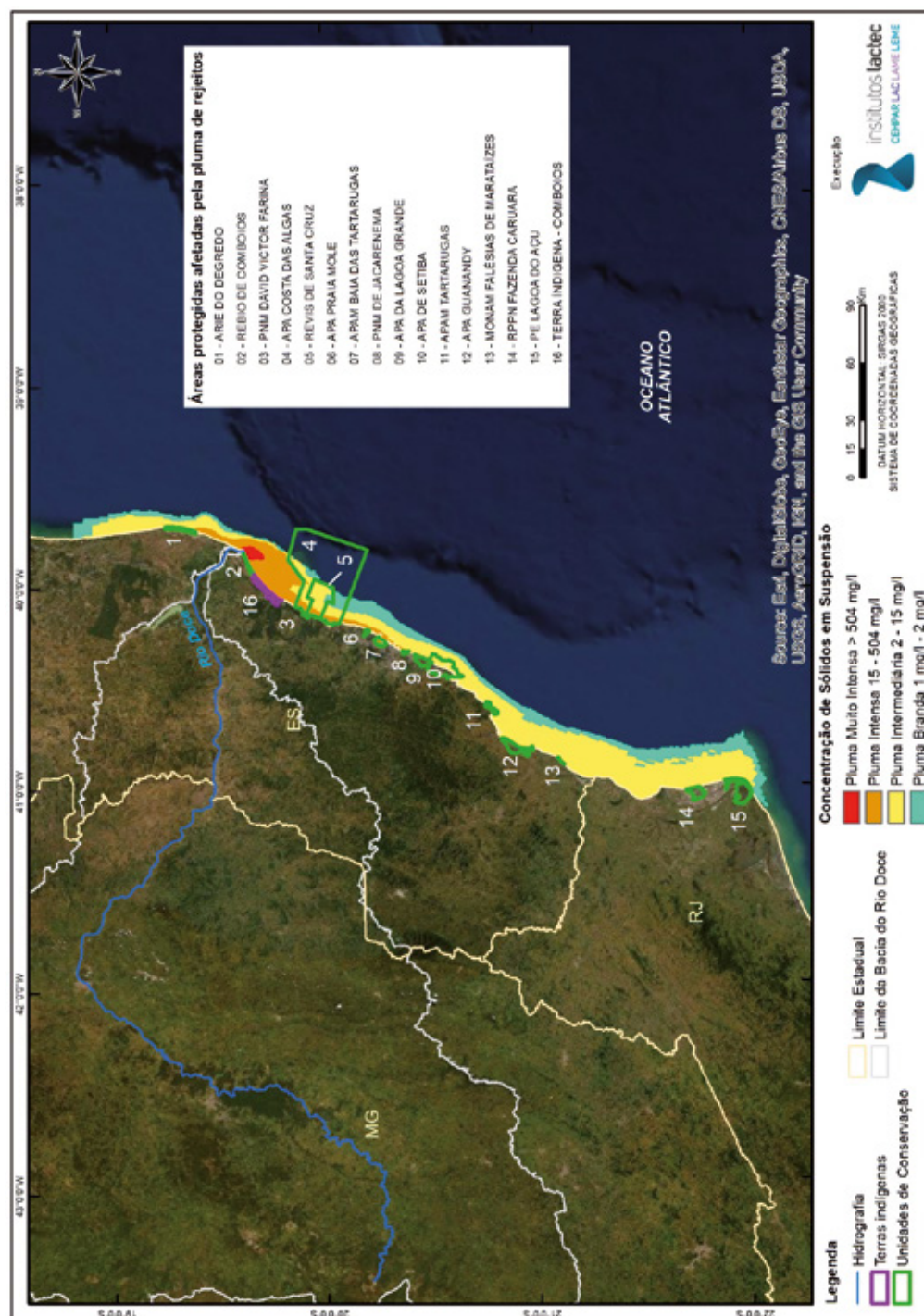


Tabela 68 – Relação das Unidades de Conservação e Terra Indígena afetadas pela pluma de rejeitos, extensão linear (km) e área (ha) alterada por classe da pluma (nível de concentração).

NOME	CLASSE DA PLUMA DE REJEITOS	EXTENSÃO LINEAR (km)	ÁREA AFETADA (ha)
Ambiente Costeiro			
Área de Proteção Ambiental Guanandy	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	23,17	--
Área de Proteção Ambiental de Praia Mole	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	2,01	--
Área de Proteção Ambiental da Lagoa Grande	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	10,84	--
Área de Proteção Ambiental de Setiba	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	11,51	--
Área de Relevante Interesse Ecológico do Degredo	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	16,34	--
Monumento Natural Municipal Falésias de Marataízes	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	4,36	--
Parque Estadual da Lagoa do Açú	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	15,44	--
Parque Natural Municipal David Victor Farina	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	0,25	--
Parque Natural Municipal de Jacarenema	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	4,31	--
Reserva Biológica de Comboios	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	9,72	--
	Pluma Muito Intensa > 504 mg/l	2,96	--
Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Caruara	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	7,13	--
Terra Indígena Comboios	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	20,09	--
Ambiente Marinho			
Área de Proteção Ambiental Municipal Baía das Tartarugas	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	--	1.503,85
	Pluma Branda 1 mg/l - 2 mg/l	--	10.034,99
Área de Proteção Ambiental Costa das Algas	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	--	9.245,35
	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	--	15.552,83
Área de Proteção Ambiental de Setiba	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	--	6.801,37
Área de Proteção Ambiental Municipal Tartarugas	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	--	609,37
	Pluma Intensa 15 - 504 mg/l	--	2.974,70
Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz	Pluma Branda 1 mg/l - 2 mg/l	--	2.708,37
	Pluma Intermediária 2 - 15 mg/l	--	12.057,92
Pluma Muito Intensa		2,964	--
Pluma Intensa		16,29	13.723,90
Pluma Intermediária		108,88	35.021,49
Pluma Branda		--	12.743,36
TOTAL GERAL		128,13	61.488,75

Para 12 áreas do ambiente costeiro, incluindo a Terra Indígena Comboios, foi possível determinar apenas a extensão do dano por contato com a pluma de rejeitos, que totaliza 128,13 km lineares de Unidades de Conservação e de Terra Indígena afetadas pela pluma de rejeitos decorrente do desastre.

Para o ambiente marinho, observa-se a sobreposição da pluma de rejeitos com cinco UCs, totalizando uma área afetada correspondente a 61.488,75 ha.

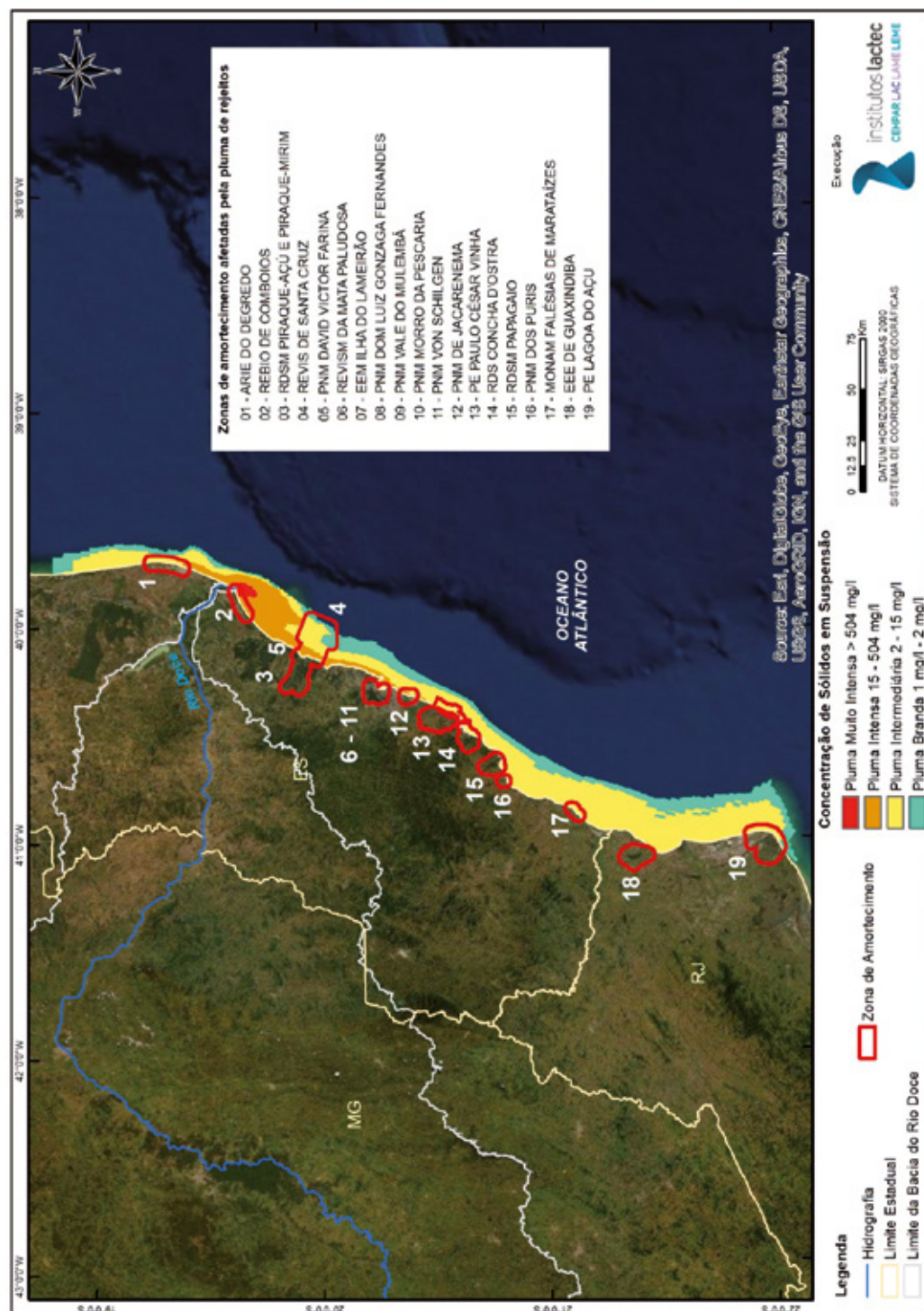
Também foram afetadas pela pluma de rejeitos 19 zonas de amortecimento (Tabela 69 e Figura 166). O cálculo das áreas afetadas pela pluma de rejeitos seguiu o mesmo procedimento adotado para as UCs.

Tabela 69 – Relação das Unidades de Conservação que tiveram parte da área de suas respectivas zonas de amortecimento afetadas pela sobreposição com a pluma de rejeitos decorrente do desastre.

NOME	CLASSE DA PLUMA DE REJEITOS	ÁREA AFETADA (ha)
Área de Relevante Interesse Ecológico do Degredo	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	5.397,79
	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	787,75
Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	5,74
Estação Ecológica Municipal Ilha do Lameirão	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	58,40
Monumento Natural Municipal Falésias de Marataízes	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	3.050,98
Parque Estadual da Lagoa do Açu	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	5795,86
	Pluma Branda (1 - 2 mg/l)	992,63
Parque Estadual Paulo César Vinha	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	6.802,41
Parque Natural Municipal David Victor Farina	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	1.164,72
Parque Natural Municipal Dom Luiz Gonzaga Fernandes	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	5,07
Parque Natural Municipal dos Puris	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	498,03
Parque Natural Municipal Morro da Pescaria	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	1674,64
Parque Natural Municipal Vale do Mulembá	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	2,56
Parque Natural Municipal Von Schilgen	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	775,27
Refúgio da Vida Silvestre Municipal Mata Paludosa	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	100,82
Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	18.772,67
	Pluma Branda (1 - 2 mg/l)	7.489,63
	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	5.487,63
Reserva Biológica de Comboios	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	3.091,00
	Pluma Muito Intensa (> 504 mg/l)	1.818,18

NOME	CLASSE DA PLUMA DE REJEITOS	ÁREA AFETADA (ha)
Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Papagaio	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	1.176,44
Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraque-Açú e Piraque-Mirim	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	18,41
Reserva Estadual de Desenvolvimento Sustentável Concha D'Ostra	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	1.799,65
Parque Natural Municipal de Jacarenema	Pluma Intensa (15 - 504 mg/l)	1.153,77
	Pluma Intermediária (2 - 15 mg/l)	1.346,45
Pluma Muito Intensa		1.818,18
Pluma Intensa		12.637,77
Pluma Intermediária		46.328,29
Pluma Branda		8.482,26
TOTAL GERAL		69.266,50

Figura 166 – Zonas de amortecimento das Unidades de Conservação também afetadas pelo desastre.



De um total de 23 áreas afetadas e 34 interações entre essas áreas e as classes da pluma de rejeitos, a avaliação do dano indica que para 29,41% dos casos ($n = 10$) o dano foi classificado como gravíssimo, grave para 01 avaliação (2,95%) e para 23 avaliações o dano foi classificado como pouco grave (67,64%).

O dano tende a evoluir nas áreas afetadas pela Pluma Muito Intensa e Pluma Intensa, como é o caso de parte da área afetada da APAM Baía das Tartarugas, APA Costa das Algas e REVIS de Santa Cruz, nos trechos da zona de amortecimento da ARIE do Degredo, EEM Ilha do Lameirão, PNM David Victor Farina, PNM Von Schilgen, REVISM Mata Paludosa, REBIO Comboios, RDS Piraque-Açú e Piraque-Mirim e PNM de Jacarenema. Para as demais unidades de conservação e zonas de amortecimento afetadas a tendência foi classificada, conforme metodologia, como estável (estabilizado). Quanto à reversibilidade 13 avaliações indicam que o dano é parcialmente reversível, correspondente às áreas afetadas pela Pluma Muito Intensa e Pluma Intensa, enquanto para os demais casos ($n = 21$) o dano foi classificado como reversível - áreas afetadas pela Pluma Branda e Pluma Intermediária.

Ressalta-se que houveram outras áreas naturais protegidas, especialmente no âmbito municipal, que não foram consideradas neste diagnóstico, pois seus dados não constam nos bancos de dados oficiais consultados. Também, outras áreas protegidas que estão presentes na região costeira e que protegem ecossistemas estuarinos, não foram passíveis de mensuração pela metodologia adotada.

Em relação ao cruzamento das áreas naturais protegidas com o mapa da deposição de rejeitos no mar, constatou-se que a deposição afetou ao menos 4 UCs, sendo elas: APA Costa das Algas, REVIS Santa Cruz, APAM Tartarugas e APA de Setiba. A análise sobre a deposição do rejeito considerou as UCs que protegem o ecossistema marinho. Assim, apesar de não ser considerada uma área natural protegida, o banco de Abrolhos foi afetado e é tratado com detalhes na sequência.

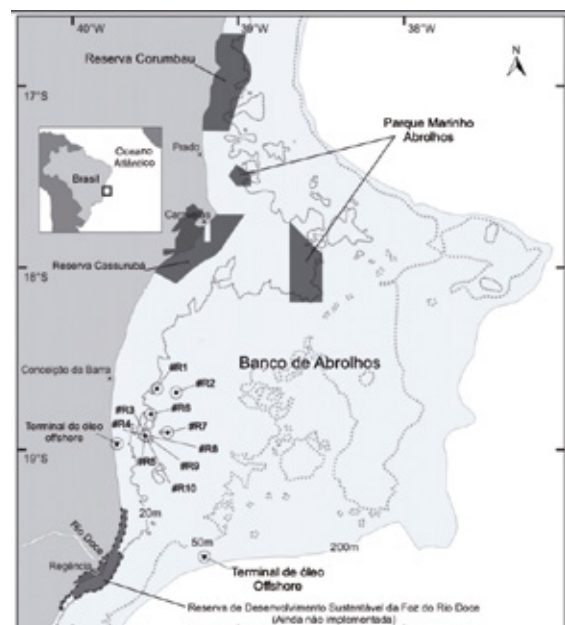
5.9.1 ABROLHOS

Com o rompimento da barragem de Fundão e a consequente chegada da pluma de rejeitos à região costeira, uma série de estudos foram direcionados na tentativa de identificar eventuais danos ocorridos à Abrolhos.

Quando se menciona Abrolhos é preciso distinguir o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, e uma extensa área de rica biodiversidade que abrange regiões que vão do sul da Bahia até próximo a foz do rio Doce, no Espírito Santo, denominada como Banco de Abrolhos (Figura 167).

Os estudos desenvolvidos por outros grupos de pesquisa sugeriram que a região dos Abrolhos, incluindo o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, foi afetada pelo rompimento da barragem de Fundão e que os ecossistemas da região, especialmente

Figura 167 – Localização do Banco dos Abrolhos, norte do estado do Espírito Santo e do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos.



Fonte: Adaptado de Mazzei et al. (2017); pág. 124

aqueles mais sensíveis como os recifes de corais, as algas marinhas e os bancos de rodólitos possam apresentar níveis altos de danos no futuro, mesmo expostos a concentrações muito baixas de sedimentos. Esses ecossistemas são sensíveis às pressões antrópicas e alterações no ambiente e o aumento da sedimentação é um dos principais efeitos dessa natureza sobre os recifes de coral brasileiros, incluindo os de Abrolhos, especialmente devido ao desmatamento e as descargas de efluentes industriais e urbanos.

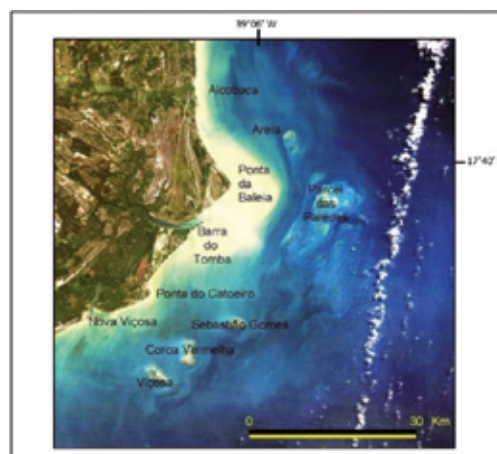
Dados preliminares de análises de concentração de EPTs realizados pelo Lactec em amostras de músculo de peixes da região adjacente à cidade de Caravelas (BA), obtidas por meio de parceria com Instituto Meros do Brasil (coletadas em março e abril de 2013 - pré-desastre e em maio de 2018 - pós-desastre), indicaram incremento na concentração de diversos EPTs nos animais capturados no período pós-desastre. Esse incremento pode ser um indicativo da influência do aporte de sedimentos provenientes do rompimento da barragem de Fundão na região do Banco de Abrolhos. No entanto, sabe-se que esta região está sob influência de outras possíveis fontes de contaminação, as quais também podem estar associadas ao aumento observado nas concentrações destes EPTs.

Afirmar que as alterações observadas até o momento na região de Abrolhos tem vínculo direto com o desastre, envolve algumas complexidades: a primeira delas é que a linha-base para Abrolhos é limitada, ou seja, as informações existentes após o desastre retratam a condição ambiental atual da região, com todas as alterações descritas, porém, na maioria dos casos, não permitem uma análise comparativa com alterações já existentes anteriormente; outra questão relevante, comentada anteriormente, é que a região dos Abrolhos, incluindo o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, sofre influência do aporte sedimentar de vários rios próximos, e seus efeitos podem interagir e se somar aos do desastre de diversas formas (Figura 168). Destacam-se os rios Jucuruçu, Itanhém e Peruípe (bacia do rio Caravelas) e Mucuri. Além desses, o aporte sedimentar do rio Jequitinhonha, rio de maiores proporções localizado mais ao norte, na Bahia, poderia exercer influência sobre os recifes (SILVA, 2011).

Na Figura 169 é possível observar os principais rios que desaguam nas proximidades dos recifes de Abrolhos. Os processos naturais de intemperismo sobre a alta variabilidade geológica encontrada nessa região podem ser responsáveis pelo aporte de uma série de elementos químicos que dificultariam entender o que é oriundo de processos naturais e o que está relacionado a pluma de rejeitos da Samarco. Para aumentar a complexidade, soma-se ainda a presença de uma série de atividades antrópicas, principalmente relacionadas a processos de extração mineral, indústrias e aglomerações urbanas.

Com base nos dados da ANM verificou-se que nesta região ocorrem processos minerários de Mn, de bauxita, de Ti e ilmenita. A extração destes elementos pode facilitar o aporte de uma série de outros EPTs associados, os quais não teriam vínculo com o desastre. Estudos e

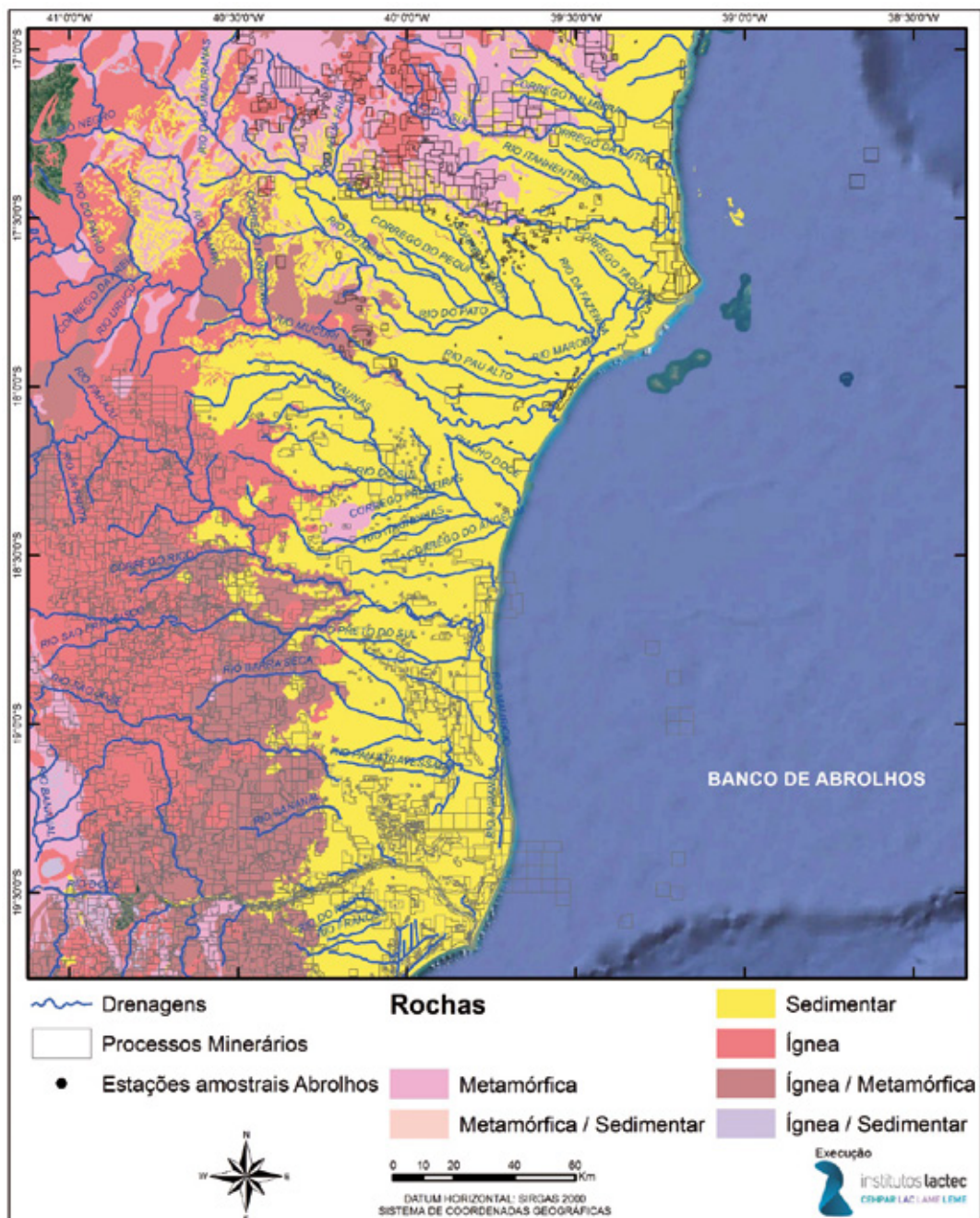
Figura 168 – Pluma de sedimentos em suspensão onde estão localizados os recifes costeiros da região de Abrolhos.



Fonte: Silva (2011); pág. 16.

análises isotópicas realizados por UERJ (EVANGELISTA et al., 2016) e pelo LARAMG – Laboratório de Radioecologia e Mudanças Globais (EVANGELISTA e VALERIANO, 2017) indicaram a presença de uma zona de mistura que de acordo com os referidos trabalhos, poderiam estar associadas a chegada da pluma a região de Abrolhos. Entretanto estes estudos não levaram em consideração os demais aportes sedimentares mencionados, desta forma, até que sejam realizados estudos complementares e mais abrangentes, julga-se prematuro tecer afirmações conclusivas sobre a real influência da pluma de rejeitos sobre os corais de Abrolhos.

Figura 169 – Mapa da distribuição geral dos tipos de rochas e a localização das principais drenagens que desembocam nas proximidades do banco de Abrolhos.



Execução: Lactec.

Por outro lado, é possível concluir que os danos da chegada de rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Fundão ao banco dos Abrolhos são evidentes, especialmente àqueles ecossistemas mais próximos da foz do rio Doce e mais sensíveis aos efeitos da sedimentação. Além disso, é importante considerar que são áreas de extrema importância para conservação e que os efeitos do desastre são sinérgicos a outras pressões antrópicas, o que torna o ambiente mais sensível à impactos, o que pode aumentar ainda mais a importância e a gravidade dos danos. Porém, mensurar esses danos ainda não é possível, demandando análises mais específicas e aprofundadas.

Conforme mencionado acima, considerando especificamente o Parque Nacional Marinheiros de Abrolhos, considera-se prematuro afirmar sobre os efeitos do desastre, sendo necessário o levantamento de mais informações para que haja segurança no diagnóstico dos danos do rompimento da barragem de Fundão a esses ecossistemas.

5.10 OUTROS TEMAS ESTUDADOS

Assim como descrito para o Ambiente Aquático Continental, algumas áreas temáticas e parâmetros estudados apontaram para alterações e degradação ambiental, mas não puderam ser associadas, até o presente momento, ao desastre. Alguns outros não indicaram alterações, porém os danos do desastre podem ainda não ter aparecido ou podem não ter sido identificadas através das análises realizadas. Dessa forma, abaixo constam todos os resultados desses levantamentos que são de extrema importância para descrever a situação atual do ambiente, possibilitando acompanhamento e evolução das condições ao longo do tempo.

5.10.1 VEGETAÇÃO COSTEIRA

Comparando os resultados (Tabela 70), não foram identificadas alterações significativas na riqueza e diversidade de espécies, não indicando danos diretos à composição da restinga próxima à foz do rio Doce. Além disso, a comparação entre as imagens do período de março a agosto de 2015) e T1 (novembro e dezembro de 2015) não indicaram a ocupação da área pela pluma de rejeitos. Entretanto, por estar diretamente relacionada as alterações de marés, as plantas da restinga podem conter elementos químicos presentes na água.

Tabela 70 – Dados comparativos dos estudos de vegetação de restinga no estado do Espírito Santo.

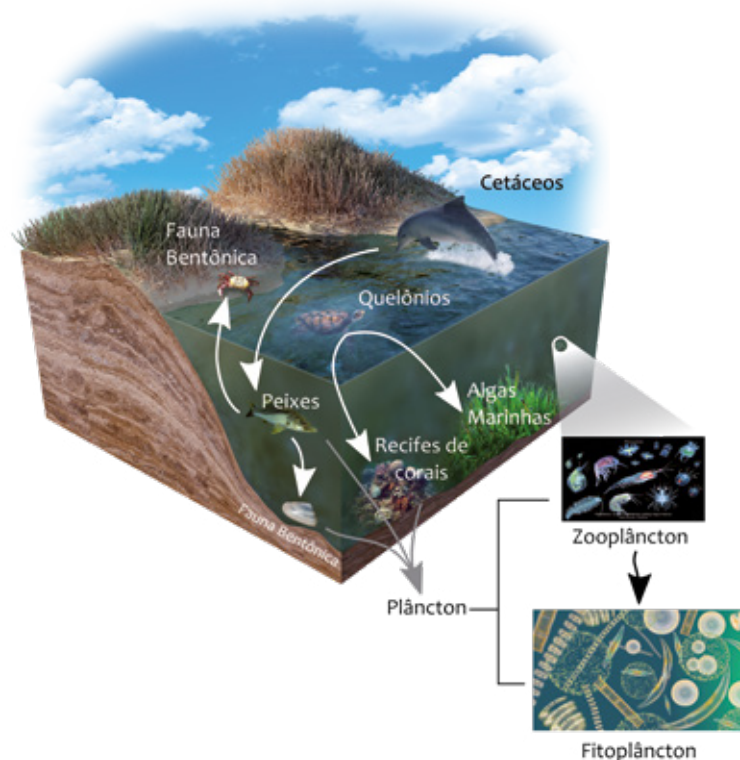
Autores	Ano	Localização	Metodologia	Nº de indivíduos	Nº de espécie	Nº de famílias
Colodete & Pereira	2007	Linhares, ES	Levantamento florístico	-	61	33
Monteiro <i>et al.</i>	2014	Parque Estadual de Itaúnas, ES	Intercepto de linha e inventário florístico	1055	42	28
Lactec	2019	Linhares, ES	15 pontos de amostragem e inventário florístico	2935	62	38

5.11 SÍNTESE DOS DANOS

Ao todo foram identificados 18 danos ao ambiente costeiro e marinho, englobando sete grupos temáticos: água, plâncton (fito e zoo), sedimentos (transporte e qualidade), comunidades bentônicas (organismos associados ao fundo), ictiofauna (peixes), quelônios e mamíferos marinhos e áreas protegidas (Figura 170). Esses danos foram observados em ambientes e organismos selecionados como bioindicadores dos efeitos do desastre, procurando abordar as suas diferentes esferas e variabilidade de modo a representar o todo. Porém, não se limitam a apenas esses. É evidente que outros representantes da flora e da fauna expostos às mesmas condições também sofreram consequências semelhantes. As cadeias alimentares nos diferentes ambientes são complexas e envolvem uma diversidade enorme de organismos e fatores que influenciam na ocorrência e gravidade dos danos.

Em alguns casos, como dito anteriormente, os danos podem ainda não ter aparecido de forma evidente, como nos animais de vida longa, os quais demandam um estudo de longo prazo para um diagnóstico seguro ou considerando o processo de acumulação de EPTs.

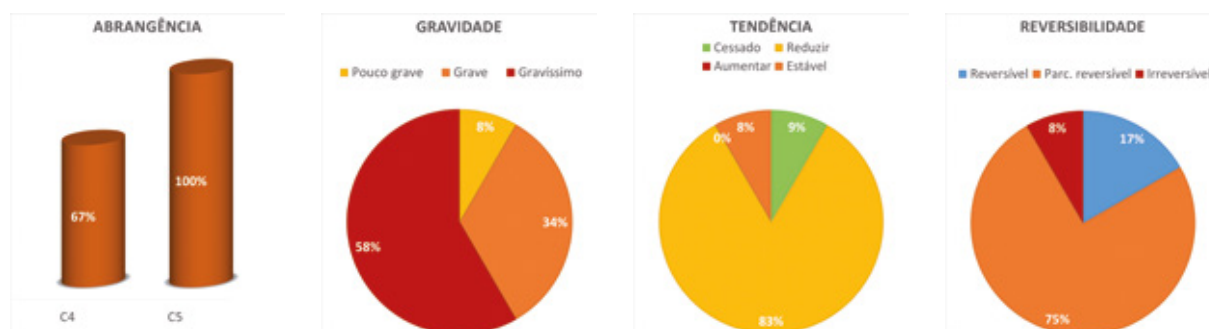
Figura 170 – Áreas temáticas da zona costeira e marinha.



Elaborado por: Lactec.

Dos danos identificados, seis deles não puderam ser classificados devido à escassez de dados de linha-base, estando relacionados ao fitoplâncton, zooplâncton, sedimento, acúmulo de EPTs nos organismos e à saúde dos peixes. Os mesmos foram descritos apenas de maneira qualitativa. Os demais 12 danos foram classificados quanto a gravidade, tendência e reversibilidade.

No geral, os danos ao ambiente da zona costeira e marinha foram classificados, em sua maior parte, como graves ou gravíssimos, com tendência de redução e parcialmente reversíveis (Figura 171).

Figura 171 – Análise integrada para gravidade, tendência e reversibilidade para os danos.

Elaborado por: Lactec.

Quando avaliados os compartimentos de forma distinta, observa-se que a maior parte dos danos estiveram concentrados nos compartimentos marinhos (C5), mais próximos da foz do rio Doce. As porções mais distantes da foz, considerando os danos avaliados até o momento, apresentaram gravidades reduzidas e baixa persistência, porém, devemos levar em consideração que os efeitos dos processos de bioacumulação e biomagnificação de EPTs nos organismos serão observados em longo prazo e devem ser monitorados, especialmente considerando que muitos desses organismos são utilizados para consumo humano.

É importante ressaltar que vários danos afetaram e continuam a afetar os serviços ecossistêmicos fornecido pelo ambiente costeiro e marinho, sendo que muitos deles foram comprometidos e modificados, de forma que suas funções ecológicas e os benefícios promovidos por eles aos seres humanos se alteraram, dentre eles provisão de biodiversidade, regulação de teias tróficas, provisão de alimentos pela pesca, provisão de habitat, produção primária e ciclagem de nutrientes.

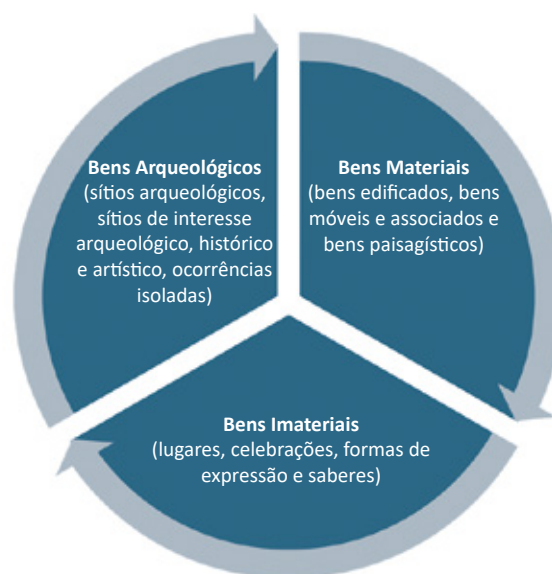
Em um primeiro momento a perda de biodiversidade foi um dos serviços ecossistêmicos mais facilmente detectados devido às alterações sofridas pelo ecossistema marinho quando da chegada da pluma. Um importante serviço afetado foi a provisão de alimentos pela pesca. A foz do rio Doce representa uma das principais áreas de recursos pesqueiros no estado do Espírito Santo, e os riscos da contaminação dos pescados à saúde humana fomentaram a proibição da pesca de qualquer natureza (processo nº 0002571-13.2016.4.02.5004), com ressalva à destinada para pesquisa científica, pela Justiça Federal do Espírito Santo a partir de 22/02/2016, por prazo indeterminado. Essa proibição perdura até o momento desse relatório. Dessa forma, considera-se que as ações de proibição à pesca devem ser mantidas como proteção à saúde humana, com relação à qualidade do pescado em estudo, e de forma complementar podem auxiliar na recuperação ambiental. Entretanto, é importante que as ações junto aos pescadores, inclusive aos artesanais e ribeirinhos, de criar condições de manutenção de suas atividades econômicas e qualidade de vida, sejam mantidas e fortalecidas.

6 PATRIMÔNIO CULTURAL

O patrimônio cultural compõe modos de vida e práticas, e sua alteração e/ou destruição representa a alteração e/ou destruição dos cursos de vida, o que demonstra a necessidade de um olhar amplo e integrado para o processo do desastre da Samarco (ainda em curso, sob o ponto de vista do patrimônio cultural), ocasionado pelo rompimento da Barragem de Fundão.

O diagnóstico de danos aos bens patrimoniais, assim como os trabalhos de campo realizados foram organizados em três diferentes áreas de pesquisa, conforme mostra a Figura 172, abrangendo os bens arqueológicos, materiais e imateriais.

Figura 172 – Patrimônio Cultural: Campos de Pesquisa do Diagnóstico de Danos.



Fonte: Lactec.

A passagem da lama de rejeitos da Samarco ocasionou danos aos bens culturais em todos os compartimentos, entretanto, com maior expressividade no C1, onde a ação mecânica da onda de rejeitos foi mais intensa, porém se fazendo sentir também de maneira considerável nos C2 e C3.

Foi possível observar que, os danos oriundos dos efeitos mecânicos da onda de rejeitos foram mais expressivos ao patrimônio arqueológico, acarretando no soterramento de diversos bens arqueológicos, bem como na perturbação de camadas sedimentares associadas a esses bens. Quanto aos bens culturais materiais, além das ações mecânicas, os danos foram causados pelas ações emergenciais/ reparatórias – essas últimas relacionadas, sobretudo, à pressão acarretada aos bens edificados e paisagísticos por conta da circulação de maquinário em localidades com esses bens, bem como aos problemas evidenciados na condução das atividades na Reserva Técnica da Fundação Renova no âmbito dos bens materiais móveis –, ressaltando-se que os danos aos bens culturais materiais concentraram-se, quase em sua totalidade, no C1.

As referidas ações emergenciais e reparatórias também são significativas no patrimônio cultural imaterial, pois acarretam tensões nas comunidades, assim como em dúvidas quanto ao futuro – gerando muita insegurança e sofrimento social, prejudicando a continuidade de diversas práticas culturais.

O “medo da água”, recorrente em diversos relatos coletados em campo, tem afetado de forma sensível diferentes práticas culturais que eram comuns até o desastre, evidenciando o dano aos bens imateriais nos C2 e C3.

Quando se faz a análise da relação do número de bens da linha-base (5.135) e o número de bens alvo de danos (285) pode-se presumir que os mesmos não são expressivos sob o ponto de vista quantitativo⁷. Contudo, essa percepção se mostra equivocada, uma vez que um olhar macro acaba por camuflar a importância e significância desses bens em seus contextos socioculturais. Dessa forma, empregou-se um jogo de escalas – entre o macro e o micro –, a fim de mapear efetivamente a extensão e a natureza dos danos e avaliar aspectos normalmente ignorados ou sub-representados.

Cabe salientar que o rio Doce, considerado como patrimônio imaterial e paisagístico, foi afetado em toda a sua extensão, acarretando na alteração/destruição dos cursos de vida de milhares de pessoas, conforme diversos relatos extraídos em campo. Ou seja, do ponto de vista quantitativo o rio Doce remete a um bem, contudo, do ponto de vista qualitativo o dano perpetrado ao rio é gravíssimo, além de promover ‘ondas de afetação’, pois a partir do rio Doce outros bens são atingidos nos territórios por onde esse curso d’água passa num “efeito dominó”.

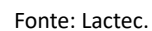
6.1 ÁREA DE ESTUDO

Para o diagnóstico de bens arqueológicos e culturais foram selecionadas áreas de 43 municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Doce, atingidos de alguma forma pela torrente de 44 milhões de m³ de rejeito, desde a barragem de Fundão até a foz do rio Doce, em solo capixaba.

A região do desastre foi subdividida em cinco compartimentos, conforme detalhado na contextualização (Figura 173).

⁷ Conforme será detalhado adiante, no tópico voltado a metodologia de avaliação dos bens móveis, uma amostra de 60 bens da Reserva Técnica da Fundação Renova foi avaliada, mas tem-se um total de 643 bens danificados na Reserva.

43°02'N 42°02'N 41°02'N 40°02'N



O processo de identificação dos danos aos bens arqueológicos e culturais causados pelo desastre da Samarco, iniciou-se com a compilação de uma linha-base (que caracteriza a situação pré-desastre). Após essa fase, foram realizados diversos trabalhos de campo (expedições) pelas equipes de avaliação de bens arqueológicos, materiais e imateriais.

6.2.1 BENS ARQUEOLÓGICOS

250

Os levantamentos bibliográficos conduzidos para a construção da linha-base resultaram na identificação de 579 sítios arqueológicos, tornando evidente o potencial arqueológico da região alvo do desastre como um todo (43 municípios).

Para o presente diagnóstico foram selecionados 67 bens (55 bens com danos e 12 bens sem danos) para avaliação, de acordo com os seguintes critérios: sua localização e circunscrição à APDL (ou muito próximo a ela) e a diversidade tipológica e cronológica de bens e sua relação com os cenários de ocupação delineados a partir da LB⁸. Dentre os bens avaliados, 55 apresentaram danos. Para fins de análise de danos, os bens foram classificados em duas categorias: sítios arqueológicos (SA) e sítios de interesse histórico arqueológico e cultural (SIAHA)⁹, sendo 38 SA e 17 SIAHA.

Os 67 bens selecionados para diagnóstico foram objeto de observação detalhada de superfície, ou seja, uma avaliação do dano sobre o bem cultural sem abertura de unidades de escavação e através de caminhamentos denominado por Prospeção Extensiva de Superfície. Após essa análise de superfície, alguns foram alvo de intervenções arqueológicas de subsuperfície e de coleta de material arqueológico, etapa essa denominada por Prospeção de Subsuperfície. Essas ações tiveram o intuito de dimensionar minimamente as áreas dos sítios e a espessura do pacote arqueológico, tudo isso com o objetivo de confirmar se o bem foi atingido ou não pelo rejeito, oriundo do rompimento da barragem de Fundão. Ressalta-se que todas as intervenções de subsuperfície e coletas de material arqueológico foram conservativas, no que tange ao recurso arqueológico.

Nessas intervenções orientadas e pontuais, procurou-se realizar o mínimo de movimentação de solos, através de Unidades de Escavação, Sondagens e Tradagens. Essas unidades de escavação apresentam dimensões variadas, pois visam o entendimento de estruturas construtivas soterradas e porções de terreno mais amplas, na tentativa de evidenciar vestígios e estruturas arqueológicas. Já as sondagens têm como foco o entendimento da estratificação do sítio, assim como as tradagens. No entanto, as sondagens têm maior preocupação com a qualidade da informação existente em subsuperfície, enquanto com a tradagem o arqueólogo busca o simples entendimento da espessura do pacote

8 Sítios arqueológicos: Segundo a PORTARIA Nº 316, DE 4 DE NOVEMBRO DE 2019, que estabelece os procedimentos para a identificação e o reconhecimento de sítios arqueológicos pelo IPHAN, em seu Art. 2º, "Sítio Arqueológico é o local onde se encontram vestígios resultantes de atividades humanas, do período pré-colonial ou histórico, localizados em superfície, subsuperfície ou submersos, passível de contextualização arqueológica." A mesma portaria aponta a necessidade de delimitação, georreferenciamento, caracterização e contextualização dos sítios arqueológicos. Nesse sentido, o instrumento jurídico, em compasso com os avanços teóricos e metodológicos da disciplina científica, aponta para uma prática arqueológica que pode se orientar para os objetos e estruturas materiais produzidos, utilizados, descartados pela ação humana, envolvendo processos econômicos, socioculturais e simbólicos, sem amarras cronológicas. Essas materialidades, em um sítio arqueológico, possuem uma coerência entre si, uma inter-relação a qual se chama contexto arqueológico. Assim, em seu Art. 7º, a portaria salienta a contextualização como a interpretação dos dados referentes às dimensões temporal, espacial e cultural do sítio arqueológico, somada à correlação com outras informações, como fontes documentais, orais, iconográficas e outros bens arqueológicos. Para fins desse diagnóstico foi necessário estabelecer de forma assertiva os critérios para adoção do conceito, os quais são listados a seguir: Cadastrado anteriormente como sítio arqueológico, ou seja, bem já reconhecido como tal pelo IPHAN; Ocupações anteriores ao século XX; Determinação da comunidade que o referido contexto pode/deve ser considerado como sítio arqueológico; Sítios de naufrágio com mais de 50 anos (embora a UNESCO determine 100 anos para essa definição)

9 Sítio de Interesse Arqueológico, Histórico e Artístico (SIAHA): Conceito tomado às Normas de Quito, documento elaborado em 1967 durante a Reunião sobre conservação e utilização de monumentos e sítios de interesse histórico e artístico, promovida pela Organização dos Estados Americanos (OEA). O conceito de SIAHA serve para designar bens posteriores à 1900 e/ou bens que não haviam sido cadastrados anteriormente ao diagnóstico. Serve também para bens cuja patrimonialização, com o emprego da categoria de sítio arqueológico, pode levar a restrição de seus usos. Nesse sentido, espaços que estavam em uso no momento do desastre, que podem ser de propriedade pública ou privada, inventariados ou não, tendem a ser considerados como SIAHAs. Foi considerada ainda a relação com os estudos devotados ao patrimônio material, nesse sentido, bens cuja valoração foi feita satisfatoriamente com o emprego da categoria de bem paisagístico e/ou edificado não foram elevados à categoria de sítio arqueológico. Sumariza-se da seguinte forma os critérios considerados para a definição de SIAHAs: Ocupações associadas apenas ao século XX; Determinação da comunidade que não deve ser considerado sítio arqueológico, pois traria possíveis limites de restrição de uso à comunidade; Contexto valorado em outra categoria patrimonial (bens edificados e/ou paisagísticos); Pontes (excetuando-se caso da Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway); Sítios de naufrágio com menos de 50 anos.

arqueológico, a presença/ausência de evidências e sua densidade de peças, guiando a realização ou não de intervenções mais detalhadas.

No C5 foi realizado o levantamento do fundo de áreas marítimas e ribeirinhas e a prospecção de alvos potenciais, sítios arqueológicos submersos, além do exame de sítios arqueológicos posicionados na interface terra/água. Assim, quando o bem se encontrava próximo à linha da costa marítima, houve uma visita técnica inicial, por meio terrestre, para depois realizar a prospecção com arqueólogos mergulhadores; quando o bem se encontrava longe da costa e completamente submerso, buscou-se fazer um levantamento geofísico, antes da prospecção com arqueólogos mergulhadores. Adicionalmente, durante os mergulhos foram coletadas amostras de sedimento de naufrágios, para análises granulométricas (areia, silte, argila, cascalho) e químicas (para 37 parâmetros de metais).

A Figura 174 a seguir ilustra alguns tipos de análises e ferramentas utilizadas para identificar e qualificar os danos aos bens arqueológicos pelo desastre da Samarco.

Figura 174 – Tipologias de ferramentas e análises utilizadas pela equipe de arqueologia para identificar os bens danificados pelo desastre: a) Exame e classificação de peças arqueológicas coletadas em campo; b) Prospecção Extensiva de Superfície: Planta e perfil de estrutura em sítio arqueológico; c) Prospecção de Subsuperfície: Unidade de Escavação realizada em Bento Rodrigues, Mariana/MG; d) Prospecção Subaquática no oceano Atlântico; e) e f) Fragmentos cerâmicos coletados no sítio arqueológico Terra Prometida I, Tumiritinga (MG).



Fonte: Lactec.

Um total de quatro danos aos bens arqueológicos foram identificados pela equipe, decorrentes do rompimento da barragem de Fundão e suas classificações quanto à gravidade foram definidas, baseando-se nas escalas de indicadores para cada dano, conforme mostra Tabela 71 a seguir. Destaca-se ainda que um mesmo bem arqueológico pode ter sofrido mais de um tipo de dano.

Tabela 71 – Relação de danos decorrentes do desastre da Samarco identificados no Patrimônio Arqueológico com seus respectivos Indicadores, Escalas de Indicadores e Gravidade.

QT.	DANO	INDICADOR	ESCALA DO INDICADOR	GRAVIDADE
1	Soterramento de bem arqueológico	Porcentagem da área do sítio afetada (%)	Superior a 50% da área do bem afetada	Gravíssimo
			Entre 25% e 50% da área do bem afetada	Grave
			Inferior a 25% da área do bem afetada	Pouco grave
2	Perturbação de camadas sedimentares do bem arqueológico	Porcentagem da área do sítio afetada (%)	Superior a 50% da área do bem afetada	Gravíssimo
			Entre 25% e 50% da área do bem afetada	Grave
			Inferior a 25% da área do bem afetada	Pouco grave
3	Modificação da paisagem de implantação do bem arqueológico	Porcentagem da área atingida da faixa envoltória de 100 metros (%)	Superior a 50% da área de inserção do bem ou bens com dano gravíssimo de soterramento ou perturbação (superior a 50%).	Gravíssimo
			Entre 25 e 50% da área de inserção do bem	Grave
			Inferior a 25% da área de inserção do bem	Pouco grave
4	Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	Em bens nos compartimentos 1, 2 e 3: Porcentagem de estruturas e vestígios arqueológicos associados ao solo/rejeito/ mistura por qualquer período de tempo (%).	Superior a 65% da área do bem afetada, ou seja, de estruturas e vestígios arqueológicos do bem afetado	Gravíssimo
			Entre 33% – 65 % da área do bem afetada, ou seja, de estruturas e vestígios arqueológicos do bem afetado	Grave
			Inferior a 33% da área do bem afetada, ou seja, de estruturas e vestígios arqueológicos do bem afetado	Pouco grave
		Em bens no Compartimento 5: Inserção do bem em relação ao oceano, sendo considerada a parcela do bem em contato com o ambiente atingido pela pluma ao longo de um ano.	Bens totalmente submersos (100% do bem, 100% do ano)	Gravíssimo
			Bens parcialmente submersos (pelo menos 5% do bem, pelo menos 50% do ano)	Grave
			Bens em zona de interface (pelo menos 1 % do bem, pelo menos 10% do ano)	Pouco grave

6.2.2 BENS CULTURAIS MATERIAIS

Os bens materiais neste diagnóstico são contemplados pelas seguintes tipologias de bens: edificados e urbanísticos (ex.: casarões antigos), paisagísticos (ex.: paisagens e caminhos antigos/históricos) e móveis e associados (ex.: objetos religiosos de capelas e igrejas).

O IPHAN lista entre os bens tombados de natureza material os “imóveis, como as cidades históricas, sítios arqueológicos e paisagísticos e bens individuais” e os “móveis, como coleções arqueológicas, acervos museológicos, documentais, bibliográficos, arquivísticos, videográficos, fotográficos e cinematográficos”.

A metodologia empregada aos bens culturais materiais considerou que bens que estivessem na rota da onda de rejeito ou que cujas áreas tivessem sido envolvidas nas ações emergenciais (logo após o desastre) ou reparatórias (ao longo do tempo pós-desastre), seriam avaliados para identificar a existência do dano ou não, concentrando esforços no C1 (ação mecânica da onda mais intensa), mas também nos bens paisagísticos presentes nos C2 e C3 que estão associados ao rio Doce.

Os danos foram analisados a partir da construção de uma metodologia de avaliação de conjuntos de edificações por análise comparativa, para que fosse possível isolar os fatores geradores de trincas, rachaduras, recalques e perda de material construtivo das edificações. Além disso, foi feita uma avaliação amostral dos objetos ora guardados na Reserva Técnica da Fundação Renova em Mariana (MG).

Destaca-se que os bens materiais foram agrupados por “Conjuntos” para facilitar o entendimento e avaliar os danos, constituindo-se, portanto, de uma importante ferramenta metodológica para realização deste diagnóstico. Desta forma, 20 conjuntos de bens foram agrupados, conforme mostra a Tabela 72 a seguir.

Tabela 72 – Conjuntos do Patrimônio Cultural Material.

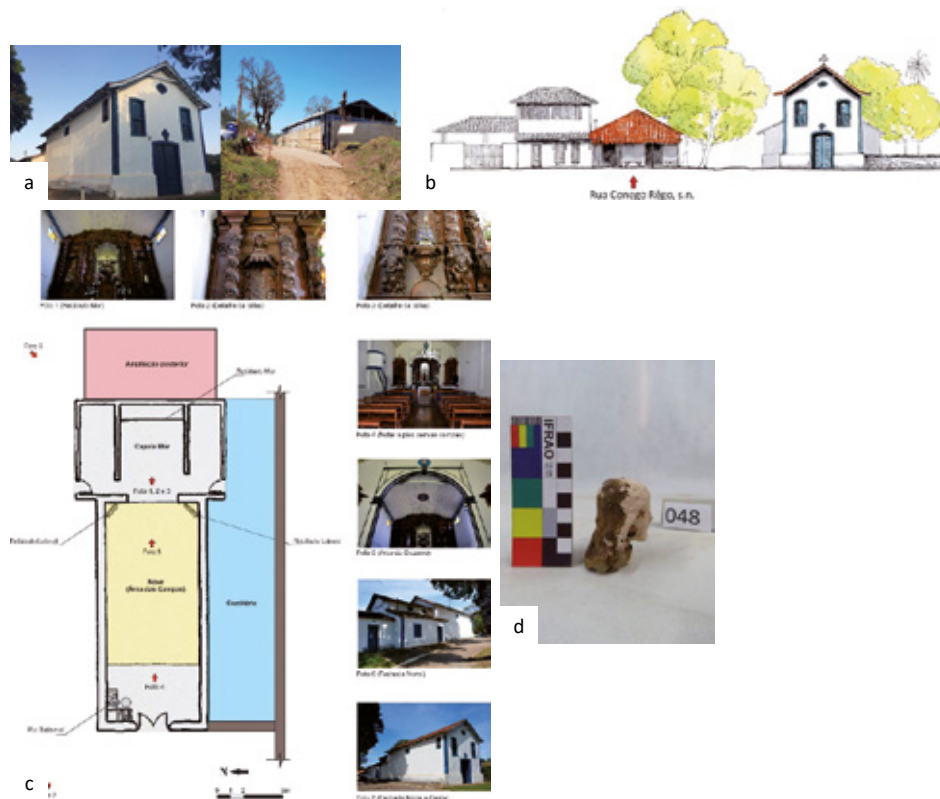
TIPO DE BEM	CONJUNTO	QUANTIDADE DE BENS
Edificados	Bento Rodrigues	10
	Paracatu de Baixo	01
	Gesteira	01
	Sede/Barra Longa	39
	Fazendas	04
	Santa Rita Durão	20
	Monsenhor Horta	08
	Camargos	11
Paisagísticos	Estrada Real	N/A
	Caminho de São José	N/A
	Rio Doce	N/A
	Lago da UHE Risoleta Neves/Candonga	N/A
	Encontro dos rios Piranga e do Carmo	N/A
	Lagoa Juparanã	N/A
Móveis e Associados	Capela de São Bento (Bento Rodrigues)	15
	Capela de Santo Antônio (Paracatu de Baixo)	15
	Capela de Nossa Senhora da Conceição (Gesteira)	15
	Capela de Nossa Senhora das Mercês (Bento Rodrigues)	15
	Igreja Matriz de São José (Barra Longa)	08
	Igreja de Nossa Senhora do Rosário (Santa Rita Durão)	03

É importante esclarecer que 3.645 bens de natureza material foram apontados na Linha-Base, no âmbito dos 43 municípios que compõem este diagnóstico. Entretanto, a metodologia empregada e pesquisa de campo indicaram que o número de bens culturais materiais alvo de danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão foi equivalente a 171 bens, dentre os quais 94 bens edificados, 06 paisagísticos e 71 bens materiais móveis. Destes bens móveis, 60 correspondem a uma amostra dos 643 bens móveis afetados que se encontram na Reserva Técnica da Fundação Renova. Isso não significa que os demais bens avaliados não possam apresentar, futuramente, danos (materiais) em decorrência de ações, obras ou processos desencadeados pós-desastre a cargo da Samarco, que ainda se encontram em andamento.

Logo, o percurso metodológico executado pela equipe de bens materiais possibilitou a construção de um quadro seguro dos bens atingidos pelo desastre, bem como a geração de indicadores possíveis para qualificar os danos, por meio de descrições detalhadas (denominadas por dossiês analíticos) de cada bem que compõe os 20 conjuntos de bens, de pesquisas junto à Reserva Técnica da Fundação Renova e de aspectos históricos e metodológicos considerados como essenciais para a completa avaliação dos danos (Rede de Núcleos Urbanos nas Minas Gerais do Ouro, Avaliação Comparativa dos Conjuntos de Bens Edificados, Quintais de Minas Gerais, Hierarquia nos Objetos e Materialidade da Estrada Real).

A Figura 175 a seguir ilustra alguns tipos de análises e ferramentas utilizadas para identificar e qualificar os danos aos bens materiais pelo desastre da Samarco.

Figura 175 – Tipologias de ferramentas e análises utilizadas pela equipe de bens materiais para identificar os bens danificados pelo desastre: a) Capela de São Bento (pré e pós-desastre), Bento Rodrigues, Mariana, MG; totalmente destruída pela onda de rejeito; b) Croqui da Capela de São Bento e entorno (composição pré-desastre); c) Planta da Capela de São Bento e Imagens Internas e Externas (composição pré-desastre); d) Cabeça de uma imagem registrada na Reserva Técnica da Fundação Renova (pós-desastre).



Fonte: Lactec

Um total de cinco danos aos bens culturais materiais foram identificados pela equipe, decorrentes do rompimento da barragem de Fundão e suas classificações quanto à gravidade foram definidas, baseando-se nas escalas de indicadores para cada dano, conforme mostra a Tabela 73. Salienta-se que um mesmo bem material pode ter sofrido mais de um tipo de dano.

Tabela 73 – Relação de danos decorrentes do desastre da Samarco identificados no Patrimônio Cultural Material com seus respectivos Indicadores, Escalas de Indicadores e Gravidade

QT.	DANO	INDICADOR	ESCALA DO INDICADOR	GRAVIDADE
1	Comprometimento das estruturas de bens culturais materiais	<i>Percentual perdido de elementos originais responsáveis pela identificação do bem cultural material (em %):</i> TIPOLOGIAS: 1- Material construtivo original.	Acima de 75%	Gravíssimo
2	Desencadeamento de processos físico-químicos que acelerem a degradação dos bens culturais materiais	2- Elementos componentes da paisagem original (pré desastre). 3- Trechos e setores originais de rotas e traçados de estradas e caminhos tradicionais. 4- Elementos originais componentes de objetos móveis <i>Percentual alterado de elementos originais responsáveis pela identificação do bem cultural material (em %):</i> TIPOLOGIAS: 1 - Adição de trincas e rachaduras.	De 50% a 75%	Grave
3	Modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais	2- Adição de materiais estranhos as estruturas originais do bem cultural. 3- Adição de fungos, bolores e mofo. 4- Adição de infestações de animais danosos aos bens culturais. 5- Adição de elementos estranhos a implantação paisagística ou ao contexto do bem cultural. 6- Retirada de bens culturais materiais móveis de seus contextos.	De 25% a 50%	Pouco grave
4	Alteração de partes ou setores de rotas e caminhos históricos e/ou tradicionais	<i>Percentual perdido de elementos originais responsáveis pela identificação do bem cultural material (em %):</i> TIPOLOGIAS: 1- Material construtivo original. 2- Elementos componentes da paisagem original (pré desastre). <i>Percentual alterado de elementos originais responsáveis pela identificação do bem cultural material (em %):</i> TIPOLOGIAS: 1 - Adição de trincas e rachaduras.	Acima de 75%	Gravíssimo
		2- Adição de materiais estranhos as estruturas originais do bem cultural. 3- Adição de fungos, bolores e mofo. 4- Adição de infestações de animais danosos aos bens culturais. 5- Adição de elementos estranhos a implantação paisagística ou ao contexto do bem cultural. 6- Retirada de bens culturais materiais móveis de seus contextos.	De 50% a 75%	Grave
			De 25% a 50%	Pouco grave
5	Interrupção ou cessão do acesso e/ou uso dos bens culturais materiais	Tempo de interrupção ou cessão do acesso ao bem cultural material	Maior que 5 anos*	Gravíssimo
			De 1 a 5 anos	Grave
			De 0 a 1 ano	Pouco grave

*Contando-se até o presente momento (mais de quatro anos de interrupção de acesso pós-desastre) e podendo se estender indefinidamente no tempo, sem previsão de retorno do acesso/uso bens materiais.

6.2.3 BENS CULTURAIS IMATERIAIS

As tipologias de bens que contemplam o patrimônio imaterial são as seguintes: celebrações (festas de caráter comemorativo e extraordinárias em relação à vida cotidiana), formas de expressão (manifestações e performances culturais), lugares (territórios de referência para as práticas culturais) e ofícios, saberes e modos de fazer (técnicas e conhecimentos tradicionais e locais).

Por meio de expedições de campo realizadas entre agosto e novembro de 2018, os pesquisadores puderam entrar em contato com uma série de interlocutores (moradores e de atores institucionais), principalmente, aqueles com conhecimento das práticas culturais e modos de vida locais, com os quais conversaram a respeito do desastre, das transformações nas dinâmicas das localidades, dos danos provocados aos bens culturais imateriais e das consequências nos modos de vida da população local. Além dessa coleta de relatos, os pesquisadores também fotografaram e acumularam outros tipos de materiais fornecidos pelos próprios informantes, tais como fotografias antigas, recortes de jornal, panfletos, entre outros. Cabe ressaltar que, ao longo dessas interações, os interlocutores sempre eram informados dos objetivos da pesquisa e convidados a assinar um termo de livre consentimento e autorização de uso de imagem, depoimentos e voz.

As informações de campo foram todas registradas em documentos denominados por Instrumentais de Campo. Esses Instrumentais foram divididos da seguinte forma:

- Instrumental de Localidade: Registro de informações gerais sobre as localidades, suas histórias, a relação dos moradores com o rio e as narrativas de como o desastre atingiu aquela população e as dinâmicas sociais;
- Instrumental de Bem: Registro de dados sobre os bens culturais imateriais;
- Instrumental de Instituição: Registro das conversas institucionais realizadas.

Os Instrumentais de Campo serviram como fontes de informações para elaboração das Fichas de Bens e Localidades que contemplaram as informações dos três Instrumentais acima mencionados, bem como para consulta de informações para elaboração do próprio diagnóstico.

Essas Fichas foram uma construção textual, não somente com narrativas de fatos, mas antes de tudo, com interpretações que tornam compreensíveis os sentidos dados pelos interlocutores aos bens culturais.

No processo de elaboração dessas Fichas foram analisados somente os bens que sofreram danos, não apenas enquanto práticas culturais específicas ou lugares envolvidos, mas também como produtos das relações com outras práticas e dinâmicas locais. Para dar conta de casos em que tais conexões eram constitutivas do próprio bem, a estratégia metodológica foi, em alguns casos, criar conjuntos de bens que, dentro de uma mesma localidade, apresentavam regularidades e semelhanças, tanto em suas configurações anteriores ao desastre quanto pelos danos sofridos, como, por exemplo: o Conjunto de Festas Religiosas de Furquim, que reúne as festas do Bom Jesus, do Divino, da Virgem do Carmo.

Ao longo de todos os campos, portanto, foram realizadas 347 conversas formais (essas com termo de consentimento assinado) e 337 informais, acerca dos danos provocados pelo rompimento da barragem de Fundão. A partir desse material coletado em campo foram elaboradas 81 Fichas de Bem e 59 Fichas de Localidade. Esse material serviu de base para a análise final dos danos aos bens culturais imateriais, sendo que foram identificados danos em 59 bens imateriais.

A Figura 176 a seguir ilustra alguns tipos de análises e ferramentas utilizadas para identificar e qualificar os danos aos bens imateriais pelo desastre da Samarco.

Figura 176 – Tipologias de ferramentas e análises utilizadas pela equipe de bens imateriais para identificar os bens danificados pelo desastre: a) Equipe de antropologia junto com morador da região mostrando a área atingida na margem do rio Doce; b) Pescador mostrando suas redes inutilizadas pós-desastre; c) Memórias de práticas culturais no rio Doce; d) Memórias de batismo no rio Doce.



Fonte: a) e b) Lactec; c) e d) Fotos cedidas por atingidos.

Um total de sete danos aos bens culturais imateriais foram identificados pela equipe, decorrentes do rompimento da barragem de Fundão e suas classificações quanto à gravidade foram definidas, baseando-se nas escalas de indicadores para cada dano, conforme mostra Tabela 74 a seguir. Salienta-se que um mesmo bem imaterial pode ter sofrido mais de um tipo de dano.

Tabela 74 – Relação de danos decorrentes do desastre da Samarco identificados no Patrimônio Cultural Imaterial com seus respectivos Indicadores, Escalas de Indicadores e Gravidade.

QT.	DANO	INDICADOR	ESCALA DO INDICADOR	GRAVIDADE
1	Alteração de práticas culturais	1. Narrativas que indicam interrupção das práticas (96-100%)	Interrupção das práticas em 96-100%	Gravíssimo
		2. Narrativas que indicam diminuição das práticas (51-95%)	Diminuição das práticas em 51-95%	Grave
		3. Narrativas que indicam diminuição das práticas (1-50%)	Diminuição das práticas em 1-50%	Pouco grave
2	Alteração da rede de relações comunitárias	1. Narrativas que indicam interrupção das redes (96-100%)	Interrupção das redes em 96-100%	Gravíssimo
		2. Narrativas que indicam diminuição das redes (51-95%)	Alteração das redes em 51-95%	Grave
		3. Narrativas que indicam diminuição das redes (1-50%)	Alteração das redes em 1-50%	Pouco grave
3	Sofrimento Social	Aparecimento de narrativas sobre sofrimento social relacionado aos danos aos bens culturais	Probabilidade de ocorrência em pelo menos 20% da população	Gravíssimo
			Probabilidade de ocorrência em pelo menos 10% da população	Grave
			Probabilidade de ocorrência em pelo menos 5% da população	Pouco grave
4	Alteração de espaços relacionados às práticas culturais	1. Narrativas sobre supressão do espaço (96-100%)	Supressão dos espaços em 96-100%	Gravíssimo
		2. Narrativas sobre desconfiguração do espaço (51-95%)	Desconfiguração dos espaços em 51-95%	Grave
		3. Narrativas sobre desconfiguração do espaço (1-50%)	Desconfiguração dos espaços em 1-50%	Pouco grave
5	Alteração de espaços de referência de memória	1. Narrativas sobre supressão do espaço (96-100%)	Supressão dos espaços em 96-100%	Gravíssimo
		2. Narrativas sobre desconfiguração do espaço (51-95%)	Desconfiguração dos espaços em 51-95%	Grave
		3. Narrativas sobre desconfiguração do espaço (1-50%)	Desconfiguração dos espaços em 1-50%	Pouco grave
6	Alteração no acesso a matérias-primas e implementos associados necessários à produção dos bens culturais	1. Acesso totalmente impedido indicado nas narrativas (96-100%)	Acesso bloqueado em 96-100%	Gravíssimo
		2. Acesso parcial indicado nas narrativas (51-95%)	Dificuldade de acesso em 51-95%	Grave
		3. Acesso parcial indicado nas narrativas (1-50%)	Dificuldade de acesso em 1-50%	Pouco grave
7	Alteração na circulação de práticas e bens culturais	1. Narrativas sobre a interrupção da circulação (96-100%)	Interrupção da circulação em 96-100%	Gravíssimo
		2. Narrativas sobre aumento da dificuldade na circulação (51-95%)	Dificuldade de circulação em 51-95%	Grave
		3. Narrativas sobre aumento da dificuldade na circulação (1-50%)	Dificuldade de circulação em 1-50%	Pouco grave

6.3 DANOS AO PATRIMÔNIO ARQUEOLÓGICO

No caso do patrimônio arqueológico, dentre os 67 bens selecionados, 55 bens apresentaram algum tipo de dano.

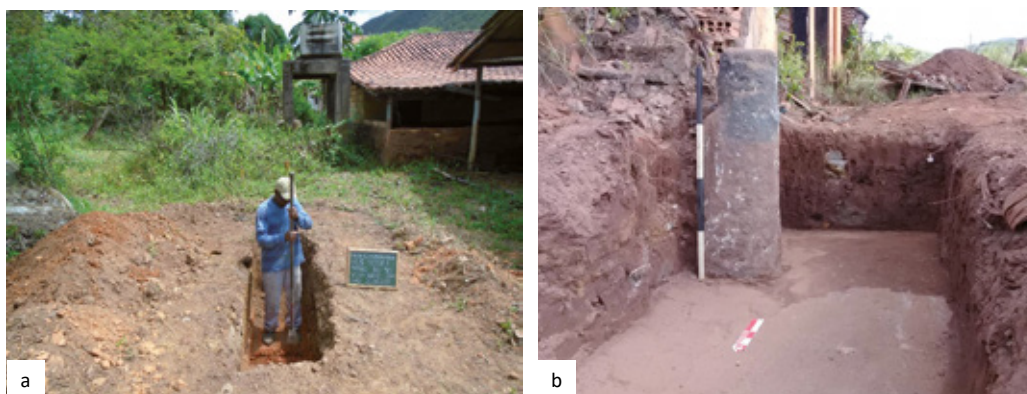
Dentre os 55 bens atingidos pelo desastre (28 no C1, 14 no C2, 06 no C3 e 07 no C5), 2 sítios arqueológicos foram completamente destruídos pela onda de rejeitos decorrente do rompimento da barragem de Fundão: Fazenda Fábrica Nova e Mina Santo Antônio. Outros 15 foram severamente atingidos: Bento Rodrigues, PCH Bicas, Paracatu de Baixo, Ruínas Carlos Leal da Maia, Gesteira Velha, Gesteira 1, Catas, Candonga, Arraial, Fazenda do Gualaxo, Corvinas, Apaga Fogo, Marimbondão, Lapa da Candonga e Soberbo Velho. Já em 4 bens houve danos significativos: Antiga Bateria de Fornos e Carvão, Ruínas do Pé de Jaca, Fazenda Boa Vista do Outra Banda e Quintais de Barra Longa. E, por fim, 34 sítios arqueológicos sofreram interferências de menor amplitude. Entretanto, cabe ressaltar que o patrimônio arqueológico tem como característica sua natureza finita, portanto, não renovável, o que implica na gravidade dos danos ora relatados.

6.3.1 SOTERRAMENTO DE BEM ARQUEOLÓGICO

Corresponde à adição de rejeito e demais camadas de sedimento (solo/rejeito), rochas e entulho sobre um bem arqueológico, sejam esses bens vestígios esparsos, estruturas ou contextos de ocupação. Além disso, ações emergenciais e reparatórias também foram consideradas como origens desse tipo de dano, uma vez que ocorreram sem antes uma ampla apreciação de suas consequências, considerando que os bens representam, também, a essência cultural dessas populações.

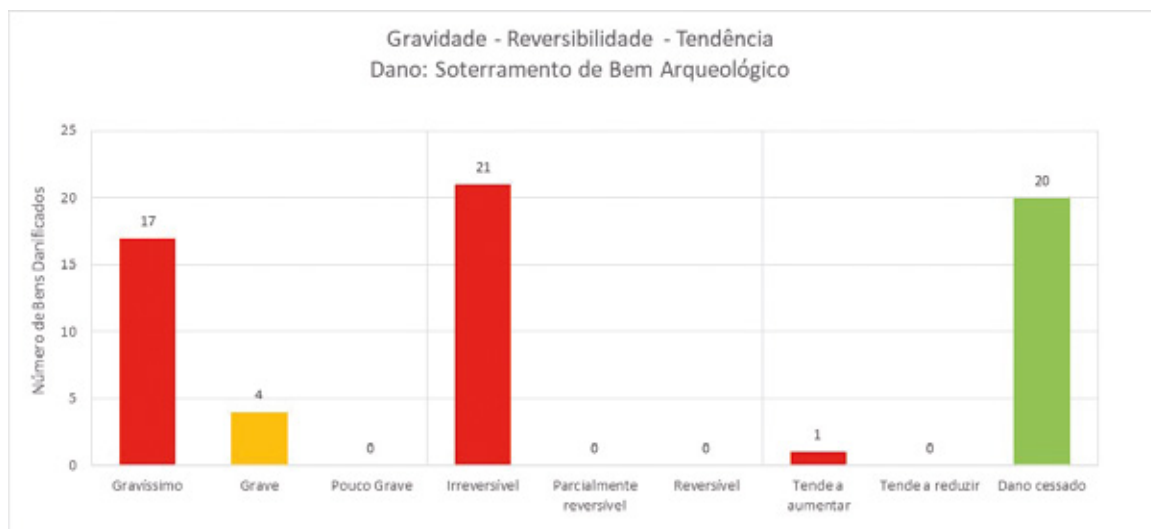
Um total de 21 bens sofreu este dano no C1, sendo 10% sítios pré-coloniais indígenas, 71% sítios históricos e 19% sítios multicomponenciais). As Figuras 177 e 178 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 177 – a) Unidade de Escavação em Bento Rodrigues, Mariana (MG): Solo original está abaixo da camada de rejeito; b) Marco de divisa em pedra, de propriedade soterrada em Bento Rodrigues, Mariana (MG).



Fonte: Lactec.

Figura 178 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Apesar de transcorridos mais de quatro anos do desastre, ainda é bastante nítido este tipo de dano nas áreas atingidas, principalmente, no C1. A ação mecânica da passagem da lama/rejeito, que causou soterramentos de bens arqueológicos, provocando danos mais intensos a um conjunto de remanescentes da cultura material que são únicos e insubstituíveis, pois são finitos e não renováveis, tendo em vista que o avanço e extravasamento da lama com rejeito para as margens do rio Doce¹⁰).

Este dano foi classificado na maior parte dos bens como gravíssimo (17 bens) ou grave (4 bens), bens esses concentrados no C1, tendo em vista que o percentual das áreas estimadas dos bens arqueológicos afetados foi maior que 50% (gravíssimo) ou maior que 25% (grave).

No que se refere à reversibilidade e tendência deste dano, ele é irreversível na sua totalidade (21 bens), com tendência de intensificação em 1 bem e de não evolução (dano cessado) para os demais 20.

A irreversibilidade está associada ao fato de que não é possível retomar por completo suas características pré-desastre, pois, uma vez soterrado, o contexto arqueológico tem suas características modificadas. Caso as medidas preventivas e reparatórias não sejam seguidas de maneira adequada¹¹, parte considerável dos bens arqueológicos alvo desse dano terão os efeitos do dano intensificados, isso porque os bens continuam soterrados, sofrendo ação do rejeito em seus contextos de deposição e características de seus componentes.

6.3.2 PERTURBAÇÃO DE CAMADAS SEDIMENTARES ASSOCIADAS AO BEM ARQUEOLÓGICO

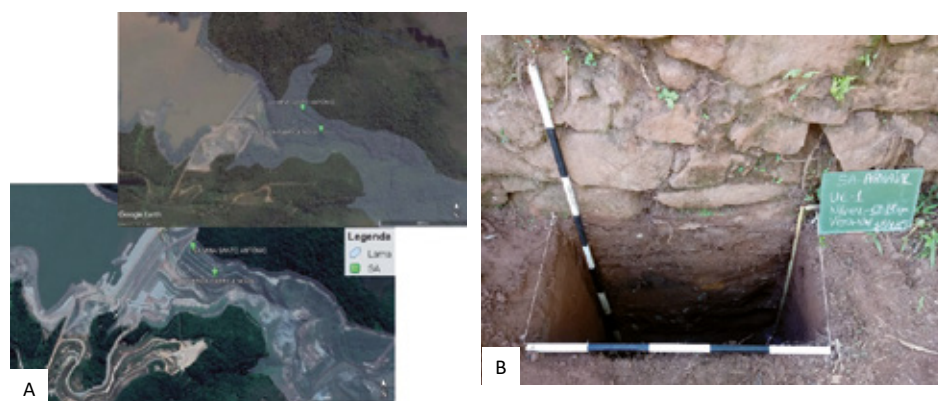
Este dano corresponde à inversão, supressão ou desestruturação das camadas sedimentares e arqueológicas pré-desastre. O dano também está relacionado à demolição, parcial ou total, de estruturas arqueológicas imóveis, notadamente edificações, partes de edificações, obras de arte ou suas partes.

¹⁰ Esses bens podem ser tanto referentes a naufrágios (depositados no fundo do rio como do mar) quanto a vestígios que acabaram dentro de cursos d'água em função dos processos erosivos das margens do rio Doce.

¹¹ Essencial que medidas sejam aplicadas corretamente, pois, caso contrário, mais danos podem ocorrer.

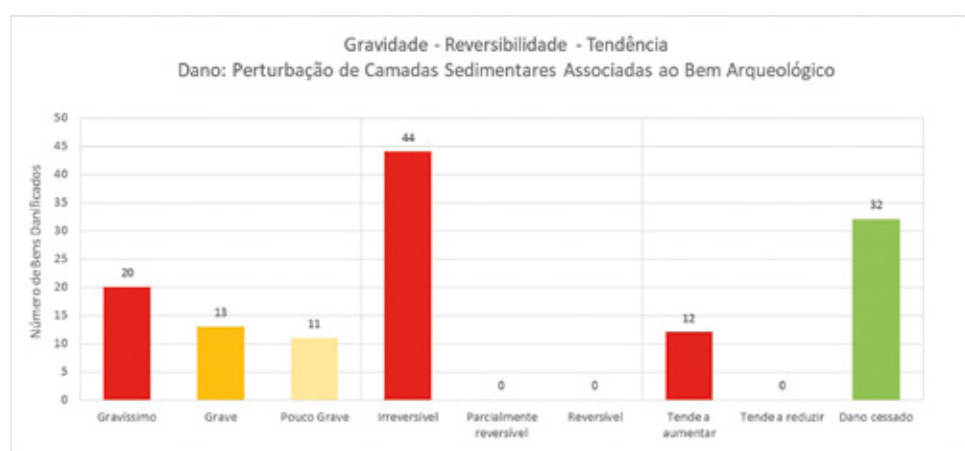
Um total de 44 bens sofreu este dano nos C1 e C2 e C3 sendo 25% sítios pré-coloniais indígenas, 50% sítios históricos e 25% sítios multicomponenciais. As Figuras 179 e 180 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 179 – a) Sítios arqueológicos danificados em Mariana, MG: Mina Santo Antônio e Fazenda Fábrica Nova; b) Unidade de Escavação aberta rente à estrutura de muro de pedra localizado na planície fluvial (neste caso, o rejeito alcançou uma marca de 1,3 m de profundidade).



Fonte: A) Imagens de satélite; B) Lactec.

Figura 180 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Idem ao dano de soterramento de bem arqueológico, mesmo após mais de quatro anos do desastre, o dano de perturbação de camadas sedimentares associadas a um bem arqueológico nas áreas atingidas ainda é significativamente perceptível, principalmente, no C1. A ação mecânica da onda de rejeitos, que causou erosões e revolvimento de camadas sedimentares, provocou danos mais intensos a um conjunto de remanescentes da cultura material que são únicos e insubstituíveis, pois são finitos e não renováveis.

De forma paralela, este dano também teve origem nas ações reparatórias, devido às correções de solos realizadas por uma parcela de proprietários de áreas que foram atingidas pela lama de rejeitos, na tentativa de retomar as práticas agrícolas, causando, invariavelmente, perturbação de camadas sedimentares, onde se encontram vestígios arqueológicos.

Para a maioria dos bens, este dano foi classificado como gravíssimo (20 bens), com ocorrências no C1 e C2, isto é, com 50% ou mais áreas dos bens arqueológicos afetados pelo rejeito. Sequencialmente, tem-se os graves no total de 13 bens (seis no C1, cinco no C2 e dois no C3), com um percentual da área do bem arqueológico afetada inferior à 25% e, por último, 11 casos poucos graves para este dano (dois no C1, seis no C2 e 3 no C3).

Este dano é irreversível para a totalidade dos 44 bens ora identificados, tendo em vista a natureza desses bens serem finitos, não renováveis e únicos, não sendo possível retomar por completo suas características pré-desastre. Foi detectada a tendência desse dano ser intensificado em 12 bens, devido ao fato de que ações emergenciais/reparatórias ainda estão acarretando, em alguns casos, a perturbação das camadas sedimentares superficiais que compõem registros arqueológicos.

6.3.3 MODIFICAÇÃO DA PAISAGEM DE IMPLANTAÇÃO DE BEM ARQUEOLÓGICO

Alteração da aparência geral e das feições específicas do lugar onde foi estabelecido o bem arqueológico e de seu entorno, ou seja, do espaço necessário para a apreciação do bem, com especial destaque para a apreciação visual do bem em questão. Um total de 46 bens sofreu esse dano nos C1, C2, C3 e C5, sendo 22% sítios pré-coloniais indígenas, 54% sítios históricos e 24% sítios multicomponentiais. As Figuras 181 e 182 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 181 – a) Terraço fluvial no sítio arqueológico Terra Prometida 1 (pós-desastre); b) Mina Santo Antônio (pós-desastre), Mariana (MG).

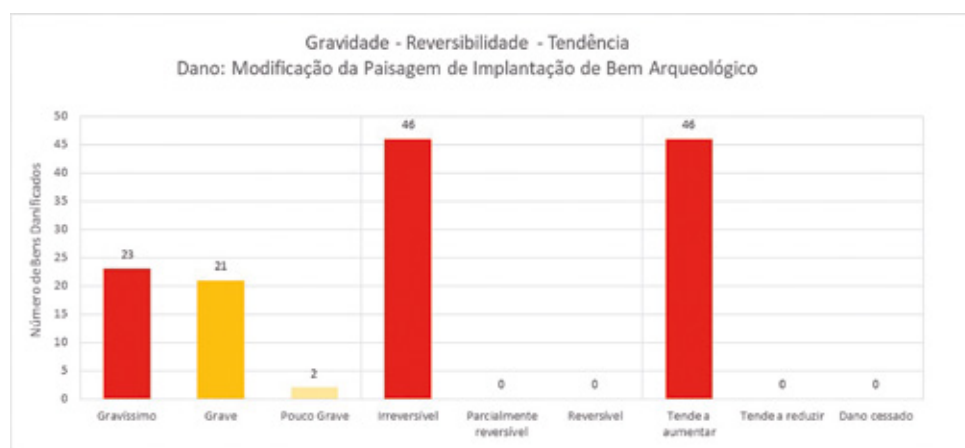


A



B

Fonte: Lactec.

Figura 182 – Classificações do Dano.

Fonte: Lactec.

Da mesma forma como ocorreu para os danos de soterramento de bem arqueológico e de perturbação de camadas sedimentares associadas a um bem arqueológico, após mais de quatro anos do desastre, o dano modificação da paisagem de implantação de bem arqueológico nas áreas atingidas ainda é bastante notável, principalmente, no C1.

Sob a mesma proporção, este dano foi classificado como gravíssimo e grave para 23 e 21 bens respectivamente, com ocorrências nos C1, C2 e C3, isto é, 23 bens com 50% ou mais de suas áreas de ambiência afetadas pelo rejeito (quinze no C1, cinco no C2 e três no C3) e 21 bens com menos de 25% de suas áreas de ambiência afetadas (sete no C1, nove no C2 e cinco no C3). Dois casos pouco graves foram evidenciados para este dano no C1.

Neste caso, esse dano tende sempre a se intensificar (46 bens), pois uma vez deflagrada a modificação da paisagem de inserção do bem, essa situação tende a resultar em uma maior invisibilidade do bem para especialistas e comunidades. Imbricada com esse processo está uma crescente dificuldade ou impossibilidade de apreciação visual do bem, para fins de estudo ou fruição. Ou seja, tal dano concorre para o esquecimento ou ampliação da invisibilidade de bens vulneráveis.

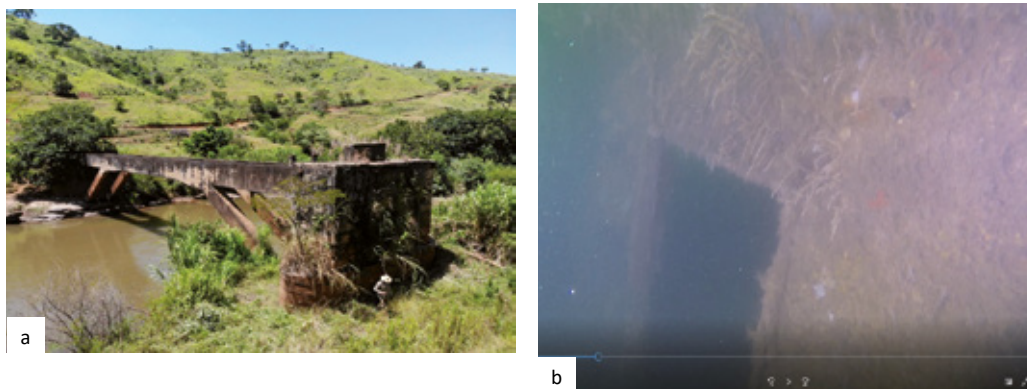
Da mesma forma, a irreversibilidade para os 46 bens foi identificada para este dano, não voltando por completo suas características pré-desastre.

6.3.4 ACELERAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE VESTÍGIOS ARQUEOLÓGICOS

Os vestígios arqueológicos, móveis ou imóveis, apresentam determinadas taxas de degradação de acordo com sua natureza, contexto de deposição e condições dadas pelo meio físico e biótico circundante. A premissa de dano é a de que o solo/rejeito/mistura, tanto solidificado nas planícies de inundação e nas encostas, quanto diluído na água dos reservatórios rios e oceano, em contato com as evidências arqueológicas, deflagrou a aceleração da deterioração do estado de conservação dos remanescentes arqueológicos.

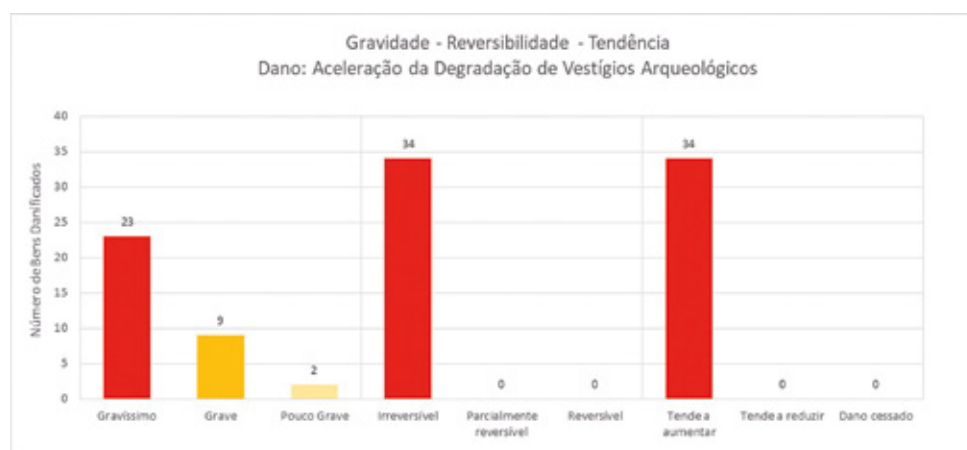
Um total de 34 bens sofreu esse dano nos C1, C2, C3 e C5, sendo 15% sítios pré-coloniais indígenas, 65% sítios históricos e 21% sítios multicomponenciais. As Figuras 183 e 184 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 183 – a) Estrutura da ponte que compõe o SA Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway com marcas de rejeito (visível nos pilares de sustentação da ponte) ; b) Imagem destacada de vídeo subaquático: Evidencia-se uma das portas do casario da embarcação no sítio arqueológico Naufrágio Comboios 1, em Linhares (ES) (oceano Atlântico).



Fonte: Lactec.

Figura 184 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

A presença no solo de elementos químicos adversos, seja pelo rejeito oriundo do desastre ou pela interação deste rejeito com substâncias químicas de tentativas de recuperações do solo, contribuíram com a contaminação e degradação de materiais arqueológicos presentes nessas áreas a curto, médio e longo prazos.

Além do solo, a água também é um meio que pode contribuir com aumento deste dano, pois a pluma de rejeitos que se espalhou pelo mar e que também se depositou em pontos do litoral pode alterar, a longo prazo, a camada superficial que envolve as embarcações naufragadas, causando, portanto, o dano de aceleração da degradação de vestígios arqueológicos, devido às interações físico-químicas que podem vir a ocorrer.

Um total de 23 bens teve o dano classificado como gravíssimo nos compartimentos analisados (treze no C1, dois no C2, um no C3 e sete no C5), tendo, portanto, acima e 66% da área do bem arqueológico afetado e/ou 100% submerso durante um ano. Seguido de 9 casos classificados como graves (sete no C1 e dois no C2), com uma parcela significativa (33% a 65%) das evidências arqueológicas expostas ao contato com solo/rejeito/mistura e, por último, 2 casos poucos graves¹² para este dano, com pequena amostra das evidências exposta ao contato com o solo/rejeito/mistura (um no C1 e um no C3).

Cabe destacar que para classificar esses bens nessas escalas de gravidade foi considerada, conforme mencionado na metodologia, a inserção desses bens nos diferentes compartimentos.

Tanto com relação à reversibilidade como à tendência, este dano foi considerado irreversível para todos os 34 bens e com tendência de evoluir, seguindo a lógica até então apontada: o dano impede o bem de retornar por completo as suas características pré-desastre, assim como o dano, uma vez deflagrado, tende a aumentar sob a ótica da arqueologia.

6.4 DANOS AO PATRIMÔNIO MATERIAL

Com relação ao patrimônio cultural material, os 171 bens atingidos estão quase em sua totalidade inseridos no C1 (apenas o bem paisagístico Lagoa Juparanã está localizado fora desse compartimento, em Linhares/ES, C3 e o Rio Doce, analisado sob a ótica de bem paisagístico no C1, mas que cuja relevância paisagística perpassa toda a sua extensão, abordada de forma mais aprofundada na categoria lugar dos bens imateriais). Nesse caso, utilizar diferentes lentes de análise, aproximando o olhar dos municípios e localidades constitui um exercício que elucida a gravidade dos danos a esse patrimônio. Por exemplo, em Mariana, 27% dos bens edificadas conhecidos sofreram danos, enquanto que em Barra Longa esse número chega a 66%. Em casos extremos, 100% dos bens culturais materiais de determinadas localidades foram danificados, como em Bento Rodrigues e Gesteira, sendo que em localidades como Camargos, Santa Rita Durão e sede de Barra Longa essa proporção oscila entre 60% e 90%.

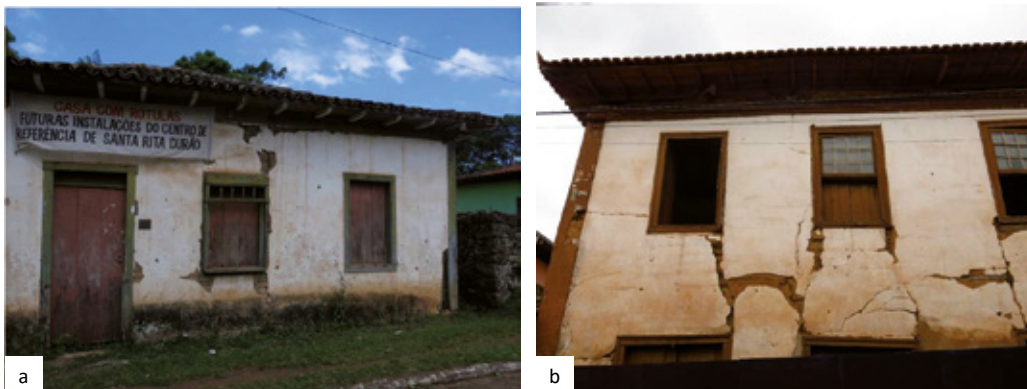
6.4.1 COMPROMETIMENTO DE ESTRUTURAS DE BENS CULTURAIS MATERIAIS

Este dano pode-se dar por dois processos: ou pela perda de elementos em bens culturais materiais (desde paredes, telhados, partes de objetos sacros até perda de vegetação existente pré-desastre). Ou ainda, pela alteração de suas características originais (que pode ser desde o surgimento de trincas e rachaduras até a implantação de equipamentos, canteiros de obras, plantas usadas para contenção de rejeitos etc.) ou em alguns casos também pela adição de elementos estranhos aos bens materiais.

Um total de 156 bens (94 edificadas, seis paisagísticos e 56 móveis e associados) sofreram este dano nos C1 e C3, sendo 60% bens edificadas, 36% bens móveis ou associados e 4% bens paisagísticos. A Figura 185 e Figura 186 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

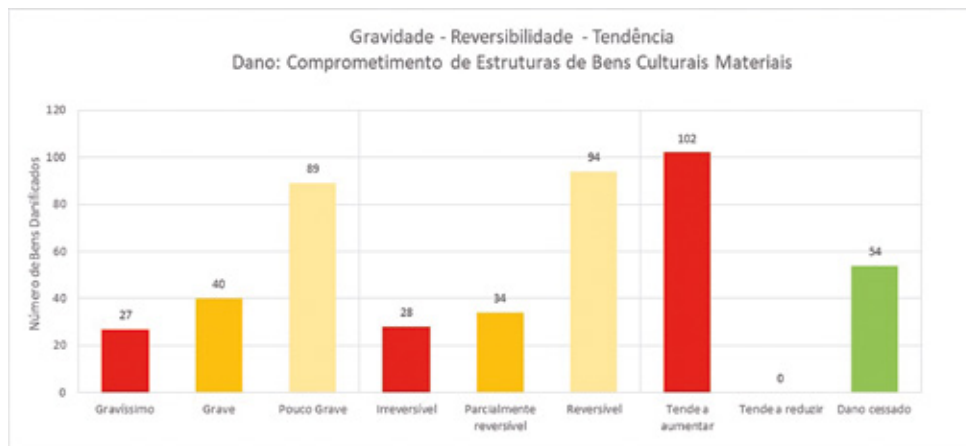
¹² Atualmente, pouco grave, mas que a médio e longo prazo o dano pode se intensificar e se tornar grave ou gravíssimo.

Figura 185 – a) Casa das Rótulas, Santa Rita Durão, Mariana (MG); b) Sobrado feito de taipa de pilão, Santa Rita Durão, Mariana (MG).



Fonte: Lactec.

Figura 186 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Identificou-se este dano por meio de evidências pós-desastre, tais como: trincas e rachaduras em edificações (devido às trepidações de maquinário pesado em grande fluxo nos antigos arraiais mineradores); acessos interrompidos às edificações; surgimento de fungos, bolores e outros agentes biológicos, alterando os aspectos visuais dos bens, bem como comprometendo suas estruturas; construção de estruturas (devido às ações emergenciais e reparatórias), como tapumes, toldos e canteiros de obras, comprometendo estruturas não só no entorno, como ao próprio bem, dado que essas ações muitas vezes não deram e continuam não dando o devido cuidado quanto à conservação do patrimônio histórico.

Cabe salientar que este dano se concentrou no C1. Em Mariana, por exemplo, 27% dos bens edificados conhecidos sofreram danos oriundos do desastre, enquanto que em Barra Longa esse número chega a 66%, tornando patente a sua amplitude em relação ao universo patrimonial desses municípios.

No C3 também foi evidenciado este dano na Lagoa Juparanã, em São Rafael, Linhares (ES), a qual foi severamente afetada tanto na sua dimensão paisagística como no lazer/turismo (praias de água doce), em decorrência do barramento¹³ do rio Pequeno junto à foz do rio Doce.

¹³ Feito para evitar que o rejeito adentrasse à Lagoa Juparanã. Porém, efeitos indesejáveis surgiram à população, fazendo com que praias e balneários fossem completamente inundados.

Em termos quantitativos de bens, para este dano a maioria deles (89) foram classificados como pouco graves, tendo em vista que por meio das análises da equipe de bens materiais diagnosticaram que 25% a 50% de elementos originais desses bens foram perdidos ou alterados. Em segunda posição, para 40 bens o referido dano foi considerado grave e, por último, 27 bens gravíssimos, como foi o caso das localidades como Bento Rodrigues e Gesteira, onde 100% dos bens edificadas, por exemplo, foram danificadas.

Quanto à reversibilidade deste dano, como para a maior parte dos bens o dano foi classificado como pouco grave e se aplicadas uma correta gestão desses bens, com ações de conservação, restauro e valorização, 94 bens foram considerados reversíveis e os demais parcialmente reversíveis (34 bens) e irreversíveis (28 bens), neste último, para aqueles casos que houve danificação total do bem.

De maneira geral, para patrimônio material, quando comparado ao patrimônio arqueológico e imaterial, destaca-se uma maior presença de bens com danos cessados, já que estão relacionados à ação mecânica da onda de rejeitos, como foi o caso do dano ora descrito que, para 54 bens os danos estão cessados. Em contrapartida, para 102 bens, tendem a se intensificar caso ações de recuperação não forem implementadas.

Ressalta-se ainda que, em termos numéricos, um número certamente ainda maior de bens móveis e associados, edificadas e paisagísticos devem ter sofrido este dano e que deveriam ter sido alvos já de trabalhos consorciados entre equipes de arqueologia e especialistas em bens materiais, mas que por razões diversas não foram ainda realizadas¹⁴ E ainda pelo fato desses bens estarem associados a processos complexos, o dano se estenderá ainda por muito tempo, certamente por anos, possivelmente por décadas.

6.4.2 DESENCADEAMENTO DE PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS QUE ACELEREM A DEGRADAÇÃO DOS BENS CULTURAIS MATERIAIS

Esse dano consiste no surgimento/evolução das patologias desencadeadas a partir de interações físico-químicas. Tais efeitos, são potencialmente danosos, dado seu caráter cumulativo. Ainda que atue em uma ampla gama de bens materiais imóveis e móveis, esse dano foi computado apenas nos bens móveis da Igreja de Nossa Senhora das Mercês, uma vez que entende-se que o dano Comprometimento das estruturas de bens culturais materiais, computado para os demais bens, já considera as interações físico-químicas e a correspondente aceleração da degradação dos bens. Cabe ressaltar que a Igreja Nossa Senhora das Mercês, não foi atingida pela lama, entretanto, as demais edificações religiosas cujos bens móveis foram encaminhados à Reserva Técnica da Fundação Renova o foram. Dessa forma, um total de 15 bens sofreram este dano no C1, tratando-se de bens móveis ou associados da Igreja de Nossa Senhora das Mercês. Sob o contexto amostral considerado, esse dano foi medido como pouco grave nesses bens, tendo em vista que a análise da equipe de bens materiais diagnosticou que 30% de elementos originais desses bens foram perdidos ou alterados. As Figuras 187 e 188 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

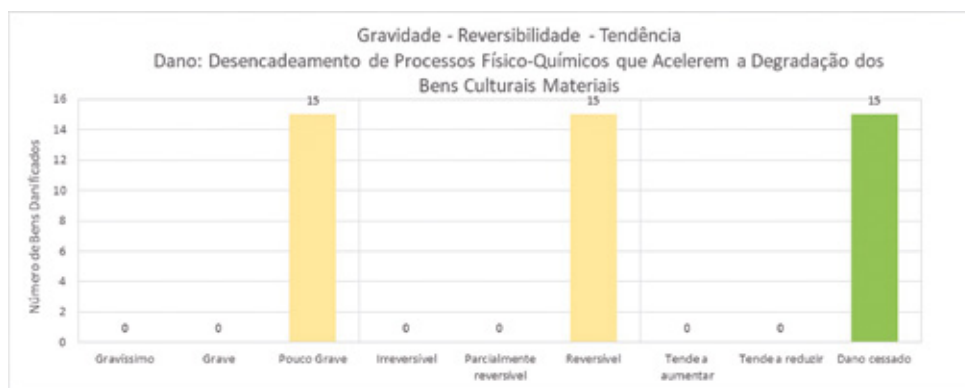
¹⁴ Competindo a diversos outros atores. Por exemplo, fragmentos de objetos inseridos na Reserva Técnica da Fundação Renova que ainda não foram alvo de análises pela Fundação.

Figura 187 – a) Imagem de Roca de Nossa Senhora das Mercês. Vista frontal. Data: 10/2017. Fonte: Estilo Nacional (2017c). ; b) Imagem sacra não identificada. Vista frontal. Data:10/2016.



Fonte: Estilo Nacional (2017c).

Figura 188 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

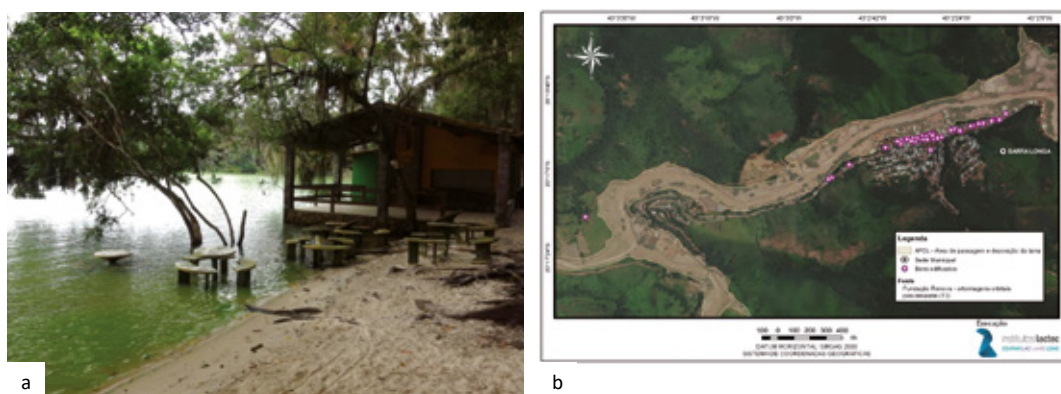
Este dano foi ainda considerado reversível, sob o ponto de vista ter sido classificado como pouco grave para a totalidade de bens ora considerados e com a aplicação de uma correta gestão desses bens, com ações de conservação, restauro e valorização e, sobretudo, com o retorno dos bens para as comunidades envolvidas, ter-se-á revertido o quadro do dano. Quanto à tendência de evolução, este dano está cessado, uma vez que considerou-se que o contexto atual da Reserva Técnica da Fundação Renova possibilitou a estabilização do dano.

6.4.3 MODIFICAÇÃO DA PAISAGEM OU CONTEXTO DE IMPLANTAÇÃO DE BENS CULTURAIS MATERIAIS

Os bens culturais, de modo geral, dependem também de seus contextos de implantação, sejam paisagísticos ou arquitetônicos. Ainda que uma determinada construção estivesse absolutamente intacta, o fato de todo seu entorno ter sido alterado (ou desaparecido/destruído) constitui um dano ao bem cultural. Perde-se parte de suas capacidades comunicativas, significativas, simbólicas, entre outras.

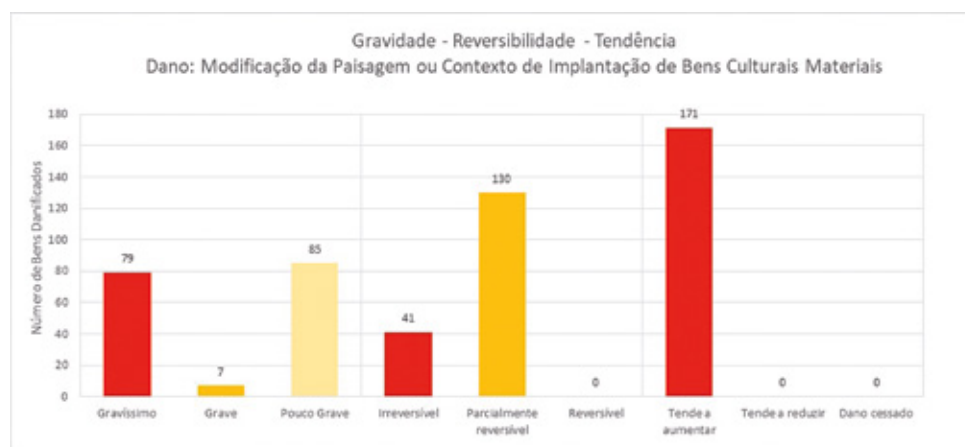
Um total de 171 bens sofreu esse dano nos C1 e C3, ou seja, todos os bens materiais que compõe a amostra analisada sofreram esse dano. As Figuras 189 e 190 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 189 – a) Vista do balneário inundado na Lagoa de Juparanã, Linhares (ES); b) Bens materiais edificados que sofreram danos no Conjunto Barra Longa/ Sede sobre ortoimagens orbitais pós-desastre (T2), Barra Longa (MG).



Fonte e Fonte: Lactec.

Figura 190 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Destarte, este dano foi observado em todos os bens alvo de danos culturais materiais (C1: Mariana (MG), Barra Longa (MG), Rio Doce (MG), Santa Cruz do Escalvado (MG) e Ponte Nova (MG) e C3: Linhares (ES)), com maior quantitativo de bens edificados (94 bens), na sequência de móveis e associados (71 bens) e, por último, paisagísticos (seis bens).

A paisagem envoltória, no caso de grandes estruturas e edificações (ou monumentos, elementos urbanísticos), é o seu grande “contexto”. Para os objetos e bens associados, o elemento circundante, ou de suporte, é seu lugar de origem, normalmente, uma edificação (mas não somente). Um exemplo claro é a manutenção de um santo padroeiro quando toda sua igreja/capela original foi retirada ou alterada. Logo, a modificação da paisagem é um dano que está intimamente relacionado ao conceito de bem paisagístico.

No que se refere aos bens paisagísticos que sofreram este dano foram todos aqueles considerados no diagnóstico como um todo, sendo eles: Rio Doce, Estrada Real, Lagoa Juparanã, Caminho de São José, Encontro dos rios Piranga e do Carmo e Lago da UHE Risoleta Neves/Candonga.

Assim como foi para os outros danos materiais elencados até aqui, para o dano modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais, a maior parcela de bens foi de pouco graves (85 bens), já que as análises da equipe de bens materiais diagnosticaram que 25% a 50% de elementos originais desses bens foram perdidos ou alterados. Em segundo lugar, são os gravíssimos (superior a 75% dos elementos originais perdidos ou alterados) com 79 bens e, por último, os graves (50% a 75% dos elementos originais perdidos ou alterados) com sete bens.

Como os danos à maior parte dos bens foram pouco graves e se aplicadas uma correta gestão desses bens, com ações de conservação, restauro e valorização, 130 bens foram considerados parcialmente reversíveis e os demais irreversíveis (41 bens), neste último, para aqueles casos que houve danificação total do bem e/ou de seu entorno.

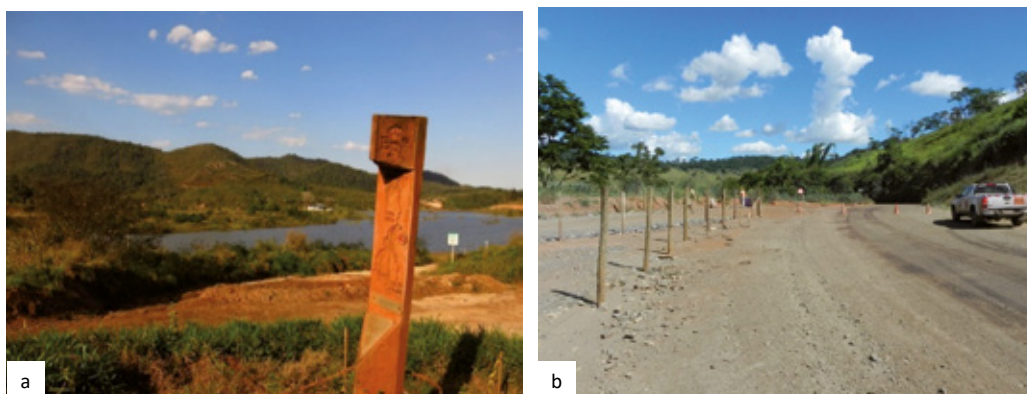
De maneira geral, para patrimônio material, quando comparado ao patrimônio arqueológico e imaterial, destaca-se uma maior presença de bens com danos cessados, já que estão relacionados à ação mecânica da onda de rejeitos, entretanto, neste caso, o dano na sua totalidade foi considerado com tendência de intensificação se ações de recuperação, não forem implementadas, assim como pelo fato desses bens estarem associados a outros processos, o dano poderá se estender e ainda aumentar ao longo do tempo.

6.4.4 ALTERAÇÃO DE PARTES OU SETORES DE ROTAS E CAMINHOS HISTÓRICOS E/OU TRADICIONAIS

A diferença entre essa classificação e as anteriores se dá por se tratar de uma alteração/perda de elementos constitutivos de grandes estruturas e infraestruturas que interligam diversas ocupações humanas (povoados, fazendas, sítios, cidades) e demais bens culturais, fazendo parte da experiência, do entendimento e da fruição dos mesmos. Essas alterações/perdas podem implicar em danos aos bens culturais, sendo que em alguns casos as próprias rotas são um bem cultural (como são, neste caso, a Estrada Real e o Caminho de São José).

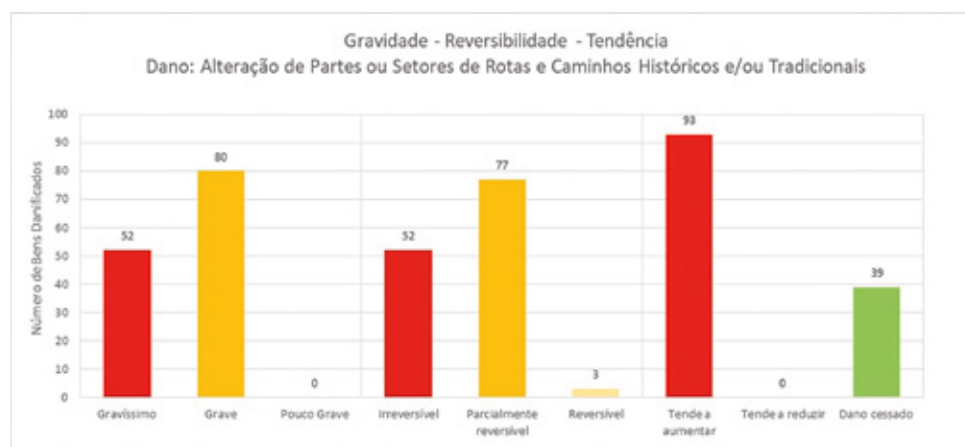
Um total de 132 bens sofreram este dano no C1, sendo 67% bens edificados, 31% bens móveis ou associados e 2% bens paisagísticos. As Figuras 191 e 192 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 191 – a) Trecho da Estrada Real, em Bento Rodrigues, Mariana (MG); b) Interrupção no caminho de São José, entre Barra Longa, MG e Santa Cruz do Escalvado (MG).



Fonte: Lactec.

Figura 192 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Este dano foi evidenciado apenas no C1, com maior representatividade de bens edificados (88 bens), na sequência de móveis e associados (41) e, por último, paisagísticos (três).

Diferentemente do que ocorreu para os outros danos materiais descritos até aqui, o dano alteração de partes ou setores de rotas e caminhos históricos e/ou tradicionais obteve como maior parcela de bens graves (80 bens), já que as análises da equipe de bens materiais diagnosticaram que 50% a 75% de elementos originais desses bens foram perdidos ou alterados. Na sequência vieram os gravíssimos (superior a 75% dos elementos originais perdidos ou alterados) com 52 bens e, por último, nenhum pouco grave.

Sob a mesma proporção que a gravidade, a reversibilidade contou com 77 bens parcialmente reversíveis, 52 irreversíveis e três reversíveis. Conforme já elencado para outros danos materiais, se aplicadas uma correta gestão desses bens, com ações de conservação, restauro e valorização, reverter o dano, nem que de maneira parcial, pode ser viável.

Quanto à tendência de evolução deste dano, destaca-se uma maior presença de bens com dano tendendo a se intensificar (93 bens), caso ações de recuperação, aplicadas de maneira correta, não forem implementadas, assim como pelo fato desses bens estarem associados a outros processos, o dano poderá se estender e ainda aumentar ao longo do tempo. Em contrapartida, há um expressivo quantitativo de bens com este dano cessado (39 bens), pois estão relacionados à ação mecânica da onda de rejeitos.

6.4.5 INTERRUPTÃO OU CESSÃO DO ACESSO E/OU USO DOS BENS CULTURAIS MATERIAIS

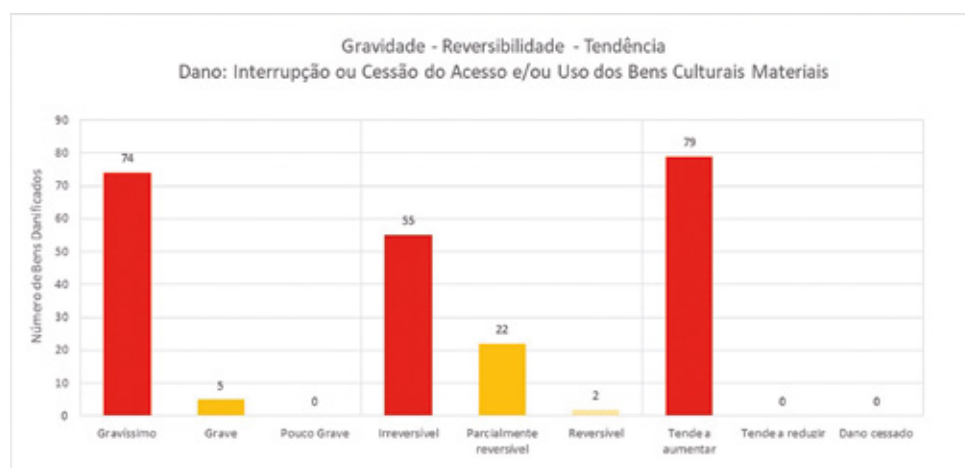
Há, ainda, outra possibilidade a ser contemplada: um bem cultural específico está intacto, porém, por inúmeras razões, o acesso a ele pela sociedade foi interrompido ou cessado. Isso pode se dar, pois uma área teve de ser isolada, por obras em andamento, restauros, pela prevenção a outros danos (furtos, contaminações, depredações). Ainda que essa interrupção ou cessão de acesso tenha sido promovida ou motivada por medidas necessárias (cautelares, emergenciais), o fato é que se promoveu um dano.

Um total de 79 bens sofreram este dano nos C1 e C3, sendo 76% bens móveis ou associados, 16% bens edificados e 8% bens paisagísticos. As Figuras 193 e 194 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 193 – a) Hotel Xavier, em Barra Longa, MG; b) Capela de Nossa Senhora das Mercês, Bento Rodrigues, Mariana (MG).



Fonte: Lactec.

Figura 194 – Classificações do Dano.

Fonte: Lactec.

A retirada de objetos da Igreja de Nossa Senhora das Mercês, em Bento Rodrigues, é caso claro que reporta este dano. Tal retirada foi extremamente necessária para se prevenir contra furtos ou também de danos decorrentes do desastre (o qual já havia destruído a Capela de São Bento, templo coirmão na localidade). Entretanto, desde então, a comunidade se viu privada do acesso, do uso, da fruição, da interação com as dimensões materiais e simbólicas desses bens culturais, portanto, gerando este dano às comunidades e à sociedade em geral.

De forma similar, o Caminho de São José também sofreu este dano: parte dele, que está localizado nas proximidades da UHE Risoleta Neves, é constantemente interrompido para que máquinas e caminhões pesados trafeguem, com o objetivo de construir novas estruturas dedicadas à contenção, retirada e tratamento dos rejeitos oriundos da Barragem de Fundão. Logo, de forma frequente, é impossível fazer o Caminho de São José a pé ou de transporte lento (bicicletas, cavalos).

Para este dano, de forma oposta aos demais até aqui mencionados, houve maior quantitativo de bens móveis e associados (60 bens), na sequência edificados (13) e, por último, paisagísticos (seis), justamente pelo fato de diversas igrejas atingidas pelo desastre terem tido peças recolhidas contra furtos; acessos interrompidos para as comunidades, devido a algum tipo de reparação; entre outras situações.

Dentre todos os danos materiais ora descritos, o dano interrupção ou cessão do acesso e/ou uso dos bens culturais materiais foi o que apresentou o maior quantitativo de bens classificados como gravíssimos (74 bens), tendo em vista que o tempo de interrupção ou cessão do acesso/uso de bens materiais é considerado maior que cinco anos¹⁵. Por último, os graves (cinco bens) com um tempo de interrupção ou cessão de acesso pós-desastre entre um e cinco anos.

Cabe salientar ainda que a cessão de acesso a bens culturais configura um dos danos mais severos causados pelo desastre. Portanto, viabilizar o contato das populações com os objetos, na medida do possível, é uma das ações mais importantes para atenuar este dano.

¹⁵ Para este dano, o indicador é o tempo. Tempo pelo qual as comunidades foram impedidas de acessar ou usar os bens materiais. No caso de gravíssimo, destaca-se que não há uma previsão de retorno do acesso/uso de bens materiais, podendo se estender indefinidamente no tempo (maior que 5 anos). Como são os casos da Capela de São Bento (bem totalmente destruído pelo desastre e sem definição e/ou viabilidade quanto a sua reconstrução ou recuperação); do uso das casas de arquitetura tradicional de Bento Rodrigues; e do acesso à Estrada Real no trecho entre Camargos e Santa Rita Durão.

No que se refere à reversibilidade, este dano contou de forma expressiva com bens irreversíveis (55), 22 parcialmente reversíveis e dois reversíveis. A predominância dos irreversíveis está muito associada aos vários bens que sofreram este dano apontarem para um futuro ainda bastante indefinido, imensurável e não recuperável em até cinco anos e, provavelmente, não serem jamais cessados, mesmo com aplicação de medidas adequadas de recuperação, conservação, restauro e valorização. Diante disso, a tendência deste dano também se mostrou em elevação para todos os bens (79), sem exceção.

6.5 DANOS AO PATRIMÔNIO IMATERIAL

Os 59 bens imateriais danificados, presentes em todos compartimentos, estão relacionados a modos de vida, práticas e sociabilidades específicas, o que aponta a ressonância do desastre na desarticulação das comunidades atingidas. Da mesma forma, diferentes olhares auxiliam na compreensão desse fenômeno, em localidades como a sede de Rio Doce, de Santa Cruz do Escalvado e Camargos, 100% dos bens imateriais foram afetados, enquanto essa porcentagem chegou a 70% e 67% em Bento Rodrigues e Paracatu, respectivamente. Por sua vez, 50% do patrimônio imaterial reconhecido para o município de Rio Doce foi atingido, enquanto 22% do patrimônio imaterial de Mariana foi alvo de danos. Ademais, por vezes, o fato de apenas um bem ter sido afetado em uma localidade, seja ele um campo de futebol, uma 'prainha', um lugar de culto ou um festejo, já resulta em uma perda significativa para a comunidade envolvida, assim como em sofrimento social.

6.5.1 ALTERAÇÃO DE PRÁTICAS CULTURAIS

Dano que congrega a alteração ou a supressão de espaços, a alteração ou o rompimento das redes de colaboração e transmissão de saberes e, por fim, a dificuldade ou supressão do acesso aos instrumentos, objetos ou matérias-primas. Esse dano foi indicado quando as narrativas relacionam os itens apontados, sem destacar algum em especial e/ou quando as narrativas enfatizam a questão da alteração e/ou suspensão da prática em si.

Um total de 35 bens sofreram este dano nos C1, C2 e C3, sendo 37,1% celebrações, 28,6% formas de expressão, 28,6% lugares e 5,7% ofícios, saberes e modos de fazer. As Figuras 195 e 196 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações dele sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 195 – a) Dona Iranir, doceira, relatou as dificuldades de manutenção de seu ofício, após a queda de frequentadores da praia do Jaó, sua principal clientela, em Tumiritinga (MG); b) Memória de família indo para uma das ilhas do rio Doce, Ilha Brava, Governador Valadares (MG).



Fonte: A) Lactec; B) Foto cedida pela atingida Joelma.

Figura 196 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Primeiramente, é importante ressaltar que, na ótica de bens imateriais, todos os compartimentos e localidades estão associados ao Bem Rio Doce. Diante disso, diversas celebrações, festividades, encontros religiosos, atividades esportivas/lazer e demais atividades tradicionais (tais como: faiscação e pesca) foram afetadas pela onda de rejeitos, causando alterações das práticas culturais, tendo em vista à contaminação da água, diminuição e/ou remoção de pessoas circulando nas áreas atingidas, dificuldades de acesso, aumento das distâncias e a quebra dos laços existentes até o desastre nos locais onde tais práticas eram realizadas de maneira mais frequente.

Este dano ocorreu em 13 celebrações¹⁶, 10 formas de expressão¹⁷, 10 lugares¹⁸ e dois ofícios¹⁹, saberes e modos de fazer²⁰.

Desta forma, este dano foi considerado na sua maior parcela gravíssimo (18 bens), isto é, com mais de 96% das narrativas indicando interrupção das práticas culturais. Graves para 10 bens (51%

¹⁶ Para este dano, as celebrações foram consideradas festas típicas (junina, carnaval) e religiosas (padroeiros e santos locais).

¹⁷ Para este dano, as formas de expressão foram consideradas as cavalgadas, bandas, corais de cantos.

¹⁸ Para este dano, os lugares foram considerados o próprio Rio Doce e balneários.

¹⁹ Para este dano, os ofícios, saberes e modos de fazer foram considerados a produção de doces/chuck e faiscação e pesca.

²⁰ Essa categorização em quatro conjuntos, segue o Decreto nº 3.551, de 04 de agosto de 2000 do IPHAN, a saber: **Celebrações**: rituais e festas que marcam a vivência coletiva do trabalho, da religiosidade, do entretenimento e de outras práticas da vida social; **Formas de Expressão**: manifestações literárias, musicais, plásticas, cênicas e lúdicas; **Lugares**: mercados, feiras, santuários, praças e demais espaços onde se concentram e se reproduzem práticas culturais coletivas; **Ofícios, Saberes e Modos de Fazer**: conhecimentos e modos de fazer enraizados no cotidiano das comunidades.

a 95% das narrativas indicando diminuição de práticas) e pouco graves para sete bens (1% a 50% das narrativas indicando diminuição de práticas).

De forma geral, a reversibilidade de danos no âmbito de bens imateriais é maior se comparada a outros tipos de patrimônio cultural, como é o caso do dano de alteração de práticas culturais onde para 30 bens são parcialmente reversíveis e para outros cinco bens são reversíveis, dependendo de medidas que garantam os espaços, matérias-primas, implementos, coletivos e indivíduos necessários à produção e reprodução desses bens imateriais.

Quanto à tendência deste dano, há um predomínio de redução em todos os compartimentos onde houve este dano (18 bens). Para 13 bens este dano tende a aumentar e para quatro bens estão cessados. Importante destacar que, por exemplo, o fato de que o rio Doce tende a se recuperar com o passar do tempo, reduzindo o dano aos bens imateriais que estão associados ao uso desse curso d'água, não afasta a gravidade do dano, pois essa redução se dará ainda a longo prazo.

6.5.2 ALTERAÇÃO DA REDE DE RELAÇÕES COMUNITÁRIAS

Alteração ou rompimento de redes de convívio, transmissão de saberes e solidariedade entre indivíduos e coletivos detentores dos saberes relacionados aos bens culturais.

Um total de 36 bens sofreram este dano nos C1, C2 e C3, sendo 44,5% celebrações, 33,3% lugares e 22,2% formas de expressão. As Figuras 197 e 198 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 197 – a) Barraca “Coxinha da Sandra”, na Feira do Produtor Rural, Sede, Mariana (MG), para onde foi deslocada após o desastre (registro de 18/08/2018); b) Casa de Oxum, dona das águas doces, em terreiro localizado em Barbados, Colatina (ES): Identificados relatos de ofensa à entidade pelos rejeitos, interrupção temporária de atividades no terreiro por falta d'água e diminuição de rituais realizados no rio Doce.



Fonte: Lactec.

Figura 198 – Classificações do Dano.

Fonte: Lactec.

Grande parte da população que teve todos seus pertences, casas, roças e pomares destruídos pela onda de rejeitos e tiveram que sair das áreas atingidas, perderam também importantes espaços de encontro e sociabilidade como: igrejas, praças, bares e outros equipamentos de uso coletivo. Essas rupturas, além de terem ocorrido entre os moradores da própria localidade atingida, ocorreu também nas relações desses habitantes com moradores de localidades próximas (e vice-versa), que eram bastante rotineiras.

Além disso, importantes festas/celebrações bastante comuns às comunidades atingidas também foram interrompidas ou ainda bastante prejudicadas pós-desastre.

Este dano ocorreu em 16 celebrações²¹, oito formas de expressão²² e 12 lugares²³, sendo considerado na sua maior parte gravíssimo (21 bens), ou seja, com mais de 96% das narrativas computadas pela equipe de antropologia indicando interrupção das redes. Graves para 10 bens (51% a 95% das narrativas indicando diminuição das redes) e pouco graves para cinco bens (1% a 50% das narrativas indicando diminuição das redes).

De forma equivalente ao dano de alteração de práticas culturais, para o dano de alteração da rede de relações comunitárias o maior quantitativo também foi de bens parcialmente reversíveis (35) e um bem reversível, dependendo de medidas que garantam os espaços, matérias-primas, implementos, coletivos e indivíduos necessários à produção e reprodução desses bens imateriais.

No que se refere à tendência deste dano, a evolução predomina em todos os compartimentos, onde houve este dano (35 bens), caso as medidas necessárias para a gestão dos danos não sejam adotadas de forma adequada ou que simplesmente não sejam adotadas. Para um bem este dano cessou.

6.5.3 SOFRIMENTO SOCIAL

Ocasionalmente pela alteração e/ou rompimento de relações de reciprocidade, pelo desânimo e descrédito advindos da insatisfação com as ações deflagradas pela Fundação Renova, da desconfiança acerca do uso do rio Doce e da água e do preconceito vivenciado pelos atingidos, como pessoas marcadas pelo desastre.

21 Para este dano, as celebrações foram consideradas festas típicas (junina, carnaval) e religiosas (padroeiros e santos locais).

22 Para este dano, as formas de expressão foram consideradas as cavalgadas, bandas, corais de cantos.

23 Para este dano, os lugares foram considerados o próprio Rio Doce, balneários, campos de futebol, cachoeiras, bares/restaurantes, estradas e distritos.

Um total de nove bens sofreram este dano nos C1, C2 e C3, sendo 33,3% formas de expressão, 33,3% lugares, 22,2% celebrações e 11,2% ofícios, saberes e modos de fazer. As Figuras 199 e 200 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deles sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 199 – a) Memória da Folia de Reis de Povoação, Linhares (ES) (registro de Claudionor Soares); b) Foto de cartaz de apresentação da Banda de Congo São Benedito do Rosário de Vila do Riacho, Aracruz (ES).



Fonte: Imagens cedidas por atingidos.

Figura 200 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Os municípios evidenciados com este dano foram Rio Doce (MG) e Mariana (MG) no C1, Resplendor e Colatina no C2 e Aracruz (ES) e Linhares (ES) no C3. Os bens danificados foram duas celebrações no C3 (folia de Reis em Povoação e festas religiosas de padroeiros e santos locais em Degredo), três formas de expressão no C3 (congada e bandas de congo), três lugares (Rio Doce no C2 e C3 e Bento Rodrigues no C1) e um ofício, saber e modo de fazer no C1 (faiscagem e pesca).

Muitos dos relatos afirmam um “adormecimento” das festas e das formas de expressão, desde a ocorrência do desastre, devido ao prejuízo financeiro das comunidades, desânimo, entre outras causas que levaram à diminuição ou até mesmo a não mais realização de determinada festa e/ou forma de expressão.

Quanto aos lugares e ofício, saber e modo de fazer está bastante atrelado ao sentimento da “perda do rio”, com evidências de transtornos psicológicos numa parcela da população atingida, a qual tem sido pouco assistida nos processos de reparação e no atendimento de demandas.

Dentre o total de bens considerados para este dano, sete deles foram considerados gravíssimos, isto é, com uma probabilidade de ocorrência em pelo menos 20% da população amostrada. Os demais (dois bens) foram graves, quando a probabilidade de ocorrência foi em pelo menos 10% da população amostrada.

O quantitativo de bens irreversíveis (nove) para o dano em questão foi o mais expressivo. A reversibilidade também neste caso depende de medidas que garantam os espaços, matérias-primas, implementos, coletivos e indivíduos necessários à produção e reprodução desses bens imateriais.

Para nenhum bem este dano cessou. Muito pelo contrário, a tendência é de aumentar para todos os bens ora considerados, caso as medidas necessárias para a gestão dos danos não sejam adotadas de forma adequada ou que simplesmente não sejam adotadas.

6.5.4 ALTERAÇÃO DE ESPAÇOS RELACIONADOS A PRÁTICAS CULTURAIS

Trata-se de um dano relacionado à alteração ou supressão de espaços onde as práticas culturais ocorrem ou ocorriam.

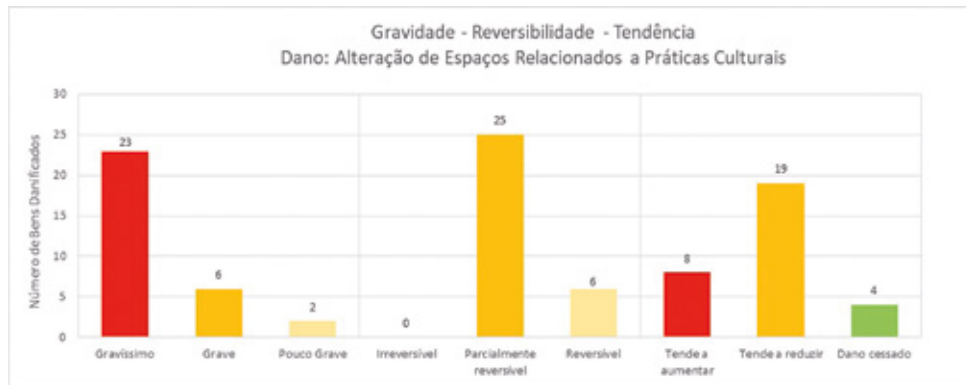
Um total de 31 bens sofreram este dano nos C1, C2 e C3, sendo 83,9% lugares, 9,7% celebrações e 6,4% formas de expressão. As Figuras 201 e 202 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 201 – a) Festa Nossa Senhora das Mercês (2018), Bento Rodrigues, Mariana (MG); b) Bote de uso da família de Marizete, moradora de Biboca, São José do Goiabal (MG), inutilizado pós-desastre (registro de 22/09/2018).



Fonte: Lactec.

Figura 202 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Vários relatos mencionam a ocorrência deste dano, tendo em vista as mais diversas transformações, causadas pelo desastre, em cenários em que ocorriam diversas celebrações e formas de expressão. De forma paralela, com relação à qualidade da água do rio Doce e do mar, este dano também foi perceptível, pelo receio muitas vezes mencionado pela população atingida que alterou e, por vezes, interrompeu importantes práticas comerciais e de lazer até então realizadas tanto no rio Doce como na faixa litorânea (como banhos, pesca, surfe, esportes náuticos), o que prejudicou e ainda prejudica também o turismo na região.

Em termos quantitativos, este dano foi sofrido por três celebrações (festas religiosas), duas formas de expressão (ensaio musical e cavalgada) e 26 lugares (como campos de futebol, conjuntos paisagísticos, rio Doce, clube, lagoas, praias, balneários, entre outros).

Para 23 bens o dano foi gravíssimo, tendo em vista que em mais de 96% dos espaços relacionados a práticas culturais foram suprimidos. Outros seis bens foram graves (51% a 95% dos espaços desconfigurados) e dois bens pouco graves (1% a 50% dos espaços desconfigurados).

Quanto à reversibilidade, o quantitativo de bens parcialmente reversíveis (25) foi o mais significativo para este dano. Na sequência, os reversíveis (seis bens).

A tendência deste dano é reduzir para a maior parcela de bens (19 bens), para outros oito, tende a evoluir e para outros quatro, o dano está cessado.

Cabe ressaltar que para todos os bens ora considerados, tanto a reversibilidade como a tendência do dano estão vinculados às medidas reparatórias, devendo ser adotadas de forma adequada e ainda, sendo preciso, para isso, uma mudança de rota no âmbito das ações em andamento por parte da Fundação Renova.

6.5.5 ALTERAÇÃO DE ESPAÇOS DE REFERÊNCIA DE MEMÓRIA

Ênfase nas memórias do uso e fruição de determinado espaço, na historicidade dos processos socioculturais de uso de espaços partilhados por diferentes gerações, abruptamente afetados pelo desastre.

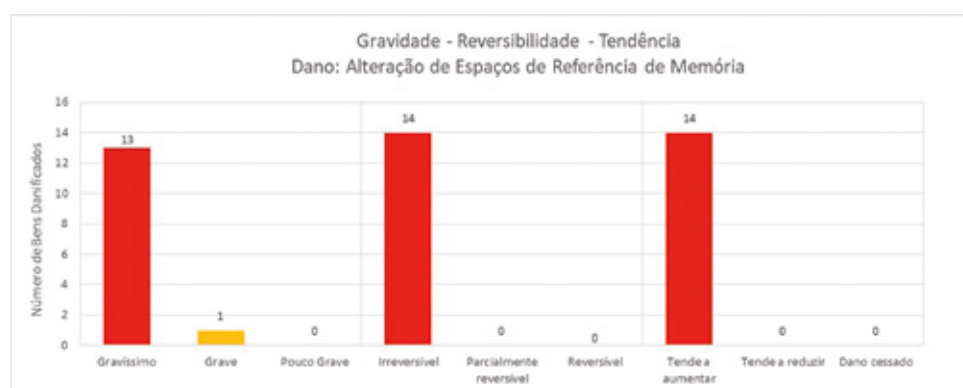
Um total de 14 bens sofreram este dano nos C1, C2 e C3, sendo 92,9% lugares e 7,1% celebrações. As Figuras 203 e 204 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 203 – a) Recorte de jornal: Fotografia de quintal de Bento Rodrigues, Mariana (MG); a) Morador de Revés do Belém exhibe foto de pescaria (memória) no rio Doce pré-desastre (registro de 23/09/2018), Revés do Belém, Bom Jesus do Galho (MG).



Fonte: a) (Paracatu, 2018, n. 26, p. 6; b) Lactec.

Figura 204 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Espaços de referência de memória resumem-se basicamente em práticas comunitárias, recreativas e de lazer que foram e/ou são utilizadas por gerações. Isso explicita a importância desses lugares nas memórias das pessoas sejam elas coletivas e/ou familiares e a capacidade que esses lugares apresentam ao ocasionar lembranças e afetos.

Este dano foi evidenciado em uma celebração (festa padroeiro/santo local) e 13 lugares (campos de futebol, distrito, conjuntos paisagísticos, rio Doce, prainha, cachoeira, bar/restaurante, Caminho de São José, conjunto de bens associados à UHE Candonga).

Assim como ocorreu para todos os danos a bens imateriais mencionados até aqui, o dano alteração de espaços de referência de memória também apresentou o seu maior quantitativo de bens considerados gravíssimos (13 bens), com supressão de espaços de referência de memória acima de 96% e um bem grave, com desconfiguração dos espaços em 51% a 95%.

Para este dano, tanto a reversibilidade como a tendência foram únicas para todos bens (irreversível e tende a aumentar).

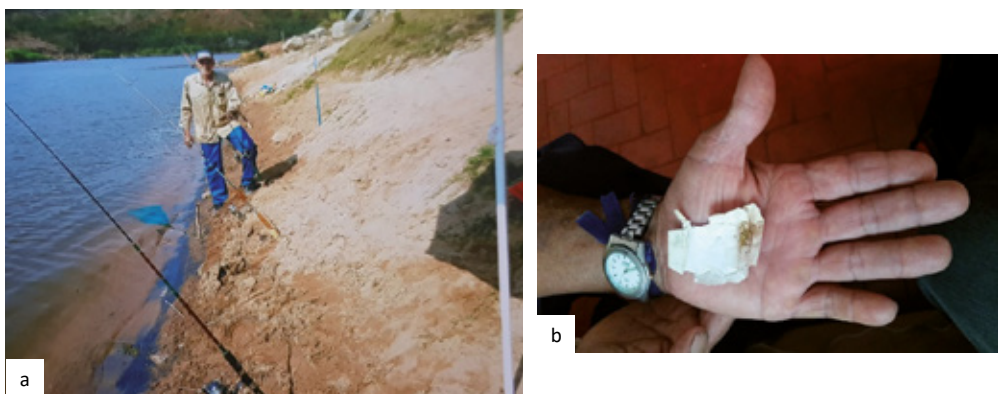
Cabe ressaltar que para todos os bens ora considerados, a tendência do dano está vinculada às medidas reparatórias, devendo ser adotadas de forma adequada e ainda, sendo preciso, para isso, uma mudança de rota no âmbito das ações em andamento por parte da Fundação Renova.

6.5.6 ALTERAÇÃO NO ACESSO A MATÉRIAS-PRIMAS E IMPLEMENTOS ASSOCIADOS NECESSÁRIOS À PRODUÇÃO DOS BENS CULTURAIS

Dano relacionado à dificuldade ou supressão do acesso aos instrumentos, objetos e matérias-primas necessários para uma prática cultural.

Um total de quatro bens sofreram este dano nos C1 e C3, sendo 50% formas de expressão e 50% ofícios, saberes e modos de fazer. As Figuras 205 e 206 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 205 – a) Memória de Juarez pescando no rio Doce (pré-desastre), em Perpétuo Socorro, Belo Oriente (MG); b) Arcedino Esteves de Sousa mostrando uma pequena quantidade de ouro, o qual apresenta como prova de sua atividade na faiscagem (registro de 23/08/2018), Sede, Rio Doce (MG).



Fonte: a) Foto cedida pelo atingido Juarez; b) Lactec

Figura 206 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Seja pela ação da onda de rejeitos, sejam pelas ações emergenciais e reparatórias, este dano prejudicou duas formas de expressão (cavalgada e congada) e dois ofícios, saberes e modos de fazer (artesanatos com bordado, faiscagem e pesca).

Após o desastre, a típica forma de expressão denominada de Cavalgada de Paracatu foi desestimulada, tendo em vista que parte dos habitantes de Paracatu, assim como muitos animais, tiveram que sair da região. As pessoas, a partir de então, com moradias distantes de Paracatu e os animais sendo criados em fazenda mantida pela Samarco.

A Congada trata-se de uma outra forma de expressão cultural bastante antiga e tradicional que acontece nos distritos de Povoação e Regência, em Linhares (ES), a qual é realizada por Bandas de Congo (adultos e mirins), compostas por instrumentistas e dançarinas. Com a desestruturação econômica dessas localidades, causada pelo aporte de rejeito ao rio Doce e a interrupção da pesca (ofício bastante comum na região), também afetou o financiamento e continuidade da Congada.

O ofício de bordadeira também sofreu esse dano por perderem máquinas antigas de costura, pela ação da onda de lama e que eram atreladas às histórias e gerações das famílias atingidas, bem como à qualidade técnica de bordados (*richelieu*) que era até então oferecida por essas máquinas perdidas. Ainda com a passagem de caminhões e veículos pesados nos meses e anos seguintes ao desastre causou a suspensão de poeira, impedindo a realização do bordado, especificamente aqueles realizados em tecidos brancos.

No quesito gravidade, para um bem este dano foi gravíssimo (acesso bloqueado a matérias-primas e implementos necessários à produção de bens acima de 96% das narrativas), para dois bens o dano foi grave (dificuldade de acesso à matérias-primas e implementos necessários à produção de bens em 51% a 95% das narrativas) e para um bem foi pouco grave (dificuldade de acesso em 1 a 50% das narrativas).

Para reversibilidade deste dano, três bens foram enquadrados como parcialmente reversíveis e outro um bem como reversível.

No que se refere à tendência deste dano, para dois bens tende a reduzir, para um tende a reduzir e um o dano está cessado.

Cabe ressaltar que para todos os bens ora considerados, tanto a reversibilidade como a tendência do dano estão vinculados a medidas reparatórias, devendo ser adotadas de forma adequada e ainda, sendo preciso, para isso, uma mudança de rota no âmbito das ações em andamento por parte da Fundação Renova.

6.5.7 ALTERAÇÃO NA CIRCULAÇÃO DE PRÁTICAS E BENS CULTURAIS

Impossibilidade (temporária ou definitiva) dos bens e práticas circularem por um determinado território.

Um total de 07 bens sofreram este dano nos C1 e C3, sendo 71,4% formas de expressão e 28,6% celebrações. As Figuras 207 e 208 mostram, respectivamente, imagens evidenciando o referido dano e as classificações deste dano sob a ótica da gravidade, reversibilidade e tendência de evolução.

Figura 207 – a) Mestre Alcides com o estandarte da Folia de Reis de Barreto, em Barreto, Barra Longa (MG); b) Memória de Cavalgada pré-desastre, em Ponte do Gama, Mariana (MG).



Fonte: a) Lactec; b) Foto cedida por atingido.

Figura 208 – Classificações do Dano.



Fonte: Lactec.

Diversos bens sofreram este dano. Dentre eles estão duas celebrações (Folia de Reis das localidades de Paracatu e de Barreto) e cinco formas de expressão (ensaios musicais, banda, congado, capoeira).

A Folia de Reis de Paracatu continuou ocorrendo, contudo, com modificações após o desastre, principalmente com relação ao percurso realizado pelos foliões. O giro, um dos principais elementos dessa celebração, promovia a circulação do grupo dentro da própria localidade, bem como nas comunidades vizinhas. Na Folia de Reis de Barreto o giro era por um circuito amplo de localidades, passando inclusive por outros municípios. Logo, após o desastre, o trajeto da Folia foi alterado e a festividade circulou apenas dentro da comunidade de Barreto, uma vez que, com o rompimento de uma ponte, provocado pelo acúmulo de rejeito, não foi possível atravessar o rio em direção a outras localidades.

A Sociedade Musical São Caetano é uma banda tradicional do distrito de Monsenhor Horta e é a quarta banda mais antiga do Brasil, terceira mais antiga de Minas Gerais e primeira da região dos Inconfidentes. A Sociedade se apresenta tanto em festejos religiosos e não religiosos locais, quanto em festivais e festas de outros distritos ou municípios. A Festa de São Caetano, que ocorre em agosto, a Festa do Divino, em outubro, e as procissões da Semana Santa são exemplos de eventos anuais de Monsenhor Horta que contam com a apresentação dessa Sociedade Musical. O desastre não só alterou a circulação da mesma pela região, principalmente entre os distritos mais afetados, que tiveram suas

populações removidas ou restrições no acesso, mas como também interrompeu a sua ida em algumas localidades, nas quais a banda costumava tocar. A Banda do Carmo, formada por jovens, transita por espaços além do município de Barra Longa, apresentando-se dentro e fora do município, incluindo Gesteira. A banda circulava bastante por territórios vizinhos. Tal circulação está comprometida até hoje, pois um dos lugares onde sempre tocavam era a comunidade de Gesteira, bastante afetada pela lama de rejeitos.

Além da Banda do Carmo, a Banda de Congo²⁴ de São Benedito do Guaxe teve sua circulação diminuída, porque deixaram de receber convites para festas e porque os próprios integrantes da Banda demonstraram receio em visitar as áreas atingidas, como Povoação e Regência. A chegada do rejeito à região litorânea do município, onde se encontram Povoação e Regência, fez com que os eventos nos quais a banda tocava fossem alterados, reduzindo os convites. O receio demonstrado pelos integrantes da Banda está relacionado ao potencial de toxicidade presente na água das localidades que visitariam. Em 2018, alguns relatos informaram que a circulação da Banda estava voltando a se estabelecer como o esperado.

O Congado é uma manifestação cultural antiga e tradicional presente em Santana do Deserto e em outros povoados localizados às margens do rio Doce. Tem origem em festejos praticados por escravos e é realizado até hoje por pessoas herdeiras dessa tradição. Diz-se, em Santana do Deserto, que o congado dali é “original”, tamanha a importância que se dá a essa manifestação e muitos afirmam ser a “sede do congado”. O Congado circula por comunidades vizinhas para mostrar seu trabalho artístico. No entanto, com o desastre houve redução na intensidade da circulação do grupo pelas comunidades, uma vez que hoje há maior dificuldade de acesso à Santana do Deserto. A passagem entre o povoado e o distrito de Merengo, por exemplo, é realizada de barco, atravessando o rio Doce. Como o desastre causou intenso assoreamento do rio, o trânsito entre as duas comunidades está prejudicado. O Caminho de Santana, percorrido na Festa Anual de Santana do Deserto, também teve trechos temporariamente interditados pela lama de rejeitos, o que limitou o trajeto feito na romaria anual que era acompanhada pelo grupo.

Quanto à capoeira, as apresentações aconteciam, principalmente, em festas e eventos oficiais, como a Festa do Robalo e o campeonato de surfe, ambos em Regência (ES). Narrativas de receios associados à qualidade da água, em especial nos locais em que os grupos de capoeira se apresentavam, fizeram com que esses grupos de capoeira reduzissem as apresentações em alguns distritos de Linhares (ES), por exemplo.

A maioria dos bens para este dano foi considerado grave (cinco bens), isto é, com dificuldade de circulação em 51% a 95% das narrativas e dois bens apontados como pouco graves (dificuldade de circulação em 1 a 50% das narrativas).

Para este dano todos os bens foram considerados parcialmente reversíveis. No que se refere à tendência deste dano, de forma similar a tantos outros danos a bens imateriais para um bem este dano está cessado, para outros quatro tende a aumentar e para dois tende a reduzir.

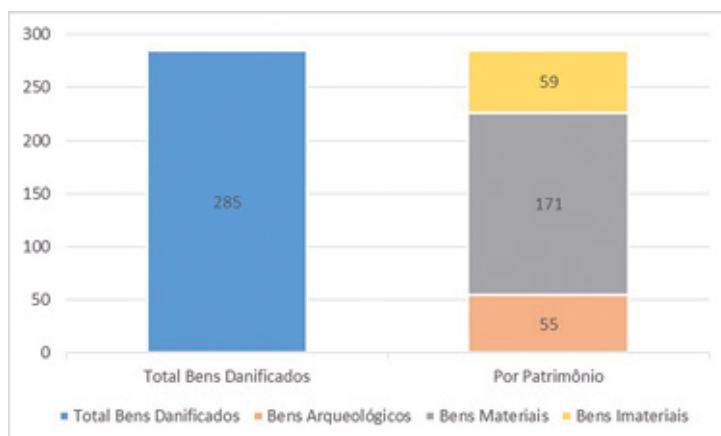
24 Trata-se de uma manifestação cultural antiga e tradicional presente em Linhares (ES) e em outros municípios e povoados do ES, localizados no litoral e no interior. Tem origem em festejos praticados por africanos escravizados, inicialmente como parte das memórias de antigos reinados africanos, e é realizado atualmente por pessoas herdeiras dessa tradição. As atividades dos grupos de congo estão relacionadas aos festejos religiosos dedicados à São Benedito, São Pedro, São Sebastião e Nossa Senhora da Penha.

Cabe ressaltar que para todos os bens ora considerados, tanto a reversibilidade como a tendência do dano estão vinculados às medidas reparatórias, devendo ser adotadas de forma adequada e ainda, sendo preciso, para isso, uma mudança de rota no âmbito das ações em andamento por parte da Fundação Renova.

6.6 SÍNTESE DE DANOS

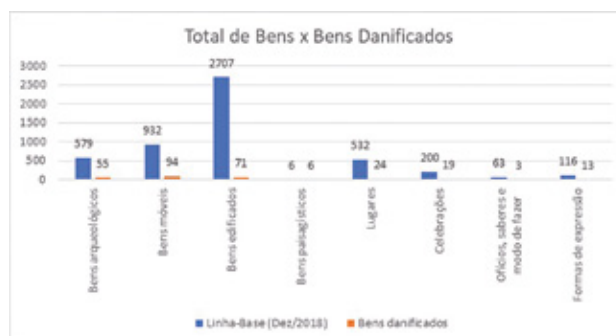
As pesquisas realizadas no âmbito deste diagnóstico resultaram na identificação de um conjunto significativo de bens culturais alvo de danos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão. Foram identificados danos em 285 bens, sendo 55 bens arqueológicos (sítios arqueológicos pré-coloniais, sítios arqueológicos históricos, sítios de interesse arqueológico, histórico e artístico), 754 bens materiais (edificações, móveis e associados e paisagísticos), tendo sido 171 bens analisados por amostra e indicados nos gráficos a seguir, e 59 bens imateriais (lugares, celebrações, formas de expressão, saberes, modos de fazer e ofícios) (Figura 209) distribuídos em todos os compartimentos atingidos pelo desastre, bem como de acordo com as categorias de bens (Figura 210).

Figura 209 – Quantitativo de Bens Danificados: Total e por Patrimônio.



Fonte: Lactec.

Figura 210 – Total de bens culturais (LB) e bens danificados pelo desastre, de acordo com suas categorias.



Fonte: Lactec.

Com relação à gravidade dos danos, o C1 foi o que apresentou danos gravíssimos em maior quantidade, em todos os subcampos do diagnóstico. Uma parcela significativa dos danos ao patrimônio arqueológico está classificada como gravíssima ou grave. No caso do patrimônio material, esse

padrão se repete, exceto para os danos desencadeamento de processos físico-químicos que acelerem a degradação dos bens culturais materiais e modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais, onde se observa uma porcentagem maior de danos pouco graves. Com relação aos bens imateriais, os danos foram gravíssimos ou graves em sua maioria, sendo reduzidos os danos classificados como pouco graves.

Quanto à tendência dos danos identificados no âmbito do patrimônio cultural demonstrou que, em todos os compartimentos, há um predomínio de danos que tendem a aumentar, caso as medidas necessárias recomendadas²⁵, para a gestão dos danos, não sejam adotadas de forma adequada. Cabe ainda destacar uma maior presença de danos cessados no subcampo do patrimônio material, relacionados às origens mecânicas. Por fim, é importante indicar que os danos que tendem a reduzir, muitas vezes têm origem nas interações físicas, químicas e/ou biológicas no escopo dos bens imateriais. Contudo, por exemplo, o fato de que o rio Doce tende a se recuperar com o passar do tempo, reduzindo os danos aos bens imateriais que estão associados ao uso desse curso d'água, não afasta a gravidade dos danos, pois essa redução se dará ainda a longo prazo. Outrossim, a retomada de condições ambientais mais próximas ao cenário pré-desastre não garantirá, em absoluto, a retomada das práticas culturais ao longo do Doce.

A análise da reversibilidade encontra resultados opostos nos subcampos dos bens arqueológicos e bens imateriais. No caso da arqueologia, há o predomínio absoluto de danos irreversíveis, enquanto no segundo predomina uma maior reversibilidade dos danos. Ainda, quanto à arqueologia, tem-se bens de natureza finita e não renovável, já no subcampo do imaterial, a reversibilidade depende da aplicação de diversas medidas que garantam os espaços, matérias-primas, implementos, coletivos e indivíduos necessários à produção e reprodução dos bens imateriais. No caso do patrimônio material, predominam os danos parcialmente reversíveis, demandando para isso, a correta gestão desses bens, com ações de conservação, restauro e valorização.



Fonte: Lactec.

Convém²⁶ apontar que o rio Doce, que compõe o quadro em tela na categoria bem paisagístico (bem material) e na categoria lugar (bem imaterial), foi afetado em toda a sua extensão, desde o seu nascimento (a partir dos rios Carmo e Piranga) até a sua foz, o que demonstra a gravidade do dano a esse bem, ainda que do ponto de vista quantitativo ele tenha sido contabilizado como “um” bem.

No que se refere à amplitude geográfica – em contraponto com a ênfase das ações desencadeadas pela Samarco/Fundação Renova, entre 2016 e 2017, no campo do patrimônio cultural (na maioria das vezes restritas ao trecho situado entre Mariana e a UHE Risoleta Neves) – o presente diagnóstico abrangeu uma faixa de terrenos significativamente mais ampla, abarcando áreas de 43 municípios atingidos desde Mariana até a foz do rio Doce (agrupados em compartimento do C1 a C5), tendo como localização a APDL estabelecida por esse diagnóstico (não necessariamente restrita a ela), assim como

²⁵ Diversas ações/recomendações propostas foram indicadas ao longo do diagnóstico de danos e enquadradas sob um Programa de Gestão do Patrimônio Cultural (PGPC) e subdividido por patrimônio arqueológico, material e imaterial.

²⁶ Desenhos: Ricardo Sanzi (2019).

as áreas alvo de ações emergenciais e reparatórias. No caso da arqueologia, foram, ainda, investigadas por meio de métodos geofísicos e mergulhos porções da costa marítima capixaba, no intuito de se identificar e avaliar bens arqueológicos submersos até então desconhecidos no fundo do leito marinho ou em zonas intermarés, igualmente atingidas pela lama (C5).

No caso do patrimônio arqueológico é importante destacar que foi necessário lidar, com uma contradição colocada recorrentemente por desastres mundo afora, sejam naturais ou tecnológicos, como no caso deste diagnóstico de danos, uma vez que o rejeito em seu deslocamento, não só atingiu de distintas formas e intensidades sítios arqueológicos acautelados pela União, mas também “criou” bens e zonas históricas e arqueológicas sensíveis, de complexa constituição e análise face ao desastre, conforme evidencia com grande propriedade o dossiê recentemente entregue ao MPMG, contendo subsídios para o tombamento de Bento Rodrigues, enquanto sítio de memória, ou ainda, como sítio de consciência relacionado à memória em torno do desastre, sua amplitude e efeitos (ICOMOS Brasil/ IEDS/ PPACPS-UFMG, 2019).



Fonte: Lactec.

No campo do patrimônio material, os processos desencadeados em função do desastre (ações de caráter emergencial e reparatório), notadamente o aumento do tráfego de caminhões e máquinas pesadas, a recuperação/construção de estruturas novas (pontes e vias) e uso inadequado de estruturas antigas, não apenas ampliaram, como aprofundou os danos aos bens culturais materiais edificados e paisagísticos. Da mesma forma, a indefinição quanto ao destino dos objetos mantidos na Reserva Técnica da Fundação Renova, bem como o alargado tempo decorrido desde o desastre, somados aos erros no tratamento dos objetos, aponta que, embora necessária, a existência e perpetuação dessa estrutura de caráter temporário, constitui em si um dano aos bens culturais materiais. Convém lembrar que a proteção e a sobrevivência do patrimônio cultural material – edificações, paisagens, objetos móveis e associados – depende de elementos estruturantes – lotes, arruamentos, redes de estradas e caminhos, paisagem – que foram profundamente alterados ou danificados.

A abordagem dos bens imateriais, orientada pelo quadro conceitual da Antropologia e pautada pelo método etnográfico, permitiu recuperar narrativas de cerca de 480 atingidos pelo desastre – entre entrevistas e conversas informais, ao longo dos mais de 650 km percorridos pelo rejeito até a foz no Espírito Santo. Foram visitadas cerca de 60 localidades – centro urbanos, comunidades rurais, comunidades quilombolas, vilas de pescadores – afetadas em seus modos de vida tradicionais, dada a impossibilidade de manter, em parte ou em sua totalidade, as relações de vizinhança, rituais coletivos, celebrações tradicionais, práticas e locais de convívio.

As percepções das pessoas com relação aos danos causados aos bens imateriais são os principais elementos que sustentam as narrativas etnográficas, constituindo-se em verdadeiros ‘elementos de prova’ do diagnóstico de danos ao patrimônio imaterial. Os relatos coletados foram frutíferos ao possibilitar reflexões para além da análise de danos a esses bens, trazendo insumos sobre as percepções acerca do desastre, das ações em curso a partir da Fundação Renova e dos desejos de futuro.

O desastre do rompimento da barragem de Fundão afetou as bases de produção e reprodução do patrimônio cultural, uma vez que os territórios e lugares de convivência de diversas comunidades foram destruídos. Diante da importância desse patrimônio cultural, como fonte de diversidade cultural e garantia de desenvolvimento sustentável, como preconiza o IPHAN em escala nacional e a UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) em contexto internacional, caberá corrigir os rumos das ações em andamento, a cargo da Fundação Renova, e construir novos caminhos para a salvaguarda desse patrimônio, compreendido enquanto direito cultural.

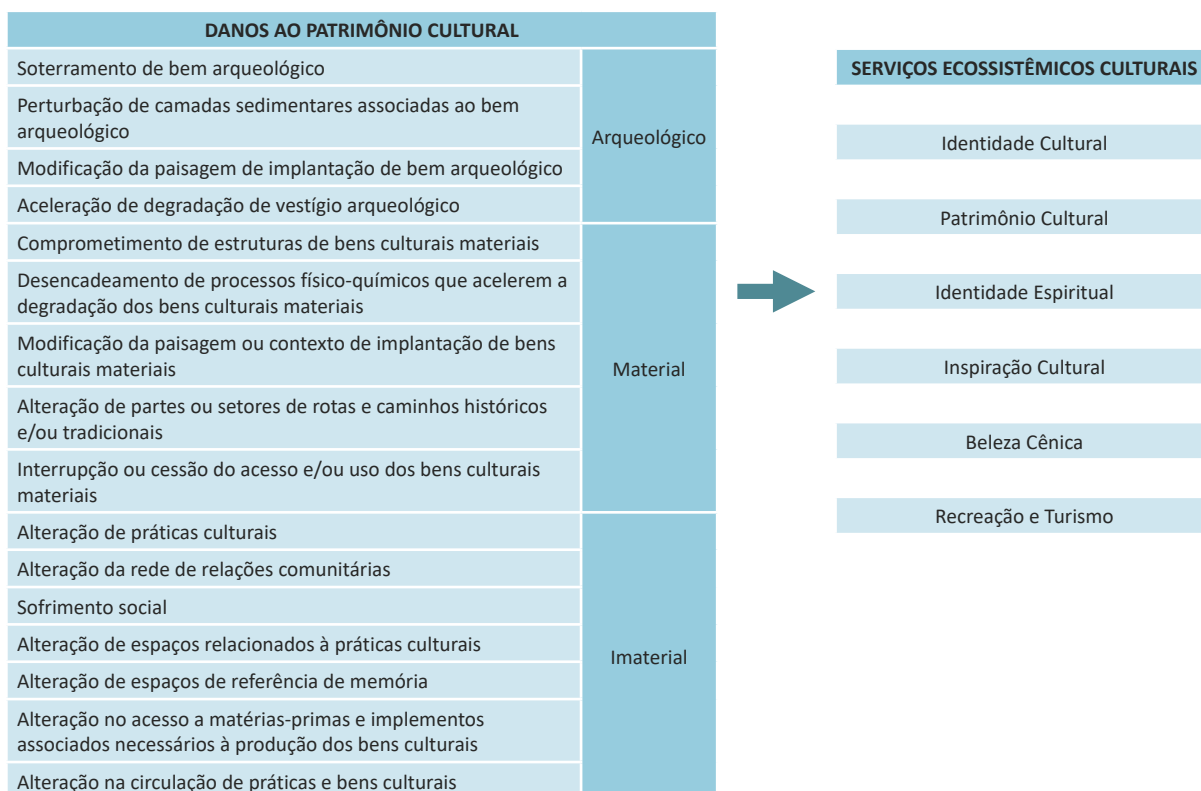


Fonte: Lactec.

Os 16 danos evidenciados ao patrimônio cultural estão associados a seis categorias básicas de Serviços Ecosistêmicos Culturais (SEC), categorias essas baseadas em trabalhos realizados pelo painel internacional de especialistas *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005 apud FGV, 2016), conforme mostra a Figura 211.

Tais categorias auxiliam na classificação dos diferentes benefícios socioculturais usufruídos pelos seres humanos por meio do contato com o meio ambiente.

Figura 211 – Danos ao Patrimônio Cultural e Serviços Ecosistêmicos Culturais.



Fonte: Adaptado de FGV (2016).

7 MATRIZ DE DANOS

De forma a sintetizar todos os danos avaliados foi elaborada uma matriz, apresentada na Tabela 75, que contém a lista de todos os danos por ambiente afetado e suas respectivas classificações em termos de abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade. Para os danos aos ambientes terrestre e atmosfera, ambiente aquático continental e zona costeira e marinha, a classificação adotada foi baseada no pior cenário encontrado para aquele dano. Já para os danos ao patrimônio cultural, o critério adotado teve por base a classificação verificada no maior número de bens e/ou conjunto de bens.

Tabela 75 – Matriz de danos do ambiente terrestre e atmosfera, ambiente aquático continental e zona costeira e marinha e suas respectivas classificações em termos de abrangência, gravidade, tendência e reversibilidade.

Ambiente	Área temática	Dano	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade
Terrestre	Superfície	Alterações de paisagem	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível
		Danos em processos de extração de bens minerais	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Parcialmente reversível
		Danos em feições subterrâneas ²⁷	Compartimento 1	Grave	Cessado	Irreversível
		Áreas de geração de resíduos sólidos	Compartimento 1	Grave	Redução	Parcialmente reversível
		Ampliação de áreas de disposição de rejeitos	Compartimento 1	Grave	Aumento	Parcialmente reversível
	Solos	Alteração da composição do solo ²⁸	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível
		Aumento da densidade do solo	Compartimento 1	Grave	Cessado	Parcialmente reversível
		Aumento dos processos erosivos	Compartimento 1	Grave	Redução	Parcialmente reversível
		Alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível
		Alteração da permeabilidade e fluxo de água no solo	Compartimento 1	Grave	Redução	Irreversível
	Flora	Alteração da estabilidade de encostas	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível
		Alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo ²⁹	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Parcialmente reversível
		Contaminação do solo por EPTs ³⁰	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível
		Contaminação do solo por EPTs devido às ações emergenciais pós-desastre	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível
		Formação de tecnossolo	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível
		Supressão de vegetação nativa ciliar	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível
		Supressão de vegetação nativa por implantação de infraestrutura	Compartimentos 1 e 3	Grave	Aumento	Parcialmente reversível
		Perda de biodiversidade de flora	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível
		Perda de recursos florestais madeireiros	Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível
		Perda de recursos florestais não madeireiros	Compartimento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível
		Redução na capacidade de resiliência da floresta	Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível
		Fragmentação dos habitats e aumento do efeito de borda	Compartimento 1	Pouco grave	Aumento	Parcialmente reversível
		Introdução e aumento de espécies exóticas	Compartimento 1	Grave	Aumento	Reversível

²⁷ Aqui é apresentada a classificação para a maioria das feições, sendo que 3 foram classificadas como gravíssimo.

²⁸ Comparação com os solos controle, uma vez que não haviam indicadores de linha base.

²⁹ Para o diagnóstico desse dano, houve também a interpretação de outros indicadores (plantas coletadas em campo e realização de experimento em condições controladas) para os quais não havia linha base.

³⁰ Para o diagnóstico desse dano, houve também a interpretação de outros indicadores (plantas coletadas em campo e realização de experimento em condições controladas) para os quais não havia linha base; para os EPTs Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Sn e Zn não foi diagnosticado dano para a matriz solo do compartimento 1. Para maiores detalhes, verificar Relatório de Elementos Potencialmente Tóxicos no Tecnossolo, que se encontra no Material Suplementar do Tomo III.

Ambiente	Área temática	Dano	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade
Terrestre	Fauna	Alterações nas populações faunísticas ³¹	Compartmento 1	Grave	Cessado	Reversível
		Alterações nas assembleias faunísticas	Compartmento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível
			Compartmentos 2 e 3	Pouco grave		
		Piora nas condições físicas da fauna	Compartmento 2	Pouco grave	Redução	Reversível
		Perda de conectividade na paisagem	Compartmento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível
		Perda de qualidade dos habitat	Compartmento 1	Gravíssimo	Cessado	Reversível
	Áreas naturais protegidas	Comprometimento à saúde da fauna silvestre ³²	Compartmentos 1 e 3		Dano não classificado	
		Aumento na bioacumulação ³³	Compartmentos 1, 2 e 3		Dano não classificado	
		Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas ³⁴	Compartmentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Estabilizado	Parcialmente reversível
		Alteração da qualidade do ar ³⁵	Compartmento 1	Gravíssimo	Redução	Reversível
Aquático Continental	Atmosfera	Alteração na área de drenagem dos cursos de água	Compartmento 1	Pouco grave	Cessado	Irreversível
		Alteração na configuração da rede de drenagem dos cursos de água	Compartmento 1	Gravíssimo	Redução	Irreversível
		Soterramento de cavas e açudes	Compartmento 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível
		Redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água ³⁶	Compartmentos 1, 2 e 3	Pouco grave**	Cessado	Reversível
	Água	Aumento das concentrações de sólidos na água ³⁷	Compartmentos 1, 2 e 3	Gravíssimo***	Redução	Parcialmente reversível
		Aumento das concentrações de EPTs na água ³⁸	Compartmentos 1, 2 e 3	Gravíssimo**	Redução	Parcialmente reversível
		Dano ao uso da água para abastecimento público	Compartmentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível

31 Há indícios de ocorrência do dano também nos compartimentos 2 e 3.

32 Resultados baseados apenas em duas campanhas, por isso, não classificado

33 Resultados baseados apenas em duas campanhas, por isso, não classificado

34 Aqui é apresentada a classificação para a maioria das áreas naturais protegidas. Para classificação individual ver Capítulo 2.5 do TOMO III - Ambiente terrestre e atmosfera.

35 A comparação foi realizada com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N. 003/1990 (PTS e PM10) e com o valor guia estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (PM2,5), uma vez que não haviam indicadores de linha base.

A Resolução CONAMA N. 003/1990, vigente até 18/11/2018, não estabelece padrão de qualidade do ar para as partículas respiráveis (PM2,5).

É válido ressaltar que os valores estabelecidos pela Resolução CONAMA N. 003/1990 foram estabelecidos no que os valores preconizados pela Organização Mundial da Saúde em 2005.

Para o cenário pós-desastre foram avaliados os dados das estações de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova em Barra Longa, Gesteira e Paracatu de Baixo, considerando o período desde a instalação de cada uma até dezembro de 2018.

36 * Na linha-base, esse percentual é zero, uma vez que a variação da série histórica pré-desastre serviu de referência para o dano. ** Categoria A (valores de acordo com o limite legislado e com a variação histórica pré-desastre) foi predominante em novembro/2015

37 * Na linha-base, esse percentual é zero, uma vez que a variação da série histórica pré-desastre serviu de referência para o dano. *** Categoria C foi predominante em novembro/2015

38 * Na linha-base, esse percentual é zero, uma vez que a variação da série histórica pré-desastre serviu de referência para o dano. *** Categoria C foi predominante em novembro/2015

Ambiente	Área temática	Dano	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade
Aquático Continental	Alteração da comunidade fitoplanctônica	Comunidades planctônicas	Compartimento 1 ³⁹			
			Compartimento 2A			
			Compartimento 2B ⁴⁰	Gravíssimo	Estabilizado	Irreversível
			Reservatório da UHE Risoleta Neves			
			Reservatório da UHE Bagueari			
			Reservatório da UHE Aimorés ⁴¹			
			Compartimento 1	Gravíssimo	Aumento	Irreversível
			Compartimento 2A	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Compartimento 2B	Gravíssimo	Estabilizado	Irreversível
			Compartimento 3		Dano não classificado	
	Alterações nas comunidades zooplancônicas		Reservatório da UHE Risoleta Neves	Gravíssimo	Estabilizado	Irreversível
			Reservatório da UHE Bagueari	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Reservatório da UHE Aimorés	Grave	Estabilizado	Parcialmente reversível
			Reservatório da UHE Mascarenhas		Dano não classificado	
			Compartimento 1	Grave	Cessado	Reversível
			Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Reversível
			Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Cessado	Reversível
			Compartimentos 2 e 3	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Compartimento 1	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível
			Compartimentos 2 e 3	Grave	Estabilizado	
Transporte de sedimentos	Assoreamento dos reservatórios hidrelétricos		Reservatório da UHE Risoleta Neves	Gravíssimo		Irreversível
			Reservatório da UHE Bagueari	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Reservatório da UHE Aimorés	Pouco grave		
			Compartimento 1	Grave		
			Compartimentos 2 e 3	Pouco grave		
					Redução	Parcialmente reversível
Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	Alteração na composição granulométrica do sedimento		Compartimento 1	Grave		
			Compartimentos 2 e 3	Pouco grave	Redução	Parcialmente reversível

39 Para a estação CAN01 a tendência é de aumento.

40 No compartimento 3 não foi possível mensurar nem classificar o dano.

41 No reservatório da UHE Mascarenhas não foi possível mensurar nem classificar o dano.

42 CSS obs: Concentração de Sedimentos em Suspensão observada média no posto no período, usando os dados descritos nos capítulos anteriores do relatório. QSS obs: Descarga Sólida em Suspensão observada média no posto no período, usando os dados descritos nos capítulos anteriores do relatório. CSS sim: Concentração de Sedimentos em Suspensão simulada média para o local do posto, usando apenas os dados simulados nos mesmos dias em que dados observados estão disponíveis, usando os dados descritos nos capítulos anteriores do relatório.

43 No Compartimento 3 não foi possível mensurar nem classificar o dano.

44 No reservatório das UHEs Almorés e Mascarenhas não foi possível mensurar nem classificar o dano.

45 Resultados apresentados para apenas duas coletas, por isso, não puderam ser classificados

46 Resultados apresentados para apenas duas coletas, por isso, não puderam ser classificados

47 Grande grupo Copepoda como representativo pois faz parte dos organismos mais abundantes do planeta, os crustáceos, e com grande importância ecológica nos sistemas aquáticos. Nos trabalhos pesquisados Copepoda foi o grupo com maior densidade e riqueza de espécies. As espécies representativas de Copepoda foram aquelas classificadas como “muito frequente” (espécies que ocorreram em todos ou quase todos os pontos amostrais de cada trabalho pesquisado, ou seja, ocorreram em mais de 70% dos pontos de coleta) e/ou “abundante” (com alta densidade em cada trabalho pesquisado, considerando os valores de densidade registrados por trabalho).

48 Nos trabalhos pesquisados sobre o tema após o desastre, não houve apontamento das concentrações de metais ao longo do texto, somente gráficos, tornando imprecisa a definição de concentrações.

Ambiente	Área temática	Dano	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade
Zona Costeira e Marinha	Transporte de sedimentos	Incremento na deposição de sedimentos	Compartmento 5	Gravíssimo	Redução	Irreversível
		Alteração das características granulométricas do sedimento superficial	Compartmento 4	Grave	Redução	Parcialmente reversível
	Qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	Aumento da concentração de EPTs no sedimento	Compartmento 5	Gravíssimo	Dano não classificado	Parcialmente reversível
			Compartmento 4			
		Alteração na estrutura das comunidades benthicas de fundos inconsolidados	Compartmento 5-B1, 5-B2 e 5-C	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Compartmento 5-A, 5-D e 5-E	Pouco Grave		
	Zona Costeira e Marinha	Alterações na condição de saúde e contaminação por EPTs em invertebrados benthicos de fundos inconsolidados	Compartmentos 4 e 5	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível
			Compartmentos 4 e 5			
		Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna	Compartmento 4	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Compartmento 5	Gravíssimo		
		Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	Compartmentos 4 e 5	Grave	Redução	Parcialmente reversível
			Compartmento 5			
Patrimônio Cultural	Ictiofauna	Diminuição das populações de espécies de peixes costeiros de interesse comercial	Compartmentos 4 e 5	Grave	Redução	Parcialmente reversível
	Quelônios e mamíferos marinhos	Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	Compartmentos 4 e 5	Dano não classificado	Dano não classificado	Parcialmente reversível
		Aumento na bioacumulação	Compartmentos 4 e 5			
	Áreas naturais protegidas	Degradação da qualidade dos habitats marinhos	Compartmento 5	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível
		Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas ⁴⁹	Compartmento 5	Pouco grave	Estabilizado	Reversível
			Compartmentos 1	Gravíssimo	Cessado	Irreversível
		Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico ⁵¹	Compartmentos 1, 2, 3 e 5	Gravíssimo	Cessado	Irreversível
		Modificação da paisagem de implantação de bem arqueológico	Compartmentos 1, 2, 3 e 5	Gravíssimo	Aumento	Irreversível
		Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	Compartmentos 1, 2, 3 e 5	Gravíssimo	Aumento	Irreversível

49 Aqui é apresentada a classificação para a maioria das áreas naturais protegidas. Para classificação individual ver Capítulo 6 do TOMO IV - Zona Costeira e Marinha.

50 Classificação dos danos ao patrimônio cultural é baseada no maior quantitativo de bens. Para classificação individual ver TOMO V - Patrimônio Cultural.

51 Para o patrimônio cultural o compartmento 3 abrange também o estuário, ou compartmento 4.

Ambiente	Área temática	Dano	Abrangência	Gravidade	Tendência	Reversibilidade
Patrimônio Cultural	Material	Comprometimento das estruturas de bens culturais materiais ⁵²	Compartimentos 1 e 3	Pouco grave	Aumento	Reversível
		Desencadeamento de processos físico-químicos que acelerem a degradação dos bens culturais materiais	Compartimento 1	Pouco grave	Cessado	Reversível
		Modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais	Compartimentos 1 e 3	Grave	Aumento	Parcialmente reversível
		Alteração de partes ou setores de rotas e caminhos históricos e/ou tradicionais	Compartimento 1	Grave	Aumento	Parcialmente reversível
		Interrupção ou cessão do acesso e/ou uso dos bens culturais materiais	Compartimentos 1 e 3	Gravíssimo	Aumento	Irreversível
	Imaterial	Alteração de práticas culturais	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível
		Alteração da rede de relações comunitárias ⁵³	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Aumento	Parcialmente reversível
		Sofrimento social	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Aumento	Irreversível
		Alteração de espaços relacionados às práticas culturais	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Redução	Parcialmente reversível
		Alteração de espaços de referência de memória ⁵⁴	Compartimentos 1, 2 e 3	Gravíssimo	Aumento	Irreversível
		Alteração no acesso a matérias-primas e implementos associados necessários à produção dos bens culturais	Compartimentos 1 e 3	Grave	Redução	Parcialmente reversível
		Alteração na circulação de práticas e bens culturais	Compartimentos 1 e 3	Grave	Aumento	Parcialmente reversível

52 Foram avaliados 171 bens, dentre os quais 71 bens materiais móveis. Destes, 60 correspondem a uma amostra dos 643 bens móveis afetados que se encontram na Reserva Técnica da Fundação Renova. Dessa forma, o número de bens móveis afetados na Reserva é de 643 bens.

53 Classificação dada como "Grave e Gravíssimo" para bem Rio Doce foi contabilizado como Gravíssimo na matriz de danos

54 Classificação dada como "Grave e Gravíssimo" para bem Rio Doce foi contabilizado como Gravíssimo na matriz de danos

8 CONCLUSÕES

Esse diagnóstico, realizado com dois anos de estudos, sendo um ano de coletas em campo, apresentou os danos socioambientais advindos do desastre. Apesar de alguns danos ainda carecerem de mais estudos para aprofundar a análise dos resultados, os que foram aqui apresentados já fornecem um quadro consolidado do efeito drástico que o desastre teve e ainda tem sobre o meio ambiente e o patrimônio cultural.

O diagnóstico dos danos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG) no dia 05 de novembro de 2015, permitiu afirmar que o ambiente foi alterado profundamente, especialmente no momento imediatamente após o desastre. O trecho que sofreu danos mais intensos e agudos foi aquele localizado entre a barragem de Fundão e a usina hidrelétrica Risoleta Neves. Nesse trecho, a onda de lama passou destruindo tudo o que havia pela frente, dentro e fora da calha do rio. Organismos da flora e da fauna morreram pela força mecânica, pelo soterramento, ou por asfixia. Houve supressão de uma parte importante da vegetação, fato que potencializou outros efeitos do desastre nesses ambientes, como alterações no solo e nos animais que viviam e dependiam das áreas vegetadas. Esse fato resultou, juntamente com a contaminação por EPTs, na diminuição acentuada da qualidade dos habitat. As alterações ambientais geraram danos em nível de ecossistema, tanto naturais quanto modificados, e em consequência, nas funções ecológicas e nos benefícios providos por eles aos seres humanos. Dessa forma, é de extrema importância as ações de recuperação que venham a restaurar o ambiente e os serviços ecossistêmicos por ele fornecidos. Dentre estas ações destaca-se a restauração florestal, dada a influência que esta prática vem a exercer nos demais elementos, como a recuperação dos solos, conectividade, fornecimento de habitat para a fauna e melhoria da qualidade do ar e da água.

Nos rios, o efeito imediato do desastre foi a mortandade de toneladas de peixes, e provavelmente de outros organismos ali presentes. Assim como para o ambiente terrestre, o comprometimento da qualidade ambiental prejudicou e continua a prejudicar os organismos que sobreviveram ou as novas gerações que estão recolonizando os diferentes ambientes. Nesse trecho inicial da área atingida pela lama de rejeitos, as comunidades biológicas no meio aquático dificilmente retornarão às condições pré-existentes. O que vem ocorrendo é uma recolonização dos ambientes por organismos que suportam as condições atuais, em grande parte, aquelas mais resistentes e típicas de ambientes degradados, incluindo espécies exóticas e invasoras. De grande importância para os usos humanos, as águas dos rios são utilizadas para o abastecimento, irrigação, dessedentação animal, habitat, biodiversidade, além da pesca, geração de energia, uso em indústrias e no comércio. Ainda, serviços de caráter sociocultural, como o valor estético, espiritual, turístico, educacional e histórico foram afetados. Houve, também, danos relacionados a ações humanas posteriores ao desastre, relacionadas à disposição de resíduos sólidos, por exemplo, que prejudicaram ainda mais a região.

Nos trechos após a usina hidrelétrica de Risoleta Neves, o meio aquático também foi consideravelmente prejudicado. A qualidade das águas e dos sedimentos foi alterada, e EPTs foram disponibilizados nesses ambientes, sendo absorvidos pelos organismos da flora e da fauna. O mesmo ocorreu no ambiente costeiro e marinho, onde se observaram danos crônicos. Nos ecossistemas aquáticos, tanto de água doce quanto marinhos, as condições físico-químicas da água e do sedimento apresentaram

uma tendência de retornar aos valores anteriores ao desastre, porém, a resposta em grande parte dos organismos é oposta. Devido à condição que os organismos apresentam de acumular EPTs, e passá-los aos níveis superiores da cadeia alimentar a tendência é que esse dano ligado à contaminação dos organismos piore com o tempo. Especialmente em animais de topo da cadeia alimentar, e aqueles de vida longa, esse acúmulo de contaminantes pode se refletir como danos aos organismos em longo prazo, podendo não ser visíveis ainda, mesmo após aproximadamente quatro anos do desastre, mas com potencial de causar prejuízos nos próximos anos. Dessa forma, é imprescindível o monitoramento desses organismos a longo prazo.

Os danos elencados como prioritários à sociedade foram aqueles relacionados à água e aos pescados. O uso da água doce foi comprometido, sendo que o abastecimento das comunidades foi interrompido em vários locais em toda a extensão do rio Doce, em alguns dos quais o abastecimento ainda não foi retomado.

Já para os animais que são utilizados como recurso pesqueiro, no ambiente marinho, os riscos da contaminação à saúde da população levaram à proibição da pesca, além do armazenamento, distribuição e comercialização do pescado em geral (BRASIL, 2016). As restrições perduram até o momento deste relatório em busca de garantir a segurança da saúde humana. Além de garantir a saúde das pessoas, a restrição da pesca pode auxiliar no processo de restauração dos ecossistemas afetados pelo desastre, considerando que a região sofre com processos de pesca ilegal e sobrepesca.

No âmbito do patrimônio cultural, os bens arqueológicos foram os mais afetados pelos efeitos mecânicos do desastre da Samarco, uma vez que foram soterrados. Além disso, houve perturbação de camadas sedimentares associadas a esses bens. No subcampo dos bens materiais houve um maior equilíbrio entre ações mecânicas e emergenciais/reparatórias, essas últimas relacionadas, sobretudo, à pressão acarretada aos bens edificados, móveis e paisagísticos por conta da circulação de maquinários em localidades com a presença desses bens, bem como aos problemas evidenciados na condução das atividades na Reserva Técnica da Fundação Renova. As referidas ações emergenciais/reparatórias também são significativas no subcampo do patrimônio imaterial, pois acarretaram em tensões e disputas nas comunidades, assim como em dúvidas quanto ao que será do futuro, gerando insegurança e sofrimento social, bem como prejudicando a continuidade de diversas práticas culturais. As interações físicas, químicas e/ou biológicas têm um maior efeito nos bens imateriais, devido ao fato de se tratarem das origens de danos nos C2 e C3, relacionados à qualidade das águas. O “medo da água”, recorrente nos relatos coletados, tem afetado de forma muito sensível diferentes práticas culturais.

Os danos ao patrimônio cultural, que compõe modos de vida e práticas, acarretaram a alteração ou destruição de cursos de vida, o que demonstra a necessidade de um olhar amplo e integrado para o processo do desastre, ocasionado pelo rompimento da Barragem de Fundão, ainda em continuidade.

Há que se considerar que um desastre ambiental não é um evento único, mas um processo que se desenrola ao longo do tempo e se propaga no espaço geográfico. Desta forma, ressalta-se que grande parte dos danos socioambientais aqui relatados ainda continuam a ocorrer, sendo que parte apresenta tendência de piora, podendo se agravar ainda mais. Considerando, ainda, a abrangência do desastre e a complexidade de ecossistemas atingidos, não é possível afirmar que o meio ambiente retornará às condições existentes antes do desastre. Os ambientes afetados são resilientes e com

os resultados obtidos até o momento entende-se que eles alcançarão um novo estado de equilíbrio. Porém, esse novo estado abrangerá a existência de rejeitos de mineração onde antes não havia, logo dificilmente esses ambientes retornarão integralmente às condições pré-desastre.

Ressalta-se, também, que nesses quatro anos após o desastre não houve ainda um grande evento de cheia, mesmo considerando o período chuvoso de janeiro de 2016. Logo que ocorra, os efeitos do desastre poderão voltar a ser sentidos, uma vez que o rejeito esteja disponível para ser transportado no ambiente aquático. Dessa forma, é fundamental garantir a retenção dos rejeitos que se encontram fora da calha dos rios e a manutenção de monitoramento sobre os ambientes afetados.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Encarte Especial Sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana MG**. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília, DF: ANA, 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução - RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013. **Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos**, p. 11, 2013.
- ALBINO J.; SUGUIO K. Sedimentation processes and beach morphodynamics active at the Doce River mouth, Espírito Santo State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 82: 1031-1044, 2010.
- ALLONDA AMBIENTAL. **Relatório técnico de consolidação das investigações geológico-geotécnicas realizadas nos diques intermediários e principal – Fazenda Floresta**. ALL-4458-E-RT-GEO-201. Fundação Renova, 2017.
- AMARAL, T. S.; FERREIRA, M. M.; LOUREIRO FERNANDES, L. Variação sazonal da comunidade zooplantônica em um recife marinho, Vitória – 8 B, Guarapari, Espírito Santo. In: **Congresso de Ecologia do Brasil**. Anais... Caxambu: Sociedade de Ecologia do Brasil, 2007.
- ANDRADE, C. A. **Estudo ecotoxicológico no trecho médio da Bacia do Rio Doce – MG**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 219p. 2003.
- ANTUNES, A. **Impactos de enchente, dragagem de aprofundamento e dinâmica estuarina sobre a ictiofauna do estuário do Rio Itajaí-Açu, SC, Brasil**. Dissertação de Mestrado, Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, 2010.
- APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23rd ed. Washington, 2017.
- APLYSIA SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Parecer técnico sobre a qualidade do pescado no rio Doce e zona costeira adjacente**. Relatório Técnico nº867/2018. Revisão 1, 2018.
- ARAÚJO, F. G.; AZEVEDO, M. C. C.; SILVA, M. A.; PESSANHA, A. L. M.; GOMES, I. D.; CRUZ-FILHO, A. G. Environmental influences on the demersal fish assemblages in the Sepetiba Bay, Brazil. **Estuaries**, 25(3):441-450, 2002.
- ARAÚJO, F. G.; CRUZ-FILHO, A. G.; AZEVEDO, M. C. C.; SANTOS, A. C. A.. Estrutura da comunidade de peixes demersais da baía de Sepetiba, RJ. **Revista Brasileira de Biologia**, 58(3):417-430, 1998.
- BAGGIO, R. A., ARAUJO, S. B. L., AYLLÓN, D., BOEGER, W. A. Dams cause genetic homogenization in populations of fish that present homing behavior: Evidence from a demogenetic individual-based model. **Ecological Modelling**, 384: 209-220, 2018.
- BARBOSA, F. A. R.; CALLISTO, M.; GALDEAN, n. The diversity of benthic macroinvertebrates as an indicator of water quality and ecosystem health: a case study for Brazil. **Aquatic Ecosystem Health and Management**, 4:51-59, 2001.
- BARLETTA, M.; AMARAL, C. S.; CORRÊA, M. F. M.; GUEBERT, F.; DANTAS, D. V.; LORENZI, L.; SAINT-PAUL, U. Factors affecting seasonal variations in demersal fish assemblages at an ecocline in a tropical-subtropical estuary. **J. Fish Biol.**, 73:1314-1336, 2008.
- BERNARDINO, A. F.; PAGLIOSA, P.R.; CHRISTOFOLETTI, R.A.; BARROS, F.; NETTO, S.S.; MUNIZ, P. & LANA, P.C. Benthic estuarine communities in Brazil: moving forward to long term studies to assess climate change impacts. **Brazilian Journal of Oceanography**, 64(sp2):81-96, 2016.
- BEZAMAT, C.; WEDEKIN, L. L.; SIMÕES-LOPES, P. C. Potential ship strikes and density of humpback whales in the Abrolhos Bank breeding ground, Brazil. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, 25:712–725, 2015.
- BIANCHINI, A. **Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação**. Primeira Expedição do Navio de pesquisa Soloncy Moura do CEPISUL/ICMBio. Relatório Técnico. Universidade Federal do Rio Grande. Instituto de Ciências Biológicas. Rio Grande do Sul. 62 pp. 2016.

- BIANCHINI, A.; BASTOS, A.C.; TEIXEIRA, E.C.; CASTRO, E.V. & SANTOS, J.A.D. Relatório Semestral. Anexo 1. Seção 3. **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I.** Fundação Espírito-Santense de Tecnologia. Rede Rio Doce Mar. 315pp. 2019.
- BIOS CONSULTORIA E SERVIÇOS AMBIENTAIS. **Monitoramento da ictiofauna na área de influência da Usina Hidrelétrica de Aimorés, Rio Doce – Aimorés/MG.** Relatório Consolidado, 2013. 93p.
- BORGHETTI, n. B.; BORGGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: A Verdadeira Integração dos Países do Mercosul.** Curitiba: Ed. Roberto Marinho, 2004.
- BORRINI-FEYERABEND et al. **Governance of Protected Areas: From understanding to action.** 124p. IUCN. Gland, Switzerland, 2012.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre condições e padrão de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução – RE Anvisa nº 989 de 15 de abril de 2016. **Determina a proibição do armazenamento, da distribuição e da comercialização de pescado oriundo da atividade pesqueira desenvolvida no mar na região de Barra do Riacho em Aracruz/ES até Degredo/Ipiranguinha em Linhares/ES, dentro dos 25 m de profundidade.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15, abr. 2016.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 03/1990, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial da União,** Brasília, 22 ago. 1990. Seção 1, p. 15937-15939.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 420/2009, de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.** Brasília: Diário Oficial da União, 30 dez 2009, p. 81-84.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 454, de 1 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial da União,** Brasília, DF, 8 nov. 2012.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Decreto Nº 6.660, de 21 de Novembro de 2008 que **Regulamenta dispositivos da Lei Nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica.** Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>>. Acessado em 13 de fevereiro de 2014.
- BRASIL. Justiça Federal. Processo nº 0002571-13.2016.4.02.5004 (2016.50.04.002571-0). **Ação Civil Pública.** Autor: Ministério Público Federal. Data de Início: 03/02/2016. Disponível em:< <https://www.jusbrasil.com.br/processos/94446655/processo-n-0002571-1320164025004-do-trf-2>>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF) Procuradoria da República em Minas Gerais. LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce.** Relatório de linha-base: volume I - meio físico. Curitiba: Lactec, 2017a.
- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF) Procuradoria da República em Minas Gerais. LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce.** Relatório de Linha-Base: Volume II – Meio Biótico e Bens Arqueológicos e Culturais. Curitiba: Lactec, 2017b.
- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF) Procuradoria da República em Minas Gerais. LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce.** Relatório Consolidado Bens Arqueológicos e Culturais. Curitiba: Lactec, 2018a.
- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF) Procuradoria da República em Minas Gerais. LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce.** Relatório de Revisão de Linha-Base: Volume Ambientes Costeiros. Curitiba: Lactec, 2018b.
- BRASIL. **Programa Nacional de Áreas Protegidas.** Brasília, DF: MMA, 2007.

- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF) 4ª Câmara de Coordenação e Revisão. **Valoração de danos em matéria de meio ambiente e patrimônio cultural**. Série Manuais de Atuação, 2. Brasília: MPF, 2014.
- BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008.
- BRITO, I. A., LÓPEZ-BARREIRA, E. A. L., ARAUJO, S. B. L. A., RIBEIRO, C. A. O. Modeling the exposure risk of the silver catfish *Rhamdia quelen* (Teleostei, Heptapteridae) to wastewater. **Ecological Modelling**, 347:40-49. 2017.
- BROMENSCHENKEL, v. C. S. **Estimativa da população de *Ucides cordatus* em reserva de desenvolvimento sustentável (RDS)**. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, p. 71, 2016.
- BUCHMAN, M. F. **NOAA Screening Quick Reference Tables**. NOAA OR &R Rep. 2008.
- CADDY, J.F. & GARIBALDI, L. Apparent changes in the trophic composition of world marine harvests: the perspective from the FAO capture database. **Ocean Coast. Manage**, 43:615-655, 2000.
- CAL. CONSULTORIA AMBIENTAL LTDA. **Composição da ictiofauna de alguns corpos de água entre Aracruz e Linhares**. Linhares Geração. Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Governo do Estado do Espírito Santo. 2001. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/>>. Acesso em 23. jun. 2019.
- CAMPO, L. ***Mytella guyanensis***. Disponível em: < <https://www.usgs.gov/media/images/mytella-guyanensis-shell-valve-external-view>>. Acesso em: 01 de nov. de 2019.
- CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C.; BAER, A. **Migratory fishes of South America. Biology, fisheries and conservation status**. Canadá: World Fisheries Trust. 2003.
- CEA. **Diagnóstico Ambiental da Região do Delta do Rio Doce e Várzeas Litorâneas do Suruaca no Município de Linhares, no Estado do Espírito Santo**. 2001.
- CETESB. **Norma Técnica L5.309 mai/2003: Determinação de bentos de água doce – macroinvertebrados: métodos qualitativo e quantitativo**. São Paulo: CETESB: 16 p. 2003.
- CETESB. **Protocolo para o biomonitoramento com as comunidades bentônicas de rios e reservatórios do estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 113 p. 2012.
- CLARKE, K. R.; WARWICK, R. M. **Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation**. 2nd edition. PRIMER-E: Plymouth, 2001.
- CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce e planos de ações para as unidades e planejamento e gestão de recursos hídricos no âmbito da bacia do rio Doce: relatório final**. Consórcio Ecoplan-Lume, 2010.
- CONTI, R. C.; NALESSO, R. C. Status of the population structure of mangrove crab *Ucides cordatus* (Decapoda: Ocypodidae) on the Piraquê-Açu river estuary, Espírito Santo, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, 58:81-92, 2010.
- COPPE. **Avaliação dos impactos da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana nove meses após o desastre**. Capítulo 5 - Avaliação dos Danos Ambientais Decorrentes do Rompimento das Barragens ao Longo da Bacia do Rio Doce e Zona Costeira Adjacente - Biodiversidade. Relatório Técnico, COPPE/UFPR, Rio de Janeiro/RJ, 2017.
- COPPTEC, 2017. **Avaliação dos danos ambientais decorrentes do rompimento das barragens ao longo da bacia do rio Doce e Zona Costeira adjacente – Biodiversidade. Relatório Técnico**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Cap.5. 70pp. 2017.
- CPMAIS – SERVIÇOS DE CONSULTORIA EM MEIO AMBIENTE LTDA. **12ª Campanha de monitoramento marinho – Estaleito Jurong Aracruz**. Relatório Técnico, CPRT 022/15, 383p., 2015.
- CREPALDI, M. O. S. **Etnobotânica na Comunidade Quilombola Cachoeira do Retiro, Santa Leopoldina, Espírito Santo, Brasil**. Dissertação de mestrado – Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro/Escola Nacional de Botânica Tropical, 2007.

- CTA Serviços em Meio Ambiente Ltda. **Relatórios Trimestrais (março, julho e novembro de 2016) do Monitoramento da Ictiofauna na região marinha adjacente à foz do rio Doce, Linhares/ES.** Relatórios Técnicos 1-3, CTA/SAMARCO, Vitória/ES, 2016.
- CUCHEROUSSET J.; OLDEN J. D. Ecological impacts of non-native freshwater fishes. **Fisheries**, 36(5):215-230, 2011.
- CULVERHOUSE, P.F.; WILLIAMS, R.; BENFIELD, M.; FLOOD, P.R. et al. **Automatic image analysis of plankton: future perspectives.** Mar. Ecol. Prog. Ser., n.312, p.297-309, 2006. Instituto de biologia da UFRJ. Disponível em: <http://www.intranet.biologia.ufrj.br/lizi/cat.zoo/Copepoda/Calanoida/Paracalanus-quasimodo/organismo.html>>Acesso em: 24 nov 2019.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Títulos Minerários do Estado de Minas Gerais e Espírito Santo.** Disponível em: <<http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>>. Acessado em: 15 maio 2017. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0013/001325/132540por.pdf>>.
- DORR, J. v. n. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **USGS/DNPM. Professional Paper**, 641-A:1-110, 1969.
- DUARTE, S., ARAUJO, F.G. Fecundity of the *Hypostomus affinis* (Siluriformes, Loricariidae) in the Lajes Reservoir, Rio de Janeiro, Brazil. **Revista de Biologia Tropical**, 50:193-197. 2002.
- DUPONCHELLE, F., LINO, F., HUBERT, N., PANFILI, J., RENNO, J.-F., BARAS, E., TORRICO, J.P., DUGUE, R., NUÑEZ, J. Environment-related life-history trait variations of the Red-bellied Piranha *Pygocentrus nattereri* in two river basins of the Bolivian Amazon. **Journal of Fish Biology**, 71:1113–1134. 2007.
- EAKINS, R. J. ***Astyanix bimaculatus*.** Fish Base. Disponível em: <https://www.fishbase.in/photos/PicturesSummary.php?StartRow=2&ID=4475&what=species&Tot Rec=4>. Acesso em 31 de outubro de 2019.
- ECONSERVATION. **Análise Estatística dos Dados do Programa de Monitoramento da Comunidade do Zoobentos do Rio Doce.** 2016
- ESCOBAR, H. Mud tsunami wreaks ecological havoc in Brazil. **Science**, 350(6265):1138-1139, 2015.
- ESPINDOLA, H. S.; CAMPOS, R. B. F.; LAMOUNIER, K. C. C.; SILVA, R. S. Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, 5(3):74-100, 2016.
- EVANGELISTA H.; VALERIANO C.; SANTOS E.A; VAZ G.; NETO C.; NOGUEIRA J.S; LICINIO M.V.; RIBEIRO J.N.; PEREIRA M.G.; RIBEIRO A.V.; CALDERON E.N.; CASTRO C.B.; GUEBERT F.; JEROZOLIMSKI R.; CRUZ E.; CAJUEIRO L.L.M.; RODRIQUES A. **Estudo preliminar sobre a detecção da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre o Parque Nacional dos Abrolhos-BA, para o evento de 5-6 de Janeiro 2016.** 2016. Disponível em:<http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/publicacoes/Documentos/DCOM_relatorio_UERJ_versao_final.pdf>. Acesso em julho de 2018.
- EVANGELISTA H.; VALERIANO C. **Sumário das análises de isótopos radiogênicos de Sr e Nd em sedimentos da foz do rio Doce-ES e do Parque Nacional dos Abrolhos-BA (antes e depois do rompimento da barragem de rejeitos da SAMARCO em Mariana-MG).** 2017. Disponível em: <http://www.consultaesic.cgu.gov.br/busca/dados/Lists/Pedido/Attachments/612349/RESPOSTA_PEDIDO_02680002082201705%20-%20sumario_de_analises_UERJ_21Set2017.pdf>. Acesso em janeiro de 2019.
- FABRÍCIO, J. v. F.; SAYÃO, A. S. F. J.; MAIA, P. C. A. **Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções.** Rio de Janeiro, 2006. 170p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em:<<https://www.maxwell.vrac.pucrio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=8888@1>>.
- FARUG – FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE. **Relatório Técnico-Científico.** Contrato 105/2016. 2016. Etapa I – Análise de contaminantes. 63 pp. http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/Rio_Doce/dcom_relatorio_contrato_105_2016.pdf . Acesso em, 23 de abril de 2018.
- FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D.C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR, P. M.; MILLAN, v. E. G.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A.; SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.

- FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2011/2012 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012. Disponível em: < <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf> >.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Metodologia provisional para evaluation de la degradacion de los suelos**. Roma: FAO/PNUMA: UNEP: UNESCO, 1980. 86 p.
- FREELAND, J. L.; PETERSEN, S. D.; KIRK, H. *Molecular Ecology* (2nd edn). Wiley-Blackwell, Oxford. Strategies for the conservation of endangered freshwater pearl mussels (*Margaritifera margaritifera* L.): A synthesis of conservation genetics and ecology. **Hydrobiologia**, 644(1): 69–88. 2011.
- FREITAS, C. M.; SILVA, M. A.; MENEZES, F. C. O desastre na barragem de mineração da Samarco: Fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. **Ciência e Cultura**, 68(3):25-30, 2016.
- FROESE, R.; PAULY, D., **Fishbase**. Electronic Publication. Disponível em: <<http://www.fishbase.org>>. Acesso em setembro de 2019.
- FUNDAÇÃO BIODIVERSITAS. **Elaboração da Lista das Espécies da Flora de Importância Econômica da “Região Sudeste” Brasileira**. Relatório Final. Brasília, DF, 2006.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE (FAURG). **Relatório técnico-científico, contrato 105/2016. Etapa 5: Análise comparativa sobre os resultados entre as expedições Soloncy Moura I e II e as amostras coletadas antes do evento**, p. 16, 2016.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Diretrizes empresariais para a valoração não econômica de serviços ecossistêmicos culturais**. Versão 1.0 / Mario Monzoni ... [et al.]. – São Paulo: GVces, 2016.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **Monitoramento das intervenções prioritárias – Relatório de Resultados do 1º ano de monitoramento**. 2018, 663 p.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **Monitoramento reprodutivo das tartarugas marinhas na planície costeira do rio Doce**. Relatório anual – Agosto/2017 a Julho/2018. Linhares: Fundação Pró TAMAR, 29p., 2018.
- GARBARINO, J. R.; HAYES, H. C.; ROTH, D. A.; ANTWEILER, R. C.; BRINTON, T. I.; TAYLOR, H. E. **Heavy Metals in the Mississippi River**, U.S. Geological Survey Circular, 1133, Reston, Virginia, 1995.
- GAVELLO J. C. Revision of genus *Steindachneridion* (Siluriformes: Pimelodidae). **Neotrop. Ichthyol.** 3 607–623. 10.1590/S1679-62252005000400018. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-62252005000400018>. Acesso em julho de 2019.
- GEOPROJETOS e CVRD. Geoprojetos Engenharia; Companhia Vale do Rio Doce. Usina Hidrelétrica Candonga, **Relatório do Projeto Básico**. Geoprojetos, 2000.
- GIAIA - GRUPO INDEPENDENTE DE AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL. **Análises das análises qualitativas da comunidade Zooplânctônica – 3ª Expedição à Bacia do Rio Doce**. 2016.
- GODINHO, H. P; GODINHO, A. L (Orgs). **Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais**. Belo Horizonte: PUC Minas. 302 p. 2003.
- GOES, P.; BRANCO, J. O.; PINHEIRO, M. A. A.; BARBIERI, E.; COSTA, D.; FERNANDES, L. L. Bioecology of the uçá-crab, *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763) in Vitória Bay, Espírito Santo state, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, 58:153-163, 2010.
- GOLDER ASSOCIATES. **Avaliação dos Impactos no Meio Físico Resultantes do Rompimento da Barragem de Fundão**. 2732 p. 2016.
- GOLDER ASSOCIATES. **Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistema de Água e Sedimentos**. Abril, 2017.
- GOMES, L.E.O.; CORREA, L.B.; SÁ, F.; NETO, R.R.; BERNARDINO, A.F. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, 120:28-36, 2017.
- GRASS DEVELOPMENT TEAM. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2., 2017**. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document: Disponível em: <<http://grass.osgeo.org>>.
- GUALANDI, R. L. S. **Distribuição espaço-temporal da comunidade de Copepoda no entorno do RAM Victory-8B**. 2007. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Espírito Santo, Vitória.

- GUEVARA, Y. Z. C. et al. Reference Values of Soil Quality for the Rio Doce Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], 42:1-16, 2018.
- HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. **Water Research**, 14(8):975-1001, 1980.
- HALL, S. J.; GREENSTREET, S. P. R. Taxonomic distinctness and diversity measures: responses in marine fish communities. **Marine Ecology Progress Series**, 166:227-229, 1998.
- HEINO, J.; MYKRA, H.; HAMALAINEN, H.; AROVIITA, J.; MUOTKA, T. Response of taxonomic distinctness and species diversity indices to anthropogenic impacts and natural environmental gradients in stream macroinvertebrates. **Freshwater Biology**, 52(9):1846-1861, 2007.
- HOLOS ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA. **Síntese dos estudos sobre a ictiofauna na área de influencia da UHE Aimorés no período entre 1997 e 2007**. Consórcio UHE Aimorés. Relatório, 2007. 41p.
- HYLAND, J.; BALTHIS, L.; KARAKASSIS, I.; MAGNI, P.; PETROV, A.; SHINE, J.; VESTERGAARD, O.; WARWICK, R. Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos. **Mar Ecol Prog Ser**, 295:91-103, 2005.
- IBAMA. **Nota Técnica Nº 001/2016**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF: MMA, 2016.
- ICOMOS – BRASIL; IEDS – Instituto de Estudos do Desenvolvimento Sustentável; PPACPS - Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável **Dossiê de Tombamento de Bento Rodrigues**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, maio de 2019.
- ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Relatório da Segunda Expedição para avaliação dos efeitos da pluma de sedimentos oriunda da foz do rio Doce sobre o ambiente marinho no estado do Espírito Santo ao sul da Bahia. **Relatório Técnico da Segunda Expedição**. 2016. 19 pp. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/publicacoes/Documentos/ICMBio_Relatorio_do_segundo_cruzeiro_de_levantamento_impactos_lama_biodiversidade_marinha_ES_BA_31mai2016.pdf . Acesso em, 20 de abril de 2018.
- IGM - Instituto Geológico e Mineiro. Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro. Instituto Geológico e Mineiro. (2001).
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Laudo técnico preliminar dos impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2016.
- INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). **Educação Patrimonial: Inventários Participativos. Manual de Aplicação**. Brasília: DAF/IPHAN, 2016.
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Parecer técnico: processo 3524/2008**. Belo Horizonte: IGAM, 2008. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/cerh/ctig/3524-2008-parecer-tecnico.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2017.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **World Soil Resources Reports No. 106**. FAO, Rome, 2015.
- JAGER, H. I. Individual variation in life history characteristics can influence extinction risk. **Ecological Modelling**, 144:61-76. 2001.
- JAMES, H. L. Sedimentary facies of iron-formation. **Economic Geology**, 49:235 -293, 1954.
- JESUS, H.C.; AMORIN, N.R.; ALONSO, M.K. **Investigação da poluição da Baía de Vitória – ES através da análise de metais, colimetria e agrotóxicos em sururu de mangue (*Mytella guyanensis*)**. XLVI Congresso Brasileiro de Química. Área de Química Ambiental. Salvador (BA). Setembro 2006.
- JOHNSON, R. K., WIEDERHOLM, T., ROSENBERG, D.M. Freshwater biomonitoring using individual organisms, populations and species assemblages of benthic macroinvertebrates. In: Rosenberg D.M., Resh v. H. (eds.), **Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates**, Chapman Hall, 488p., 1993.

- JOYEUX, J. C.; CAMPANHA FILHO, E. A.; JESUS, H. C. **Trace metal contamination in estuarine fishes from Vitória Bay, ES, Brazil. Brazilian Archives of Biology and Technology**, 47(5):765-774, 2004.
- JUNQUEIRA, M. V.; AMARANTE, M. C.; DIAS, C. F. S.; FRANÇA, E. S. Biomonitoramento de qualidade das águas da Bacia do Alto Rio das Velhas (MG/Brasil) através de macroinvertebrados. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 12:73-87, 2000.
- KNAPP, R. A.; MATTHEWS, K. R. Non-native fish introductions and the decline of the Mountain Yellow-Legged Frog from within protected areas. **Conservation Biology**, 14:28–438, 2000
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. F. J. **Numerical ecology**. Elsevier, 2012.
- LEONARD, D.R.P.; CLARKE, R.K.; SOMERFIELD, P.J.; WARWICK, R.M. The application of an indicator based on taxonomic distinctness for UK marine biodiversity assessments. **Journal of Environmental Management**, 78:52–62, 2006.
- LEONARDO, F.; IZOTON, J.; VALIM, H.; CREADO, E.; TRIGUEIRO, A.; SILVA, B.; DUARTE, L.; SANTANA, n. **Rompimento da barragem de Fundão (SAMARCO/VALE/BHP BILLITON) e os efeitos do desastre na foz do Rio Doce, distritos de Regência e Povoação, Linhares (ES)**. Relatório de Pesquisa. Vitória: GEPEDES. 2017. 114 p.
- LEOPOLD, L. B. **A View of the River**. Cambridge: Harvard University Press, 298 p. 1994.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Professional Paper: **USGS Numbered Series**, Washington, v. 252, 57 p. 1953.
- LIMA, L. P. Z.; POMPEU, P. S.; SUZUKI, F. M.; CARVALHO, M. T. Dinâmica espacial de lagoas marginais presentes no rio Aiuruoca, MG, em períodos de cheia e seca. **Revista bras. Bioci.**, 8(3):253-256, 2010
- MAGRIS, R. A.; MARTA-ALMEIDA, M.; MONTEIRO, J. A. F.; BAN, n. E C. A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil). **Science of the Total Environment**, 659:828-840, 2019.
- MARINHA DO BRASIL. **Levantamento Ambiental Expedito em Regência/ES**. Instrução Especial Simplificada LH-035/15. Relatório de Levantamento Hidrocnográfico. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Marinha do Brasil, Vitória. 137pp., 2016.
- MARQUES, M. G. S. M.; FERREIRA, R. L.; BARBOSA, F. A. R. A comunidade de macroinvertebrados aquáticos e características limnológicas das lagoas Carioca e da Barra, Parque Estadual do Rio Doce, MG. **Rev. Bras. Biol.**, 59(2):203-210, 1999.
- MARTA-ALMEIDA, M.; MENDES, R.; AMORIM, F. N.; CIRANO, M.; DIAS, J. M. Fundão Damcollapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. **Mar Pollut Bull.**, 15;112(1-2):359-364. 2016.
- MATTHEWS-CASCON, H.; BEZERRA, L.E.A.; BARROSO, C.X.; RABAY, S.G.; MOREIRA, A.C.; ROCHA, V.P. & SOARES, M.O. Marine benthic communities affected by the Doce river (southwestern Atlantic): Baseline before a mining disaster. **Marine Pollution Bulletin**. 135:1000-1006, 2018.
- MAXIMIANO, L. A. **Considerações sobre o conceito de paisagem socioambiental**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba – PR. 2002.
- MELO, v. F.; ALLEONI, L. R. **Química e mineralogia do solo**: parte I - conceitos básicos. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. 695 p.
- MENEZES-SILVA, S. **Diagnóstico das Restingas do Brasil**. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2002.
- MEZZOMO, M. D. M. **Considerações sobre o termo “paisagem” segundo o enfoque Geoecológico**. In: Planejamento da Paisagem como subsídio para a participação popular no desenvolvimento urbano. Estudo aplicado ao bairro de Santa Felicidade – Curitiba / PR. Organização de João Carlos Nucci. Curitiba: LABS/DGEOG/UFPR, P. 277. 2010.
- MICRA Microbiologia e Controle Ambiental. **Programa de monitoramento limnológico e de qualidade de águas da Usina Hidrelétrica Eliezer Batista. Relatório consolidado – período março a dezembro 2013**. Ponte Nova, MG: Julho, 2013.
- MICRA Microbiologia e Controle Ambiental. **Programa de monitoramento limnológico e de qualidade de águas da Usina Hidrelétrica Eliezer Batista. Relatório consolidado – período março a dezembro 2018**. Ponte Nova, MG: Outubro, 2018.

- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa nº 166 de 29 de junho de 2011. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. ANEXO I **Estabelece lista de valores orientadores para solos e água subterrânea**. Belo Horizonte, 2011
- MISHIMA, M.; TANJI, S. Fatores ambientais relacionados à distribuição e abundância de bagres marinhos (Osteichthyes, Ariidae) no complexo estuarino-lagunar de Cananéia (25ºS, 48ºW). **Boletim do Instituto da Pesca**, 10:17-27, 1983.
- MORETTI, M. S.; CALLISTO, M. Biomonitoring of benthic macroinvertebrates in the middle Doce River watershed. **Acta Limnol. Bras.**, 17(3):267-281, 2005.
- NALESSO, R.C.; JOYEUX, J.C.; QUINTANA, C.O.; TOREZANI, E. & OTEGUI, A.C.P. Soft-bottom macrobenthic communities of the Vitória Bay estuarine system, South-eastern Brazil. **Braz. J. Oceanogr.** 53(1/2):23-38, 2005.
- NETELER, M. et al. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS. **Environmental Modelling and Software**, 31:124–130, 2012
- NIEBUHR, B. B. **Combinando ecologia de paisagens e ecologia do movimento para entender conectividade e processos ecológicos**. 2018. 100 f. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2018.
- NIENCHESKI, L. F.; MACHADO, E. C.; SILVEIRA, I. M. O.; FLORES MONTES, M. J. Metais traço em peixes e filtradores em quatro estuários da costa brasileira. **Tropical Oceanography**, 42(1):94-106, 2014.
- NORKKO, A.; THRUSH, S. F.; HEWITT, J. E.; CUMMINGS, v. J.; NORKKO, J.; ELLIS, J. I.; FUNNELL, G. A.; SCHULTZ, D.; MACDONALD, I. Smothering of estuarine sandflats by terrigenous clay: the role of wind-wave disturbance and bioturbation in site-dependent macrofaunal recovery. **Mar. Ecol. Progr. Ser.**, 234:23-41, 2002
- ODUM, E. P. **Fundamentos de Ecologia**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 927, 2001.
- OTTONI, M. v. et al. Hydrophysical database for Brazilian soils (HYBRAS) and pedotransfer functions for water retention. **Vadose Zone Journal**, [s. l.], 17:1-17, 2018.
- PACHECO, A. A. **Avaliação da contaminação em solos e sedimentos da bacia hidrográfica do Rio Doce por metais pesados e sua relação com o fundo geoquímico natural**. 2015. Tese (Doutorado em Scientiae) – Faculdade de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2015.
- PARACATU SENTE SAUDADES DE ÁGUAS CLARAS. **A SIRENE: para não esquecer**, A (Jornal). Ouro Preto: Sempre Editora e UFOP. Fev. de 2018.
- PARKER, T. A. et al. Ecological and distributional databases. In: STOTZ, Douglas F. et al. **Neotropical birds: ecology and conservation**. University of Chicago Press, 1996.
- PASTOROK, R. A.; BARTELL, S. M.; FERSON, S. **Ecological modeling in risk assessment: Chemical effects on populations, ecosystems, and landscapes**. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, USA. 2002.
- PATTROL. **Ensaio de laboratório**. PAT-RT-LAB-1893.18-0001. Fundação Renova. 2017.
- PEIXOTO, J. P. OORT, A. H. *Lê cycle de Peau et lê*. La Recherche. Spécial: L'eau, v.21, 1990.
- PEREIRA, A. A.; VAN HATTUM, B.; DE BOER, J.; VAN BODEGOM, P. M.; REZENDE, C. E.; SALOMONS, W. Trace elements and carbon and nitrogen stable isotopes in organisms from a Tropical Coastal Lagoon. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, 59:464–477, 2010.
- PETERSON, A. T. *et al.* **Ecological niches and geographic distributions**. USA: Princeton University Press, 2011.
- PETROBRAS. Atividade de perfuração marítima na área geográfica do Espírito Santo: Projeto de caracterização ambiental regional da Bacia do Espírito Santo e parte norte da Bacia de Campos. Relatório Final, v.1, 20015.
- PETROBRAS. **6º Relatório Anual do Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo**. Processo Administrativo Nº 02022.001407/2010 CGPEG/DILIC/IBAMA. Rio de Janeiro. Elaborado pela Scitech – Environmental Science and Technology para a Petrobras, p. 431, 2017.

- PETROBRAS. **8º Relatório Anual do Projeto de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo**. Volume único. 403p. 2019.
- PETROBRAS. **Relatório Final do Projeto de Caracterização Ambiental Regional da Bacia do Espírito Santo e Parte Norte da Bacia de Campos (PCR-ES/AMBES)**. 2015.
- PIMENTA, v. ***Ucides cordatus***. Disponível em: < http://www.planetainvertebrados.com.br/index.asp?pagina=especies_ver&id_categoria=25&id_subcategoria=24&com=1&id=178&local=2>. Acesso em: 01 de nov. de 2019.
- PINHEIRO, H.T.; MARTINS, A. S.; ARAUJO, J.N. Demersal fish communities may indicate priority areas for marine resources conservation. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, 6(3):210-221, 2011.
- PINTO-COELHO, R. M. Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: O rompimento da Barragem de Fundão, Mariana (MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico UFMG**, 24(1):16-43, 2015.
- POTAMOS. Potamos Engenharia e Hidrologia Ltda. Caracterização hidrológica e hidrossedimentológica da bacia de contribuição ao reservatório - Relatório técnico. In: **Avaliação do impacto das frentes de assoreamento nas curvas de remanso do reservatório da UHE Candonga**. Belo Horizonte: Potamos, CH2M & Fundação Renova, 2017.
- PROJETO CARANGUEJO. **Relatório final do projeto Bioecologia do caranguejo *Ucides cordatus* e caracterização sócio-econômica e de saúde dos catadores de caranguejo no Espírito Santo**. Vitória: FNMA/UFES, p. 375, 2007.
- QUARESMA, V.S.; CATABRIGA, G.; BOURGUIGNON, S.N.; GODINHO, E.; BASTOS, A.C. Processos sedimentares modernos ao longo da plataforma continental adjacente à desembocadura do rio Doce. **Brazilian Journal of Geology**, 45:635-644, 2015.
- QUEIROZ, H.; SOBANSKI, M.; MAGURRAN, A. Reproductive strategies of Red-bellied Piranha (*Pygocentrus nattereri* Kner, 1858) in the white waters of the Mamirauá flooded forest, central Brazilian Amazon. **Environmental Biology of Fishes**. 2010
- REBOUÇAS, A. C. Diagnóstico do setor de hidrogeologia. Caderno técnico da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS-p. 46. São Paulo - SP. 1996.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ v. V. H. (ed.); COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, 1999, 359 p.
- RIBEIRO, J. W.; SANTOS, J. S. DOS; DODONOV, P.; et al. Landscape Corridors (LSCorridors): a new software package for modeling ecological corridors based on landscape patterns and species requirements. **Methods in Ecology and Evolution**, p. 1–19, 2017.
- RIGUEIRA, D. M. G., ROCHA, P. L. B., MARIANO-NETO, E. Forest cover, extinction thresholds and time lags in woody plants (Myrtaceae) in the brazilian atlantic forest: resources for conservation. **Biodiversity and conservation**, 2013.
- ROCHA, M. L. C. F. **Indicadores Ecológicos e Biomarcadores de Contaminação Ambiental na Ictiofauna da Baía de Santos e do Canal de Bertioga, São Paulo, Brasil**. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2009.
- RODRIGUES, A. S. D. L. **Caracterização da bacia do rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil: avaliação geoquímica ambiental e proposição de valores de background**. 2012. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2012.
- ROSSI-SANTOS, M. R.; WEDEKIN, L. L.; SOUSA-LIMA, R. S. Distribution and habitat use of small cetaceans in the Abrolhos Bank, Eastern Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Mammals**, 5(1):23-28, 2006.
- RUDORFF, N.; RUDORFF, C. M.; KAMPEL, M.; ORTIZ, G. Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. ISPRS J. Photogramm. **Remote Sens.** 145:349–361. 2018
- SAADI, A.; CAMPOS, J. C. F. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015-Mariana-MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, 24(1/2):63-103, 2015.

- SANTHOSH, B.; ANIL, M. K.; MUHAMMED ANZEER, F.; ANEESH, K. S.; MIJO, v. A.; GOPAKUMAR, G.; RANI, M. G.; GOPALAKRISHNAN, A.; UNNIKRISHNAN C. (Eds.). **Culture techniques of marine copepods**. ICAR-Central Marine Fisheries Research Institute, Kochi, Kerala, India, 2018 144pp.
- SANTOS, E. E. et al. **Relações pedogeomorfológicas do município de Mariana (MG): uma análise**. 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia. Rio de Janeiro – RJ. 2012.
- SANTOS, L. G. C. **Macroinvertebrados bentônicos em lagoas do médio rio Doce, MG: estrutura e composição taxonômica e funcional das comunidades**. 2018. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, UFMG, 2014.
- SCALAMATO, A. T. et al. **Geomorfologia e Percepção da Paisagem: Uma possibilidade de estudos sobre sustentabilidade ambiental**. Departamento de Geografia da Universidade Federal de Santa Maria. 2019.
- SCHMIDT, T. C. S.; MARTINS, I. A.; REIGADA, A. L. D.; DIAS, J. F. **Taxocenose of marine catfish (Siluriformes, Ariidae) in the complex bay-estuary of São Vicente, SP, Brazil**, 2008. Disponível em: <<http://www.biotaneotropica.org.br/v8n4/en/abstract?article+bn01108042008>>
- SILVA, A.S. **Evolução da sedimentação nos recifes costeiros de Abrolhos nas últimas décadas**. 2011. Dissertação apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências. Salvador: 2011.
- SILVA, D. L.; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico UFMG**, 24(1):136-158, 2015.
- SILVA, G. P. et al. Caracterização química, física e mineralógica de estêreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, 36(1):45-52, 2006.
- SILVA, L. G. M.; NOGUEIRA, L. B.; MAIA, B. P.; RESENDE, L. B. Fish passage post-construction issues: analysis of distribution, attraction and passage efficiency metrics at the Baguari Dam fish ladder to approach the problem. **Neotropical Ichthyology**, 10(4):751-762, 2012.
- SOUZA, E.M. **Avaliação da contaminação por metais pesados (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn) nos manguezais dos Rios Aribiri, Bubu e Santa Maria da Vitória - Grande Vitória/ES, utilizando *Crassostrea rhizophorae* (GUILDINS, 1828) e *Mytella guyanensis* (LAMARCK, 1819) como biomonitorios**. Dissertação de Mestrado Acadêmico. Programa de Pós-graduação em Biologia Animal. Universidade Federal do Espírito Santo. 2002
- SOUZA, I. C.; DUARTE, I. D.; PIMENTEL, n. Q.; ROCHA, L. D.; MOROZESK, M.; BONOMO, M. M.; AZEVEDO, v. C.; PEREIRA, C. D. S.; MONFERRÁN, M. V.; MILANEZ, C. R. D.; MATSUMOTO, S. T.; WUNDERLIN, D. A.; FERNANDES, M. n. Matching metal pollution with bioavailability, bioaccumulation and biomarkers response in fish (*Centropomus parallelus*) resident in neotropical estuaries. **Environmental Pollution**, 180:136-144, 2013.
- TAMAR. **Parâmetros reprodutivos das tartarugas marinhas na região da foz do Rio Doce**. Relatório não publicado. Tamoios, ES: Centro Tamar, 2017.
- TAYLOR, J. N.; COURTENAY, W. R.; McCANN, J. A. Known impacts of exotic fishes in the continental United States, p. 322-373. In: COURTENAY, W.R.; STAUFFER, J.R. (eds.), **Distribution, biology, and management of exotic fishes**. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, 1984.
- THE TRUSTEES OF THE NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON. **Polychaeta**. Disponível em: <<https://data.nhm.ac.uk/>>. Acesso em: 01 de nov. de 2019.
- TILMAN, D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. **Ecology**, 77:350–363, 1996.
- TRENDALL, A.F. Introduction. In: A.F. Trendall and R.C. Morris, Eds., **Iron-Formation: Facts and Problems**, 1–11. Elsevier, Amsterdam. 1983.
- TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. 3. ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2006.
- UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. **Monitoramento da influência da pluma do rio Doce após o rompimento da barragem de rejeitos em Mariana/MG – novembro de 2015**: processamento, interpretação e consolidação de dados. Rede UFES – rio Doce, Vitória, 2017. Disponível em <<http://>>

- www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/Rio_Doce/relatorio_consolidado_ufes_rio_doce.pdf
Acesso em: 06 de abril de 2018.
- UNESCO. **Convenção para a salvaguarda do patrimônio imaterial**. Paris, 2003.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). Method 3052: **Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices**. Philadelphia PA, Washington, DC. 1996.
- VERVLOET, R. J. H. M. Capítulo 2: A geomorfologia da região de rompimento da barragem da Samarco: a originalidade da paisagem à paisagem da mineração. In: **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Rio de Janeiro. Folio Digital: Letra e Imagem. Pp. 91. 2016.
- VIEIRA, F. 2010. **Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce**. MG. Biota 2: 5-22.
- VIEIRA, F.; GOMES, J. P. C.; MAIA, B. P.; MARTINS, L. G. **Peixes do Quadrilátero Ferrífero: guia de identificação**. Fundação Biodiversitas, Belo Horizonte. 208 p. ilustr. 2015.
- VIEIRA, J. P.; GARCIA, A. M.; MORAES, L. **O Estuário da Lagoa dos Patos**. Um século de transformações. A assembléia de peixes. In: U. SEELIGER, & C. ODEBRECHT. (eds.). Rio Grande: Furg, p. 79-88, 2010.
- VISÃO AMBIENTAL. **Relatório de campo UHE Candonga. RP-065**. Rev. 02. Pg 03. Belo Horizonte: 07/10/2015. 2015a.
- VISÃO AMBIENTAL. **Relatório de campo UHE Candonga. RP-065**. Rev. 02. Pg 03. Belo Horizonte: 07/12/2015. 2015b.
- VISÃO AMBIENTAL. **Relatório de Qualidade da Água. Campanha – água superficial – 2012/2013**. UHE Risoleta Neves. Município Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado / MG. Belo Horizonte: Julho de 2013.
- VITULE, J. R. S. Introdução de peixes em ecossistemas continentais brasileiros: revisão, comentários e sugestões de ações contra o inimigo quase invisível. **Neotropical Biology and Conservation**, 4(2):111-122, 2009.
- WARWICK, R. M.; LIGHT, J. Death assemblages of molluscs on St Martin, Isles of Scilly: a surrogate for regional biodiversity? **Biodiversity and Conservation**, 11:99–112, 2002.
- WARWICK, R. M.; CLARKE, K. R. Taxonomic distinctness and environmental assessment. **Journal of Applied Ecology**, 35:532–543, 1998.
- WHO. World Health Organization Europe. **Air quality guidelines global update**. 2005. Disponível em: <http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf>. Acesso em: 02/07/2019.
- WILLOT, S. J. Species accumulation curves and the measure of sampling effort. **Journal of Applied Ecology**, 38:484–486, 2001.
- WPCLIPART. **Animais aquáticos**. Disponível em:<https://www.wpclipart.com/animals/aquatic/fish/B/brycon/Brycon_devillei.jpg.html>. Acesso em julho de 2019.
- WRIGHT, S. Isolation by Distance. **Genetics**, 28:114–138. 1943.
- WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind**. Paris, UNESCO, 2019.
- ZALMON, I. R.; KROHLING, W. & FERREIRA, C. E. L. Abundance and diversity patterns of the sessile macrobenthic community associated with environmental gradients in Vitória Harbor, southeastern Brazil. **Zoologia**, 28(5):641-652, 2011.
- ZEUG, S. C., WINEMILLER, K. O.; TARIM, S. Response of river Oxbow fish assemblage to patterns of hidrologic connectivity and environmental variability. **T. Am. Fish. Soc.**, 134(5):1389-1399. 2005.



www.institutoslactec.org.br

CONTATO

Leonardo Pussieldi Bastos
Divisão de Meio Ambiente
T + 55 (41) 3361-6882
leonardo.bastos@lactec.org.br