

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

VALORAÇÃO ECONÔMICA DOS DANOS SOCIOAMBIENTAIS

Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Maio/2021



Documento:	Diagnóstico Socioambiental dos Danos Decorrentes do Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce e Região Costeira Adjacente Valoração Econômica dos Danos Socioambientais
Considerações Gerais:	Este documento refere-se à valoração econômica de danos socioambientais, parte integrante do Diagnóstico Socioambiental dos Danos Decorrentes do Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce, o qual apresenta os resultados da valoração econômica dos danos socioambientais do desastre.
Contrato:	4500173758 – Samarco/Lactec
Solicitante:	Empresa: Ministério Público Federal Procuradoria da República em Minas Gerais
	Endereço: Av. Brasil, 1877
	Bairro: Bairro Funcionários
	Cidade: Belo Horizonte/MG
	CEP: CEP 30140-007
	A/C: Dr. Eduardo Henrique de Almeida Aguiar
	E-mail: eduardoaguiar@mpf.mp.br
Executante:	Lactec Avenida Comendador Franco, nº 1341 Jardim Botânico CEP 80215-090 Curitiba – PR – BR e-mail: leonardo.bastos@lactec.org.br Meio Ambiente T + 55 (41) 99102-8276

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	
Carlos Eduardo Ribas	Diretor Comercial	
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 ¹		
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		
Renata Cristine da Silva Gonçalves	Esp. Economista	Valoração econômica
Ronaldo Serôa da Motta	Dr. Economista	Valoração econômica
Ramón Arigoni Ortiz	Dr. Economista	Valoração econômica
Carolina Burle Schmidt Dubeux	Dr. Planejamento Ambiental	Valoração econômica

1 Agradecemos o apoio e orientação técnico-metodológica dos consultores internacionais: Rachel H. DelVecchio e Robert Paterson da empresa Industrial Economics Incorporated (IEC).

Fernando Camargo da Silva	Esp. Engenheiro Florestal	Vegetação e área marinha
Marcelo Augusto da Silva	Biólogo	Vegetação e área marinha
Tamara Molin	Bióloga	Vegetação e área marinha
Vanessa Ariati	MSc. Bióloga	Vegetação e área marinha
Bernardo Lipski	MSc. Engenheiro Agrônomo	Solos
Letícia de Pierri	Dr. Engenheira Agrônoma	Solos
Marianne Schaefer	MSc. Engenheira	Água (rio Doce)
França Sieciechowicz	Ambiental	Água (rio Doce)
Alcides Conte Neto	Estatístico	Água (rio Doce)
Thiago Carvalho de Mello	Msc. Engenheiro Químico	Água (rio Doce)
Nicole Machuca	Dr. Bióloga	Água (rio Doce)
Brassac de Arruda		
Cristovão Vicente	Ph.D Engenheiro Civil	Água (rio Doce)
Scapulatempo Fernandes		
Maurício Belezia	MSc. Biólogo	Ictiofauna
de Oliveira		
Luciana Rodrigues	Dr. Bióloga	Ictiofauna
de Souza Bastos		
Vinícius Abilhoa	Dr. Biólogo	Ictiofauna
Rafael Antunes Baggio	Dr. Biólogo	Ictiofauna
Sabrina Borges	Dr. Física	Ictiofauna
Lino de Araujo		
Angie Thaisa da	MSc. Bióloga	Ictiofauna
Costa Souza		
Matheus Oliveira Freitas	Dr. Biólogo	Ictiofauna e área marinha
Patrícia Dammski	MSc. Bióloga	Área marinha
Borges de Andrade		
Ana Carolina Wosiack	MSc. Bióloga	Área marinha
Rubem Luis Daru	Dr. Engenheiro Civil	Área marinha
Tobias Bernward Bleninger	Dr. Engenheiro Civil	Área marinha e Água (rio Doce)
Bruna Arcie Polli	Dr. Engenheira Ambiental	Área marinha
João Paulo Jankowski	MSc. Engenheiro	Área marinha e Água (rio Doce)
Saboia	Ambiental	
Juliano José da Silva Santos	MSc. Biólogo	Área marinha
Thadeu Sobral de Souza	Dr. Biólogo	Área marinha
João Luís Bittencourt	MSc. Engenheiro Florestal	Área marinha
Guimarães		
Ana Tereza Bittencourt	Dr. Bióloga	Área marinha
Guimarães		
Marcelo Alejandro	MSc. Biólogo	Aves escavadoras
Villegas Vallejos		

Laryssa Akemi Takii	Engenharia Ambiental	Aves escavadoras
Cristiane Schappo Wessling	MSc. Engenharia Ambiental	Patrimônio cultural
Paulo Eduardo Zanettini	Dr. Arqueólogo	Patrimônio cultural
Camila Azevedo de Moraes Wichers	Dra. Arqueóloga e Museóloga	Patrimônio cultural
Gabriela Ribeiro Farias	Arquiteta	Patrimônio cultural
Rodrigo Silva	Dr. Historiador	Patrimônio cultural
Rogério Ricciluca Matiello Félix	MSc. Historiador	Patrimônio cultural
Luciana Bozzo Alves	MSc. Arqueóloga	Patrimônio cultural
Luiz Antonio Queiroz Pacheco	MSc. Arqueólogo	Patrimônio cultural
Luis Felipe Freire Dantas Santos	Dr. Arqueólogo e Historiador	Patrimônio cultural

ESTAGIÁRIOS

Rafaela Righi	Engenharia Ambiental	Revisão e formatação
Marina Ferraz Sampaio	Biologia	Aves escavadoras
Tamires Maiara Ercole	Agronomia	Solos
Maria Fernanda Dames dos Santos Lima	Engenharia Ambiental	Solos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Entendimento Entre Recuperação e Compensação	31
Figura 2 – Perda Interina e Ações Compensatórias.....	38
Figura 3 – Processo de construção para a valoração	44
Figura 4 – Danos à flora a serem valorados e as classes de vegetação consideradas.....	50
Figura 5 – Distribuição dos pontos ao longo do Compartimento 1.....	50
Figura 6 – Relação entre riqueza e tempo decorrido após o distúrbio	53
Figura 7 – Curva de recuperação natural da vegetação.....	55
Figura 8 – Perda descontada da vegetação no contexto de recuperação natural	56
Figura 9 – Área Basal e Riqueza Total comparadas com a idade de florestas no processo de restauração florestal. As médias dos ecossistemas de referência estão representadas pelas linhas horizontais: Florestas maduras (traços), florestas degradadas (pontos) e florestas secundárias (traços e pontos).	57
Figura 10 – Principais valores estimados dos parâmetros estudados em relação aos ecossistemas de referência	57
Figura 11 – Valores de referência finais (linhas horizontais pretas) e intermediários (linhas horizontais laranja) e valores de comparação de florestas plantadas (símbolos azuis) e regeneração natural (símbolos verdes) para cada indicador. As linhas horizontais mais finas e as barras verticais representam a semi-amplitude do intervalo de confiança em torno da mediana. Os símbolos verdes combinam a regeneração natural por plantio e condução	58
Figura 12 – Curva de recuperação externa da vegetação	60
Figura 13 – Perda interina descontada da vegetação no contexto de recuperação externa.....	60
Figura 14 – Curva de compensação da vegetação	62
Figura 15 – Soterramento de solos aluvionares por rejeito de minério de ferro em Mariana/MG	71
Figura 16 – Área de abrangência do escopo de valoração dos danos ambientais causados ao habitat solo devido o desastre de Fundão em Mariana/MG.....	72
Figura 17 – Linha do tempo construída para elaboração de cenários no modelo Century	76
Figura 18 – Série histórica (médias mensais entre 1961-2019) de precipitação (barras), temperatura máxima (linha contínua) e temperatura mínima (linha pontilhada) utilizadas na parametrização do modelo Century	78
Figura 19 – Pastagens degradadas encontradas próximo ao distrito de Paracatu de Baixo, às margens do rio Gualaxo do Norte (MG): estação seca (esquerda) e chuvosa (direita).....	79
Figura 20 – Coeficiente de correlação entre os valores de estoque de carbono observados (Lactec e dados da literatura) e simulados.	80
Figura 21 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; <i>pools</i> passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário de equilíbrio.	81
Figura 22 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; <i>pools</i> passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário de linha base.	82

Figura 23 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário Tecnossolo C3, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base.	85
Figura 24 – Comportamento do estoque de carbono total do solo (0-20 cm), para toda a área afetada, simulado para o cenário Tecnossolo C3, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base.	88
Figura 25 – Perda do estoque de carbono total do solo em toda área afetada (cenário Tecnossolo C3).	88
Figura 26 – Gráfico da perda descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua no tempo.	89
Figura 27 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário Tecnossolo C5, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base 91	
Figura 28 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; <i>pools</i> lento e ativo) simulados para as frações lenta e ativa da linha base e do cenário Tecnossolo C5	92
Figura 29 – Comportamento do estoque de carbono total do solo simulados para o cenário Tecnossolo C5 em toda a área afetada e incluindo o fator de equivalência, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base.	95
Figura 30 – Perda do estoque de carbono total do solo, cenário Tecnossolo C5, incluindo o fator de equivalência.	96
Figura 31 – Gráfico da perda interina equivalente descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua. ...	97
Figura 32 – Divisão do Rio Doce em Compartimentos.....	111
Figura 33 – Interpolação linear para definição das datas de passagem da lama em cada estação de monitoramento, 2019	114
Figura 34 – Curvas de Permanência da Turbidez – Pré-Desastre	115
Figura 35 – Curvas de Permanência da Vazão (m ³ /s) – Pré Desastre	115
Figura 36 – Curvas de Linha Base da Turbidez – Pré Desastre	117
Figura 37 – Predição do Comportamento da Turbidez Média – Pré-Desastre e Pós-Desastre	120
Figura 38 – Gráficos de Resíduos - Comparação entre Predição do Comportamento da Turbidez Média e a Turbidez Observada.....	121
Figura 39 – Gráficos de Resíduos - Comparação entre Predição do Comportamento da Turbidez Média e a Turbidez Observada.....	121
Figura 40 – Curva de Predição do Comportamento da Turbidez, por Compartimento	123
Figura 41 – Curva de Permanência da Turbidez	125
Figura 42 – Gráfico de exemplo do deslocamento da curva de permanência	126
Figura 43 – Curva de Recuperação da Qualidade da Água (%).	126
Figura 44 – Quantidade de perda descontada de água afetada pelo desastre em metros cúbicos ...	130
Figura 45 – Etapas seguidas para a mensuração da quantidade de esgoto tratado pela compensação por esgotamento sanitário na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.	133

Figura 46 – Evolução da ampliação do esgotamento sanitário da população sem coleta e sem tratamento, no período de 5 anos, considerando 20% de expansão anual.....	136
Figura 47 – Evolução da ampliação do esgotamento sanitário da população com coleta e sem tratamento, no período de 5 anos, considerando 20% de expansão anual.....	137
Figura 48 – Quantidade total de esgoto adicional, em m ³ /ano, gerado pela população adicional durante o período de 2022 e 2044, na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.	138
Figura 49 – Quantidade total de esgoto em m ³ /ano, gerado pela população urbana já existente em 2022 na BHRD, que não possui coleta e nem tratamento, durante o período de 2022 e 2026.	139
Figura 50 – Quantidade total de esgoto em m ³ /ano, gerado pela população urbana já existente em 2022 na BHRD, que possui coleta, mas não possui tratamento, durante o período de 2022 e 2026.	139
Figura 51 – Curvas de compensação da quantidade de esgoto em m ³ /ano, gerado pela população urbana na BHRD, durante o período de 2022 e 2044, a ser coletado e tratado após investimentos em esgotamento sanitário.....	140
Figura 52 – Racionalidade para definição de tipologia de tratamento por município.	146
Figura 53 – Tipologia de Tratamento definida para os municípios da BHRD, considerando a remoção de DBO, valores absolutos e relativos em percentual.....	148
Figura 54 – Curvas de custos obtidas pelas estimativas realizadas no Atlas Esgoto, valores de 2015.	150
Figura 55 – Cascudo (<i>Hypostomus affinis</i>), espécie de peixe selecionado como indicadora da ictiofauna na abordagem de valoração dos danos. Na foto estão indivíduos coletados nas estações de coleta da bacia do rio Doce.....	160
Figura 56 – Dinâmica populacional simulada de <i>Hypostomus affinis</i> para as condições pré (azul) e pós-desastre na presença de recuperação natural em 163 anos (verde), considerando a estimativa de tamanho populacional inferior e queda de 95% do tamanho populacional no momento do desastre. A linha vertical contínua corresponde ao momento do Desastre da Samarco (2015) e a tracejada indica o momento em que o rejeito acaba de ser removido do ambiente (2178).	171
Figura 57 – Resultado da perda interina descontada, que representa a quantidade de indivíduos da espécie <i>H. affinis</i> perdidos devido ao desastre, no horizonte temporal de 163 anos	176
Figura 58 – Dinâmica populacional simulada de <i>Hypostomus affinis</i> para as condições pré e pós-desastre.....	178
Figura 59 – Curva de compensação do peixamento hipotético do <i>Hypostomus affinis</i> no rio Doce, valores descontados.	182
Figura 60 – 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 61 – Diferença de concentração (percentil 95%) (com e sem desastre), definida como área de passagem da pluma de rejeitos de Fundão.....	190
Figura 62 – 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 (sem desastre).....	192
Figura 63 – Tartaruga-verde (<i>Chelonia mydas</i>) e boto-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>)	194

Figura 64 – Categorias de perda de adequabilidade ambiental: para a tartaruga-verde (<i>Chelonia mydas</i>) – mapa à esquerda; e para o boto-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) – mapa à direita.	195
Figura 65 – Área consolidada de perda de adequabilidade ambiental para a tartaruga-verde (<i>Chelonia mydas</i>) e para o boto-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>).	197
Figura 66 – Áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental.....	199
Figura 67 – Áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental. 1º mapa: área total sobreposta; 2º mapa: área total sobreposta, classificada pela gravidade da deposição do sedimento.....	200
Figura 68 – 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 (sem desastre).....	203
Figura 69 – Perda interina descontada na perpetuidade, das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, da área marinha, em hectare.	206
Figura 70 – Esquema representando os serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais.	208
Figura 71 – Curvas de crescimento resultantes da aplicação do modelo FORMAN para as espécies <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Laguncularia racemosa</i> e <i>Avicennia germinans</i> , limitadas ao ano 50 do modelo. O eixo vertical é apresentado em escala logarítmica para facilitar a visualização do ano em que se atinge a área basal-alvo de cada espécie (ponto vermelho).....	217
Figura 72 – Curva de crescimento resultante do modelo FORMAN após aplicação de média simples para valores de área basal das espécies <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Laguncularia racemosa</i> e <i>Avicennia germinans</i> , limitadas ao ano 50 do modelo. O eixo vertical é apresentado em escala logarítmica para facilitar a visualização do ano em que se atinge a área basal-alvo (ponto vermelho).	219
Figura 73 – Curva de crescimento da área basal do manguezal, após aplicação da taxa de equivalência, taxa de desconto e perpetuidade, curva da compensação.....	220
Figura 74 – Distribuição de gêneros dominantes em função da salinidade do solo (g/L) e potencial redox (mV) à profundidade de 25 cm em Guadalupe, mar do Caribe (acima) e distribuição de gêneros em função da salinidade do solo (g/L) e presença de água no solo (% do peso) mensurados durante 1,5 anos em Proserpine, Austrália (abaixo).....	229
Figura 75 – Esquema de estimativa da cobertura de copas de espécies arbóreas para Fase I em parcelas retangulares.....	237
Figura 76 – Surucuá-variado (<i>Trogon surrucura</i>), espécie de ave florestal selecionada como indicadora da fauna silvestre na abordagem de valoração dos danos.	246
Figura 77 – Delimitação do Compartimento 1 da Bacia do Rio Doce (linha preta), dividida em três subcompartimentos para fins de avaliação dos danos.	248
Figura 78 – Distribuição da adequabilidade ambiental da espécie <i>Leptopogon amaurocephalus</i> na bacia do rio Doce. Em destaque os limites do compartimento 1 (cor laranja) e do Parque Estadual do Rio Doce (cor verde)	250
Figura 79 – Curva de recuperação natural estimada pelo modelo estatístico, cenários T0 e T2a.....	254
Figura 80 – Perda natural descontada na perpetuidade do número de indivíduos perdidos da espécie <i>Trogon surrucura</i> , cenários T0 e T2a.....	256

Figura 81 – Curva de recuperação externa estimada pelo modelo estatístico, cenários T0 e T2b.....	258
Figura 82 – Perda interina descontada na perpetuidade do número de indivíduos perdidos da espécie <i>Trogon surrucura</i> , cenários T0 e T2b.....	260
Figura 83 – Divisão da área de pesquisa em compartimentos. Os dados dos Compartimentos 3 e 4 estão unificados como Compartimento 3 na presente análise de danos. Cabe destacar que o Compartimento 5 foi abordado apenas pela Arqueologia Subaquática	270
Figura 84 – Atividade desenvolvida e estruturas mapeadas no sítio arqueológico Arraial sobre ortoimagem orbital pós-desastre (T2). Em rosa, a área estimada do bem (área total). A área afetada pelo dano soterramento é indicada pela APDL.....	274
Figura 85 – Atividades desenvolvidas e distribuição das evidências identificadas no sítio arqueológico Santa Fé II sobre ortoimagem orbital pós-desastre (T2). Em rosa, a área estimada do bem (área total). A área afetada pela perturbação das camadas é indicada no desenho pela área hachurada com linhas em cinza.	275
Figura 86 – Localização do sítio arqueológico Naufrágio Degredo 1 em relação à pluma. Em rosa, a área estimada do bem (área total). A área afetada pela aceleração da degradação de vestígios arqueológicos corresponde à porção do bem que fica em contato com pluma e em relação à deposição do fator de contaminação.....	275
Figura 87 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens arqueológicos afetados pelo dano de soterramento	287
Figura 88 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens arqueológicos afetados pelo dano de perturbação	287
Figura 89 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens arqueológicos afetados pelo dano de aceleração	288
Figura 90 – Área para compensação nos bens afetados com áreas remanescentes aptas a receber ações de compensação, área total original e ponderada pelo fator	298
Figura 91 – Área para compensação nos bens arqueológicos em outros locais na bacia do rio Doce, ambiente terrestre, área total original e ponderada pelo fator.....	298
Figura 92 – Área para compensação nos bens arqueológicos em outros locais na bacia do rio Doce, ambiente aquático, área total original e ponderada pelo fator.....	299
Figura 93 – Localização dos bens afetados considerados na valoração para receber ações compensatórias em suas áreas restantes; bens afetados que não receberão ações compensatórias em suas áreas e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento I.	306
Figura 94 – Localização dos bens afetados considerados na valoração para receber ações compensatórias em suas áreas restantes; bens afetados que não receberão ações compensatórias em suas áreas e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento II.	307
Figura 95 – Localização dos bens afetados considerados na valoração para receber ações compensatórias em suas áreas restantes e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento III.....	308
Figura 96 – Localização dos bens afetados considerados na valoração que não receberão ações compensatórias em suas áreas e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento V.	309

Figura 97 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais não recuperáveis afetados pelo desastre	336
Figura 98 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens parcialmente recuperáveis afetados	337
Figura 99 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais recuperáveis afetados	337
Figura 100 – Demonstração gráfica curva de recuperação externa dos bens materiais totalmente recuperáveis.....	347
Figura 101 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais recuperáveis afetados pelo desastre	348
Figura 102 – Demonstração gráfica curva de recuperação externa dos bens materiais parcialmente recuperáveis.....	350
Figura 103 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais parcialmente recuperáveis afetados pelo desastre	351
Figura 104 – Curva de compensação descontada em área (m ²).	374
Figura 105 – Resultado Consolidado da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão pelo Método de Equivalência de Habitat/Recurso	400

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Áreas em hectares de vegetação suprimida e morte tardia subdivida por classe de vegetação e por danos à flora a serem valorados	52
Tabela 2 – Valores assumidos para a construção da curva de recuperação natural e cálculos para estimar a perda natural descontada em hectare da vegetação afetada pelo desastre	54
Tabela 3 – Cálculos realizados para estimar a perda natural descontada em hectare, considerando a vegetação suprimida e morte tardia	54
Tabela 4 – Valores assumidos para a construção da curva de recuperação externa e cálculos para estimar a perda interina descontada em hectare da vegetação afetada pelo desastre	59
Tabela 5 – Cálculos realizados para estimar a perda interina descontada em hectare, considerando a vegetação suprimida e morte tardia	59
Tabela 6 – Valores assumidos para a construção da curva de compensação em hectare da vegetação ganhos com as ações compensatórias	61
Tabela 7 – Cálculos realizados para estimar os ganhos descontados em hectare da compensação	62
Tabela 8 – Orçamento do projeto de restauração florestal, como forma de recuperação e compensação dos danos ambientais causados à vegetação, preços de maio de 2019	67
Tabela 9 – Valores atualizados, não descontados, do projeto de restauração florestal, preços de maio de 2019 para março de 2021.....	67
Tabela 10 – Valores totais, não descontados, dos projetos de restauração florestal, recuperação e compensação, preços de março de 2021	67
Tabela 11 – Cronograma do desembolso financeiro (fluxo de caixa) do projeto de recuperação, custos descontados a valor presente de 2021	68
Tabela 12 – Cronograma do desembolso financeiro (fluxo de caixa) do projeto de compensação, custos descontados a valor presente de 2021	69
Tabela 13 – Resultado final da valoração dos danos causados à vegetação devido ao rompimento da barragem de Fundão	69
Tabela 14 – Tabela de valores considerados para o cálculo da perda descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos	86
Tabela 15 – Resultado do cálculo da perda descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua no tempo	89
Tabela 16 – Tabela de valores considerados para o cálculo da perda interina descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos	93
Tabela 17 – Resultado do cálculo da perda interina descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua no tempo	96
Tabela 18 – Incremento do estoque de carbono no solo em florestas com idades inferiores a 20 anos.....	100
Tabela 19 – Incremento do estoque de carbono no solo em florestas com idades superiores a 20 anos.....	100

Tabela 20 – Valores utilizados para o cálculo dos ganhos da compensação, mediante ações de restauração florestal, considerando ganhos perpétuos no tempo.....	102
Tabela 21 – Serviços Ecossistêmicos prestados pelos sistemas ambientais que incluem vegetação nativa e pastagens.....	105
Tabela 22 – Orçamento do projeto de restauração florestal, como forma de recuperação e compensação dos danos ambientais causados ao solo, preços de maio de 2019.....	107
Tabela 23 – Valores atualizados, não descontados, do projeto de restauração florestal, preços de maio de 2019 para março de 2021.....	108
Tabela 24 – Custo da Recuperação em Tecnossolo da Vegetação, como Referência para Restauração Florestal para Recuperação do Solo, valor presente de 2021 e preços de março de 2021.....	108
Tabela 25 – Custo da Compensação em Solos Naturais da Vegetação, como Referência para Restauração Florestal para Recuperação do Solo, valor presente de 2021 e preços de março de 2021	109
Tabela 26 – Resultado final da valoração dos danos causados ao solo devido ao rompimento da barragem de Fundão	109
Tabela 27 – Localização Geográfica de cada estação de monitoramento ao longo do rio Doce	113
Tabela 28 – Datas aproximadas da passagem da lama em cada estação de monitoramento ao longo do rio Doce, 2015	114
Tabela 29 – Média e Quantis das Curvas de Permanência Calculadas (m^3/s).....	116
Tabela 30 – Coeficientes de Correlação R^2 por Compartimento.....	122
Tabela 31 – Coeficientes estimados do modelo de comportamento da turbidez média por compartimento	122
Tabela 32 – Tempo estimado de recuperação natural da turbidez, por compartimento	123
Tabela 33 – Área de Drenagem dos Compartimentos do Rio Doce	129
Tabela 34 – Valores de perda descontada da água, por compartimento, recuperação natural	129
Tabela 35 – Quantidade total da população urbana existente em 2022 na BHRD, enquadrada nas modalidades de não atendimento e que deverão ser atendidas em 5 anos.....	136
Tabela 36 – Benefício promovido pela compensação: Esgoto gerado em m^3 /ano nas três modalidades de não atendimento a ser atendido pelos investimentos em esgotamento sanitário, após aplicação da taxa de desconto social (valores descontados).	140
Tabela 37 – Resultados da valoração do dano causado ao rio Doce, devido ao rompimento da barragem de Fundão, pela perspectiva do recurso ambiental, comparação entre o quantitativo de recurso de água perdido (Perda Interina) e a compensação proposta pelo esgotamento sanitário.	141
Tabela 38 – Atualização dos valores do investimento em esgotamento sanitário necessários para universalização do serviço na BHRD e apresentação do valor atualizado considerando o multiplicador.	151
Tabela 39 – Cálculos realizados para mensuração do valor do dano causado a água do rio Doce, devido ao desastre da barragem de Fundão.....	154
Tabela 40 – Resultado final da valoração dos danos ambientais causados à água do rio Doce	155

Tabela 41 – Média de indivíduos ($\bar{N}$) amostrados e estimados (N_E) de <i>H. affinis</i> nas estações da APDL nas fases de outubro de 2018 e fevereiro de 2019, por idade, número de indivíduos totais estimados na APDL nesse período segundo estimativas a (N_{TS}) e b (N_{TI}).	164
Tabela 42 – Média (N) e desvio padrão (DP) (em milhão de indivíduos) para as estimativas superior (sup) e inferior (inf) do tamanho populacional das populações de <i>Hypostomus affinis</i> da APDL da bacia do Rio Doce, segundo diferentes cenários simulados: sem recuperação (R0), com recuperação em 163 anos (R163); efeitos agudos do Desastre da Samarco com redução de 95% (Q95) da população.	170
Tabela 43 – Valores populacionais estimados pelo modelo e utilizados na valoração para cálculo da perda interina descontada.	172
Tabela 44 – Resultado da perda interina descontada, que representa a quantidade de indivíduos da espécie <i>H. affinis</i> perdidos devido ao desastre, no horizonte temporal de 163 anos.	176
Tabela 45 – Produção e repovoamento de indivíduos do <i>H. affinis</i> do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna	181
Tabela 46 – Ganho ambiental descontado do repovoamento de indivíduos do <i>H. affinis</i> do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna	182
Tabela 47 – Cronograma de execução do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna.....	186
Tabela 48 – Orçamento simplificado do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna.....	186
Tabela 49 – Cronograma financeiro de execução do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna	187
Tabela 50 – Resultado final da valoração dos danos ambientais causados à ictiofauna do rio Doce.	188
Tabela 51 – Valores das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, por classe de deposição, e linha base.	200
Tabela 52 – Critérios de classificação da gravidade do dano.	202
Tabela 53 – Valores dos intervalos da faixa de espessura do rejeito, subdividido pela classificação do dano, juntamente com a moda e mediana de cada classe.	204
Tabela 54 – Peso adotado para ponderação das áreas de deposição de sedimento, subdividido pela classificação do dano, com base na mediana de cada classe.....	204
Tabela 55 – Valores das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, por classe de deposição, e linha base.	205
Tabela 56 – Perda interina descontada na perpetuidade, das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, da área marinha, em m ² e hectare.	206
Tabela 57 – Serviços Ecosistêmicos prestados pelos manguezais e pela área marinha, conceito, afetados pelos danos.	210
Tabela 58 – Parâmetros espécie-específicos de plantas de mangue utilizadas no modelo FORMAN, conforme Chen e Twilley (1998).	215
Tabela 59 – Fontes de dados utilizados para definição dos parâmetros área basal e densidade de indivíduos no modelo FORMAN.	216

Tabela 60 – Curva de crescimento resultante do modelo FORMAN após aplicação de média simples para valores de área basal das espécies <i>Rhizophora mangle</i> , <i>Laguncularia racemosa</i> e <i>Avicennia germinans</i>	218
Tabela 61 – Curva de crescimento da área basal do manguezal, após aplicação da taxa de equivalência, taxa de desconto e perpetuidade	220
Tabela 62 – Relação dos serviços ecossistêmicos afetados pelo desastre da Samarco na Zona Costeira e Marinha, com ênfase nos danos que estão englobados no processo de valoração.	222
Tabela 63 – Serviços ecossistêmicos afetados pelos danos do desastre da Samarco na zona costeira e marinha, que estão sendo valorados no presente estudo, e a indicação daqueles prestados pelos manguezais e que se entende serem equivalentes na compensação ambiental.	223
Tabela 64 – Cronograma de execução da etapa de planejamento e implementação do projeto compensatório.	240
Tabela 65 – Cronograma de execução da etapa de manutenção do projeto compensatório.	240
Tabela 66 – Cronograma de execução da etapa de monitoramento do projeto compensatório.	241
Tabela 67 – Orçamento para execução de projeto de restauração ecológica para manguezais degradados considerando 1 hectare. Preços de maio/2019.	243
Tabela 68 – Fluxo de Caixa da execução de projeto de restauração ecológica para manguezais degradados, valores descontados e atualizados	244
Tabela 69 – Resultado final da valoração dos danos ambientais causados à área marinha	244
Tabela 70 – Resultados dos cenários estimados pela modelagem de nicho para a valoração dos danos causados as aves escavadoras	254
Tabela 71 – Valores utilizados para o cenário T2a estimados pelas modelagens para a valoração dos danos causados as aves escavadoras	255
Tabela 72 – Valores estimados pela valoração para o cálculo da perda descontada natural, considerando a recuperação natural (T2a)	256
Tabela 73 – Valores utilizados para o cenário T2b estimados pelas modelagens para a valoração dos danos causados as aves escavadoras	259
Tabela 74 – Valores Estimados pela Valoração para o Cálculo da Perda Descontada Natural, Considerando Apenas a Recuperação Externa (T2b)	260
Tabela 75 – Comparação entre o somatório da perda interina que inclui os ganhos ambientais adicionais e o somatório que não inclui tais ganhos, considerando os valores de perda do cenário T2b.	262
Tabela 76 – Cronograma de execução do projeto de manejo de fauna, como forma de recuperação e compensação dos danos causados as aves florestais	265
Tabela 77 – Orçamento simplificado do projeto de manejo de fauna, como forma de recuperação e compensação dos danos causados as aves escavadoras	265
Tabela 78 – Cronograma financeiro de execução do projeto de manejo de fauna, como forma de recuperação e compensação dos danos causados às aves escavadoras	266
Tabela 79 – Valores para a construção do resultado final da valoração dos danos ambientais causados às aves escavadoras	267

Tabela 80 – Aves escavadoras primárias ou facultativas, com exigências ecológicas similares a <i>Trogon surrucura</i> , e respectivo tamanho corporal (Comprimento Total, em centímetros).	268
Tabela 81 – Bens arqueológicos que tiveram suas áreas ajustadas com a subtração das áreas de sobreposição com bens materiais.....	277
Tabela 82 – Síntese dos atributos considerados na definição da significância	279
Tabela 83 – Bens Arqueológicos selecionados para valoração, linha de base em m ² , área afetada em m ² , e área afetada ponderada em m ²	281
Tabela 84 – Resultado do cálculo da perda interina, segregado por grupo de dano valorado e total	286
Tabela 85 – Bens arqueológicos afetados pelo desastre, que possuem mais de 25% de área não atingida pelos danos e que podem ser alvo das ações de compensação.	291
Tabela 86 – Bens arqueológicos localizados em ambiente terrestre, em outros locais da Bacia do rio Doce que não foram atingidos pelo desastre, e que possuem área que pode ser alvo das ações de compensação.	294
Tabela 87 – Bens arqueológicos localizados em ambiente aquático, em outros locais da Bacia do rio Doce que não foram atingidos pelo desastre, e que possuem área que pode ser alvo das ações de compensação.	296
Tabela 88 – Quantitativo de bens arqueológicos que possuem áreas que podem ser alvo das ações de compensação.	297
Tabela 89 – Informações básicas para a construção da curva de compensação dos bens arqueológicos que possuem áreas que podem ser alvo das ações de compensação.	300
Tabela 90 – Área a ser compensada dos bens arqueológicos que possuem áreas remanescentes, subdividido pelos danos mais representativos.	300
Tabela 91 – Ganho anual em área compensada dos bens arqueológicos que possuem áreas remanescentes, subdividido pelos danos mais representativos.	300
Tabela 92 – Ganho total na perpetuidade em área compensada dos bens arqueológicos que possuem áreas remanescentes, subdividido pelos danos mais representativos.	301
Tabela 93 – Informações básicas para a construção da curva de compensação dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.	302
Tabela 94 – Ganho anual em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.....	302
Tabela 95 – Ganho total na perpetuidade em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.	302
Tabela 96 – Informações básicas para a construção da curva de compensação dos bens arqueológicos em ambiente aquático alvo das ações de compensação.	303
Tabela 97 – Ganho anual em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.....	303
Tabela 98 – Ganho total na perpetuidade em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente aquático alvo das ações de compensação.	304
Tabela 99 – Categorias e quantitativos dos bens selecionados para compensação	305
Tabela 100 – Resumo do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens arqueológicos.	318

Tabela 101 – Valores Totais do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens arqueológicos.	320
Tabela 102 – Valores utilizados para a monetização dos danos causados aos bens arqueológicos. ...	321
Tabela 103 – Resultado final da valoração dos danos causados aos bens arqueológicos	321
Tabela 104 – Listagem dos Bens Materiais a serem valorados e linha de base de cada bem, sendo a métrica metros quadrados.....	324
Tabela 105 – Resultado do cálculo da perda inicial dos bens materiais não recuperáveis devido ao desastre após a ponderação dos pesos	333
Tabela 106 – Resultado do cálculo da perda inicial dos bens materiais parcialmente recuperáveis devido ao desastre após a ponderação dos pesos.....	334
Tabela 107 – Resultado do cálculo da perda inicial dos bens materiais recuperáveis devido ao desastre após a ponderação dos pesos	335
Tabela 108 – Resultado do cálculo da perda, segregado por modalidade de recuperação.....	336
Tabela 109 – Grau máximo ponderado de recuperação dos aspectos materiais e prestação de serviços dos bens parcialmente recuperáveis	341
Tabela 110 – Condição de recuperação, grau de recuperação material e de serviços, taxa anual de recuperação separado por bem material valorado	343
Tabela 111 – Condição de recuperação, grau de recuperação material e de serviços, taxa anual de recuperação separado por bem material valorado	345
Tabela 112 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais totalmente recuperáveis	345
Tabela 113 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais totalmente recuperáveis	346
Tabela 114 – Perda interina dos bens materiais totalmente recuperáveis	347
Tabela 115 – Condição de recuperação, grau de recuperação material e de serviços, taxa anual de recuperação separado por bem material valorado	349
Tabela 116 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais parcialmente recuperáveis .	349
Tabela 117 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais parcialmente recuperáveis .	350
Tabela 118 – Perda interina dos bens materiais parcialmente recuperáveis	351
Tabela 119 – Taxa anual de compensação separado por bem material alvo das ações compensatórias.....	353
Tabela 120 – Perda interina total dos bens materiais, por modalidade de recuperação.....	358
Tabela 121 – Extensões e metragens dos trechos do Caminho dos Diamantes a serem compensados	361
Tabela 122 – Bens materiais selecionados para serem alvo de ações compensatórias, elementos multiplicadores dos bens, e valores de metragem finais ponderados.....	363
Tabela 123 – Cálculo dos ganhos anuais da compensação em área (m ²).....	369
Tabela 124 – <i>Cálculo dos ganhos anuais da compensação em área (m²).....</i>	374
Tabela 125 – Resumo do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens Materiais.....	383
Tabela 126 – Valores Totais do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens Materiais.....	384

Tabela 127 – Valores utilizados para a monetização dos danos dos bens materiais que são totalmente recuperáveis.....	385
Tabela 128 – Valores utilizados para a monetização dos danos dos bens materiais que são parcialmente recuperáveis.....	385
Tabela 129 – Valores utilizados para a monetização dos danos dos bens materiais não recuperáveis, e cuja perda é totalmente compensada.	386
Tabela 130 – Resultado final da valoração dos danos causados aos bens materiais	386
Tabela 131 – Quantitativos de bens imateriais sobrepostos com outros bens de outra natureza impactados pelo desastre, e que puderam ser valorados de forma indireta pelo MER/MEH..	393
Tabela 132 – Listagem de todos os bens imateriais, sua categoria e status da valoração.....	394
Tabela 133 – Resultado Consolidado da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão pelo Método de Equivalência de Habitat/Recurso	399
Tabela 134 – Resultado Consolidado da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão pelo Método de Valoração Contingente.....	401
Tabela 135 – Resultado Consolidado, VALOR MÍNIMO TOTAL (limite inferior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão	403
Tabela 136 – Resultado Consolidado, VALOR MÁXIMO TOTAL (limite superior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão	403
Tabela 137 – Valor Mínimo do Dano Moral (limite inferior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão	403
Tabela 138 – Valor Máximo do Dano Moral (limite superior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão	404
Tabela 139 – Balanço dos Danos Valorados e Não Valorados pelos Métodos de Valoração Econômica de Danos Empregados.....	405

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Apresentação dos principais conceitos que norteiam a metodologia	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O MÉTODO DE EQUIVALENCIA DE HABITAT OU RECURSO	27
2.1 Avaliação de danos aos recursos naturais no âmbito internacional	28
3 MÉTODO DE EQUIVALÊNCIA DE HABITAT OU RECURSO	31
3.1 A abordagem metodológica	31
3.1.1 Procedimentos Estimativos para Mensuração da Quantidade de Serviço ou Recurso Recuperado e Compensado	37
3.1.2 Compensação Pecuniária Equivalente	42
3.1.3 Monetização dos danos a serem valorados	42
3.1.4 Processo para Construção da Valoração	44
3.1.5 Diferença Conceitual entre Serviços Ambientais e Serviços Ecosistêmicos	45
3.1.6 Fator de Desconto	45
3.1.7 Limitações da Metodologia	47
4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EQUIVALENCIA DE HABITAT OU RECURSO POR HABITAT/RECURSO A SER VALORADO	48
4.1 Vegetação.....	48
4.1.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados à Vegetação.....	48
4.1.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base.....	51
4.1.3 Construção da Curva de Recuperação Natural	52
4.1.4 Construção da Curva de Recuperação Externa e Cálculo da Perda Interina	56
4.1.5 Construção da Curva de Compensação	61
4.1.6 Taxa de equivalência da Recuperação Externa e da Compensação	62
4.1.7 Detalhamento das Ações para Recuperação Externa e Ações Compensatórias para os danos causados à Flora.....	63
4.1.8 Valor Monetário do Dano	66
4.2 Solos.....	69
4.2.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados ao Solo	69
4.2.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base.....	72
4.2.3 Construção da Curva de Recuperação Natural	82
4.2.4 Construção da Curva de Recuperação Externa e Cálculo da Perda Interina.....	89
4.2.5 Construção da Curva de Compensação	97
4.2.6 Taxa de Equivalência da Recuperação Externa e da Compensação	103
4.2.7 Detalhamento das Ações para Recuperação Externa e Ações Compensatórias para os Danos Causados ao Solo	106

4.2.8 Valor Monetário do Dano	107
4.3 Água (Rio Doce)	109
4.3.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados à Água do Rio Doce	109
4.3.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base	111
4.3.3 Construção da Curva de Recuperação Natural e Cálculo da Perda Interina	118
4.3.3.1 Construção da Curva de Predição da Turbidez	118
4.3.3.2 Construção da Curva de Recuperação Natural	124
4.3.3.3 Cálculo da Perda Interina: quantidade de água (m ³) afetada pelo desastre	127
4.3.4 Construção da Curva de Recuperação Externa	130
4.3.5 Construção da Curva de Compensação	131
4.3.6 Taxa de Equivalência da Compensação	142
4.3.7 Detalhamento das Ações Compensatórias para os danos causados à Água do rio Doce	142
4.3.8 Valor Monetário do Dano	148
4.4 Ictiofauna	155
4.4.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados à Ictiofauna	155
4.4.2 Contextualização do Dano de Bioacumulação	157
4.4.3 Definição da Espécie Chave Representante dos Danos à Ictiofauna	159
4.4.4 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base	160
4.4.5 Construção da Curva de Recuperação Natural e Cálculo da Perda Interina	165
4.4.6 Construção da Curva de Recuperação Externa	177
4.4.7 Considerações importantes quanto as decisões conservadoras para a construção dos modelos e estimativas	178
4.4.8 Construção da Curva de Compensação	180
4.4.9 Taxa de Equivalência da Compensação	182
4.4.10 Detalhamento das Ações Compensatórias para os Danos Causados à Ictiofauna	183
4.4.11 Valor Monetário do Dano	186
4.5 Área Marinha	188
4.5.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados à Área Marinha	188
4.5.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base	196
4.5.3 Construção dos Pesos e Cálculo da Perda Inicial	201
4.5.4 Construção da Curva de Recuperação Natural e Cálculo da Perda Interina	205
4.5.5 Construção da Curva de Recuperação Externa	206
4.5.6 Construção da Curva de Compensação	207
4.5.7 Taxa de Equivalência da Compensação	221

4.5.8 Detalhamento das Ações Compensatórias para os Danos Causados à Área Marinha.....	224
4.5.9 Valor Monetário do Dano	241
4.6 Aves Escavadoras	244
4.6.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados às Aves Escavadoras.....	244
4.6.2 Definição da Espécie Chave Representante dos Danos as Aves Escavadoras	245
4.6.3 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base.....	247
4.6.4 Construção da Curva de Recuperação Natural	251
4.6.5 Construção da Curva de Recuperação Externa e Cálculo da Perda Interina.....	256
4.6.6 Construção da Curva de Compensação	260
4.6.7 Taxa de Equivalência da Recuperação Externa e da Compensação	261
4.6.8 Detalhamento das Ações para Recuperação Externa e Ações Compensatórias para os Danos Causados às Aves Escavadoras	263
4.6.9 Valor Monetário do Dano	265
4.7 Patrimônio Cultural	268
4.7.1 Bens Arqueológicos	269
4.7.1.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados aos Bens Arqueológicos.....	269
4.7.1.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base	273
4.7.1.3 Taxa de Equivalência: Construção dos Pesos de Relevância Científica e Relevância Patrimonial.....	277
4.7.1.4 Construção da Curva de Recuperação Natural e Cálculo da Perda Interina.....	280
4.7.1.5 Construção da Curva de Recuperação Externa	288
4.7.1.6 Construção da Curva de Compensação.....	289
4.7.1.7 Detalhamento das Ações Compensatórias para os Danos Causados aos Bens Arqueológicos	310
4.7.1.8 Tempo de Início e Duração das Ações Compensatórias	317
4.7.1.9 Valor Monetário do Dano	317
4.7.2 Bens Culturais Materiais.....	321
4.7.2.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados aos Bens Materiais	322
4.7.2.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base	323
4.7.2.3 Seleção dos Bens Materiais a Serem Valorados	324
4.7.2.4 Taxa de Equivalência: Construção dos Pesos de Interrupção de Serviços, Acautelamento e Bens Móveis Associados.....	327
4.7.2.5 Construção da Curva de Recuperação Natural.....	331
4.7.2.6 Detalhamento da Segmentação dos Bens Materiais Conforme Possibilidade de Recuperação por Meio de Ações Externas	338

4.7.2.7 Taxa de Recuperação Anual dos Bens Materiais	341
4.7.2.8 Construção da Curva de Recuperação Externa e Cálculo da Perda Interina.....	344
4.7.2.9 Taxa de Compensação Anual dos Bens Materiais.....	352
4.7.2.10 Construção da Curva de Compensação.....	357
4.7.2.11 Detalhamento das Ações para Recuperação Externa e Compensação para os Danos Causados aos Bens Materiais	374
4.7.2.12 Tempo de Início e Duração das Ações de Recuperação Externa e Compensação	382
4.7.2.13 Valor Monetário do Dano.....	382
4.7.3 Bens Culturais Imateriais	387
4.7.3.1 Contextualização dos Danos Causados aos Bens Imateriais.....	387
4.7.3.2 Patrimônio cultural imaterial desde uma perspectiva antropológica	388
4.7.3.3 Justificativa da inviabilidade de aplicação do método	389
4.7.3.4 Sobreposição de danos	391
5 RESULTADO FINAL DA VALORAÇÃO: APRESENTAÇÃO DOS VALORES DOS DANOS CONSOLIDADOS	398
5.1 Valores consolidados da valoração pelo MEH/MER por habitat/recurso	398
5.2 Valores consolidados da valoração pelo método de valoração contingente	400
5.3 Unificação dos valores dos dois métodos aplicados para a valoração.....	402
5.4 Compilação dos danos valorados e não valorados	404
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	408
APÊNDICES	448
APÊNDICE A – REVISÃO E ANÁLISE CRÍTICA DO DOCUMENTO “PG 27 – PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO DE NASCENTES DA BACIA DO RIO DOCE” E DE SEU ORÇAMENTO ASSOCIADO	448
APÊNDICE B – METODOLOGIA DETALHADA DAS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO	457
APÊNDICE C – APROFUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE A DINÂMICA DA MOS NO SOLO	468
APÊNDICE D – DETALHAMENTO DOS CENÁRIOS C2 E C4.....	471
APÊNDICE E – INFORMAÇÕES UTILIZADAS PARA A CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NO CENTURY DE TODOS OS cenários simulados	474
APÊNDICE F – DADOS E VALORES ESTIMADOS E UTILIZADOS PARA MENSURAÇÃO DA PERDA INTERINA	488
APÊNDICE G – DETALHAMENTO DA METODOLOGIA DA DINAMICA POPULACIONAL DO PEIXE CASCUDO (<i>HYPOSTOMUS AFFINIS</i>).....	506
APÊNDICE H – DETALHAMENTO DOS VALORES BRUTOS OBTIDOS EM CADA UMA DAS LOCALIDADES E SÍTIOS AMOSTRAIS CONTEMPLADOS NOS ESTUDOS UTILIZADOS	510

APÊNDICE I – DETALHAMENTO DE TODOS OS CÁLCULOS NECESSÁRIOS AO ALCANCE DOS RESULTADOS DAS CURVAS DE CRESCIMENTO OBTIDAS	512
APÊNDICE J – PADRÕES DE CO-OCORRÊNCIA DE TROGON SURRUCURA E LEPTOPOGON AMAUROCEPHALUS EM DADOS EMPÍRICOS OBTIDOS NO DIAGNÓSTICO DOS DANOS NO RIO DOCE	519
APÊNDICE K – LISTAGEM DAS AVES QUE NIDIFICAM EM CAVIDADES COM OCORRÊNCIA NA BACIA DO RIO DOCE	521
APÊNDICE L – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA PERDIDA PONDERADA PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS AFETADOS PELO DESASTRE DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO	524
APÊNDICE M – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA COMPENSADA PONDERADA PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS AFETADOS PELO DESASTRE E QUE POSSUEM ÁREAS REMANESCENTES APTAS PARA COMPENSAÇÃO.....	529
APÊNDICE N – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA COMPENSADA PONDERADA PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS SELECIONADOS NA BACIA DO RIO DOCE E LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE	532
APÊNDICE O – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA COMPENSADA PONDERADA PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS SELECIONADOS NA BACIA DO RIO DOCE E LOCALIZADOS EM AMBIENTE AQUÁTICO	539

1 INTRODUÇÃO

A Bacia 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. A Bacia integra 230 municípios incluídos, total ou parcialmente na mesma, sendo 202 em Minas Gerais e 28 no Espírito Santo. Segundo informações do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (CBH-Doce), a bacia compreende uma população total de 3,5 milhões de habitantes (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2019a).

A empresa Samarco Mineração S/A de propriedade da Vale S/A e da BHP Billiton Ltda possui uma unidade em Mariana MG, município que integra a bacia, onde explora o minério de ferro, por meio da extração do mesmo em duas minas, Alegria Norte e Alegria Sul (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2019a). Como parte da estrutura do empreendimento, a empresa possui dois reservatórios para a estocagem do rejeito resultante do processo de beneficiamento do minério de ferro, denominados de Barragem Fundão e Barragem Germano. E ainda, há um terceiro reservatório para o armazenamento da água do processo industrial e retenção de sedimentos advindos das barragens de rejeitos, sendo este reservatório denominado de Barragem Santarém (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2019a).

Em 05 de novembro de 2015 houve o rompimento da Barragem Fundão 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, isto é, afetando os rios Gualaxo do Norte, Carmo e alcançando o Rio Doce e a região costeira adjacente à sua foz. Após o rompimento, o rejeito continuou vazando da cava de Fundão, influenciado pelo período chuvoso, incrementando o volume extravasado em, aproximadamente, mais 11 hm³, resultando em um total de 44 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 desta barragem (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2019a).

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 e valoração econômica dos danos.

O desastre ocorrido causou diversos danos ambientais que afetaram os recursos e serviços ecossistêmicos da região, ocasionando, o que a ciência econômica denomina de externalidades negativas. Segundo Longo (1993) a externalidade é definida como uma imposição de um efeito externo causado a terceiros, gerada em uma relação de produção, consumo ou troca. A externalidade pode ser tanto negativa quanto positiva, isto dependerá dos efeitos gerados aos terceiros. Com o tempo, a ciência econômica percebeu a necessidade de incorporar as externalidades negativas, mas, especificamente, aquelas que causam danos ambientais, aos custos dos agentes poluidores, isto é, aos custos das atividades econômicas. A fim de que, desta maneira, houvesse um pagamento monetário a esses efeitos negativos, sendo eles intencionais ou não, levando o agente econômico à busca constante pela eficiência e redução dos mesmos.

Desta maneira, o desastre ocorrido e que afetou a bacia do Rio Doce e a região costeira adjacente, necessita de mensuração econômica, com o intuito de medir em termos monetários o que representou os danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico/cultural ocorridos e, assim, gerar para a sociedade alguma compensação, frente à perda observada. Diante do exposto, a primeira fase do processo incluiu a realização dos diagnósticos de danos, que levantaram e avaliaram todos os danos oriundos do desastre, para que posteriormente as metodologias para a Valoração Econômica dos Danos Socioambientais pudessem ser aplicadas. Ressalta-se que o escopo destas metodologias considera apenas a valoração dos serviços ecossistêmicos e serviços histórico/culturais, isto é, focando apenas na questão ambiental e no patrimônio cultural, e que outros danos associados ao contexto socioeconômico da região pertencem a outro escopo executado por outra entidade. Assim, estabelece-se que o termo, danos socioambientais, engloba os danos ao patrimônio histórico/cultural.

Para a valoração econômica dos danos socioambientais foram empregadas duas metodologias distintas: Método de Equivalência de Habitat (MEH) e Recursos (MER) e Método de Valoração Contingente (VC) cuja aplicação é denominada de Pesquisa aos Danos Totais. O emprego dessas duas metodologias se deu, a fim de capturar diferentes perspectivas de valores, incluindo o valor do dano moral. Em 2018, foi apresentado o Relatório Metodológico de Valoração Econômica e Identificação dos Danos Ambientais (versão preliminar) com uma breve análise sobre as abordagens para a valoração de danos, porém, por não ser seu objetivo, não especificou qual delas seria utilizada. Em janeiro de 2020, foi apresentado o Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais. Esse documento teve como objetivo apresentar os dois métodos selecionados que foram aplicados para a valoração e, ainda, situar as entidades envolvidas no processo quanto ao andamento dos trabalhos.

Desde o último relatório apresentado em janeiro de 2020, ambas as valorações deram continuidade aos seus processos, sendo que a valoração pelo método contingente foi concluída em maio de 2020, cujos resultados e processos são descritos detalhadamente em relatório separado, denominado de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais: Valoração Contingente, entregue pelo LACTEC em 2020. E o Método de Equivalência de Habitat (MEH) e Recursos (MER), cujo cálculo do valor dos danos foi concluído em maio de 2021 e cujos processos metodológicos e resultados estão descritos neste documento.

Desta forma, este documento expõe detalhadamente todos os passos da aplicação do método em cada um dos habitats selecionados para o processo de valoração. O documento é dividido em três partes: a primeira se concentra em apresentar detalhadamente a metodologia do MEH/MER; a segunda se destina a apresentar o processo de aplicação desse método nos habitats e recursos valorados, mostrando a definição de métricas, construção das curvas de recuperação e compensação, perdas interinas descontadas, definição e descrição das ações de recuperação e compensação, monetização das perdas e taxas de equivalência; por fim, a terceira e última parte se concentra na apresentação do resultado consolidado final da valoração dos danos socioambientais causados ao Rio Doce, mostrando tanto o resultado da aplicação do MEH/MER, como também o resultado com valores atualizados para 2021 da valoração contingente, e o procedimento de combinação dos valores dessas duas metodologias.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE O MÉTODO DE EQUIVALENCIA DE HABITAT OU RECURSO

A Lei Federal 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, Lei de Crimes Ambientais, determina no art. 19 que a perícia de constatação do dano ambiental, sempre que possível, fixará o montante do prejuízo causado para efeitos de prestação de fiança e cálculo de multa. Tal determinação coloca diante das ciências econômicas e naturais um desafio de união de ambas as ciências na busca por traduzir os danos biológicos, químicos, físicos e outros danos ambientais em valores monetários.

Ao analisar o meio ambiente pela perspectiva econômica, o mesmo oferece uma ampla gama de bens e serviços necessários à vida do homem. Alguns desses bens e serviços são explorados diretamente pelo mercado, com preços e quantidades bem definidos, que podem ser de propriedade individual ou apropriados, como, por exemplo, a pesca comercial. Por outro lado, há outros bens denominados de bens públicos, como rios e parques, que são de propriedade coletiva e não são negociados em mercados.

Pela perspectiva ambiental o meio ambiente é provedor de serviços ecossistêmicos, gerando aos homens benefícios diretos e indiretos para sua qualidade de vida, sendo esses benefícios oriundos do funcionamento das funções ecossistêmicas como ciclo da água, controle climático, fertilidade do solo, entre outros. Quando um desastre afeta tais serviços promovidos pelo meio ambiente, as consequências afetam de forma direta e indireta o estilo de vida daquela sociedade dependente daqueles serviços ecossistêmicos, por isso a necessidade de monetizar tais perdas, a fim de garantir o estabelecimento de um montante financeiro a ser cobrado do responsável pelo ocorrido, retornando à sociedade algum grau de compensação.

Por isso, há uma ampla literatura científica e inúmeras experiências internacionais com marcos regulatórios e legais sobre como valorar os danos causados por empreendimentos.² Diante do desastre do rompimento da Barragem de Fundão, dentre os métodos de valoração existentes, foi selecionado o Método de Valoração de Danos Ambientais de Equivalência de Habitat ou Recurso (MEH/MER). A escolha desse método se deu devido à sua instrumentalidade para monetizar danos ambientais considerando o tempo na sua mensuração e análise. As consequências do desastre ocorrido são, em sua maioria, de médio e longo prazo, logo a sociedade irá permanecer durante um período de tempo sem os habitats e recursos perdidos, ou ao menos, com habitats e recursos em qualidade inferior ao que existia antes do rompimento da barragem. Por isso, o método de valoração econômica a ser aplicado, necessita valorar as perdas, não apenas no ano em que o desastre ocorreu, mas também ao longo do tempo, até o momento da recuperação total/parcial, quando esta ocorrer, abrangendo desta forma a perda interina. Por isso o MEH/MER foi selecionado, pois os procedimentos estimativos nessa abordagem se baseiam na mensuração do montante de serviços ou recursos a serem recuperados para compensar as perdas interinas. Adiciona-se que, o conceito adotado nesse método é que a população está disposta a aceitar como compensação pelo dano provocado a troca de uma unidade de serviço perdido por uma unidade de serviço fornecido pelo habitat restaurado/compensado (ALLEN, 2007). Logo a restituição devido ao impacto é realizada por meio da recuperação do habitat afetado,

2 Bateman (2002), Freeman (2003), Dunford et al (2004), Navrud (2004), NOAA (2000), Allen (2007) e REMEDE (2007)

quando possível, adicionando-se um novo habitat/recurso semelhante que forneça os serviços equivalentes aos que foram perdidos, considerando a data do evento até a data da restituição dos serviços ecossistêmicos.

Acrescenta-se que o MEH/MER é recomendado quando as perdas de serviço são primariamente ecológicas, e não serviços diretos de uso humano, como recreação e outros socioeconômicos. Nos casos em que o habitat afetado e outros serviços ecológicos são identificáveis e a compensação equivalente é possível, o MEH/MER tende a ser eficaz na mensuração da quantidade de compensação necessária para equiparar as perdas do serviço ecossistêmico (DESVOUSGES et al., 2018).

2.1 AVALIAÇÃO DE DANOS AOS RECURSOS NATURAIS NO ÂMBITO INTERNACIONAL

De acordo com a lei dos EUA (e algumas leis europeias), empresas privadas e entidades públicas, como as concessionárias de água, geralmente podem reivindicar danos e receber indenizações por excedentes de produtos perdidos ou pelo custo de limpeza e interrupção em serviços públicos de terceiros responsáveis por causar danos ambientais. Geralmente, são perdas de bens e serviços baseadas no mercado, com preços (relativamente) bem definidos. As perdas de bens públicos, no entanto, como impactos em parques e rios, que são de propriedade coletiva e não são comercializadas em mercados organizados, não são precificadas. São considerados bens e serviços não comercializáveis. Geralmente, indivíduos não podem fazer reivindicações legais privadas pedindo indenização por perda de bens e serviços públicos. Em vez disso, uma entidade governamental, geralmente chamada de *trustee*, precisa fazê-lo. E por não serem precificados, pode ser muito desafiador valorar tais reivindicações legais. A avaliação de danos aos recursos naturais (ADRN) é um processo científico e legal para determinar a quantia de indenização devida ao público por danos aos recursos naturais causados pelo derramamento de substâncias prejudiciais, para que o bem-estar da sociedade esteja igual a quanto antes da ocorrência do derramamento³.

Ao que se sabe, o primeiro ADRN foi realizado para um incidente ambiental ocorrido após o derramamento de óleo de Santa Barbara, na costa da Califórnia, em 1969. O estudo foi uma tentativa de economistas de quantificar o valor das perdas não comercializáveis para os usuários recreativos por conta da interdição do uso de praias, que ficaram cobertas de óleo durante muitos meses por conta do vazamento de um oleoduto conectado a uma plataforma de perfuração de petróleo offshore (CLARKE E HEMPHILL, 2002). Em 1978, uma equipe internacional de economistas e físicos da França e dos Estados Unidos realizou um ADRN abrangente das consequências ambientais e econômicas do vazamento de um navio-tanque da Amoco Cadiz na costa da Bretanha, na França. O petróleo bruto vazado do navio-tanque aterrado se estendeu por centenas de quilômetros na costa, interrompendo os usos comerciais e recreativos dos recursos marinhos, matando inúmeras quantidades de aves marinhas e outras formas de vida marinha, impactando negativamente o uso recreativo dos recursos litorâneos por mais de dois anos (FAIRHALL E JORDAN, 1980).

3 Ver, por exemplo, NOAA (2000) para os EUA e REMEDE (2007) para a União Europeia.

Depois de vários vazamentos de petróleo altamente divulgados e prejudiciais, além de outros vazamentos de resíduos nocivos, ocorrerem nos Estados Unidos na década de 1970, foi promulgada a Lei Abrangente de Resposta Ambiental, Indenização e Responsabilidade de 1980 (CERCLA) – às vezes conhecida como “O Superfundo” – pelo governo dos EUA. Entre outras coisas, tal lei criou a capacidade, ou exigência, de governos estaduais e certas agências federais agirem como *trustees* em nome da sociedade para processar os responsáveis por danos causados pela perda do uso de recursos naturais e do meio ambiente como resultado do vazamento de certas substâncias perigosas. As recuperações de perdas sob a lei CERCLA são limitadas ao valor total do uso público de recursos ambientais e naturais prejudicados, não incluem perdas comerciais privadas (excedente dos produtores) e devem ser usadas para a restauração dos recursos naturais afetados. As recuperações também podem incluir o custo da limpeza ao público. Depois que a CERCLA foi aprovada, houve vários casos de ADRN movidos contra partes responsáveis nos tribunais federais dos EUA por danos ao meio ambiente e perda de uso por parte do público devido ao derramamento de resíduos de operações industriais perigosos, vazamentos em locais de mineração e derramamentos de petróleo e substâncias perigosas de oleodutos, navios-tanque e outras formas de transporte.

Os métodos para avaliar danos a recursos ambientais e o custo dos danos ao público começaram a evoluir rapidamente sob a lei CERCLA. Essa evolução nas ciências naturais e na economia aplicada continuou com o extenso ADRN realizado para o vazamento de óleo Exxon Valdez, de 1989. Com a indenização das reivindicações públicas nesse caso alcançando meio bilhão de dólares, a indústria começou a desafiar vigorosamente as metodologias dos *trustees* na avaliação de danos em casos subsequentes. Essa tendência permanece hoje, onde quer que os casos de ADRN sejam implantados por *trustees* públicos, inclusive na Europa e na América do Sul. Tais tendências na evolução da ciência e da economia aplicadas e a oposição das partes responsáveis às reivindicações motivadas por danos aos recursos naturais são bem demonstradas no caso do ADRN realizado para o vazamento de óleo da *BP Deepwater Horizon* de 2010 no Golfo do México, nos EUA.

Após o vazamento de petróleo da *BP Deepwater Horizon*, em 2010, no Golfo do México (GOM), as agências *trustees* federais e estaduais dos EUA realizaram um ADRN bastante sofisticado dos efeitos do vazamento no meio ambiente e dos resultantes danos econômicos para a sociedade. O estudo de danos econômicos incluiu estimativas de perdas para o público, tanto para uso direto, como impactos em atividades recreativas na praia, quanto para o uso passivo, como a morte de aves marinhas e outros organismos biológicos prejudicados ou mortos pelo petróleo. As demandas dos envolvidos em atividades comerciais que foram afetadas negativamente, como turismo e pesca comercial, não foram incluídas no ADRN público, mas tratadas em ações legais privadas e separadas.

Os danos causados pelo vazamento de petróleo da *BP Deepwater Horizon* afetaram uma gama elevada e complexa de habitats, tendo um escopo ecológico sem precedentes na história norte americana. Os danos afetaram o oceano na profundidade de 1 milha a partir da superfície, habitats marinhos, bem como os habitats costeiros e próximos à costa, e a biota da região (NOAA, 2016).

Para a valoração econômica dos danos desse evento foram aplicados tanto a MEH/MER como o método de valoração contingente. Como resultado da aplicação do MEH/MER, a partir das mensurações dos danos ocorridos, foi elaborado pela NOAA e demais entidades envolvidas, um programa

de restauração dos danos denominado de *Final Programmatic Damage Assessment and Restoration Plan and Final Programmatic Environmental Impact Statement* (Final PDARP/PEIS), sendo composto por diferentes modalidades de restauração, com o objetivo restaurar os recursos ambientais e os serviços ecológicos e os serviços de recreação que existiam na área afetada antes do incidente. Assim, o plano de restauração emprega uma abordagem abrangente e integrada a fim de lidar com danos que afetaram o ecossistema da região, tendo como foco a área do incidente, o norte do Golfo do México, Texas, Louisiana, Mississippi, Alabama e Flórida.

Outro exemplo de aplicação prática no MEH/MER que pode ser citado foi o acidente ocorrido em julho de 2011, quando um gasoduto de 12 polegadas de diâmetro (Silvertip Pipeline) pertencente a ExxonMobil Pipeline Company rompeu próximo a Laurel, Montana, resultando na descarga de petróleo bruto no Rio Yellowstone e planície de inundação. Foi estimado um volume de aproximadamente 63.000 galões (cerca de 1.500 barris) de óleo, que ocorreu durante um evento de alto fluxo, afetando aproximadamente 85 rios e planície de inundação associadas. As áreas afetadas, considerando o acidente e as ações emergências associadas, afetaram adversamente recursos naturais localizados nas jurisdições dos Estados Unidos e do Estado de Montana, o rio Yellowstone e linhas costeiras adjacentes, incluindo, mas não se limitando a planície de inundação, litoral, pântanos e outras áreas ribeirinhas, ilhas, campos, pastagens, terras baixas, prados e matagais (STATE OF MONTANA; DOI, 2017).

Utilizando o MEH/MER foi elaborado o Plano de Avaliação e Restauração de Danos Programáticos e Ambientais para a ExxonMobil Pipeline Company pelo Estado de Montana e pelo Departamento do Interior dos Estados Unidos, agindo coletivamente com o *Trustees*. Assim, o método foi aplicado para valoração dos danos causados ao habitat terrestre/ribeirinho, habitat aquático e biota aquática e aves que foram afetadas pelo acidente (STATE OF MONTANA; DOI, 2017).

No caso europeu, o cálculo de perdas e dimensionamento de recomposição de danos ambientais, anteriormente era qualitativo, exigindo apenas a reparação compensatória, por meio da substituição das áreas perdidas por áreas com habitat equivalente, seguindo a proporção de 1:1 (European Commission, 2006). No entanto, em 2004, a promulgação da Diretiva de Responsabilidade Ambiental (ELD) exigiu uma quantificação mais rigorosa por meio da aplicação do MEH/MER (DESVOUSGES *et al.*, 2018). Como resultado, em 2007, a Comissão da UE patrocinou o projeto REMEDE (Métodos de Equivalência de Recursos para Avaliar o Meio Ambiente (CHAPMAN; LEJEUNE, 2007a)), que gerou um conjunto de ferramentas e métodos para avaliar os danos aos recursos e a reparação necessária sob a ELD por meio do uso do MEH/MER (MAGLIANO, 2019).

3 MÉTODO DE EQUIVALÊNCIA DE HABITAT OU RECURSO

O Método de Equivalência de Habitat (MEH) e Recursos (MER) foi utilizado para a Valoração Econômica dos Danos Socioambientais ocorridos em decorrência do rompimento da Barragem de Fundão. Este método considera o meio ambiente como provedor de recursos e serviços, e a reparação do dano se refere as ações de recuperação e compensação para gerar os recursos e serviços equivalentes (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). Isto é, ações que permitam retornar à sociedade a mesma quantidade de recursos e/ou serviços perdidos com o desastre.

3.1 A ABORDAGEM METODOLÓGICA

A abordagem do método de equivalência descrita a seguir, se aplica somente aos danos ambientais passíveis de compensação, por meio de ações que gerem serviços ou recursos equivalentes ao existente antes do desastre, promovendo estas ações no próprio local do dano ou em outro.

A relação entre compensação e recuperação precisa ser bem compreendida, pois um recurso e/ou serviço ambiental perdido, mesmo que não seja recuperável no local do dano, se for compensável, será mensurado pelo método. A Figura 1 facilita o entendimento.

Figura 1 – Entendimento Entre Recuperação e Compensação



Fonte: Lactec, 2021.

No caso de haver danos irreversíveis, isto é, quando não há possibilidades de compensação de serviços ou recursos equivalentes (como a extinção de espécies, por exemplo), não será possível aplicar o método de equivalência. Antes de iniciar a exposição do método a ser utilizado, faz-se necessário introduzir os conceitos chaves que norteiam a metodologia, exibidos no Quadro 1, sendo que esses conceitos serão lembrados ao longo deste relatório.

Quadro 1 – Apresentação dos principais conceitos que norteiam a metodologia

Linha Base: A linha base representa o quantitativo do recurso ou serviço ambiental que existia antes do desastre do rompimento da barragem do Fundão em Mariana (MG).

Métrica: A métrica se refere a uma variável selecionada que melhor representa e mensura o dano ocorrido que afetou o serviço ou recurso ambiental.

Recuperável (Reversível): O dano ser recuperável (reversível), para a metodologia de valoração, representa o recurso ou serviço que apesar de ter sofrido o dano ambiental, pode ser recuperado aos níveis anteriores (linha base). Mas ressalta-se que, mesmo que esta recuperação não alcance novamente a linha base, ou em termo qualitativos, seja diferente da condição original, ainda assim, é considerado recuperável (reversível), pois existe um grau de recuperação.

Irreversível: O dano ser irreversível, para a metodologia de valoração, representa o recurso ou serviço que sofreu o dano ambiental, e após essa ocorrência, não há mais nenhuma forma de compensação, natural ou externa, entendendo-se desta maneira que o recurso ou serviço foi perdido definitivamente.

Recuperação Natural: Se refere a recuperação física, química ou biológica natural sem qualquer intervenção humana, e seu processo pode levar muito tempo.

Ações de Recuperação Externa: As ações de recuperação externa se referem às ações e atividades promovidas pelo homem por meio de técnicas e processos disponíveis, aplicados para acelerar a recuperação natural do serviço ou recurso afetado e, assim reduzir o tempo de recuperação para que o ambiente retorne ao nível de provisão de serviços e recursos antes do desastre.

Ações de Compensação: Estas ações se referem as ações de recuperação que geram serviço ou recurso equivalente ao afetado, e podem ser realizadas no local afetado, porém retornando a sociedade outro recurso/serviço que não é o que foi afetado diretamente, ou ainda, serem realizadas em outro local, não afetado pelo desastre, podendo ser esse local no mesmo município, ou até mesmo em outro estado da federação.

Fonte: Lactec, 2021.

O MEH se aplica a um dano por meio do qual vários serviços foram afetados e o MER quando é o caso de vários recursos que são impactados. Ambos seguem o mesmo protocolo. Após a ocorrência do dano, no caso do mesmo ser recuperável, seu retorno às condições iniciais pode ocorrer por meio da recuperação natural e/ou por meio da recuperação externa.

As condições iniciais se referem a Linha Base (LB), que como já evidenciado, se referem ao quantitativo do serviço e/ou do recurso ambiental antes da ocorrência do dano. Ressalta-se que a LB sempre refere a condição real de como era antes e não uma condição ideal, considerando o que deveria ser. Tal compreensão é importante, tendo em vista que algumas das áreas ambientais analisadas já se encontravam em estado irregular e/ou não condizente com o que preconiza a legislação ambiental brasileira. Mas, será essa condição precária existente previamente que será fixada como a LB do ambiente valorado. Tal decisão é adequada, na medida em que impede que sejam computados no processo outros danos ambientais de outras origens e contextos da região, evitando penalizar o responsável pelo desastre por danos que não foram provocados pelo mesmo. Além disso, a mensuração da linha base utilizada neste processo de valoração, foi elaborada com base na métrica selecionada, sendo obtido o quantitativo a ser considerado para o método, ao invés de se utilizar das informações do Relatório de Linha-Base entregue em novembro de 2017 e atualizado em 2018. Por isso, os valores de LB aqui apresentados não devem ser confundidos com as informações e dados obtidos no referido documento, embora haja sinergias e concordâncias entre as informações.

A metodologia de valoração inicia-se com a definição de uma métrica que medirá as perdas e ganhos. Um habitat ou recurso pode gerar diferentes serviços ecossistêmicos. No método de equivalência de habitat ou recurso, se faz necessário trabalhar com uma métrica que melhor represente o dano sofrido por habitat ou recurso analisado. Logo a escolha da métrica deve observar as seguintes orientações, de modo que a variável escolhida traduza os quesitos abaixo⁴:

- capacidade de garantir o retorno das características biofísicas e químicas após a recuperação e compensação;
- oportunidade em termos de aplicabilidade das ações na área impactada e/ou fora;
- possibilidade técnica de acuidade na mensuração dos parâmetros estimativos;
- benefícios em termos de equidade intra e intertemporais (perdedores e ganhadores de serviços hoje e no futuro).

Como exemplo de métrica podemos citar: área, vazão, biomassa, carbono, indivíduos, abundância, entre outros.

A recuperação natural se refere a recuperação sem qualquer intervenção humana, ou seja, a recuperação baseada nas interações física, química e biológica da natureza, que pode levar muito tempo e, muitas vezes, não retornar à linha de base, isto é, não retornar aos mesmos níveis de provisão de serviços e recursos anteriores ao dano. Por outro lado, a recuperação externa se refere às ações promovidas pelo homem por meio de técnicas e processos disponíveis aplicados para acelerar a recuperação natural do serviço ou recurso impactado e, assim, reduzir o tempo de recuperação para que o ambiente retorne ao nível de provisão de serviços e recursos antes do desastre.

A escolha dessas ações para a recuperação externa deve considerar alguns fatores como:

- Viabilidade técnica: serem tecnicamente viáveis, isto é, serem passíveis de implementação;
- Ocorrência de externalidades: não gerar consequências negativas ao meio ambiente, patrimônio e às comunidades, ou seja, que as mesmas não desencadeiem outros danos ou que potencializem os já ocorridos; e
- Grau de equivalência: o ambiente deve ser o mais próximo possível do original (antes do dano) em termos de qualidade.

A análise das ações de recuperação externa deve ser estritamente técnica sem qualquer preocupação com custos e considerar todas aquelas ações tecnicamente viáveis que contribuam para a recuperação, inclusive, no que diz respeito à valoração. Ou seja, todos os grupos de ações necessárias para realizar a recuperação de um habitat precisam ser consideradas e ter seus custos contabilizados para que sejam utilizados no método de valoração.

Essas ações externas devem considerar as ações já em curso e que estarão em curso, até o fim da avaliação, pela Renova e outros órgãos atuantes após o desastre, sejam públicos ou privados. Efeitos negativos dessas ações devem ser considerados, quando possível, por meio de ações externas adicionais para sua correção e/ou ajustados na equivalência. Do mesmo modo, ações que geram efeitos positivos também precisam ser consideradas, afim de contabilizar esses ganhos permitindo que os danos mensurados estejam ajustados com a perda existente.

4 Ver resenha sobre métricas para habitats e recursos usados em diversos estudos de MEH e MER em Scemama e Harold (2016).

Independentemente da modalidade de recuperação, existe um período de tempo para a recomposição dos serviços e/ou recursos perdidos, que culmina em um intervalo de tempo no qual a sociedade permanece sem aquele serviço e recurso ambiental. A fim de melhorar a compreensão, cita-se um exemplo, uma floresta que será replantada levará 25 anos até alcançar a idade adulta que possuía antes do desastre. Esses 25 anos de espera reflete o período no qual a sociedade ficará sem este recurso e sem os serviços ambientais que eram prestados pela mesma. Porém, durante este tempo de espera a perda não permanece igual a cada ano, pois, devido à recuperação gradual, que ocorre anualmente, alguma quantidade de serviço e/ou recurso perdido é recuperada reduzindo, assim, o quantitativo das perdas. Desta forma, a perda total, ou seja, o somatório de perdas ocorridas ano a ano, é denominada de perda interina. No exemplo, a perda interina é a perda total líquida (perda bruta menos a recuperação gradual) descontada a valor presente, ocorrida durante os 25 anos, no qual a sociedade permaneceu sem o recurso e/ou serviço (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). Assim, esta variação anual do serviço e/ou recurso em recuperação é traduzida por uma função de recuperação, que estima a quantidade anual dos serviços e/ou recurso recuperados a cada ano.

Cabe neste momento introduzir o aspecto da compensação da metodologia. Apesar das ações de recuperação, as mesmas são limitadas pelas condições técnicas e geralmente não estabelecem a mesma quantidade de serviços e/ou recursos anterior ao desastre, gerando assim perdas definitivas. E ainda, consideram-se nestas perdas definitivas, situações nas quais, dentro de uma área que está sendo recuperada, parte dela foi danificada permanentemente. Desse modo, a sociedade perde um serviço e/ou recurso que antes do dano era prestado e, posteriormente a ele, foi extinto. Além desses dois aspectos mencionados, há, ainda, outro fator, o tempo, abordado no parágrafo acima, que se refere ao tempo de espera da sociedade para obter o serviço/recurso novamente. Como mencionado, a perda interina é descontada a valor presente, para tanto há a necessidade da aplicação de um fator de desconto sobre as perdas.

Como se considera as perdas durante a recuperação, o somatório dessas perdas descontadas é sempre maior do que o dano inicial. Assim, essas perdas precisarão de compensação, ou seja, mesmo havendo recuperação, não será em termos quantitativos suficiente, pois, a parte responsável pelo dano estará ainda devendo à sociedade uma quantidade de recursos e/ou serviço referente ao tempo de espera e/ou referente a baixa equivalência da recuperação ou ainda referente a um dano residual permanente, o que culminará na busca de outros locais para a compensação.

Portanto, o valor do dano será composto pelo esforço de promover a recuperação externa, e também por ações que compensem as perdas definitivas e/ou interinas. Estas perdas juntas, sempre serão maiores que a perda inicial provocada pelo dano, pois, elas representam não apenas o que a sociedade perdeu com o desastre, mas também o tempo em que a mesma fica sem o serviço e o recurso. Por isso, como já ressaltado, além das ações de recuperação também é necessário haver ações de compensação. Assim, esclarece-se que a compensação se refere a ações de recuperação que gerem serviços ou recursos equivalentes ao afetado e, que podem ser realizadas no local afetado quando o recurso/serviço compensado é outro que não o afetado pelo desastre, ou ainda, serem realizadas em outro local, que não corresponda aquele que foi diretamente afetado pelo desastre, podendo ser no mesmo município, ou até mesmo em outro estado da federação.

Utilizando o mesmo exemplo já citado, vamos supor que foram suprimidos 50 hectares de florestas devido ao desastre. Considerando o tempo e a taxa de recuperação, esse dano resultou em perdas interinas de 150 hectares descontados. Isto é, a quantidade total dos serviços e/ou recursos ambientais perdidos com os 50 hectares de floresta derrubadas correspondem aos serviços e/ou recursos ambientais de 150 hectares ao final do período. Isso equivale a dizer que 150 hectares descontados no tempo deverão ser recuperados para compensar os 50 hectares que foram suprimidos. Assim, para a definição das ações de compensação, deverão ser considerados os mesmos fatores, já citados para a escolha das ações de recuperação externa.

Da mesma forma, as ações de compensação também estão submetidas à variação do aumento da quantidade de serviços e/ou recursos ao longo do tempo, gerando uma função de compensação, que estima a quantidade anual dos serviços e/ou recurso compensados a cada ano. Sendo que é necessário identificar o ano em que a compensação se inicia após a ocorrência do dano; os anos durante os quais as ações de compensação estão sendo promovidas e que geram crescimento dos serviços ou recurso; e os anos nos quais os serviços ou recursos permanecerão atuando após findo o crescimento, ou seja, por quanto tempo se manterão na natureza. Assim a metodologia de valoração dos danos ambientais possui as seguintes funções: função de recuperação natural, função de recuperação de ações externas e função de compensação. Elas se diferenciam em termos de tempo, ou seja, poderão ser naturais ou externas. Sendo que, se entende que todas as ações que são externas, isto é, promovidas pelo homem, tenderão a apresentar um tempo menor em relação à recuperação natural.

O comportamento dessas funções, isto é, o quantitativo de crescimento dos serviços ou recursos, pode acontecer de forma contínua ao longo do tempo de recuperação ou compensação, ou pode ocorrer de forma distinta entre esses períodos. O crescimento pode ser expresso por funções lineares, nas quais a variação anual é sempre igual ou pode ser não-linear com funções quadráticas, exponenciais e logarítmicas, ou ainda, essas variações anuais podem ser estimadas com valores sem uma trajetória previamente definida.

Quando o termo descontado é utilizado, ele se refere a mesma lógica utilizada na matemática financeira, quando se realiza o desconto no tempo. Porém, as perdas e ganhos descontados não se expressam em termos monetários, mas sim, nas unidades de medidas das métricas adotadas, como, por exemplo, hectares, área, volume e outros. Para realizar esta correção no tempo, a metodologia utiliza um fator de desconto cuja fórmula matemática é de juros compostos. Mais adiante, esta questão será abordada detalhadamente.

Quando há evidências de que o tempo de recuperação e/ou compensação é superior a 50 anos, o tempo total pode ser estimado de forma bastante aproximada porque para prazos acima de 50 anos os valores totais de perdas e ganhos descontados não variam significativamente por conta do desconto no tempo. Também, pelo mesmo efeito do desconto para prazos muito longos, a função de recuperação não afeta significativamente o valor final e, portanto, na ausência de referências teóricas ou empíricas da literatura, um crescimento linear pode ser adotado. Ou seja, tempos de recuperação muito longos apresentam funções que tendem a uma variação constante, o que reduz erros de estimativas no modelo adotado. Por isso, no momento da definição dessas curvas, os períodos de curto prazo (1 a 50 anos) serão mais criteriosamente definidos, pois neles, as variações apresentarão maior peso matemático na equação.

Em suma, o valor dos danos seria a soma dos custos de recuperação e compensação.

Logo a restauração física, química ou biológica dos danos será realizada de duas formas⁵:

- a) Com ações de recuperação no mesmo local impactado, e
- b) Com ações de compensação, no mesmo local ou em outro local.

Comenta-se que, as perdas a serem compensadas, também serão monetizadas pelo produto entre as perdas descontadas e o custo unitário das ações de compensação, gerando um valor total monetário de compensação.

Após o cálculo das perdas e o tempo e a função de recuperação e compensação e os ganhos gerados por esses últimos, é necessário avaliar a equivalência entre afetado, recuperado e compensado. Isso porque o método considera que as ações de recuperação e compensação podem não recuperar ou compensar totalmente a qualidade ambiental dos serviços e recursos prestados pelo ambiente, em termos de riqueza biológica, genética, física e outras. Desse modo, a equivalência mede o quanto que este meio recuperado/compensado é semelhante ao meio que existia antes do desastre, representando uma correção do valor monetário obtido e permitindo o aumento ou redução do mesmo. A equivalência se expressa em termos percentuais, por meio do qual se estima uma paridade de cada serviço ou recurso impactado com a expectativa de recuperação ou compensação das ações propostas. Essa equivalência seria então:

- igual a 1 (ou 100%): recuperado ou compensado com qualidade ambiental comparável ao que havia antes do desastre;
- menor que 1 (ou 100%): recuperado ou compensado com qualidade ambiental menor do que havia antes do desastre;
- maior que 1 (ou 100%): recuperado ou compensado com qualidade ambiental maior do que havia antes do desastre;

No momento da construção dessa paridade, é necessário avaliar o estado da qualidade ambiental de cada serviço ou recurso afetado pelo dano após a recuperação e/ou compensação, ou seja, ao final de uma recuperação, todos os serviços ou recursos deverão ser analisados, a fim de verificar a equivalência dos mesmos em relação a sua condição original. No exemplo dado, os 150 hectares de vegetação recuperados, prestam serviços relacionados ao solo, água, fauna e outros. Dessa forma, é possível determinar uma equivalência para cada um desses serviços, para tanto, recomendando-se adotar uma das três estratégias abaixo:

- Quando são serviços ou recursos com paridade próxima, estimar o valor médio, isto é, ao determinar diversas equivalências para cada serviço prestado, se elas apresentarem valores percentuais próximos, melhor utilizar a média desses valores;
- Quando os percentuais de equivalência são poucos e os mesmos divergem muito, estimar a média ponderada com peso, diferenciando a importância de cada um para a qualidade e disponibilidade agregada dos serviços ou recursos impactados;
- Quando os percentuais de equivalência são muitos e divergem muito, utilizar o método do componente principal.

5 Ver o desenvolvimento mais detalhado dessas fórmulas, p.ex., em Scemama e Harold (2015) e Kohler e Dodge (2006).

3.1.1 PROCEDIMENTOS ESTIMATIVOS PARA MENSURAÇÃO DA QUANTIDADE DE SERVIÇO OU RECURSO RECUPERADO E COMPENSADO⁶

Como já discutido, o objetivo destas mensurações (MEH/MER) é calcular a quantidade de serviço ou recurso que deverá ser recuperado e compensado para restaurar a quantidade de serviço ou recurso perdido no momento do desastre, tendo a linha base como referência. Assim, após a apresentação do quadro dos principais conceitos norteadores e a explanação do funcionamento da metodologia apresentam-se, de forma mais detalhada, os procedimentos estimativos e os parâmetros a serem considerados. Como já explicado, na valoração dos danos ambientais há dois grupos de componentes a considerar, a saber: a recuperação e a compensação. Dessa forma, para a mensuração do dano é necessário conhecer os seguintes parâmetros:

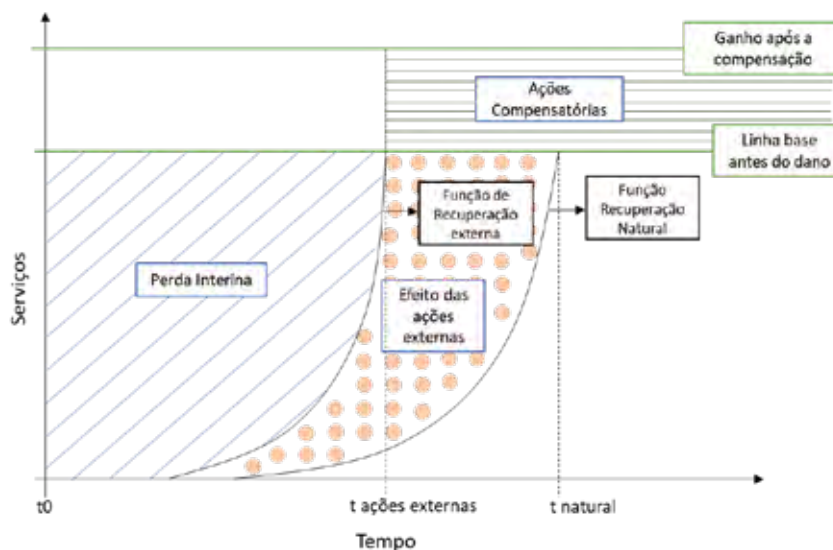
- Linha de base: quantidade de serviço ou recurso existente antes do desastre, que denominamos de linha de base, isto é, a verificação da existência de mudanças negativas no meio analisado, advém da comparação com uma realidade anterior na qual estas mudanças não se faziam presentes;
- Dano: quantidade de serviço ou recurso perdida no ano 1 do desastre: redução da linha de base por causa do desastre (perda inicial);
- Métrica do serviço ou recurso: a variável que melhor reflete a dimensão do impacto sobre o serviço ou recurso;
- Tempo de recuperação natural do serviço ou recurso impactado: o tempo para findar o efeito da recuperação natural, ou seja, o tempo para que os serviços ou recursos retornem à linha base, de forma natural;
- Tempo de recuperação do serviço ou recurso impactado, por meio de ações externas: o tempo para findar o efeito da recuperação das ações externas, ou seja, o tempo para que os serviços ou recursos retornem à linha base, por meio de ações externas;
- Ações de recuperação externa: ações de recuperação para recuperar o serviço ou recurso afetado: definição das ações externas que acelerem a recuperação natural;
- Equivalência ambiental da recuperação externa: percentual que reflete a qualidade ambiental do serviço ou recurso recuperado em relação a sua condição original;
- Ações de Compensação: ações de recuperação, que podem ser no local impactado, porém provendo outros serviços/recursos equivalentes que não são os mesmos que foram afetados, ou em outro local, que não é o local atingido pelo desastre, e que geram o mesmo serviço ou recurso equivalente ao que foi afetado;
- Linha de base da compensação: quantidade de serviço ou recurso já existente noutro habitat ou recurso equivalente onde a compensação será realizada;
- Ano do início da compensação: quantos anos depois a compensação se iniciou após o desastre;
- Tempo de compensação: o tempo para o efeito das ações de recuperação da compensação findar;

6 Ver textos básicos em NOAA (2000) para a experiência nos EUA e REMEDE (2007) para a experiência europeia.

- Tempo de permanência da compensação: o tempo no qual o serviço ou recurso compensado permanece sendo gerado após o fim da compensação;
- Equivalência ambiental da compensação: percentual que reflete a qualidade ambiental do serviço ou recurso compensado em relação a sua condição original;
- Fator de desconto: percentual por unidade de tempo que diminui o valor do serviço ou recurso futuro.

É com base nestas informações que a análise da valoração é realizada, ou seja, quais serviços haviam antes, quais foram perdidos e quanto tempo para obtê-los novamente, sendo que este tempo poderá ser reduzido por meio de ações externas (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). A Figura 2 ilustra a metodologia a ser aplicada, na qual se observam as funções de recuperação natural e externa, o tempo necessário para que o serviço retorne aos níveis anteriores em cada uma das situações e a área que representa a compensação. Como já explicado, mesmo com a redução do tempo da recuperação promovida pelas ações externas, a sociedade permanece com a perda interina representada pela área hachurada em azul. Observa-se que, mesmo com a redução gradual, a cada ano, até que a função de recuperação externa alcance a linha base, há um quantitativo de perda anual dos serviços e/ou recursos ambientais. Esse quantitativo é medido pela equação da metodologia.

Figura 2 – Perda Interina e Ações Compensatórias



Fonte: Lactec, 2021.

As variáveis que englobam a metodologia são:

t = tempo em anos;

t_0 = ano no qual o dano ocorreu;

$t = TI$, momento em que o dano cessa de reduzir a perda do serviço ou recurso;

$t = TR$, momento em que a recuperação natural e/ou de ações externas cessam de adicionar serviço ou recurso, pois os mesmos já alcançaram a linha base;

$t = TC0$, momento em que a compensação se inicia;

$t = TCC$, momento em que a compensação cessa de adicionar serviço (ou recurso);

I = número total de serviços ou recursos danificados;

R = número total de serviços recuperados, e que são equivalentes às perdas interinas e danos residuais;

C = quantidade de serviços ou recursos a ser compensada;

V_i = valor unitário dos serviços ou recursos afetados;

V_r = valor unitário dos serviços ou recursos recuperados;

V_c = valor unitário dos serviços ou recursos compensados;

B_i = linha de base (antes do desastre) dos serviços ou recursos afetados;

B_c = quantidade inicial dos serviços ou recursos compensados;

x_{ti} = quantidade de serviços ou recursos afetados no final do ano t , sendo que $x_{tj} = I/t$ caso a função de recuperação seja linear;

x_{tr} = quantidade de serviços ou recursos recuperados no final do ano t , sendo que $x_{tr} = R/t$ caso a função de recuperação externa seja linear;

x_{tc} = quantidade de serviços ou recursos compensados no final do ano t ; e

σ_t = é o fator de desconto, onde $\sigma_t = 1/(1+d)^t$ sendo 'd' a taxa de desconto social.

Ao considerar estas variáveis, as mesmas serão utilizadas conforme o contexto do que está sendo valorado.

Caso 1: Ações de recuperação do serviço ou recurso impactado (R)

Neste caso, considera-se que o serviço ou recurso impactado é passível de recuperação, há ações tecnicamente disponíveis que podem promover ações externas para potencializar a recuperação natural e alcançar a linha base em menos tempo.

Assim, a estimativa se restringe à quantidade de serviço ou recurso a ser recuperado (R) que seria calculada pela igualdade abaixo:

$$\sum_{0,TI} V_i^* \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti})/B_i\}^* I = \sum_{0,TR} V_r^* \sigma_t^* \{(x_{tr} - B_i)/B_i\}^* R$$

Perdas oriundas do dano, considerando a
Recuperação Natural

Ganhos oriundos das ações de Recuperação
Externa

Note que X_{ti} , perda de serviço ou recurso devido ao dano, considera somente ações de recuperação natural e X_{tr} inclui as ações externas de recuperação que reduz o tempo de recuperação natural do serviço ou recurso.

Caso 2: Ações de compensação do serviço ou recurso impactado em outro local (C)

Nesse caso, além da recuperação (natural e externa) do serviço ou recurso impactado seria possível estimar a quantidade C de serviço ou recurso, para compensar pela perda (R), calculada na igualdade abaixo:

$$\sum_{0,R} V_i^* \sigma_t^* \{(B_i - (x_{ti} + x_{tr}))/B_i\}^* I = \sum_{0,T} V_c^* \sigma_t^* \{(x_{tc} - B_c)/B_c\}^* C$$

Perdas oriundas do dano, considerando a Recuperação Natural e a Externa
Ganhos oriundos das ações de Compensação

Note que a perda X_{ti} , e a recuperação (natural e externa) X_{tr} , são agora estimadas conjuntamente e confrontadas à linha base para identificar a quantidade de C equivalente que ainda resta compensar.

Caso 3: Ganhos e Perdas Adicionais

Quando a recuperação é concluída em tempo R sem conseguir retornar ao B_i (linha base), estima-se a perda adicional que se perpetuará da seguinte forma:

A_r = Perda adicional

V_r = valor unitário dos serviços ou recursos recuperados nas ações externas;

σ_t = é o fator de desconto, onde $\sigma_t = 1/(1+d)^t$ sendo 'd' a taxa de desconto social.

B_i = linha de base (antes do desastre) do serviço ou recurso afetado;

X_r = quantidade de serviços ou recursos recuperados no final do ano t ;

d = a taxa de desconto social

$$A_r = V_r^* \sigma_t^* \{(B_i - X_r)/B_i\}/d$$

Por outro lado, quando a ação de compensação finda no tempo T e a geração do serviço ou recurso permanece, estima-se o ganho adicional que se perpetuará da seguinte forma:

A_c = Ganho adicional

V_c = valor unitário do serviço ou recurso compensado;

σ_t = é o fator de desconto, onde $\sigma_t = 1/(1+d)^t$ sendo 'd' a taxa de desconto social.

X_c = quantidade de serviços ou recursos compensados no final do ano t ;

B_c = quantidade inicial do serviço ou recurso compensado;

d = a taxa de desconto social

$$A_c = V_c^* \sigma_t^* \{(X_c - B_c)/B_c\}/d$$

Formulação final

Considerando o Caso 1 e as perdas adicionais, unindo as duas fórmulas tem-se:

$$\sum_{0,Ti} V_i^* \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti})/B_i\}^* I = \sum_{0,TR} V_r^* \sigma_t^* \{[(x_{tr} - B)/B] + A_r\}^* R$$

Perdas oriundas do dano, considerando a Recuperação Natural
Ganhos oriundos das ações de Recuperação Externa

E considerando o Caso 2 e os ganhos adicionais, unindo as duas fórmulas tem-se:

$$\underbrace{\sum_{0,TR} V_i^* \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti} + x_{tr})/B_i\}^* I}_{\text{Perdas oriundas do dano, considerando a Recuperação Natural e a Externa}} = \underbrace{\sum_{TC0,TCC} V_c^* \sigma_t^* [\{(x_{tc} - B_c)/B_c\} + A_c]^* C}_{\text{Ganhos oriundos das ações de Compensação}}$$

Cálculo de R e C

Desse modo, o R que representa o número total de serviços recuperados, e que são equivalentes às perdas interinas e aos danos residuais é estimado pela razão da igualdade conforme abaixo. Essa recuperação, como dito anteriormente, pode ser natural e externa com ações adicionais para acelerar essa recuperação.

$$R = \frac{[\sum_{0,TR} V_i^* \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti})/B_i\}^* I]}{[\sum_{0,TR} V_r^* \sigma_t^* \{(x_{tr} - B_i)/B_i\} + A_r]}$$

Já o C que representa a quantidade de serviços ou recursos a ser compensado, também é estimado pela razão da igualdade, conforme abaixo.

$$C = \frac{\sum_{0,TR} V_i^* \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti} + x_{tr})/B_i\}^* I}{\sum_{TC0,TCC} V_c^* \sigma_t^* [\{(x_{tc} - B_c)/B_c\} + A_c]}$$

Como já explicado, a relação entre I (o total de serviços/recursos danificados) e R (total de serviços/recursos recuperados) é dada pela equivalência E_r expressa por $E_r = V_i / V_r$. E a relação entre o I e o C (total de serviços/recursos compensados) é dada pela equivalência $E_c = V_c / V_r$. Dessa forma, ao estimar essas equivalências, o cálculo mostra que R e C dependem somente de E_r e E_c e não mais de V_i , V_r e V_c .

Como as perdas e ganhos são descontados no tempo por σ_t , então a expressão acima pode ser entendida da seguinte forma:

$$R = \frac{[\sum_{0,TR} \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti})/B_i\}^* I]}{[\sum_{0,TR} E_r^* \sigma_t^* \{(x_{tr} - B_i)/B_i\} + A_r]} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Perdas de serviço descontadas sem recuperação} \\ \text{Ganhos de serviço descontados com recuperação} \end{array}$$

$$C = \frac{\sum_{0,TR} \sigma_t^* \{(B_i - x_{ti} + x_{tr})/B_i\}^* I}{\sum_{TC0,TCC} E_c^* \sigma_t^* [\{(x_{tc} - B_c)/B_c\} + A_c]} \rightarrow \begin{array}{l} \text{Perdas de serviço descontadas com recuperação} \\ \text{Ganhos de serviço descontados com compensação} \end{array}$$

Desta forma, R e C seriam, um multiplicador de I para indicar a quantidade do serviço ou recurso impactado que teria que ser, respectivamente, recuperado e compensado para restaurar as perdas geradas pelo dano. Ou seja, para cada unidade de I impactada, a parte responsável (a que causou o dano) teria que compensar com R e C unidades de restauração e compensação, respectivamente.

3.1.2 COMPENSAÇÃO PECUNIÁRIA EQUIVALENTE

A metodologia considera que é possível que as ações de recuperação e compensação, ao invés de serem realizadas de forma prática, por exemplo, com atividades como revegetação, limpeza de solo, e outras, podem ser apenas pagas em dinheiro no valor equivalente do dano promovido. Tal processo pode ser adotado nos casos em que a recuperação e a compensação física, química ou biológica de R e C não forem tecnicamente viáveis ou desejáveis, por isso, ela pode se converter em pagamento pecuniário equivalente que representaria o valor monetário do dano (VD). A monetização desse dano advém do conhecimento do custo das ações de recuperação (Cr) e de compensação (Cc) hipotéticas. Esses custos incluem as ações consideradas para estimativa de ganho de R e C e devem somar os gastos com identificação, diagnóstico, investimento, operação, monitoramento e fiscalização das ações de recuperação ou compensação, sejam públicos ou privados, incorridos pela parte responsável ou não.

Pode ser possível também que a compensação com maior equivalência ambiental se realize com a aquisição de área privada para fins de conservação. Nesse caso, os serviços e recursos contabilizados seriam aqueles que a legislação permite alterar e que ficariam, assim, preservados com a aquisição. Nesse caso, o custo de aquisição, proteção, monitoramento e fiscalização substituem Cc. Ainda, há a possibilidade de que ambos os métodos sejam adotados quando uma parcela de R e C é realizada e o restante compensado pecuniariamente. No entanto, estas análises aqui expostas sobre a compensação pecuniária equivalente são apenas sugestões e possibilidades, pois, cabe à esfera jurídica responsável pelo processo a decisão de como os recursos calculados pela valoração econômica serão aplicados.

3.1.3 MONETIZAÇÃO DOS DANOS A SEREM VALORADOS

Conforme explanado, a monetização do dano ocorre por meio dos recursos financeiros necessários para a execução dos projetos de recuperação e/ou compensação dos habitats/recursos perdidos devido ao desastre. Desta forma, a etapa de monetização ocorre obedecendo aos seguintes passos:

- Definição do projeto de recuperação e compensação a ser aplicado;
- Definição do ano de início de execução;
- Construção do escopo e cronograma de execução do projeto de recuperação e compensação;
- Orçamentação do projeto;
- Definição do cronograma de desembolso; e
- Construção do fluxo de caixa e aplicação do desconto para trazer os valores para o valor presente.

A definição do projeto de recuperação e compensação ocorre já no momento em que as curvas de recuperação e compensação estão sendo construídas. Após a finalização do cálculo da perda interina, sabe-se o quanto que tem que ser recuperado e o quanto que tem que ser compensado, conforme a métrica utilizada para mensuração. Considerando essa métrica utilizada, a ação de recuperação e compensação é selecionada conforme a aquela que, traduzida na mesma métrica, traz ganhos de recursos e serviços ambientais na mesma magnitude do que foi perdido na perda interina.

A definição do ano de início tanto da recuperação quanto da compensação também são fatores determinados no momento da construção dessas curvas, já que o tempo de espera para o início

dessas ações também faz parte do cálculo da perda interina. É nesse momento que, ações que estejam gerando ganhos na região, quando existentes, precisam ser consideradas, no caso delas estarem diretamente relacionadas com a métrica e o serviço/recurso valorado. Cita-se como exemplo, as ações de restauração florestal desenvolvidas pela RENOVA no compartimento I que afetam diretamente a métrica hectare que está sendo usada para mensurar as perdas pela remoção da vegetação. A restauração florestal reduz o tempo de espera da sociedade para obter os recursos e serviços prestados pelo retorno da floresta. Essas ações iniciaram logo após a ocorrência do dano, no ano de 2016, logo, a curva de recuperação externa estimada considera essas ações e consequentemente esses ganhos.

Após a definição do projeto e seu ano de início, a etapa a seguir se concentra na construção do seu escopo, que se refere a todas as etapas e atividades a serem realizadas para garantir que os ganhos mensurados nas curvas de recuperação externa e compensação sejam alcançados. Desse modo, um projeto de recuperação e/ou compensação precisa considerar não apenas as atividades centrais de reparação, tais como recursos humanos, insumos e maquinários para as atividades principais, mas também atividades de apoio e controle tais como monitoramento, estudos paralelos para verificação da efetividade da medida, estabelecimento de parcerias locais, envolvimento da comunidade do entorno na medida da necessidade, entre outros. Todas essas etapas e atividades representam custos que devem ser considerados na monetização do dano.

Posteriormente a definição do escopo, obtém-se um orçamento para execução do projeto selecionado. Nesse momento a estratégia do LACTEC variou conforme o habitat/recurso valorado. Nos casos nos quais o escopo a ser empregado é semelhante ao que já foi elaborado pela RENOVA, e a mesma já possui um orçamento definido e aprovado, optou-se por utilizar tais orçamentos para a valoração, realizando apenas os ajustes necessários requeridos pelo método. Em outros casos, nos quais os projetos a serem realizados exigem profissionais e conhecimentos que o LACTEC não possui, optou-se por contratar empresas/consultores especializados para elaboração tanto do escopo quanto do orçamento desses projetos. Houve também situações nas quais o escopo e o orçamento do projeto foram obtidos por meio de fontes secundárias, trabalhos independentes realizados por outras instituições, totalmente desconectados do contexto do desastre, não havendo nenhum viés, mas que eram a resposta necessária ao dano mensurado. E por fim, para as situações nas quais os projetos a serem realizados estão inseridos no setor de atuação do LACTEC, a própria instituição elaborou tanto o escopo quanto o orçamento sobre o mesmo.

A elaboração do escopo e do orçamento trazem consigo o cronograma de execução e desembolso financeiro que permite a construção do fluxo de caixa dos projetos, sendo este fluxo descontado para o valor presente de 2021. Esse desconto a valor presente para o corrente ano de elaboração desse documento ocorre, pois o valor dos danos entregue é um valor para pagamento à vista, em uma única vez, sendo este um desconto equivalente ao custo de oportunidade do capital (8% ao ano). Caso a parte responsável queira parcelar ou postergar a quitação de tais valores, será necessário corrigir esses valores no tempo, incrementando os juros adotado (8% ao ano), bem como aplicar a correção monetária pelo índice de inflação selecionado. O período de elaboração dos orçamentos ocorreu majoritariamente em março de 2021 sendo este o mês de referência para correção dos preços por meio de índices de inflação quando necessário.

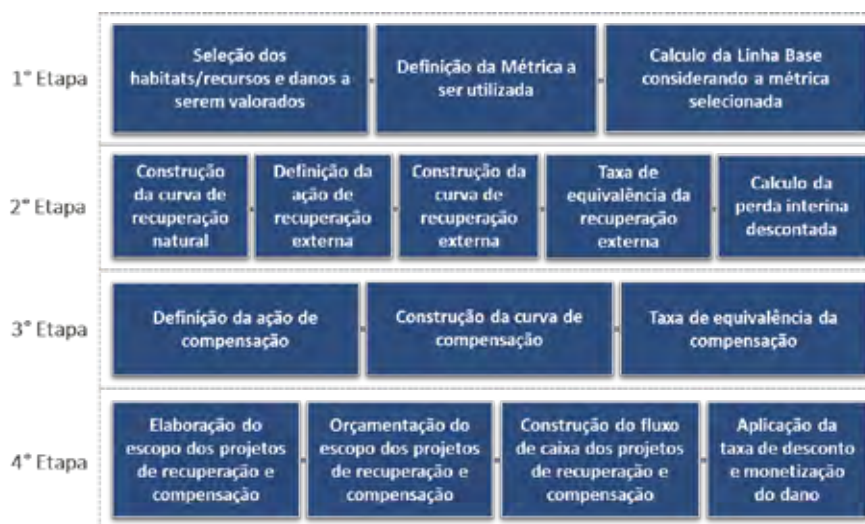
Cabe destacar que os fluxos dos ganhos ambientais mensurados nas curvas de recuperação e compensação são diferentes dos fluxos de caixa dos projetos. Geralmente o fluxo financeiro ocorre por um período menor do que o período de obtenção dos ganhos ambientais, isto porque as ações de recuperação e compensação recuperam fatores biológicos e químicos que depois de estabelecidos seguem um comportamento próprio. No entanto, por ambos os fluxos serem descontados a valor presente tal diferença não interfere no processo de cálculo e monetização da quantidade de serviços e recursos que precisam ser compensados e recuperados, bem como o valor do dano.

3.1.4 PROCESSO PARA CONSTRUÇÃO DA VALORAÇÃO

Após a apresentação dos processos matemáticos aplicados à Metodologia, a Figura 3 mostra a sequência padrão das etapas seguidas para a construção da valoração, que foram cumpridas pela equipe técnica da valoração econômica, juntamente com a equipe técnica de cada um dos habitats/recursos selecionadas para a aplicação da metodologia. Ressalta-se que, conforme as especificidades do habitat/recurso valorado algumas dessas etapas não existem ou são inseridas de forma adaptada. Tais ajustes estão descritos detalhadamente no item 4 que trata dos resultados da aplicação do método por habitat/recurso.

Inicialmente deve ser delimitado quais habitats/recursos serão valorados, por exemplo, fauna, flora, solo, água ou outros. Para a metodologia, como há a necessidade de obter custos de recuperação/compensação, os danos sofridos pelo meio ambiente precisam ser compensáveis, conforme discutido anteriormente. Após a definição dos itens descritos acima, o próximo passo é definir qual é a variável a ser utilizada como métrica que será usada para medir o dano ambiental, bem como mensurar a linha base a ser considerada, e posteriormente, construir a curva de recuperação natural, definir as ações da recuperação externa, bem como construir sua respectiva curva. O mesmo deverá ser feito para a compensação, definindo quais são suas ações e seu tempo (curva). E em ambas as etapas (2° e 3°) há a definição da taxa de equivalência dos habitats recuperados/compensados. Por fim, na etapa 4, são realizados os procedimentos necessários para a monetização do dano, obtendo assim o seu valor.

Figura 3 – Processo de construção para a valoração



Fonte: Lactec, 2021.

3.1.5 DIFERENÇA CONCEITUAL ENTRE SERVIÇOS AMBIENTAIS E SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

Conceitualmente os serviços ambientais e ecossistêmicos se diferem. Segundo Muradian *et al.* (2010), os serviços ecossistêmicos se referem aos benefícios que a sociedade obtém de ecossistemas naturais, enquanto, os serviços ambientais são oriundos de benefícios ambientais resultantes de intervenção intencional da sociedade na dinâmica dos ecossistemas, como por exemplo, a recuperação da mata ciliar de uma nascente. Deste modo, o homem pode interferir na manutenção ou ampliação do fluxo de bens e serviços ecossistêmicos (PARRON *et al.*, 2015).

Em outras palavras, a principal diferença entre serviços ambientais e serviços ecossistêmicos é que, no primeiro caso, os benefícios gerados estão associados as ações de manejo, manutenção, preservação, restauração e outras realizadas pelo homem nos sistemas naturais, já os serviços ecossistêmicos refletem os benefícios diretos e indiretos providos pelo funcionamento dos ecossistemas, sem a interferência humana.

Conforme mencionado anteriormente, a valoração econômica dos danos ambientais deste documento se concentra nos serviços ecossistêmicos perdidos, isto é, nos serviços que naturalmente a natureza provia à região e que foram perdidos devido ao desastre. Porém, considerando que a monetização do dano, pelo método adotado, se dá pelas ações de recuperação e compensação, compreende-se que o custo para obter novamente os serviços ecossistêmicos está atrelado ao custo da execução de projetos que gerarão serviços ambientais. Por isso, devido a essa correlação ambos os termos podem ser entendidos como sinônimos neste relatório.

Cabe ressaltar que as métricas utilizadas para mensurar os danos valorados se concentram majoritariamente no recurso ambiental perdido, como quantidade de água, quantidade de área, quantidade de indivíduos entre outros. Logo, o que é medido é o recurso perdido e não diretamente o serviço ecossistêmico prestado por ele. Porém, os serviços ecossistêmicos tornam-se a principal justificativa da importância da valoração desses recursos, visto que a reposição dos mesmos, por meio dos serviços ambientais, devolve as suas funções ecossistêmicas.

3.1.6 FATOR DE DESCONTO

O método selecionado trabalha com a questão temporal, isto é, considera que há um intervalo que pode ser expresso em dias, meses, ou até anos, para que a sociedade obtenha de volta os serviços e recursos perdidos. Devido a esta característica, a metodologia considera que os valores ao longo do tempo precisam ser corrigidos, no caso de os números serem projetados para anos posteriores, eles precisam ser ajustados a valor futuro. Por outro lado, no caso contrário, quando valores do futuro tem que ser considerado nos dias atuais, os números são ajustados a valor presente, por meio do desconto.

A continuidade das perdas ambientais é futura, isto é, permanece nos próximos anos, porém, os valores a serem exigidos deverão ser pagos atualmente (no tempo presente), assim, a metodologia precisa considerar na equação os valores presentes, sendo necessário aplicar uma taxa de desconto, denominada taxa de desconto social, que é aplicada por meio do fator de desconto que é igual a $1/(1+d)^t$. Esta taxa traduz o custo de oportunidade do serviço ambiental (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018).

Em outras palavras, a aplicação do desconto pressupõe que as pessoas valorizam mais os serviços hoje do que aqueles adiados para uso futuro, representando assim o custo de oportunidade.

O custo de oportunidade é um termo usado para indicar o custo de algo em termos de valores de uma oportunidade renunciada. Um exemplo prático permitirá melhor compreensão: quando um agente econômico prefere investir na poupança ao invés de investir em outra aplicação financeira, o seu custo de oportunidade é medido por meio dos ganhos que aquela aplicação não selecionada poderia ter dado ao mesmo, ou seja, os ganhos daquilo que ele “abriu mão”. No contexto ambiental avaliado, o custo de oportunidade ocorre na renúncia, seja ela involuntária ou não, dos benefícios que poderiam ter sido obtidos a partir da conservação do meio ambiente no estado original, ou seja, antes do dano.

Determinar esta taxa no âmbito ambiental é bastante complexo dada as diversas incertezas para prospectar as condições futuras do meio ambiente. Teoricamente, a taxa de desconto carrega um componente de preferência no tempo que os indivíduos têm devido a sua finitude e, um componente específico relacionado as suas expectativas de consumo futuro (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). Esta taxa de desconto social difere daquela observada no mercado devido às imperfeições no mercado de capitais e questões de equidade com as gerações futuras. Assim, sua determinação não é trivial, embora, como discutido acima, possa afetar significativamente os resultados de uma valoração.

A taxa de remuneração da poupança no Brasil (taxa de desconto do consumo) que dá um prêmio a postergação de consumo, acima da inflação, estaria entre 2 e 3%, enquanto a que remunera os investimentos (custo de oportunidade do capital) entre 10 e 12%. Segundo IPEA (2019), um valor médio ponderado pelos efeitos dessas taxas no consumo e nos investimentos (elasticidades) estaria entre 8 e 10%. Dessa forma, em casos de danos com baixo nível de incerteza de recuperação, se aconselha utilizar o limite inferior dessas estimativas, isto é, a taxa de 8%, sendo este o percentual que será adotado para a valoração econômica dos danos socioambientais recuperáveis.

No caso de perdas infinitas, isto é, irrecuperáveis, o fator de desconto é utilizado juntamente com a fórmula da perpetuidade, sendo esta:

$$VPp = V/(d/100)$$

VPp = Valor presente da perpetuidade

V = Valor no tempo n perpétuo

d = taxa de desconto social

Esta fórmula permite trazer a série de valores no infinito, para o valor presente no tempo desejado.

Ressalta-se que a taxa de desconto social adotada de 8% é livre de inflação, o que significa dizer que, além do desconto, os valores monetários utilizados precisam ser corrigidos por índices de inflação para o tempo presente considerado na análise.

3.1.7 LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA

As relações entre as ações antrópicas, capacidade de suporte dos ecossistemas, suas relações ecológicas e humanas, e de como o dano afeta o meio ambiente onde está inserido são complexas e de difícil aferição. Por isso, é fato que o arcabouço no qual o método é aplicado, se depara com elevado número de incertezas (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018).

Assim, uma das principais limitações da metodologia selecionada, em relação a escolha da métrica e da estimativa do tempo de recuperação é que o mesmo conhecimento ecológico pode sugerir alternativas excludentes (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). Desse modo, tendo em vista que o balanço dessas limitações será quase sempre pragmático e decidido de forma restrita, cabe a equipe explicitar os limites dos valores estimados selecionados e o grau de validade de suas mensurações para o objetivo da valoração (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). Em síntese, os valores assumidos para aplicação da metodologia dependerão das hipóteses assumidas, da disponibilidade de dados, informações e conhecimento da dinâmica ecológica do objeto valorado.

Porém, ressalta-se que a equipe técnica adotará como princípio uma postura conservadora para aplicação do método da valoração. Isto significa que, diante de alternativas de série de dados e de opções metodológicas disponíveis sobre a melhor forma de proceder, o procedimento indica a adoção daquela que conciliaria rigor teórico e metodológico com o menor viés de ampliação do impacto medido. Esse procedimento adiciona neutralidade às escolhas e garante que as estimativas resultantes sejam tecnicamente robustas. Desse modo, os valores adotados para a construção das curvas de recuperação e compensação serão aqueles em que são possíveis fundamentar a decisão nos métodos e informações científicas conhecidas até o momento. Tal postura ocasionará modelos e valores simplificados que não serão capazes de contabilizar os danos e perdas na sua totalidade, isto é, os valores obtidos poderão ser considerados como valores mínimos a serem cobrados dos danos comprováveis e de possível medição pelo método de valoração selecionado, concluindo que o limite inferior das estimativas (valor mínimo da valoração) é o valor mínimo tecnicamente aceitável.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE EQUIVALENCIA DE HABITAT OU RECURSO POR HABITAT/RECURSO A SER VALORADO

Os habitats e/ou recursos selecionados que foram alvo da valoração dos danos ambientais são: Vegetação, Solos, Água do rio Doce, Ictiofauna (peixes), Área Marinha, Aves Escavadoras e Patrimônio Histórico/Cultural considerando os bens arqueológicos e os bens materiais. Esses habitats e/ou recursos foram escolhidos devido aos serviços ecossistêmicos e culturais prestados e, que por meio das interações biológicas, acabam por influenciar diretamente todos os outros recursos e serviços. Por exemplo, ao se valorar a vegetação perdida devido ao desastre, os números obtidos também consideram, devido às interações biológicas e aos serviços ecossistêmicos, os aspectos relacionados ao solo deste local, como controle da erosão, aumento da infiltração do solo e outros. Assim, de maneira indireta outros habitats/recursos são incorporados ao cálculo, não se fazendo necessário a valoração de cada habitat/recurso separadamente. Além disso, cada um desses elementos possui inúmeros danos, no entanto, é possível identificar danos primários, isto é, danos que acabam por ser a origem de outros danos, como, por exemplo, a supressão da vegetação nativa que origina o dano secundário da perda da biodiversidade. Por isso, dentro de cada habitat, considerando todos os danos identificados e, também, considerando os requisitos que permitem a aplicação do método MER/MEH, são preferíveis a seleção de danos primários para a valoração econômica dos mesmos.

Em janeiro de 2020 o Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais apresentou as metodologias que estão sendo utilizadas para a valoração e, no caso da MER/MEH, apresentou as primeiras definições de métricas para cada habitat/recurso valorado. Cabe ressaltar que na ocasião haviam sido selecionados 5 habitats/recursos (vegetação, água, ictiofauna, fauna terrestre e patrimônio cultural). No entanto, no decorrer dos trabalhos, conforme se avançou no processo de valoração, a equipe vislumbrou outros habitats/recursos que poderiam ser alvo da avaliação econômica, desse modo, acrescentou-se área marinha e solos. Justificativas mais detalhadas da inclusão desses ambientes serão apresentadas no tópico respectivo de cada um, nesse documento.

Além da inserção desses novos elementos ao processo, também cabe destacar que algumas decisões tomadas na época da construção do relatório entregue em janeiro, sofreram profundas alterações e/ou foram aprimoradas. Tais mudanças, quando existentes, também serão descritas em cada tópico de cada habitat/recurso apresentado.

Desse modo, os próximos itens terão como objetivo apresentar, por habitat/recurso, a metodologia de aplicação do MER/MEH, os resultados obtidos, justificativas e esclarecimentos para decisões, premissas, outras considerações e, por fim, os resultados em termos de valores monetários.

4.1 VEGETAÇÃO

4.1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS CAUSADOS À VEGETAÇÃO

A lama de rejeitos oriunda da barragem de Fundão removeu e danificou a vegetação presente no rio Doce e em suas margens. O primeiro e mais incisivo dano foi a supressão dos espécimes que se encontravam no trecho entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves (compartimento I). A força

mecânica da onda retirou desde árvores de grande porte até o banco de sementes presente no solo da área atingida. O rejeito percorreu e se depositou em locais ocupados pela vegetação nativa arbórea, como nos fragmentos florestais e, também, não arbórea, como nos campos rupestres e regiões de várzea. Em locais com cota de relevo mais alta a força da lama não foi capaz de abater os espécimes mais resistentes, mas, adentrou a mata e se depositou no solo afetando o sub-bosque e o banco de sementes e acarretando, posteriormente, na morte das árvores.

Desta forma, o Diagnóstico Socioambiental, ao analisar a flora, identificou oito danos ambientais, a saber: supressão da vegetação nativa ciliar; supressão da vegetação nativa devido à implantação de infraestrutura; perda da biodiversidade da flora; perda de recursos florestais madeireiros; perda de recursos florestais não madeireiros; redução na capacidade de resiliência da floresta; aumento do efeito de borda e introdução e aumento de espécies exóticas. Todos esses danos listados têm relação direta ou indireta com três aspectos principais: a supressão da vegetação nativa ciliar (remoção mecânica) pela lama, a morte tardia de indivíduos e a supressão da vegetação nativa devido às ações emergenciais para implantação de infraestruturas.

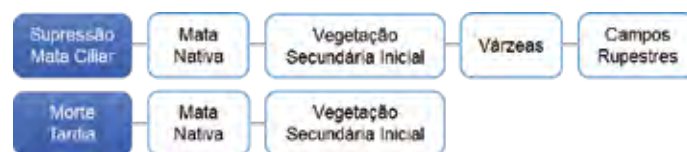
Nas áreas onde houve a supressão imediata ao desastre, esta ocorreu devido à força mecânica da lama de rejeitos que pela passagem removeu a vegetação ciliar existente. Já nos casos onde houve morte tardia de indivíduos, esta ocorreu onde não houve remoção da vegetação oriunda da força da lama, porém, houve deposição de rejeito no solo que promoveu a morte de indivíduos afetando a cobertura vegetal e promovendo alteração da regeneração natural, do banco de sementes e plântulas nestes locais. Embora o dano de morte tardia esteja vinculado a uma vegetação que permaneceu no local após a passagem da lama e, o dano foi apenas de cobrimento do solo onde a mesma estava, esta área é contabilizada na valoração do mesmo modo como se fosse uma supressão, ou seja, como se a vegetação tivesse sido removida. Isto porque, já no diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) a contabilização da quantidade em hectares de vegetação nativa alterada devido ao desastre, considera a área total, tanto de supressão quanto de morte tardia, pois embora a vegetação aparentemente esteja no local, a mesma encontra-se muito debilitada e com sua regeneração natural e banco de sementes totalmente prejudicado, dificultando a recuperação natural desta área. Além da supressão pela remoção e pela morte tardia houve, também, supressão da vegetação nativa devido às ações emergenciais da Fundação Renova, uma vez que a passagem da lama causou a destruição de diversas edificações, especialmente, nas localidades de Bento Rodrigues, Gesteira e Paracatu de Baixo. O Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC) firmado prevê que a Fundação Renova seja responsável pela reconstrução, recuperação e realocação destas localidades e de outras estruturas afetadas pelo desastre. Assim, a execução destas ações demandou a supressão de vegetação nativa em outras áreas naturais não afetadas pela passagem da lama, ocasionando, assim, outros danos à flora.

Cabe aqui destacar que no Relatório Parcial de Valoração Econômica, entregue em janeiro de 2020, havia sido considerado a inclusão das áreas suprimidas devido às ações emergenciais, a fim de serem computadas na valoração. No entanto, ao aprofundar as análises e verificar as licenças de supressão emitidas observou-se que essas áreas suprimidas já possuíam os quantitativos a serem compensados com base na legislação. Diante disso, considerando que tais danos já foram computados e cobrados por meio do processo legal de licenciamento, a equipe julgou ser coerente retirar tais áreas

da valoração econômica dos danos à flora. Logo, os danos a serem valorados englobam a supressão da mata ciliar devido a remoção mecânica da vegetação pela lama e a morte tardia.

As características biológicas da área suprimida e das áreas onde ocorreu a morte tardia são divergentes, desta forma, foram elencadas quatro classes de vegetação natural: mata nativa, vegetação secundária inicial, várzea e campos rupestres. Além disso, cabe ressaltar que esses danos identificados e considerados para a valoração não ocorreram ao longo de toda a calha do Rio Doce. Desse modo, a supressão da mata ciliar e morte tardia de indivíduos foram identificados apenas no compartimento 1. Assim, a Figura 4 exibe de forma visual os dois danos vinculados à supressão e perda de vegetação e as classes de vegetação natural que foram afetadas em cada um.

Figura 4 – Danos à flora a serem valorados e as classes de vegetação consideradas



Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 5 mostra o compartimento 1, os limites da área de passagem da lama (APDL) e os pontos do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) que foram coletados para estimativa da perda da vegetação. O NDVI é uma aplicação dos processos de realce por meio de operações matemáticas entre bandas de sensores satelitais que permite estimativas de biomassa, cobertura vegetal e a detecção de mudanças de padrão de uso e cobertura do solo.

Figura 5 – Distribuição dos pontos ao longo do Compartimento 1.



Fonte: Lactec, 2021.

4.1.2 SELEÇÃO DA MÉTRICA E CONSTRUÇÃO DA LINHA BASE

Para a valoração dos danos ambientais da vegetação foi adotada como métrica a medida da área em hectare. O relatório, entregue em janeiro de 2020, afirmava que as métricas a serem utilizadas seriam hectare e biomassa, mas, que esta última ainda estava em fase de avaliação. No entanto, a biomassa como métrica para valoração foi descartada da análise para a construção das curvas de recuperação, devido a enorme dificuldade de encontrar dados secundários na literatura, que fossem consistentes o suficiente para construir uma curva de tendência. Com relação a taxa de crescimento florestal, a dificuldade encontrada foi a mesma. Há diversos dados pontuais de crescimento, no entanto, os trabalhos voltados para vegetação nativa são mais reduzidos e, além disso, se referem a uma análise durante um curto espaço de tempo, o que dificulta obter taxas de crescimentos nos diferentes momentos de evolução do indivíduo arbóreo. É sabido que os indivíduos florestais, no geral, apresentam uma taxa de crescimento na fase juvenil mais elevada que acelera seu crescimento em termos de altura. Posteriormente, o indivíduo florestal passa para as outras fases, como a intermediária e a maturidade, nas quais o crescimento ocorre em termos de volume. Diversas buscas foram realizadas em inúmeros trabalhos e com variados recortes, tais como, escolha de espécie chave ou tentativa de utilizar uma taxa aplicada em um contexto semelhante à região. No entanto, apesar da tentativa de replicar para a região curvas de crescimento encontradas, os esforços foram frustrados, pois, nos casos dessas curvas os resultados obtidos não apresentaram correlações estatísticas confiáveis, tornando os modelos matemáticos frágeis, e não foi possível encontrar outras informações suficientes para serem aplicadas e trabalhadas dentro da realidade do rio Doce.

No entanto, apesar de todos os empecilhos, a equipe técnica encontrou uma forma de determinar uma taxa de crescimento florestal para o local do desastre. Optou-se por considerar o tempo teórico de crescimento da floresta até seu estágio adulto, conforme amplamente descrito na literatura, e dividir a área basal existente nesse estágio por esse tempo total obtendo, assim, uma taxa linear de ocupação de um indivíduo arbóreo em um hectare, oportunizando uma estimativa geral para toda a área. Esse processo será melhor explicado no item sobre a recuperação natural e externa. Adianta-se, porém, que a equipe tem consciência das limitações dessa representação, pois, sabe-se que o processo de crescimento florestal não se expressa linearmente. Entretanto, essa foi uma forma simplificada encontrada para traduzir tal processo diante de um contexto de ausência dessa informação. Ressalta-se, inclusive, que esta escolha torna a análise conservadora, pois uma curva linear tende a estimar uma perda interina menor. Assim, a métrica a ser utilizada para a valoração da flora é área em hectare, que traduzirá os danos oriundos da supressão da mata nativa por remoção mecânica e por morte tardia. A Tabela 1 exibe os valores de linha base que representam o quanto foi perdido no desastre, subdivididos por classe de vegetação nativa. Logo, o total de áreas de vegetação consideradas como perdidas é 859,40 hectares, sendo esta a linha base da valoração e, também, a perda inicial ocorrida em 2015.

Acrescenta-se que apesar de haver classes diferentes de vegetação nessas áreas, a área basal utilizada que resulta nos hectares a serem recuperados e compensados é a mesma para todos os 859,40 hectares. Simplificação necessária, dada a complexidade de se trabalhar com classes de vegetações diferentes, sendo mais uma decisão conservadora.

Tabela 1 – Áreas em hectares de vegetação suprimida e morte tardia subdivida por classe de vegetação e por danos à flora a serem valorados

Dano	Mata Ciliar Suprimida	Morte Tardia
Classe de Vegetação Natural	Área (ha)	Área (ha)
Mata Nativa	283,87	146,20
Vegetação Secundária Inicial	281,8	66,24
Várzeas	67,39	-
Campos Rupestres	13,89	-
TOTAL	646,95	212,45

Fonte: Lactec, 2021.

4.1.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO NATURAL

Alguns estudos avaliaram o tempo necessário de restauração para atingir diferentes estágios sucessionais da floresta, a partir da regeneração natural. Rios (2010) avaliando o estado da regeneração natural de espécies arbóreas adultas da Floresta Estacional Semidecidual (FES) 20 anos após o impacto da construção da barragem da Hidrelétrica Urugua-í em Misiones (Argentina) concluiu que a área se encontra no processo de sucessão secundário em estágio de desenvolvimento inicial, segundo a classificação de Guariguata & Ostertag (2001), com gradual substituição das espécies pioneiras por espécies de outros estágios sucessionais. Os autores Deschamps & Ochoa (1987) estudando a sucessão secundária em uma área com 23 anos de idade, a poucos quilômetros ao sul da área de estudo de Rios (2010) constataram o predomínio de espécies secundárias iniciais e pioneiras, caracterizando uma área em transição do estágio inicial de sucessão para um estágio médio.

Figueiredo et al. (2013) avaliando as mudanças na composição florística de uma FES, no município de Viçosa – MG, entre os anos de 1994 a 2008, concluiu que no último levantamento ocorreu uma dominância de espécies secundárias iniciais e tardias e um gradual abandono das espécies pioneiras, indicando que o trecho de floresta analisado se encontra em um estágio médio de sucessão.

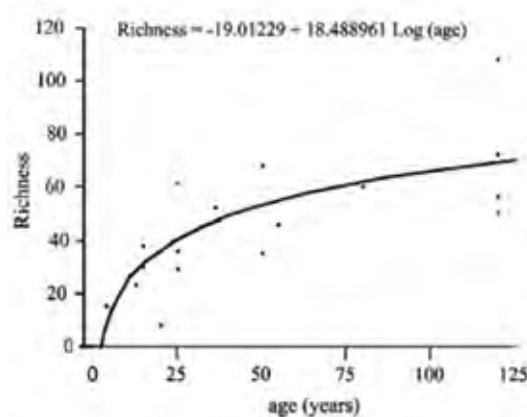
Garcia et al. (2011) analisando áreas de FES Montana, no município de Viçosa - MG, submetidas no passado a intensa exploração seletiva de espécies florestais e desmatamento parcial para a implantação de pastagens e culturas de café, conclui que após 42 anos de interrupção das atividades antrópicas os fragmentos florestais apresentam indícios de estarem no estágio avançado de regeneração. Os autores atribuem que um dos pontos significativos para o avanço da área é a sua proximidade com outros fragmentos em bom estado de conservação, pois dessa maneira ocorre a troca de material genético entre os fragmentos, beneficiando-os mutuamente, promovendo o aumento da diversidade intra e interespecífica.

Na avaliação de um fragmento urbano de FES Montana, ocupado por pastagem até a década de 1960, no município de Juiz de Fora – MG, Moreira & Carvalho (2013) concluíram que o local apresenta uma baixa diversidade e riqueza de espécies, em comparação com florestas secundárias de mesma fitofisionomia da região. Segundo os autores a presença de espécies exóticas invasoras, como o *Pinus elliottii* Engelm, e a intensa atividade humana nas proximidades do fragmento exercem forte influência sobre seu processo de regeneração, que mesmo após quase 50 anos de sucessão o local ainda apresenta características típicas de uma área em estágio intermediário.

Farah (2003) estudando um fragmento de FES submetido a incêndio em 1981, na Reserva Municipal de Santa Genebra, no município de Campinas – SP, constatou que a área não reestabeleceu naturalmente sua fisionomia florestal apresentando, 20 anos após o distúrbio, baixa densidade de espécies florestais, caracterizando-se uma comunidade retida num estado de sucessão secundária incompleta. Nesse caso o autor avalia a necessidade de aplicações de técnicas de manejo e restauração para desencadear o potencial regenerativo da vegetação.

Um importante estudo desenvolvido por Liebsch *et al.* (2008) avaliou características de fragmentos florestais da Mata Atlântica nos estados de Santa Catarina, Paraná, São Paulo e Rio de Janeiro. Os fragmentos sofreram distúrbios com espaços de tempo variando entre 4 e 120 anos. Desta forma, os autores puderam avaliar as alterações na floresta utilizando indicadores como riqueza, quantidade de espécies zoocóricas, endêmicas, não pioneiras e regenerantes. O estudo demonstrou, dentre outras conclusões, que a riqueza é um parâmetro fortemente afetado pelo tempo decorrido desde o distúrbio.

Figura 6 – Relação entre riqueza e tempo decorrido após o distúrbio



Fonte: Liebsch *et al.*, 2008.

Os dados coletados no levantamento dos fragmentos do rio Doce, especialmente para o Compartimento 1 apresentaram média de área basal de 18,67 m²/ha e riqueza total de aproximadamente 39 espécies. A partir das avaliações feitas nos estudos supracitados, bem como no modelo apresentado por Liebsch *et al.* (2008), decidiu-se por utilizar a riqueza total como parâmetro para definir o estágio e tempo de regeneração natural da floresta. A riqueza total é um parâmetro importante e muito utilizado para avaliar o desenvolvimento de áreas em recuperação. O Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (2009) ressalta que este parâmetro é um indicador de avaliação em todas as fases de uma área em processo de restauração. É importante destacar que a riqueza média dos fragmentos amostrados no Compartimento 1 foi de aproximadamente 39 espécies, indicando que, considerando apenas a regeneração natural (sem restauração externa), a vegetação suprimida pelo desastre precisaria de um tempo de aproximadamente 25 anos para retornar ao seu estágio anterior.

Após definido o tempo para a regeneração natural da vegetação, adotou-se o valor de área basal média medida por meio dos levantamentos de campo realizados pelo Lactec no local impactado pelo desastre, considerando fragmentos de floresta não afetados como sítios controle. A área basal é expressa em metros quadrados por hectare, sendo interpretada como a área ocupada por troncos em

um hectare. Este valor permite capturar a evolução da floresta não apenas em termos de crescimento em altura mais também em volume, ou seja, em ocupação de área. Conhecendo as variáveis tempo e área basal, estimou-se a taxa de crescimento anual linear por meio da razão entre a área basal e o tempo (Tabela 2). De posse de todas essas informações foi possível estimar a curva de recuperação natural.

Tabela 2 – Valores assumidos para a construção da curva de recuperação natural e cálculos para estimar a perda natural descontada em hectare da vegetação afetada pelo desastre

Tempo em anos para regeneração natural	25 anos
Área basal (área de troncos por hectare)	18,67 m ² /ha
Taxa de crescimento anual linear	0,75 m ² /ha
Total hectares perdidos em 2015 (T0)	859,40 ha

Fonte: Lactec, 2021.

Para estimar a curva de recuperação natural, bem como a perda anual ocorrida após o desastre foram feitos os seguintes cálculos, conforme resultados expostos na Tabela 3: calculado o incremento de ganho de área basal em m²/ha em 1 hectare, sendo o incremento anual constante de 0,75 m²/ha. A partir desse incremento calculou-se o percentual desse ganho por hectare, para que pudesse estimar o ganho anual em hectare, por meio da multiplicação entre o percentual ganho e a área em hectare da linha base afetada. Conhecendo-se o ganho anual em hectare, por meio da diferença entre ele e a área em hectare da linha base afetada, obteve-se a perda anual em hectare, que após a aplicação do fator de desconto (8% ao ano), resultou na perda anual em hectare descontada. É o somatório desta última coluna que fornece a perda total descontada no tempo no contexto de recuperação natural.

Tabela 3 – Cálculos realizados para estimar a perda natural descontada em hectare, considerando a vegetação suprimida e morte tardia

Ano	LB Área afetada ha	LB área basal m ² /ha	Ganho m ² /ha	Percentual de ganho por hectare	Ganho anual em hectare	Perda anual em hectare	Perda anual em hectare descontada
2015	859,40	18,67	0,00	0,00	0,00	859,40	859,40
2016	859,40	18,67	0,75	0,04	34,38	825,02	763,91
2017	859,40	18,67	1,49	0,08	68,75	790,65	677,85
2018	859,40	18,67	2,24	0,12	103,13	756,27	600,35
2019	859,40	18,67	2,99	0,16	137,50	721,90	530,62
2020	859,40	18,67	3,73	0,20	171,88	687,52	467,91
2021	859,40	18,67	4,48	0,24	206,26	653,14	411,59
2022	859,40	18,67	5,23	0,28	240,63	618,77	361,05
2023	859,40	18,67	5,97	0,32	275,01	584,39	315,73
2024	859,40	18,67	6,72	0,36	309,38	550,02	275,14
2025	859,40	18,67	7,47	0,40	343,76	515,64	238,84
2026	859,40	18,67	8,21	0,44	378,14	481,26	206,41
2027	859,40	18,67	8,96	0,48	412,51	446,89	177,47
2028	859,40	18,67	9,71	0,52	446,89	412,51	151,68
2029	859,40	18,67	10,46	0,56	481,26	378,14	128,74
2030	859,40	18,67	11,20	0,60	515,64	343,76	108,37

Ano	LB Área afetada ha	LB área basal m²/ha	Ganho m²/ha	Percentual de ganho por hectare	Ganho anual em hectare	Perda anual em hectare	Perda anual em hectare descontada
2031	859,40	18,67	11,95	0,64	550,02	309,38	90,31
2032	859,40	18,67	12,70	0,68	584,39	275,01	74,33
2033	859,40	18,67	13,44	0,72	618,77	240,63	60,22
2034	859,40	18,67	14,19	0,76	653,14	206,26	47,79
2035	859,40	18,67	14,94	0,80	687,52	171,88	36,88
2036	859,40	18,67	15,68	0,84	721,90	137,50	27,32
2037	859,40	18,67	16,43	0,88	756,27	103,13	18,97
2038	859,40	18,67	17,18	0,92	790,65	68,75	11,71
2039	859,40	18,67	17,92	0,96	825,02	34,38	5,42
2040	859,40	18,67	18,67	1,00	859,40	0,00	0,00
TOTAL	-	-	-	-	11.172,20	11.172,20	6.647,99

Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 7 exibe a curva de recuperação natural estimada que reflete os valores dos ganhos anual em hectares.

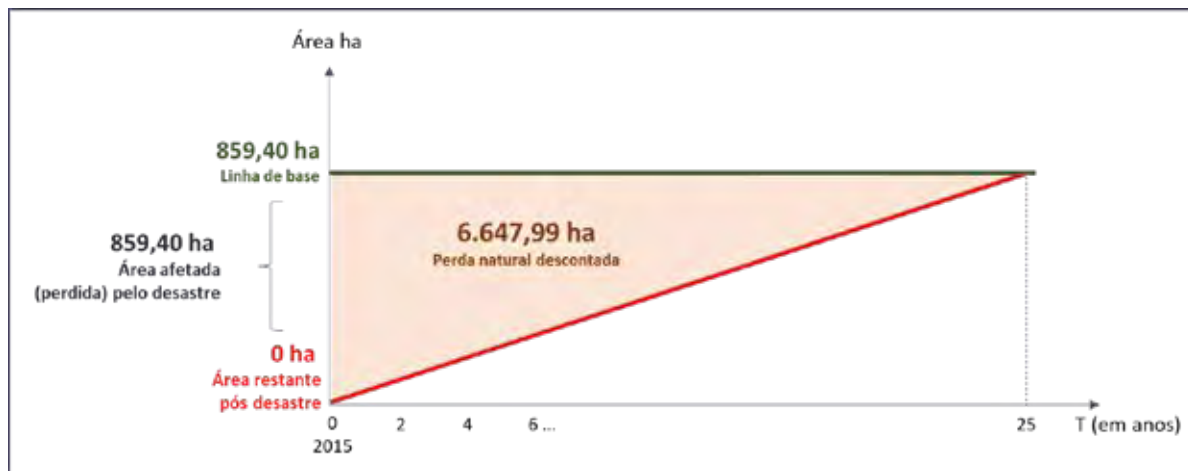
Figura 7 – Curva de recuperação natural da vegetação



Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 8 é a representação gráfica do cálculo da perda natural descontada no contexto de recuperação natural.

Figura 8 – Perda descontada da vegetação no contexto de recuperação natural



Fonte: Lactec, 2021.

4.1.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO EXTERNA E CÁLCULO DA PERDA INTERINA

O sucesso de ações de restauração florestal está relacionado a uma série de fatores, como o isolamento dos elementos de degradação, a proximidade de fragmentos florestais representativos, presença de dispersores, entre outros (NAVE et al., 2015). Ao final do processo, é essencial que a área possua um conjunto característico de espécies nativas que ocorram em ecossistemas de referência, permita fluxos bióticos e abióticos, seja capaz de se recuperar de eventos naturais periódicos e contenha os grupos funcionais necessários ao funcionamento da floresta (SER, 2004).

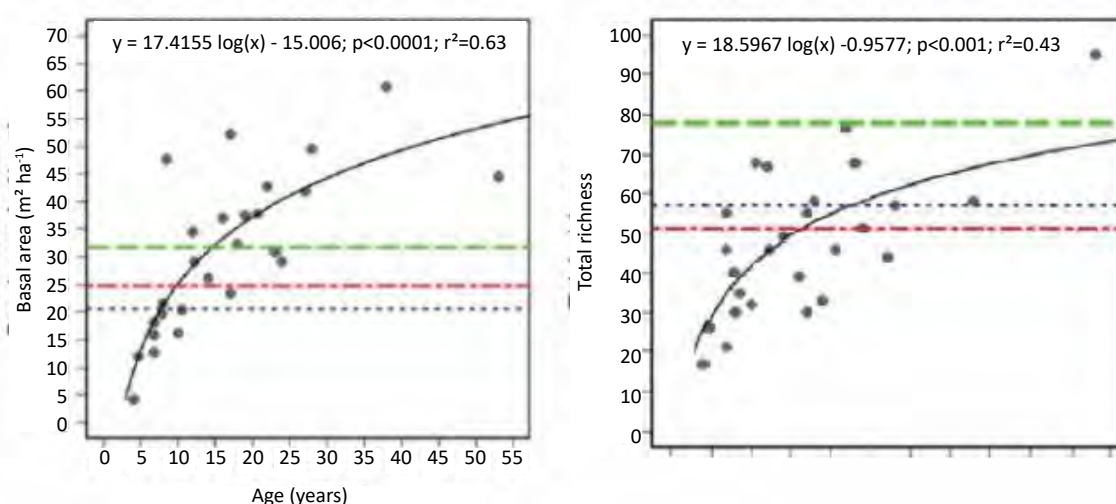
Entender a dinâmica de ecossistemas sob processo de restauração é desafiador devido às dificuldades de obter dados robustos ao longo de extensos períodos de tempo e também devido à complexidade de interações entre os diversos fatores que atuam no sistema (SUGANUMA e DURIGAN, 2015).

Castanho (2009) objetivando avaliar o estado de um fragmento de FES, no município de Iracemápolis - SP, 18 e 20 anos após o local ter passado pelo processo de restauração, concluiu que a utilização adequada de técnicas de recuperação apresenta grande importância para o restabelecimento da estrutura do local. Essas técnicas possibilitam o desenvolvimento de processos existentes em florestas naturais nas áreas restauradas, especialmente em áreas não conectadas a fragmentos florestais naturais, permitindo que a área alvo do estudo apresente características de vegetação secundária no estado médio de regeneração, cerca de 20 anos após o início dos processos de restauração.

Suganuma e Durigan (2015) fizeram um apanhado de informações a respeito de 26 povoamentos de restauração florestal na Floresta Estacional Semidecidual entre os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. A análise utilizou ecossistemas de referência (floresta madura, floresta secundária e floresta degradada) para comparar variáveis utilizadas como indicadores no processo de restauração florestal. Dentre os resultados obtidos, destaca-se que para área basal os povoamentos atingiram os mesmos números da floresta em estágio secundário em um período aproximado de 10 anos (Figura 9) enquanto para a riqueza total este período é de 16 anos. Para cobertura de copa e riqueza do sub-bosque o período verificado foi de aproximadamente 27 anos, e para densidade total

e densidade do sub-bosque, entre 32 e 37 anos. Já a densidade de plântulas não alcança o patamar da floresta secundária dentro do período de tempo estudado (55 anos). Na Figura 9, a modelagem indica que aos 10 anos de idade, os povoamentos de restauração atingem uma área basal da ordem de 25 m² / ha e uma riqueza total de aproximadamente 40 espécies, alcançando os patamares observados nas matas ciliares do rio Doce e até mesmo ultrapassando o parâmetro no caso da área basal.

Figura 9 – Área Basal e Riqueza Total comparadas com a idade de florestas no processo de restauração florestal. As médias dos ecossistemas de referência estão representadas pelas linhas horizontais: Florestas maduras (traços), florestas degradadas (pontos) e florestas secundárias (traços e pontos).



Fonte: Suganuma e Durigan, 2015.

Dentre as conclusões apresentadas no estudo, destaca-se que os parâmetros estruturais como área basal, cobertura de copa e densidade da regeneração natural foram considerados como os melhores para o monitoramento da restauração em florestas tropicais. A área basal é um indicador clássico de biomassa, representando a recuperação da floresta quanto à estrutura e sequestro de carbono. Já a riqueza da regeneração foi considerada o melhor parâmetro de monitoramento da diversidade (Figura 10).)

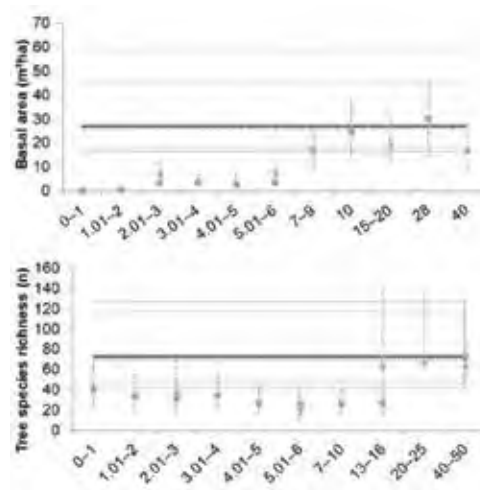
Figura 10 – Principais valores estimados dos parâmetros estudados em relação aos ecossistemas de referência

	Old-growth forest (n=5)		Degraded forest (n=5)		Secondary forest (n=5)	
	Mean ± SE	Time	Mean ± SE	Time	Mean ± SE	Time
Forest structure						
Basal area (m ² ha ⁻¹)	11.7 ± 1.6	15	30.5 ± 2.6	9	24.7 ± 1.6	31
Canopy cover (%)	80 ± 1	36	87 ± 5	32	83 ± 1	24
Total density of tree species (ind. ha ⁻¹)	11,100 ± 934	51	9,903 ± 1,545	31	10,927 ± 1,737	37
Density of the whole understorey (ind. ha ⁻¹)	9,990 ± 805	51	8,743 ± 1,596	31	8,207 ± 1,701	32
Density of saplings (ind. ha ⁻¹)	2,693 ± 427	71	2,650 ± 187	68	2,913 ± 487	87
Density of pteridophytes (ind. ha ⁻¹)	10,913 ± 1,312*	—	690 ± 571*	—	1,001 ± 47*	—
Density of lianas (ind. ha ⁻¹)	2,273 ± 90*	—	4,407 ± 720*	—	3,547 ± 595*	—
Density of epiphytes (ind. ha ⁻¹)	173 ± 19*	—	127 ± 3*	—	50 ± 8*	—
Density of shrubs (ind. ha ⁻¹)	273 ± 155	—	873 ± 539	—	1,237 ± 537	—
Richness (tree species in 1,000 m²)						
Total richness	78 ± 7	30	57 ± 6	23	51 ± 10	16
Overstory richness	41 ± 3*	—	33 ± 6*	—	30 ± 4*	—
Richness of the whole understorey	71 ± 6	77	87 ± 3	29	88 ± 9	27
Richness of saplings	42 ± 11	86	79 ± 4	69	32 ± 9	43
Rarefied richness for 100 individuals naturally regenerating	33 ± 3	39	25 ± 2	34	25 ± 5	34
Functional guilds (tree species)						
Proportion of animal-dispersed species	0.67 ± 0.02	49	0.64 ± 0.01	29	0.65 ± 0.06	35
Proportion of animal-dispersed individuals	0.54 ± 0.11	—	0.42 ± 0.14	—	0.57 ± 0.13	—
Proportion of shade-tolerant species	0.83 ± 0.04	46	0.82 ± 0.04	64	0.77 ± 0.05	51
Proportion of shade-tolerant individuals	0.93 ± 0.04	75	0.92 ± 0.04	73	0.73 ± 0.12	40
Proportion of slow-growing species	0.41 ± 0.04	36	0.45 ± 0.02	45	0.40 ± 0.06	34
Proportion of slow-growing individuals	0.66 ± 0.08	239	0.64 ± 0.11	247	0.37 ± 0.06	40

Fonte: Suganuma & Durigan, 2015.

Em outro recente e importante estudo, Londe et al. (2020) compilaram dados de 967 florestas secundárias e em processo de restauração, sendo parte delas restaurada com plantio de mudas e outra parte conduzindo a regeneração natural. Ao todo foram utilizados 14 indicadores ecológicos para comparar os valores de referência baseados em florestas secundárias e maduras com dados obtidos a partir de estudos desenvolvidos na mata atlântica para florestas secundárias e maduras. De forma geral, os indicadores se comportam de forma diferente ao longo do processo de restauração, sendo que alguns deles atingem os valores de referência no início do processo, enquanto outros requerem dezenas de anos. Para área basal, por exemplo, verificou-se que nas áreas sob restauração, o indicador demora ao menos 10 anos para atingir o ecossistema de referência de florestas secundárias, enquanto para riqueza, este tempo seria de aproximadamente 20 anos (Figura 11).

Figura 11 – Valores de referência finais (linhas horizontais pretas) e intermediários (linhas horizontais laranja) e valores de comparação de florestas plantadas (símbolos azuis) e regeneração natural (símbolos verdes) para cada indicador. As linhas horizontais mais finas e as barras verticais representam a semi-amplitude do intervalo de confiança em torno da mediana. Os símbolos verdes combinam a regeneração natural por plantio e condução



Fonte: adaptado de LONDE et al., 2019.

Lembrando que os dados coletados para o Compartimento 1 apresentaram média de área basal de 18,67 m²/ha e riqueza total de aproximadamente 39 espécies. Os números demonstram índices de área basal (G m²/ha) e riqueza relativamente abaixo dos encontrados nos estudos supracitados, entretanto é importante considerar que os fragmentos utilizados como sítios controle no rio Doce, são fragmentos que não sofreram ações de restauração florestal, e sua regeneração decorreu de forma natural em ambientes previamente degradados, por isso a principal variável que se altera entre os cenários natural e com recuperação externa é o horizonte de tempo para a regeneração que é considerado.

No estudo realizado por Londe et al. (2020), no intervalo de idade entre 13 e 16 anos, os povoamentos de restauração florestal apresentam aproximadamente 30 espécies em sua riqueza total, enquanto no modelo utilizado por Suganuma e Durigan (2015), na idade de 10 anos, os povoamentos possuem uma riqueza de aproximadamente 40 espécies, já próxima de alcançar o ecossistema de referência. A partir destas informações, optou-se por adotar como parâmetro a riqueza com o número de 40 espécies e a idade de 10 anos, visto que nesta idade o povoamento já teria alcançado outro

parâmetro – área basal – em relação ao ecossistema de referência, e estaria prestes a alcançar o próprio parâmetro de riqueza.

Após definido o tempo para a regeneração externa da vegetação e adotado o mesmo valor de área basal média, desenvolveu-se os mesmos processos matemáticos realizados na recuperação natural. Estimou-se a taxa de crescimento anual linear por meio da razão entre a área basal e o tempo (Tabela 4). De posse de todas essas informações foi possível estimar a curva de recuperação externa.

Tabela 4 – Valores assumidos para a construção da curva de recuperação externa e cálculos para estimar a perda interina descontada em hectare da vegetação afetada pelo desastre

Tempo em anos para regeneração externa (restauração florestal)	10 anos
Área basal (área de troncos por hectare)	18,67 m ² /ha
Taxa de crescimento anual linear	1,88 m ² /ha
Total hectares perdidos em 2015 (T0)	859,40 ha

Fonte: Lactec, 2021.

Para estimar a curva de recuperação externa, bem como a perda anual ocorrida após o desastre, a primeira questão a definir, no cenário de recuperação externa, é em que ano houve o início do projeto de recuperação, a restauração florestal. Sabe-se que no ano seguinte ao desastre, a RENOVA iniciou uma série de ações de revegetação na região, por isso, para a construção da curva de recuperação externa, considerou-se que os benefícios gerados pela restauração florestal iniciaram em 2016. Após essa definição, foram seguidos os mesmos procedimentos de cálculos realizados para recuperação natural, conforme resultados expostos na Tabela 5: calculado o incremento de ganho de área basal em m²/ha em 1 hectare, sendo o incremento anual constante de 1,88 m²/ha sendo este valor maior do que o cenário natural, justamente pelas ações que aceleram o processo de regeneração. A partir desse incremento calculou-se o percentual desse ganho por hectare, para que pudesse estimar o ganho anual em hectare, por meio da multiplicação entre o percentual ganho e a área em hectare da linha base afetada. Conhecendo-se o ganho anual em hectare, por meio da diferença entre ele e a área em hectare da linha base afetada, obteve-se a perda anual em hectare, que após a aplicação do fator de desconto (8% ao ano), resultou na perda anual em hectare descontada. O somatório desta última coluna que fornece a perda interina total descontada no tempo no contexto de recuperação externa.

Tabela 5 – Cálculos realizados para estimar a perda interina descontada em hectare, considerando a vegetação suprimida e morte tardia

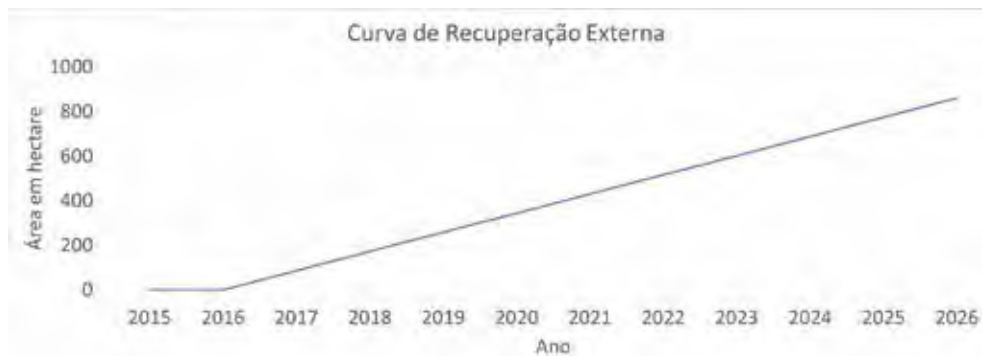
Ano	LB Área afetada ha	LB área basal m ² /ha	Ganho m ² /ha	Percentual de ganho por hectare	Ganho anual em hectare	Perda anual em hectare	Perda anual em hectare descontada
2015	859,4	18,67	0	0,00	0	859,4	859,40
2016	859,4	18,67	0	0,00	0	859,4	795,74
2017	859,4	18,67	1,867	0,10	85,94	773,46	663,12
2018	859,4	18,67	3,73	0,20	171,88	687,52	545,78
2019	859,4	18,67	5,60	0,30	257,82	601,58	442,18
2020	859,4	18,67	7,47	0,40	343,76	515,64	350,94
2021	859,4	18,67	9,34	0,50	429,7	429,7	270,78

Ano	LB Área afetada ha	LB área basal m ² /ha	Ganho m ² /ha	Percentual de ganho por hectare	Ganho anual em hectare	Perda anual em hectare	Perda anual em hectare descontada
2022	859,4	18,67	11,20	0,60	515,64	343,76	200,58
2023	859,4	18,67	13,07	0,70	601,58	257,82	139,29
2024	859,4	18,67	14,94	0,80	687,52	171,88	85,98
2025	859,4	18,67	16,80	0,90	773,46	85,94	39,81
2026	859,4	18,67	18,67	1,00	859,4	0	0,00
TOTAL	-	-	-	-	4.726,7	5.586,1	4.393,60

Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 12 exibe a curva de recuperação externa estimada que reflete os valores dos ganhos anual em hectares obtidos por meio da restauração florestal.

Figura 12 – Curva de recuperação externa da vegetação



Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 13 é a representação gráfica do cálculo da perda interina descontada no contexto de recuperação externa, cenário de execução do projeto de restauração florestal, sendo essa a perda interina descontada devida à sociedade.

Figura 13 – Perda interina descontada da vegetação no contexto de recuperação externa



Fonte: Lactec, 2021.

4.1.5 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPENSAÇÃO

Definida a perda interina em 4.393,60 hectares a serem compensados, passou-se a etapa de construção da curva de compensação. Para tanto, as ações compensatórias definidas são as mesmas das ações de recuperação, isto é, restauração florestal, porém em outras áreas da bacia do rio Doce que não foram afetadas pelo desastre.

Para a estimativa da curva de compensação, utilizou-se os mesmos processos matemáticos das curvas de recuperação, e as mesmas informações de área basal média e o tempo de restauração definido na recuperação externa (10 anos), mantendo modelo matemático linear, por meio da razão entre a área basal e o tempo (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores assumidos para a construção da curva de compensação em hectare da vegetação ganhos com as ações compensatórias

Tempo em anos para compensação (restauração florestal)	10 anos
Área basal (área de troncos por hectare)	18,67 m ² /ha
Taxa de crescimento anual linear	1,88 m ² /ha
Total de hectares a serem compensados descontados (perda interina)	4.393,60

Fonte: Lactec, 2021.

Para estimar a curva de compensação, foi definido que o início do projeto de compensação ocorrerá em 2022. Após essa definição, foram seguidos os mesmos procedimentos de cálculos realizados para as curvas recuperação, conforme resultados expostos na Tabela 7Tabela 5: calculado o incremento de ganho de área basal em m²/ha em 1 hectare, sendo o incremento anual constante de 1,88 m²/ha. A partir desse incremento, calculou-se o percentual desse ganho por hectare, para que se pudesse estimar o ganho anual em hectare, por meio da multiplicação entre o percentual ganho e a área em hectare alvo das ações compensatórias, sendo esta de 2.300 hectares. Esse quantitativo em hectare definido está associado ao ganho ao longo do tempo. Explanando com maior detalhes, a lógica aqui é a mesma da perda interina. Quando há a restauração florestal de 1 hectare, a área basal ganha vai aumentando no tempo devido ao ganho em volume dos troncos dos indivíduos arbóreos plantados. Como os ganhos estão sendo medidos em hectare considerando os incrementos em área basal, e como a perda interina é 4.393,60 hectares, é necessário descobrir a quantidade de hectares a serem reflorestados no ano 1 da compensação, que somados os ganhos ao longo do tempo e trazidos a valor presente correspondam ao valor da perda interina. Por isso, a área a ser compensada é menor que a área devida, pois os ganhos obtidos nos anos seguintes, na área compensada, também são computados como benefícios, da mesma forma como foi feito para a perda interina, porém na perspectiva das perdas. Por isso, para compensar a área devida, é necessário realizar ações de compensação (restauração florestal) em 2.300 hectares.

Assim, conhecendo-se o ganho anual em hectare, por meio da diferença entre ele e a área em hectare a ser alvo de compensação, obteve-se o ganho anual em hectare da compensação não descontado, que após a aplicação do fator de desconto (8% ao ano), resultou no ganho anual em hectare da compensação descontado. O somatório desta última coluna fornece o ganho total da compensação descontada no tempo, sendo este de 4.386,67 hectares, quitando assim a perda interina. A pequena diferença existente entre esse valor e o valor exato da perda interina é desconsiderado para fins de arredondamento.

Tabela 7 – Cálculos realizados para estimar os ganhos descontados em hectare da compensação

Ano	LB área basal m²/ha	Ganho m²/ha	Percentual de ganho por hectare	Área em ha reflorestada pelas ações compensatórias	Ganho anual em hectare da compensação não descontado	Ganho anual em hectare da compensação descontado
2022	18,67	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2023	18,67	1,867	0,10	2.300,00	230,00	124,26
2024	18,67	3,73	0,20	2.300,00	460,00	230,11
2025	18,67	5,60	0,30	2.300,00	690,00	319,60
2026	18,67	7,47	0,40	2.300,00	920,00	394,57
2027	18,67	9,34	0,50	2.300,00	1.150,00	456,68
2028	18,67	11,20	0,60	2.300,00	1.380,00	507,42
2029	18,67	13,07	0,70	2.300,00	1.610,00	548,14
2030	18,67	14,94	0,80	2.300,00	1.840,00	580,04
2031	18,67	16,80	0,90	2.300,00	2.070,00	604,21
2032	18,67	18,67	1,00	2.300,00	2.300,00	621,62
TOTAL	-	-	-	2.300,00	12.650,00	4.386,67

Nota: no primeiro ano da compensação não há ganho pois trata-se do ano inicial do projeto, cujas ações são relacionadas a diagnósticos e estudos preliminares, apenas no ano 2 é realizado o plantio, que é executado de uma vez, ou seja, os 2.300 hectares são reflorestados no ano 2. Os anos seguintes se referem aos cuidados e monitoramento dessa área.

Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 14 exibe a curva de compensação estimada que reflete os valores dos ganhos anual em hectares obtidos por meio do restauração florestal, em áreas não afetadas pelo desastre.

Figura 14 – Curva de compensação da vegetação



Fonte: Lactec, 2021.

4.1.6 TAXA DE EQUIVALÊNCIA DA RECUPERAÇÃO EXTERNA E DA COMPENSAÇÃO

Conforme já apresentado no item que detalha a metodologia do MEH/MER, a taxa de equivalência é uma taxa que traduz a qualidade ambiental da área recuperada e compensada, em comparação com a qualidade ambiental existente na linha base, ou seja, antes do dano. Para o habitat vegetação a taxa de equivalência determinada é igual a 1 o que significa dizer que as áreas que seriam recuperadas e compensadas possuiriam a mesma qualidade ambiental anterior ao desastre.

No entanto, acredita-se que essa taxa é conservadora, pois a área alvo da recuperação, ou seja, os 859,40 hectares que foram afetados pelo desastre e seriam recuperados por meio de restauração florestal, ocorreria sobre o Tecnossolo. Explicado mais adiante, o Tecnossolo é uma nova camada de solo formada por rejeito. No processo de recuperação não há ações previstas para a retirada desse Tecnossolo e também não é possível saber se pode haver efeitos adversos para a vegetação plantada sobre o rejeito. Como não há cenários semelhantes que possam servir de parâmetro para tal análise, nem estudo de longo prazo de plantios florestais sobre esse tipo de solo, a equipe optou por fixar a taxa de equivalência igual a 1, uma vez que especificar possíveis efeitos futuros seja inviável devido a ausência de informações.

4.1.7 DETALHAMENTO DAS AÇÕES PARA RECUPERAÇÃO EXTERNA E AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA OS DANOS CAUSADOS À FLORA

As ações de restauração recomendadas nessa valoração são as mesmas para as duas situações, ou seja, recuperação externa e compensação. Logo, essas ações se tratam de plantio, restauração florestal nas áreas suprimidas pela remoção mecânica da lama, nas áreas onde houve morte tardia dos indivíduos florestais e nas áreas adicionais que irão compensar a sociedade pelo tempo sem o recurso. As ações de restauração florestal foram definidas no Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta – TTAC, por isso, utiliza-se o mesmo escopo técnico de restauração do Programa de Recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Recarga Hídrica (Programa 26) e do Programa de Recuperação de Nascentes da Bacia do Rio Doce (Programa 27) definido no âmbito da subseção II – Restauração Florestal e Produção de Água, referente a cláusula 163, para descrever tais ações no processo de valoração dos danos. Ressalta-se que o escopo dos programas 26 e 27 é mais amplo, pois considera ações socioambientais a serem realizadas juntamente com os proprietários rurais. Esta amplitude não faz parte do processo metodológico da valoração, haja vista que se busca apenas orçar os custos necessários para devolver à sociedade os recursos ambientais perdidos, nesse caso, recursos florestais. Por isso, o método a ser replicado do Programa 26 e Programa 27 se refere apenas a todos os processos relacionados ao plantio florestal. Desta forma, não serão incorporadas ações socioambientais com proprietários e produtores rurais. Maiores detalhamentos sobre a análise do escopo e das ações consideradas e não consideradas podem ser verificados no Apêndice A.

Posto isso, reforça-se que processos de restauração florestais seguem, geralmente, um escopo padrão largamente adotado o que torna coerente a replicação do método adotado para os programas 26 e 27. Desta forma, o texto aqui apresentado tem como fonte o documento PG-27- PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO DE NASCENTES DA BACIA DO RIO DOCE e o documento PG-26- PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APPS) E RECARGA HÍDRICA elaborados pela Fundação Renova e apresentado em maio de 2019 à CT-Flor. As informações serão apresentadas de forma mais resumida, recomendando-se que, na busca por detalhes, seja consultado o referido documento.

Embora o programa citado seja dividido em 10 etapas de execução, para o presente estudo serão consideradas as etapas relacionadas a priorização, sementes e mudas, mobilização e engajamento, elaboração de projeto individual da propriedade, implantação e manutenção dos plantios,

monitoramento e gerenciamento, e para as áreas de recuperação (859,40 hectares), inclui-se a atividade de pesquisa e desenvolvimento. As ações são pensadas e descritas seguindo todas as normas vigentes na legislação ambiental que tangem a recuperação de áreas degradadas, tais como: Lei Nº 12.651/12; Lei Nº 11.428/2006; Decreto nº 8.972/17; IN IBAMA Nº 04/2011 e IN ICMbio Nº 11/2014.

- Definição das áreas prioritárias

No presente estudo, as áreas aqui recomendadas, para fins de recuperação, são as áreas afetadas pelo desastre, sendo os 859,40 hectares, parte suprimida pela remoção mecânica da lama e a outra parte pela morte tardia dos indivíduos florestais. As outras 4.393,60 áreas que deverão ser compensadas não são delimitadas neste documento, demandando definição pelas partes interessadas. No entanto, recomenda-se que as áreas selecionadas sejam pertencentes a bacia do rio Doce e que possam privilegiar a conectividade entre fragmentos próximos, de forma a facilitar o fluxo gênico e reduzir impactos como o efeito de borda, bem como áreas que possam maximizar a oferta dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelas florestas (exemplo: matas ciliares e zonas de recarga hídrica). Oportunizar áreas que possam oferecer proteção legal à floresta em processo de restauração. Em adição às características ambientais, verificar também as aptidões socioeconômicas da região para a implantação dos programas de restauração florestal. O atendimento a essas recomendações irá garantir os benefícios ambientais para a região afetada.

- Obtenção dos perímetros

Após a clareza dos locais a receberem as ações, segue-se o próximo passo de obtenção dos perímetros das áreas que serão recuperadas. Esta última etapa ainda conta com o piqueteamento em campo.

Com o perímetro em mãos, a equipe responsável pela elaboração dos projetos de restauração deverá retornar a campo para aferir o uso do solo dessas localidades, delimitar as respectivas Unidades de Trabalho (UT), Unidades de Referência (UR), Unidades de Intervenção (UI) e então executar o diagnóstico do uso do solo nessas áreas.

Após a definição dos respectivos polígonos com as unidades que serão trabalhadas, os técnicos de campo realizam o diagnóstico da área através da aplicação de uma chave de intervenções. A chave de intervenções é uma ferramenta produzida (adaptada) pelos técnicos da Fundação Renova a partir de Brancalion *et. al* (2015) e sua chave para seleção de métodos de restauração. O método de funcionamento da ferramenta consiste na identificação, em ambiente SIG, do uso e cobertura do solo da localidade e aplicação de diagnósticos específicos. Para cada classe de diagnóstico existe uma intervenção vinculada, compondo as atividades necessárias a execução de um projeto de restauração.

A chave trabalha não só o diagnóstico dessas áreas como também as respectivas ações de recuperação previstas. A chave, além do uso do solo e diagnóstico, é dividida em 6 ações de recuperação e suas respectivas intervenções, distribuídas da seguinte forma:

- 1ª Ação de recuperação - Isolamento dos fatores de degradação
- 2ª Ação de recuperação - Recuperação do Solo
- 3ª Ação de recuperação – Plantio ou condução da regeneração natural
- 4ª Ação de recuperação – Replantio

- 5ª Ação de recuperação - Manutenção/Manejo
- 6ª Ação de recuperação - Monitoramento

Cada uma das ações acima é composta por uma série de atividades que foram detalhadas no Apêndice B. A construção do projeto nessas bases otimiza atividade em campo, e agrega ganho de escala à elaboração dos projetos. Além disso, confere maior controle dos tipos de projetos que serão elaborados e estabelece um padrão para elaboração, tornando possível vincular uma etapa a outra fazendo a produção de projetos acontecer em cadeia.

- Calibração dos dados geográficos e obtenção das variáveis

Após a etapa de obtenção dos perímetros o responsável pelo projeto deverá ajustar os dados geográficos em escritório para eliminar os erros oriundos da coleta de dados em campo.

Por fim, com os polígonos e as respectivas classificações consolidadas, o responsável deverá gerar as variáveis do trabalho, que servirão de base de cálculo para todo o restante do projeto. As variáveis incluem as áreas dos polígonos, perímetro de Unidades de Trabalho ou blocos de UTs, dependendo da continuidade das áreas, vértices do perímetro onde serão implantados os esticadores das cercas, dentre outras necessárias a elaboração do projeto.

- Elaboração do Projeto básico

Baseado no texto do inciso IX do Art. 6º da Lei Federal nº 8.666/1993, o projeto básico consiste num conjunto de elementos necessários e suficientes, com nível de precisão adequado, para caracterizar o local onde a recuperação ocorrerá assegurando a viabilidade técnica e a possibilidade da avaliação dos custos da obra e a definição dos métodos e do prazo de execução. Neste sentido, tem função semelhante de um plano de trabalho que forneça aos órgãos reguladores as informações do que será desenvolvido.

O projeto básico deverá ser realizado a partir de dados secundários e conter minimamente, a seguinte estrutura: Apresentação/Contextualização; Justificativas; Objetivos; Materiais e Métodos com a caracterização dos solo, clima, bioma, fitofisionomia, cobertura vegetal atual, bacia e microbacia, relevo, solo, hidrografia, planejamento da campanha de campo, descrição das soluções técnicas previstas; e Cronograma de implantação.

- Elaboração do Projeto executivo

Após o cumprimento de todos os passos anteriores, o próximo passo é a elaboração do projeto executivo que detalha todas as atividades a serem executadas nas atividades de restauração.

Subprojetos executivos de restauração florestal

Os subprojetos de restauração florestal podem compreender ações de restauração ativa - plantio total de mudas e direto de sementes; e passiva - condução da regeneração natural, enriquecimento e adensamento. As soluções técnicas para plantio deverão considerar as seguintes alternativas: Seleção das espécies e grupos de plantio; Técnicas de nucleação, quando identificado o potencial; Adoção de medidas de prevenção e combate a incêndios florestais; Proteção das áreas em restauração; Controle de espécies competidoras; Tratos culturais em fragmentos remanescentes; Técnicas de manejo em plantios silviculturais para plantio; Técnicas de coleta do solo; Recomendação de adubação e calagem; Preparo do solo para o plantio; Adubação verde/plantio de leguminosas; Adubação e calagem; Controle

de formigas cortadeiras; Espaçamento; Plantio de mudas; Plantio direto de sementes; Reposição das mudas; Irrigação (quando necessário); Hidrogel e Manutenção.

- Implantação e manutenção

Anteriormente a implantação das ações existem ações estruturantes e que não entram no escopo das ações de recuperação, mas que devem ser mencionadas. São elas: Planejamento das atividades; estabelecimento das modalidades de restauração ecológica; definição das espécies e proporção dos grupos de plantio; e prevenção a incêndios florestais.

Como na elaboração dos projetos, o plantio e as manutenção são distribuídas em fases que correspondem às 6 ações de recuperação apresentadas anteriormente. A primeira ação de recuperação corresponde ao isolamento dos fatores de degradação e atividades correlatas, compreendendo as etapas: Prevenção a incêndios florestais; Cercamento; Coleta e análise do solo; Marcação dos regenerantes e roçada. A segunda ação de recuperação corresponde a recuperação do solo e atividades correlatas, compreendendo as etapas: Adubação verde; Calagem e gessagem; Colheita de baixo impacto da madeira; Controle de erosão; Coroamento; Descompactação do solo; Manejo do fragmento; Espaçamento e marcação das covas. A terceira ação de recuperação corresponde as ações de plantio e envolve as etapas: Adubação; Aplicação do hidrogel; Controle de formigas; Marcação dos regenerantes e Plantio. A quarta ação de recuperação corresponde às ações de manutenção do plantio e envolve as etapas: Adubação e adubação de cobertura; Aplicação do hidrogel; Controle de formigas e Replantio. A quinta ação de recuperação que corresponde às ações de plantio e envolve as etapas: Prevenção a incêndios florestais; Cercamento; Controle de formigas; Reposição de mudas; roçada e coroamento. Por fim, a sexta ação de recuperação corresponde ao monitoramento.

Maiores detalhamentos das seis ações estão registrados no Apêndice B.

4.1.8 VALOR MONETÁRIO DO DANO

Logo após a definição do escopo dos projetos de restauração florestal, ou seja, da adaptação feita ao Programa de Recuperação de Nascentes da Bacia do Rio Doce (Programa 27) da RENOVA, utilizado como referência tanto para recuperação quanto para compensação, passou-se a fase de orçamentação dos custos para execução dessas atividades, a fim de atribuir um valor econômico ao dano ambiental valorado.

O orçamento utilizado para precificação de tal projeto foi o orçamento do próprio Programa 27, visto que o mesmo se encontra finalizado e cujos valores estão aceitos pela instituição. Os mesmos ajustes realizados no escopo, também foram realizados no orçamento, retirando-se os custos relacionados as ações que foram desconsideradas do escopo, a fim de que, o valor R\$/hectare obtido reflita apenas os esforços necessários para a execução dos projetos de restauração florestal, garantindo a efetividade das ações (Apêndice A). A Tabela 8 mostra o orçamento de forma simplificada, com os custos R\$/ha separados pelas macroetapas. Ressalta-se que tais valores foram definidos em maio de 2019 conforme a data do documento que apresenta o Programa 27, por isso, foi necessário corrigir os valores finais para março de 2021, conforme informações expostas na Tabela 9.

Tabela 8 – Orçamento do projeto de restauração florestal, como forma de recuperação e compensação dos danos ambientais causados à vegetação, preços de maio de 2019

	Etapas	Custo Renova (R\$/ha.)
1	Priorização (<i>Pesquisa de predisposição para restauração</i>)	320,51
2	Sementes e Mudas	2.794,65
3	Mobilização e Engajamento	2.615,38
4	PIP (Projeto Individual da Propriedade)	1.600,00
5	Implantação e Manutenção	30.355,39
5.1	Plantio e manutenção (Serviços e insumos para plantio)	20.661,88
5.2	Cercamento e manutenção (Insumos e serviços terceiros)	4.027,49
5.3	<i>Proteção florestal (incêndio)</i>	5.666,03
6	Monitoramento	4.159,93
7	Gerenciamento	8.554,94
	Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais	50.400,80
8	Pesquisa e Desenvolvimento (área da recuperação)	1.708,02
	Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecnossolo	52.108,83

Fonte: Programa 27 da RENOVA, maio de 2019.

Utilizando a variação do índice de preço ao consumidor amplo (IPCA), acumulado entre maio 2019 a março de 2021, cujo valor foi 8,98% a Tabela 9 mostra os valores atualizados pela correção monetária.

Tabela 9 – Valores atualizados, não descontados, do projeto de restauração florestal, preços de maio de 2019 para março de 2021

Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais (Preços maio/2019)	50.400,80	Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais (Preços março/2021)	54.926,80
Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecnossolo (Preços maio/2019)	52.108,83	Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecnossolo (Preços março/2021)	56.788,20

Após a atualização dos valores a serem utilizados como custo unitário da restauração florestal, reais por hectare, apresenta-se o valor total dos projetos de recuperação e compensação, por meio da multiplicação do custo unitário pelo quantitativo de áreas totais a serem recuperadas e compensadas, conforme expresso na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores totais, não descontados, dos projetos de restauração florestal, recuperação e compensação, preços de março de 2021

Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecnossolo (Preços março/2021)	Total de área em hectare a ser recuperada	Valor total do projeto de recuperação não descontado
56.788,20	859,40	R\$ 48.803.780,04
Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais (Preços março/2021)	Total de área em hectare a ser compensada	Valor total do projeto de compensação não descontado
54.926,80	4.393,60	R\$ 241.326.099,54

A Tabela 11 traz o cronograma financeiro em termos percentuais, conforme a execução do projeto de recuperação, considerando o custo total que incorpora a recuperação em Tecnossolo, com o custo anual descontado após a aplicação da taxa de desconto. Por meio dessa Tabela é possível concluir que o valor descontado da recuperação do dano causado à vegetação é de R\$ 40.154.299,61 a preços de março de 2021 e a valor presente de 2021, sendo que, a partir desse valor total descontado, o custo unitário descontado da recuperação é de R\$ 46.723,64/hectare.

Tabela 11 – Cronograma do desembolso financeiro (fluxo de caixa) do projeto de recuperação, custos descontados a valor presente de 2021

Ano	Cronograma de execução - percentual de desembolso anual	Custo anual do projeto (valor não descontado)	Fator de desconto	Custo anual do projeto (valor descontado)
2022	4,0%	R\$ 1.952.151,20	0,925925926	R\$ 1.807.547,41
2023	60,0%	R\$ 29.282.268,02	0,85733882	R\$ 25.104.825,12
2024	20,0%	R\$ 9.760.756,01	0,793832241	R\$ 7.748.402,82
2025	8,0%	R\$ 3.904.302,40	0,735029853	R\$ 2.869.778,82
2026	7,5%	R\$ 3.660.283,50	0,680583197	R\$ 2.491.127,45
2027	0,1%	R\$ 48.803,78	0,630169627	R\$ 30.754,66
2028	0,1%	R\$ 48.803,78	0,583490395	R\$ 28.476,54
2029	0,1%	R\$ 48.803,78	0,540268885	R\$ 26.367,16
2030	0,1%	R\$ 48.803,78	0,500248967	R\$ 24.414,04
2031	0,1%	R\$ 48.803,78	0,463193488	R\$ 22.605,59
TOTAL	100%	R\$ 48.803.780,04		R\$ 40.154.299,61

Para a mensuração do valor descontado da compensação do dano causado à vegetação, optou-se por padronizar o cálculo a partir do comportamento do custo unitário da recuperação, porém para este caso utilizando o custo unitário em solos naturais, ou seja, sem o valor adicional de pesquisa sobre o desenvolvimento das plantas em Tecnossolo. Para tanto, foi necessário recalcular o custo unitário R\$/hectare da recuperação, considerando a área de 859,40 hectares. Desse modo, o valor total do projeto de compensação não descontado é a multiplicação entre R\$ 54.926,80 que representa o custo unitário não descontado a preços de março de 2021 em solos naturais, sobre o quantitativo de área da recuperação, os 859,40 hectares, obtendo-se um total de R\$ 47.204.088,51 que representa o valor total da área a ser recuperada se esta fosse solo natural, ou seja, sem rejeito de mineração.

A partir desse valor que é calculado o custo total da compensação. A Tabela 12 traz o cronograma financeiro em termos percentuais, conforme a execução do projeto de compensação, com o custo anual do projeto descontado após a aplicação da taxa de desconto. Por meio dessa tabela, foi possível concluir que o valor descontado do projeto é de R\$ 38.838.120,97 sendo que, a partir desse valor, dividindo por 859,40, pois é custo unitário da recuperação que é a base do cálculo, o custo unitário descontado utilizado para a compensação é de R\$ 45.192,14/hectare. Logo, o valor total descontado da compensação do dano causado à vegetação foi obtido ao multiplicar esse custo unitário descontado pela quantidade total de hectares a serem compensados, os 4.393,60 hectares, obtendo assim o valor total de R\$ 198.555.941,71 a preços de março de 2021 e a valor presente de 2021.

Tabela 12 – Cronograma do desembolso financeiro (fluxo de caixa) do projeto de compensação, custos descontados a valor presente de 2021

Ano	Cronograma de execução - percentual de desembolso anual	Custo anual do projeto (valor não descontado)	Fator de desconto	Custo anual do projeto (valor descontado)
2022	4,0%	R\$ 1.888.163,54	0,925925926	R\$ 1.748.299,57
2023	60,0%	R\$ 28.322.453,10	0,85733882	R\$ 24.281.938,53
2024	20,0%	R\$ 9.440.817,70	0,793832241	R\$ 7.494.425,47
2025	8,0%	R\$ 3.776.327,08	0,735029853	R\$ 2.775.713,14
2026	7,5%	R\$ 3.540.306,64	0,680583197	R\$ 2.409.473,21
2027	0,1%	R\$ 47.204,09	0,630169627	R\$ 29.746,58
2028	0,1%	R\$ 47.204,09	0,583490395	R\$ 27.543,13
2029	0,1%	R\$ 47.204,09	0,540268885	R\$ 25.502,90
2030	0,1%	R\$ 47.204,09	0,500248967	R\$ 23.613,80
2031	0,1%	R\$ 47.204,09	0,463193488	R\$ 21.864,63
TOTAL	100%	R\$ 47.204.088,51		R\$ 38.838.120,97

Após a obtenção do valor do dano para recuperar e para compensar, apresenta-se na Tabela 13 o resultado final da valoração econômica dos danos ambientais causados à vegetação do rio Doce, por meio da aplicação do MEH/MER.

Tabela 13 – Resultado final da valoração dos danos causados à vegetação devido ao rompimento da barragem de Fundão

Danos	Valores em Reais (preços de março de 2021 e valor presente 2021)
Valor do dano da recuperação	R\$ 40.154.299,61
Valor do dano da compensação	R\$ 198.555.941,71
Valor total dos danos causados à Vegetação	R\$ 238.710.241,32

Fonte: Lactec, 2021.

4.2 SOLOS

4.2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS CAUSADOS AO SOLO

O solo é o principal reservatório da biodiversidade do planeta, onde ocorrem inúmeros processos biológicos e ecológicos que contribuem para o fornecimento de diversos serviços ecossistêmicos. Ressalta-se a importância desta matriz para os diversos ecossistemas ao se destacar que um quarto da biodiversidade do planeta está presente nos solos (BACH; WALL, 2018) e que um único grama de solo contém cerca de 10 bilhões de diferentes espécies de microorganismos (MARON; LEMANCEAU, 2015).

Presentes na camada mais externa da crosta terrestre, as diferentes ordens de solos que ocorrem na superfície do planeta representam o alicerce da vida dos ecossistemas terrestres, por serem responsáveis por funções como a ciclagem de nutrientes, a regulação e o regime de fluxo da água, a troca e a regulação de gases com a atmosfera e a purificação de poluentes e contaminantes, que em conjunto, resultam na sustentação de plantas, animais e seres humanos na Terra (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Quando alterações naturais e/ou antrópicas ocorrem de modo a influenciar nas características originais dos solos, sua capacidade de funcionar corretamente no ambiente pode ser reduzida, afetando negativamente no provimento de alimentos e da matéria-prima, na regulação ecossistêmica e no suporte às diferentes formas de vida. Portanto, alterações das propriedades naturais do solo, de forma geral, causam consequências diretas para o sustento do meio biótico e de suas funções (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Em novembro de 2015, quando ocorreu o desastre do rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), houve significativa deposição de rejeitos em planícies de inundação às margens dos tributários do rio Doce, entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves (Compartimento I), devido à diminuição da energia da onda de rejeitos nesses locais (Figura 15). A cobertura vegetal do terreno foi suprimida no compartimento 1 e as margens dos terraços baixos, as planícies fluviais e o leito menor dos rios foram encobertos ou assoreados por uma camada de rejeitos de minério de ferro proveniente do beneficiamento do Itabirito (SILVA et al., 2006), dando origem a uma nova classe de solo (Tecnossolo) e descaracterizando completamente os Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Cambissolos que ocorriam nas áreas de várzea anteriormente ao desastre (SCHAEFER et al., 2016), (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c).

Diante disso, por meio do levantamento do diagnóstico realizado, foram identificados 10 danos ocorridos ao solo, conforme detalhado no Diagnóstico socioambiental (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c). Os danos identificados foram: alteração na composição do solo; aumento da densidade do solo; alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo; alteração da permeabilidade e fluxo de água no solo; alteração da estabilidade de encostas; aumento dos processos erosivos; alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo; contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos; contaminação do solo por EPTs devido às ações emergenciais e formação de Tecnossolo.

Dentre os danos listados, para a aplicação do método de valoração de danos ambientais MEH/MER selecionou-se o dano de formação de Tecnossolo para ser alvo de valoração, pois entende-se que este é o dano principal pelo qual os demais danos citados surgem, sendo que a formação desse Tecnossolo se deu pelo soterramento do solo natural.

Os principais solos soterrados pelo rejeito foram solos aluviais, presentes em porções baixas da paisagem e adjacentes às margens dos corpos d'água. Esses solos exercem funções de regulação do fluxo da água, além de os ambientes aluviais servirem de habitat para espécies vegetais específicas (CARVALHO et al., 2009). Assim, a função ecológica de tais solos foi impactada pela deposição do Tecnossolo (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c)

O grupo de referência dos Tecnossolo foi inserido no sistema de classificação da FAO (WRB) em 2006, buscando contemplar os solos sob influência humana extrema, como os solos de áreas urbanas e industriais (solos pavimentados), solos de estradas, de áreas de mineração etc. (ECHEVARRIA; MOREL, 2015). Apesar de não corresponder a nenhuma ordem de solo do Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, o conceito de Tecnossolo se aplica à realidade do desastre do rompimento da barragem de Fundão (SCHAEFER et al., 2016), pois a nova camada de “solo” formada é proveniente de rejeito de mineração de ferro (portanto, de origem antrópica por definição) e fará parte da paisagem permanentemente caso não seja removido. Assim, o soterramento das ordens de solo que naturalmente ocupavam

as várzeas (Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Cambissolos (SCHAEFER et al., 2016) e que exerciam suas funções ecológicas no ambiente por uma camada de rejeitos de mineração que atende os pré-requisitos para uma nova ordem de solo (pois entende-se que já ocorreram processos pedogenéticos no material desde o momento da sua deposição, em novembro de 2015), de maior fragilidade ambiental, pode configurar em dano ao solo (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c).

Após a liberação dos rejeitos contidos na barragem de Fundão, a onda de lama foi responsável por suprimir aproximadamente 860 hectares de vegetação nativa e 687 hectares de pastagens no trecho compreendido entre Fundão e a UHE Risoleta Neves (compartimento 1) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), removendo a camada natural de solos e mesmo promovendo a exposição de rochas em alguns locais. Nessa região, houve a deposição de 10,75 hm³ de rejeitos na porção extracalha, formando uma camada de rejeitos com espessura média de 1,04 m, que substituiu os solos aluvionares naturais (Figura 15), resultando na ocorrência direta dos danos ambientais listados anteriormente (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Figura 15 – Soterramento de solos aluvionares por rejeito de minério de ferro em Mariana/MG

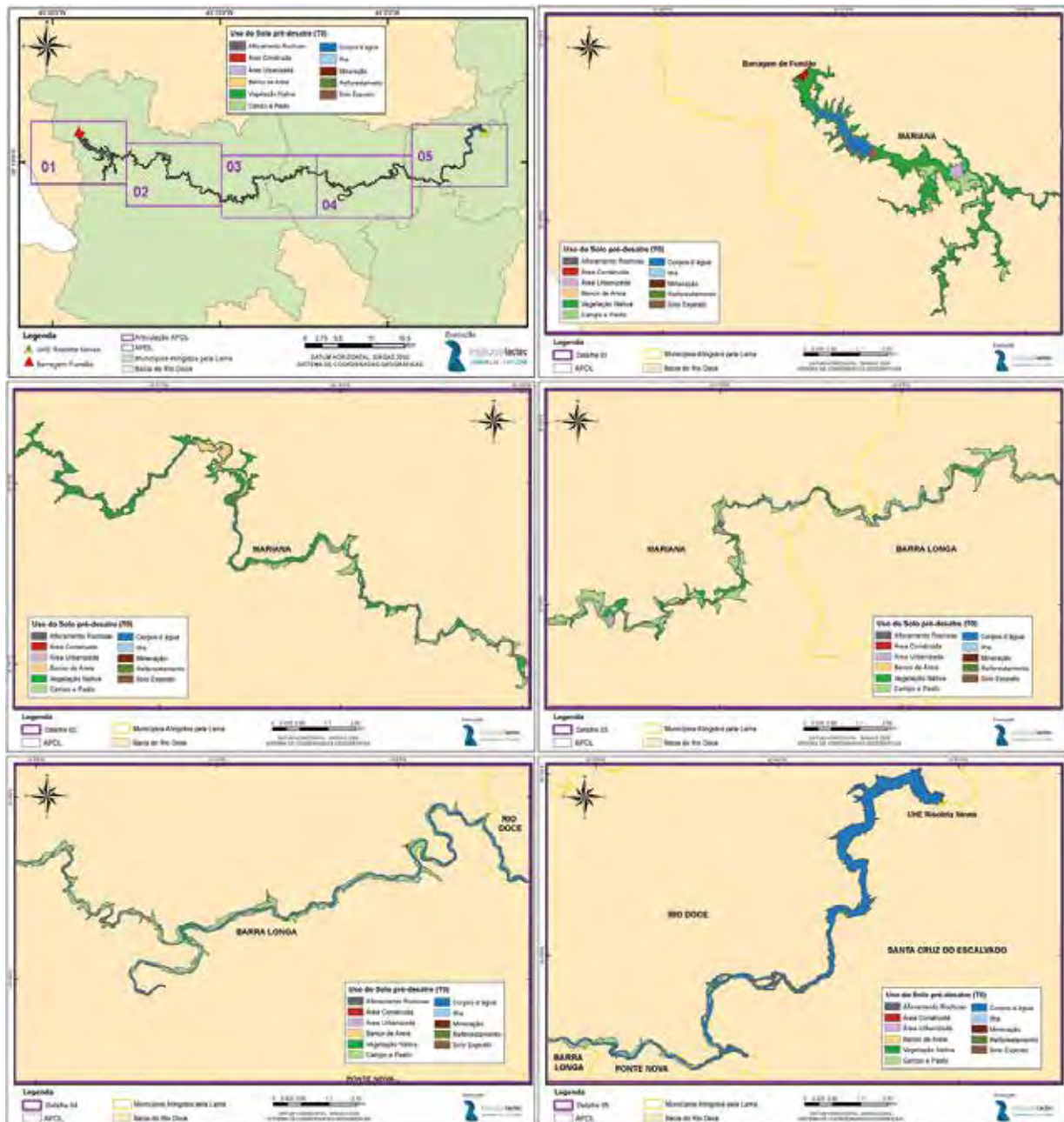


Fonte: Carmo et al. (2017).

Considerou-se que a alteração da composição do solo e a formação de Tecnossolo foram os danos mais graves, pois a substituição da mineralogia (solos caulíníticos por uma matriz essencialmente hematítica) e a perda de praticamente toda a matéria orgânica do solo (MOS) durante o processo de soterramento com rejeito afetaram o funcionamento ecológico do solo nessa região. Ademais, considerando a não retirada do rejeito na porção extracalha, somente processos pedogenéticos de muito longo prazo poderão restaurar plenamente as características originais dos solos pré-desastre.

Conforme exposto anteriormente, o soterramento ocorrido no compartimento 1 afetou áreas com vegetação nativa (floresta em estágio secundário) e áreas de pastagem. No escopo de valoração do habitat solo, a área de abrangência considerada refere-se apenas àquelas cujo uso do solo no momento do desastre era pastagem (687 ha). O restante da área na qual ocorreram danos no compartimento 1 é majoritariamente composta por vegetação ripária (860 ha), que foi suprimida. Esta área de vegetação nativa afetada já está sendo valorada no escopo de valoração da vegetação. A Figura 16 exibe o mapa com a delimitação da área de abrangência da valoração do habitat solo.

Figura 16 – Área de abrangência do escopo de valoração dos danos ambientais causados ao habitat solo devido o desastre de Fundão em Mariana/MG



Fonte: Lactec, 2021.

4.2.2 SELEÇÃO DA MÉTRICA E CONSTRUÇÃO DA LINHA BASE

Após a definição do dano a ser valorado, formação do Tecno solo devido ao soterramento do solo natural, a próxima etapa foi de definição da métrica, ou seja, a seleção da variável que mede o dano ocorrido e o seu comportamento no tempo. Para a valoração do solo foi definido como métrica o estoque de carbono (C) presente no solo por meio da unidade tonelada por hectare (considerando uma profundidade de 20 cm) (t/ha)⁷, que é convertida no final para área em hectare a ser recuperada/compensada. O processo ficará mais claro no decorrer da exposição dos cálculos. Importa inicialmente

⁷ Segundo o sistema internacional de medidas 1 tonelada (t) de carbono é igual 1 mega grama (Mg) de carbono.

compreender a importância do C no solo justificando sua escolha como métrica para valoração, que pode ser aprofundado no Apêndice C, e na sequência é apresentada a construção da linha de base do C do solo.

É no solo que se encontra o principal reservatório de carbono dentre os compartimentos ambientais terrestres (BHATTACHARYA et al., 2016). Até um metro de profundidade, estima-se que haja de 1.300 a 2.000 Pg de C (peta grama de carbono) estocado no solo (OLIVEIRA; REATTO; ROIG, 2015; POST, 2006), enquanto que o estoque na própria vegetação e atmosfera é aproximadamente quatro vezes inferior a estes valores (BHATTACHARYA et al., 2016).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais componentes dessa matriz, condicionando diversas características químicas, físicas e biológicas do solo (DICK; GREGORICH, 2004; TAN, 2003; BAYER; MIELNICZUK, 2008) e, por consequência, torna-se responsável por promover seu correto funcionamento no ambiente. Sua definição pode variar, mas em *stricto sensu*, a MOS consiste de materiais orgânicos vivos ou mortos presentes no solo, principalmente originários de resíduos vegetais (TAN, 2003). Considerando uma definição mais ampla, a MOS pode ser resumida como sendo todo e qualquer composto de origem biológica que apresente obrigatoriamente carbono (C) e hidrogênio (H) em sua composição, estando este material orgânico vivo ou morto, fresco ou em seus vários estágios de decomposição, dentro do solo ou em superfície, de origem vegetal ou animal, excetuando-se a parte aérea das plantas (GUGGENBERGER, 2006). De maneira geral, os componentes da MOS são representados por plúvioxiviados; liteira, restos de culturas e resíduos orgânicos; raízes e exsudatos; organismos do solo (micro, meso e macrofauna edáfica); substâncias não-húmicas; e substâncias húmicas (BRADY; WEIL, 2010).

Devido à heterogeneidade de seus componentes, a MOS é comumente representada por seu elemento mais abundante: o carbono orgânico do solo (COS). De maneira geral, cerca de 58% da matéria orgânica bruta do solo é representada pelo carbono (C) (STOCKMANN et al, 2013). Assim, a quantificação da MOS se dá indiretamente através da quantificação do C (BRADY; WEIL, 2010).

O solo promove serviços ecossistêmicos (SE) de suporte, provisão, regulação e cultural (BACH; WALL, 2018; PRADO et al., 2016), em que a MOS figura como protagonista no fornecimento de tais serviços. De acordo com Brady e Weil (2010), as diversas funções que o solo desempenha podem ser agrupadas em seis grupos principais de papéis ecológicos: meio para o crescimento de plantas (SE de suporte e provisão), sistema de reciclagem de nutrientes e resíduos orgânicos (SE de regulação), regulador da atmosfera (SE de regulação), habitat para organismos do solo (SE de provisão), meio de suporte para obras de engenharia (SE de suporte) e sistema de purificação e fornecimento de água (SE de provisão e regulação).

Devido ao papel fundamental da MOS no solo, abordado em parágrafos anteriores, grande parte dos processos fundamentais de regulação e provisão são dependentes de níveis adequados de matéria orgânica. Como exemplos (DICK; GREGORICH, 2004), citam-se: a MOS é um repositório de nutrientes (especialmente nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes) e aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC), contribuindo para a fertilidade do solo (contribuição ao SE de provisão para o crescimento de plantas); a MOS promove a agregação, que em resposta melhora a infiltração de água no solo e a troca de gases entre o solo e a atmosfera (contribuição aos SE de provisão e regulação do ciclo da água

e da atmosfera); ainda, a reatividade da MOS e a própria atividade biológica do solo realizam o papel de ciclagem de nutrientes e resíduos orgânicos (TAN, 2003), bem como a atenuação e detoxificação de compostos e elementos tóxicos (contribuição ao SE de regulação de reciclagem).

A partir das explanações anteriores é possível concluir que a MOS é fator determinante para a qualidade do solo (BRADY; WEIL, 2010; LIU et al., 2006), pois as funções que ela exerce estão intimamente associadas com propriedades emergentes que permitem ao solo ter qualidade física, química e biológica (VEZZANI et al., 2008). Pode-se afirmar que a degradação dos solos começa com o processo de destruição da MOS (TAN, 2003). Dessa maneira, o C do solo, por representar indiretamente a MOS, é considerado um proxy da qualidade do solo e, neste trabalho, foi utilizado como métrica para representar o principal recurso perdido durante a deposição do rejeito de mineração de ferro nas planícies aluvionares do compartimento 1 (Tecnossolo). Como o teor de C no rejeito de mineração é ínfimo (SILVA et al., 2006), considera-se que a perda desse elemento em função da substituição de solos naturais por Tecnossolos na paisagem resultou em consequências gravíssimas para o fornecimento de SE pelos solos afetados (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), e assim, a recuperação do C no Tecnossolo seria considerada a medida ideal para a atenuação dos danos ambientais diagnosticados nessa matriz.

Adiciona-se que o conteúdo de MOS que se acumula no solo é determinado pela diferença entre as quantidades de carbono adicionadas e as quantidades perdidas (BAYER; MIELNICZUK, 2008). A dinâmica de decomposição da MOS, na prática, ocorre por meio de uma saturação de C no solo (SIX et al., 2002) e por consequência, mesmo que ocorram adições constantes de grandes quantidades de material orgânico no solo existe um limite de acúmulo ditado pela dinâmica de transferência do C entre os compartimentos, transformando as frações mais lábeis (mais facilmente decomponíveis) em frações mais estáveis. Posto isso, tanto a construção da linha de base da quantidade de C no solo, quanto essa mesma medição em outros cenários, foi realizada por meio de modelagem matemática. Ferramentas de modelagem são importantes aliadas na predição de comportamentos e na representação simplificada da realidade (LEAL; DE-POLLI, 2008). A dinâmica da matéria orgânica no solo é complexa e influenciada por diversos fatores e, nesse sentido, a utilização de modelos matemáticos que possam auxiliar no estudo do comportamento da MOS é de fundamental importância pois podem ser utilizados para simular eventos futuros (LIMA et al., 2011; WENDLING et al., 2014).

O Century Ecosystem Model é um modelo de simulação mecanístico que possui como vantagens ser gratuito, apresentar boa relação entre entradas e saídas e ser um dos modelos mais difundidos e testados da dinâmica da MOS no mundo. O Century é um modelo da biogeoquímica terrestre baseada na relação entre clima, manejo (fogo, pastoreio, irrigação, etc.), propriedades do solo, produtividade da planta e decomposição (PARTON et al., 1993). No modelo do C do solo a MOS é dividida em três compartimentos (*pools*): ativo, lento e passivo (LIMA et al., 2011; STOCKMANN et al., 2013). O *pool* ativo representa a biomassa microbiana do solo e seus produtos, que possuem dinâmica rápida e *turnover* que varia de alguns meses a alguns anos; o *pool* passivo representa a MOS estabilizada (material muito resistente a decomposição), que inclui a MOS física e quimicamente estabilizada, com *turnover* que varia de 400 a 4.000 anos; e por fim, o *pool* lento representa a MOS de *turnover* intermediário, que inclui os materiais vegetais mais resistentes (componentes contendo lignina) e produtos microbianos estabilizados, com *turnover* que pode variar de 20 a 50 anos (dependendo do clima) e que é obtido

pela diferença entre o C total e os *pools* ativo e passivo (LEAL; DE-POLLI, 2008; LIMA et al., 2011; PARTON et al., 1993). Embora cada fração tenha sua importância específica para a qualidade do solo, para fins de cálculo da valoração, o que importa é o C total, que reúne todos os demais *pools*, e dessa forma os valores a serem discutidos em relação à valoração de danos serão apenas do C total.

O modelo Century (versão 4.0) foi escolhido para o estudo da dinâmica da MOS em função de cinco cenários delineados de acordo com a realidade do desastre, cenários esses detalhados abaixo e no Apêndice D e cujos scripts *site file* e *schedule file* estão expostos no Apêndice E:

- Linha base C1: a elaboração desse cenário no Century considerou as informações do solo da linha base do diagnóstico e a existência de pastagem “degradada” a partir de 1940, sendo esse o solo existente na região antes do desastre;
- Tecnossolo C2: considera todas as informações do cenário anterior de LB e adiciona a informação da existência do Tecnossolo, representando assim o solo existente na região após o desastre (a partir de novembro de 2015);
- Tecnossolo C3: considera todas as informações do cenário anterior, Tecnossolo C2, e adiciona as ações emergenciais da Renova entre novembro de 2015 e 2016, bem como as intervenções e medidas reparatórias até 2020, representando assim o solo existente na região após as ações da RENOVA;
- Tecnossolo C4: considera todas as informações do cenário anterior, Tecnossolo C3 (incluindo as ações emergenciais e medidas reparatórias da RENOVA), e adiciona as ações recomendadas pelo Lactec, que correspondem ao tratamento contínuo das vegetações plantadas (gramíneas) e adubação periódica, a fim de acelerar o aumento do C do solo;
- Tecnossolo C5: considera todas as informações do cenário do Tecnossolo C3, ou seja, as ações emergenciais e medidas reparatórias da RENOVA, e ao invés de adicionar as ações do Lactec vinculadas a pastagem, adicionam-se ações recomendadas pelo Lactec vinculadas ao replantio da floresta nativa. Nesse cenário, ao invés de recuperar pastagem com outra pastagem, sugere-se por outro lado, o plantio de espécies nativas, alterando o uso do solo de pastagem para floresta.

Dentre os cenários apresentados, para a valoração serão utilizados os cenários de linha de base (C1), o cenário C3 com as ações da RENOVA (que será o cenário de recuperação natural) e o cenário C5 que inclui as ações da RENOVA e a ação de restauração florestal (que será a recuperação externa), sendo esses apresentados detalhadamente nesse estudo. Adiciona-se que o cenário C5 foi escolhido para recuperação externa devido aos altos ganhos ambientais que este proporciona ao ambiente. Ressalta-se que, para a compensação, não há cenários elaborados pelo Century. O processo para a compensação levou em conta outro raciocínio, que será detalhado no item pertinente. A Figura 17 exibe a linha do tempo construída, a fim de esclarecer as informações utilizadas para cada cenário. Por fim, a apresentação dos resultados dos demais cenários simulados (C2 e C4), que não foram utilizados para a valoração, encontra-se no Apêndice D.

O Century realiza simulações da dinâmica mensal ou anual da MOS na camada 0-20 cm, em função dos estoques de C (g m^{-2}) em diferentes compartimentos da MOS (ativo, passivo, lento e total), sendo que para o presente estudo trabalhou-se com saídas anuais.

Previamente às simulações de linha base, o modelo foi inicializado por um cenário de equilíbrio de 6.000 anos (SILVA-OLAYA et al., 2017), que busca iniciar os estoques de C do solo nos diferentes *pools*, representando os estoques originais previamente a qualquer intervenção antrópica. Importante ressaltar que os parâmetros fixos do modelo (*Fix.100*) não foram alterados.

Para o cenário de equilíbrio, ou seja, cenário anterior a 1940 quando ainda não havia pastagem na região (pois o ciclo de desmatamento mais intenso iniciou em meados da década de 40, conforme detalhamento posterior), utilizou-se o sub-modelo da floresta, em que a parametrização buscou representar as características da Mata Atlântica nativa (Floresta Estacional Semidecidual Aluvial).

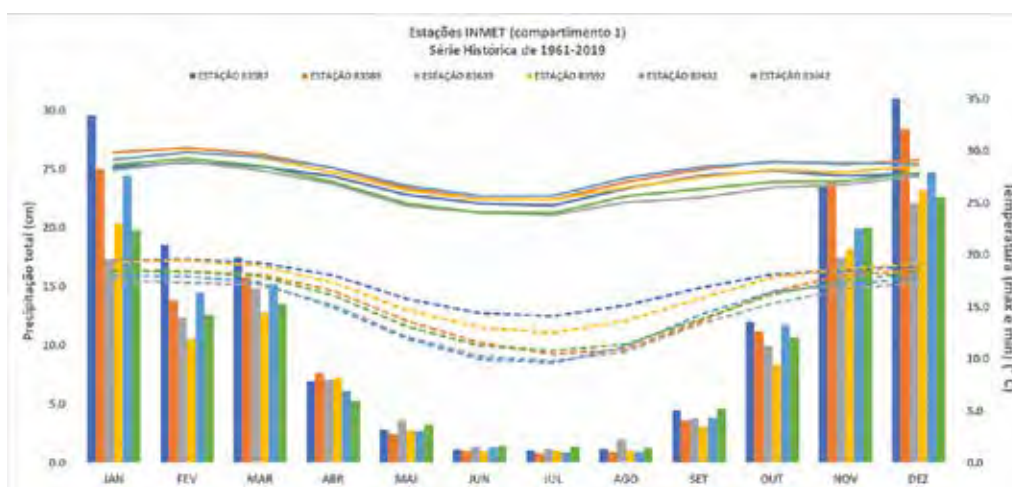
As produtividades de biomassa acima do solo ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) e C na biomassa ($\text{g C m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) foram obtidas dos trabalhos científicos na região⁸, considerando que o estoque de C na biomassa arbórea pode ser obtido multiplicando a biomassa acima do solo por 0,5 (GIRI et al., 2018).

Ainda, foi considerada uma divisão entre as frações de folhas, raízes finas, raízes grossas, galhos finos e galhos grossos, bem como os teores de nitrogênio e fósforo em cada uma dessas frações, de acordo com o trabalho de Drummond et al. (1997), que caracterizou a Mata Salão Dourado no Parque Estadual do Rio Doce (PERD). Foram utilizados os valores *default* da floresta tropical de Porto Rico (PRTP) para os demais parâmetros, a partir do arquivo *tree.100* do modelo.

Ainda para o cenário de equilíbrio, assim como para o cenário C1 (linha base), foram utilizados como *inputs* os parâmetros climáticos da região (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima), obtidos a partir de dados de uma série histórica de 30 anos de seis estações convencionais do INMET (2020) (Figura 17), após interpolação para o compartimento 1. Os valores de pH e densidade do solo, distribuição granulométrica, umidade em capacidade de campo e umidade em ponto de murcha permanente foram obtidos dos parâmetros da linha base, que representam os Neossolos Flúvicos da região (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Para os demais parâmetros do arquivo *site file* foram utilizados os valores *default* do modelo.

8 Metzker (2012), Floresta Estacional Semidecidual Submontana, em estágio de sucessão avançado, em paleocanais do rio Doce, nas proximidades da Lagoa Preta no Parque Estadual do rio Doce - PERD; Silveira et al. (2019), remanescentes florestais da bacia do rio Doce; e Souza et al. (2012), Floresta Estacional Semidecidual Submontana, em estágio de sucessão médio/avançado, às margens da lagoa Silvana – PERD.

Figura 18 – Série histórica (médias mensais entre 1961-2019) de precipitação (barras), temperatura máxima (linha contínua) e temperatura mínima (linha pontilhada) utilizadas na parametrização do modelo Century



Fonte: INMET, 2020.

A partir dos *outputs* da simulação de equilíbrio para os *pools* de carbono orgânico do solo (COS), foi criado o arquivo *site file* para o cenário de linha base (C1), utilizando-se os mesmos parâmetros climáticos e de variáveis do solo anteriormente descritos. Para o C1, considerou-se que a conversão de uso do solo (derrubada e queima da vegetação nativa, com posterior implantação de pastagens) ocorreu em 1940 (Figura 17), conforme descrito nos trabalhos de Hirsch (2003) e Lima et al. (2008)⁹.

Para o cenário C1 (linha base) a pastagem G2 do arquivo *crop.100* foi parametrizada utilizando-se como referência a produtividade média de uma pastagem de braquiária (*Brachiaria spp.*), com taxa de acúmulo diário de biomassa de 46,92 kg⁻¹ ha⁻¹ dia⁻¹ (CAVALCANTE, 2001). A simulação foi realizada para uma série de 160 anos (1940-2100) em que foram considerados como eventos a realização de adubação nitrogenada (30 kg ha⁻¹ de N) a cada cinco anos e pastoreio anuais (GVER e GM, graz.100), ocorrendo nos meses de janeiro a junho e de novembro a dezembro. Os eventos buscaram representar áreas de pastagens degradadas, conforme descrições de Lima et al. (2008, 2011) e Gabriel (2017), e mesmo por observações de campo sobre a realidade das pastagens na região do compartimento 1 (Figura 19).

⁹ HIRSCH (2003): "Particularmente, a Bacia do Rio Doce e, principalmente o "Vale do Aço" (Sub-bacia do Rio Piracicaba), vem passando por vários ciclos econômicos sucessivos desde meados do século XVIII, começando pela mineração do ouro, monocultura do café, cultivo da cana-de-açúcar, e criação de gado associada com outras atividades agropecuárias (Hirsch et al., 1996; de Paula et al., 1997). Entretanto, foi a partir da década de 1910 que teve início o primeiro estágio de desmatamento mais intenso nesta região, com a implantação da lavoura do café, preferencialmente cultivado em áreas de encosta (Machado, 1995). O segundo estágio também intenso teve início na década de 1940 quando, por um lado, a lavoura cafeeira entrou em declínio e áreas adicionais de mata nativa foram convertidas em pastagens para a criação de gado (Hirsch, 1995; Machado, 1995)";

LIMA et al. (2008): "As pastagens foram estabelecidas na década de 30, após a derrubada e queima da floresta nativa, e ficaram sob regime de pecuária extensiva até o final dos anos 60s. Nesse período, as pastagens não receberam correção e fertilização e, frequentemente, apresentavam uma pressão de pastoreio maior que a capacidade de suporte, o que levou à perda de produtividade. Atualmente, os remanescentes de pastagens encontram-se bastante degradados, com erosão laminar e solo exposto em vários pontos".

Figura 19 – Pastagens degradadas encontradas próximo ao distrito de Paracatu de Baixo, às margens do rio Gualaxo do Norte (MG): estação seca (esquerda) e chuvosa (direita)



Fotos: Lactec, 2018, 2019.

As etapas de calibração e validação são fundamentais em estudos de modelagem, pois visam estabelecer coincidências entre os dados simulados e os dados observados em campo: enquanto a calibração se refere ao ajuste dos parâmetros internos do modelo de acordo com os dados medidos, na validação as estimativas devem ser comparadas com dados observados diversos aos utilizados na sua construção e calibração (BORTOLON et al., 2012). A calibração para as simulações do presente trabalho foi realizada de maneira interativa, analisando-se os *outputs* para os estoques de C nos *pools* ativo (SOM1(C1)), lento (SOM2C), passivo (SOM3C) e total (SOMSC) em relação aos dados obtidos em campo pelo Lactec para o diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), a partir de amostras coletadas nos anos de 2018 e 2020. Nessa etapa, ainda, os *outputs* de produção de biomassa acima do solo (agacc) foram analisados e comparados com os parâmetros de alimentação do modelo. Para a validação foram utilizados os trabalhos de Guedes (2008), Lima et al. (2008, 2011) e Pacheco (2015). A acurácia das simulações, após os ajustes realizados na calibração principal em relação aos dados observados, foi testada com base no coeficiente de correlação de Pearson (r) entre dados simulados e medidos, assim como pela raiz quadrada de erro do modelo após normalização para o desvio padrão (RSR) e no *percent bias* (PBIAS) (BORTOLON et al., 2012; MORIASI et al., 2007), conforme as equações a seguir.

$$RSR: \frac{RMSE}{STDEV_{\text{observado}}} = \frac{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{observado}} - y_i^{\text{simulado}})^2}]}{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{observado}} - y_i^{\text{média}})^2}]}$$

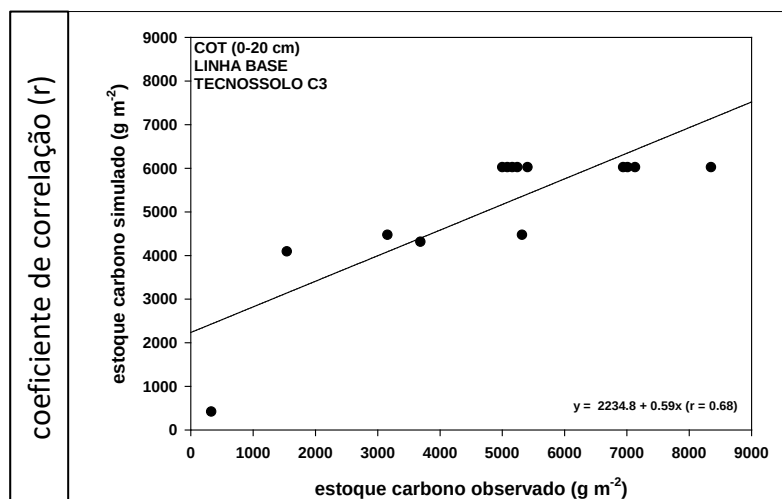
$$PBIAS: \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_1^{\text{observado}} - y^{\text{simulado}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_1^{\text{observado}})}} \right] \times 100$$

De acordo com Moriasi et al. (2007), o RSR varia de um valor ótimo partindo de zero (que indica que a variação residual é zero e, portanto, a simulação do modelo é perfeita) até valores maiores que zero. Nesse sentido, quanto menor o RSR, melhor a performance da simulação. Ainda, o PBIAS, que mede a tendência média do dado simulado ser maior ou menor do que o dado observado em variação percentual, também tem seu valor ótimo em zero, com PBIAS positivos indicando subestimativa do modelo e valores negativos indicando superestimativa da simulação. Os autores indicam as seguintes faixas de interpretação do RSR para modelos de simulações mensais: $0.00 \leq RSR \leq 0.50$ = muito bom;

$0.50 \leq RSR \leq 0.60$ = bom; $0.60 \leq RSR \leq 0.70$ = satisfatório; e $RSR > 0.70$ = insatisfatório. Para o PBIAS a interpretação varia de acordo com a especificidade do constituinte simulado. Considerando o cenário mais restritivo (ou seja, o mais conservador em termos de interpretação das taxas de variação), as seguintes faixas são citadas: $PBIAS < \pm 10$: muito bom; $\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$: bom; $\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$: satisfatório; e $PBIAS > \pm 25$: insatisfatório.

O modelo foi validado com base no coeficiente de correlação entre os valores de C total medidos e simulados ($r = 0,68$), conforme a Figura 20, assim como nos índices RSR e PBIAS, que foram calculados como sendo de 0,60 (bom) e -8,6% (muito bom), respectivamente (MORIASI et al., 2007). O valor negativo do PBIAS indica que, de forma geral, o modelo superestimou em cerca de 8,6% os estoques de C do solo.

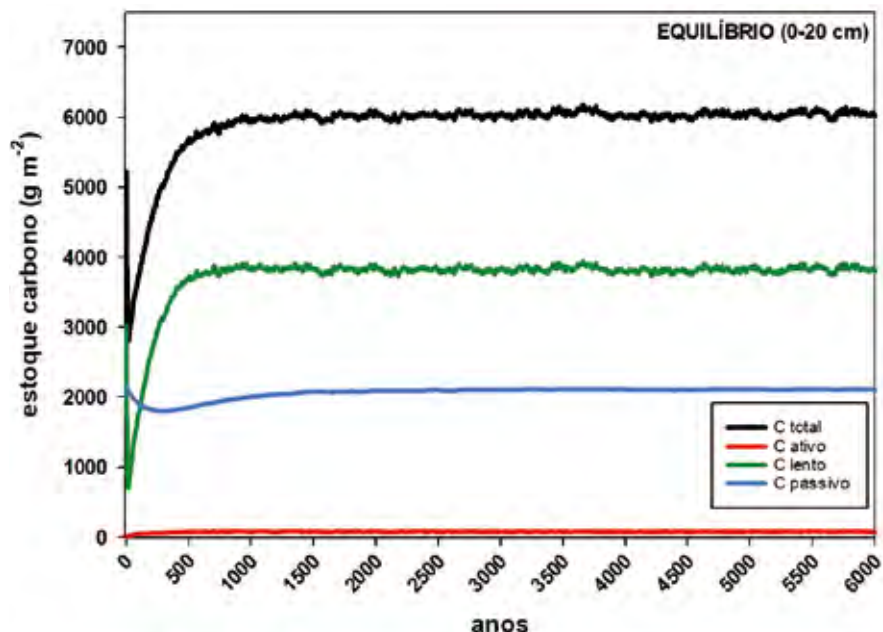
Figura 20 – Coeficiente de correlação entre os valores de estoque de carbono observados (Lactec e dados da literatura) e simulados.



Fonte: Lactec, 2021.

Após ter sido calibrado e validado, os *outputs* das simulações futuras foram analisados ao longo das cronossequências dos cenários. Na Figura 21 estão apresentados os estoques de C nas frações total, ativa, lenta e passiva para o cenário de equilíbrio. Esse cenário busca representar os estoques de C anteriores à conversão de uso do solo em 1940, ou seja, os estoques no solo sob Mata Atlântica nativa, antes de virarem pastagem. Percebe-se que, aproximadamente depois de 1.000 anos da simulação, os estoques de C se tornam estáveis e, no último ano, os valores obtidos foram: C total: 6.027 g m^{-2} ; C ativo: 79 g m^{-2} (1,3%); C lento: 3.800 g m^{-2} (63%); e C passivo: 2.109 g m^{-2} (35%). Esses estoques foram utilizados para inicializar as condições do solo de linha base.

Figura 21 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; *pools* passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário de equilíbrio.

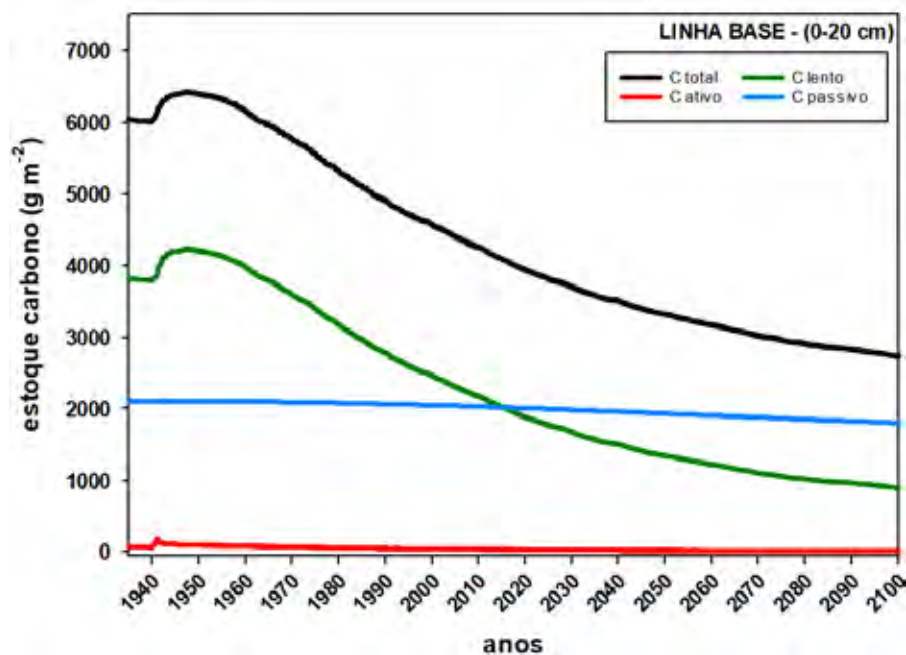


Fonte: Lactec, 2021.

Os estoques totais de C obtidos pela simulação do cenário de equilíbrio superestimaram em 15% os estoques medidos em campo em solos de áreas controle sob uso florestal coletados pelo Lactec na região do compartimento 1 (5.240 g m^{-2}) (este dado pode ser encontrado no Tomo III – Acompanhamento de Danos – Documento Suplementar “Estudo de Contaminação da Flora Nativa”). No entanto, os valores são comparáveis com a variação observada em amostras obtidas em campo por Lima et al. (2011), em oito municípios da bacia do rio Doce (Belo Oriente: 5.160 g m^{-2} ; Nova Era: 6.940 g m^{-2} ; Santa Bárbara: 5.080 g m^{-2} ; Virginópolis: 5.000 g m^{-2} ; Sabinópolis: 7.130 g m^{-2} ; Correntinho: 7.010 g m^{-2} ; Ipaba: 8.350 g m^{-2} ; e Cocais: 5.240 g m^{-2}) em condição de floresta nativa. Ainda, Wendling et al. (2014) obtiveram um estoque de C total em uma área de floresta sob Cambissolo aluvial de 6.064 g m^{-2} no município de Coronel Pacheco (MG). Segundo esses autores, solos aluvionares (como é o caso dos solos impactados pelo desastre) são mais favoráveis para obtenção de estoques mais elevados de C, uma vez que a disponibilidade de água é maior para esses ambientes.

Considerando que o desmatamento na bacia do rio Doce ocorreu no ano de 1940, o cenário C1 (Linha Base) foi construído para representar o comportamento do C no solo simulando a pastagem, no contexto de não ocorrência do desastre no ano de 2015, ou seja, a realidade do carbono no solo antes do evento. A construção desse cenário é importante pois observa-se que os estoques de C do solo apresentariam, de forma natural, uma tendência de declínio com o tempo (Figura 22), uma vez que a linha base foi construída para representar a conversão de áreas com floresta primária para áreas com pastagens degradadas, e o acúmulo de C no solo é resultado de um balanço entre entradas e saídas (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Neste caso, a taxa de decomposição é maior do que a taxa de incorporação de biomassa aérea e de raízes pelo pasto, o que causaria a diminuição do estoque de C total em 55% ao longo de 160 anos, conforme evidencia a Figura 22.

Figura 22 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário de linha base.



Fonte: Lactec, 2021.

Logo após a derrubada e queima da vegetação em 1940 (*slash and burn*), os estoques nas frações ativa, lenta e total aumentaram nos anos subsequentes. Isso ocorre devido à deposição imediata de toda a biomassa florestal sobre o solo, ou seja, a entrada de material orgânico fresco aumentou os *pools* ativo e lento, resultando no aumento do C total por consequência. A fração passiva, no entanto, não foi afetada uma vez que o período de tempo não foi suficiente para promover a estabilização da MOS recém adicionada. Os efeitos do desmatamento observados na Figura 22 foram similares aos reportados nos trabalhos de Rosendo e Rosa (2018), e Wendling et al. (2014). Assim, conclui-se afirmando que a curva de linha base do C no solo é a curva de carbono total identificada na cor preta no gráfico acima, que representa a mudança de uso do solo de floresta nativa para pastagem, situação existente na região, antes do desastre. Relembrando que o carbono total inclui as parcelas lenta, ativa e passiva, sendo o somatório das mesmas.

4.2.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO NATURAL

Após a apresentação da métrica e da construção da linha de base, será apresentado neste item a construção do comportamento do C no solo diante de um contexto de recuperação natural, ou seja, sem ação humana para acelerar o processo de incorporação do carbono ao solo. No entanto, para este habitat o cenário de recuperação natural é o cenário que contempla as ações emergenciais e medidas reparatórias da RENOVA, pois essa é a realidade da região. Logo após o desastre, esta organização, de forma emergencial, realizou semeaduras nas áreas do desastre, a fim de evitar o aumento da erosão do solo e o agravamento do assoreamento do rio Doce. Por isso, a maneira mais correta de estimar a curva de recuperação natural é considerar que houve essa intervenção que resultou em um aumento, mesmo que temporário, da incorporação do carbono ao solo nos primeiros anos após o desastre. Posto isso, o cenário de recuperação natural considerado para a valoração é o Tecnossolo C3.

Os cenários pós desastre, tanto o Tecnossolo C3, quanto o cenário Tecnossolo C5 (que será apresentado no item posterior, pois reflete a curva de recuperação externa) foram construídos a partir da parametrização do arquivo *site file* para uma série temporal de 85 anos (2015-2100), utilizando-se os valores de pH e densidade do solo, distribuição granulométrica, umidade em capacidade de campo e umidade em ponto de murcha permanente a partir da caracterização de 34 amostras do Tecnossolo previamente obtidas pelo Lactec (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Os valores iniciais de matéria orgânica (representados pelo C no solo) para esses cenários foram inicializados em zero a partir de 2015, pois considerou-se que no momento do desastre, os estoques de C da camada 0-20 cm do solo foram zerados (Figura 23). Esse evento é esperado, uma vez que a onda de lama causou a retirada da camada natural de solo na região de abrangência do estudo (Figura 16), e a consequente espessa camada de rejeito que se depositou no lugar é praticamente constituída de óxidos de ferro (goethita e hematita) e de silício (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b). Em amostras coletadas nos anos de 2016 e 2017 por Santos et al. (2019) ainda era possível verificar os baixos teores de MOS e a praticamente ausente quantificação da biomassa microbiana nesse material, corroborando os resultados simulados.

As diferenças entre os cenários C1 (linha de base), C3 e C5 basearam-se nos eventos simulados e nos diferentes *site files* (construção das características do substrato), lembrando que o C3 e C5, por representarem cenários pós desastre possuem os mesmos *site files*. A mesma pastagem de linha base (G2) foi simulada tanto no solo natural (C1) quanto no Tecnossolo (C3), buscando representar a curva de recuperação passiva do COS. Conforme mencionado anteriormente, algumas ações emergenciais e medidas reparatórias foram realizadas pela Samarco e Fundação Renova nos meses subsequentes ao desastre (IBAMA, 2020). Nesse sentido, o C3 foi considerado o real cenário de recuperação natural, uma vez que não é possível dissociar a ação da natureza para a recuperação do COS das intervenções já ocorridas. O C3, portanto, englobou as seguintes ações: preparo manual e mecânico do solo; adubação orgânica e mineral (350 kg ha⁻¹ do formulado 4-14-8; 350 kg ha⁻¹ de supersimples; e 2.000 kg ha⁻¹ de esterco curtido); semeadura e hidrossemeadura (300 kg ha⁻¹ de mix de sementes de leguminosas e gramíneas); adubação de cobertura: 200 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 45 dias após os plantios; irrigação: 5L m⁻² em todas as áreas tratadas, duas vezes por semana (FUNDAÇÃO RENOVA, 2018).

Devido à impossibilidade de representar exatamente todas as quantidades de insumos utilizadas, as seguintes parametrizações foram realizadas para o C3 (2015-2016): preparo convencional do solo (CTIL), adubações minerais de base e cobertura (PS4, MED e N4), adubação orgânica (M6.0T), plantio de gramíneas e leguminosas (EGCP e GGC1) e irrigação (A50), de acordo com os valores *default* dos arquivos cult.100, fert.100, omad.100, crop.100 e irri.100 do modelo. Em função de o desastre ter ocorrido no início do mês de novembro de 2015 (05/11/2015), considerou-se que as ações emergenciais ocorreram durante o restante do mês de novembro e nos meses subsequentes (dezembro de 2015, janeiro e fevereiro de 2016), uma vez que IBAMA (2020) afirma que:

“A Samarco contratou duas empresas para as semeaduras emergenciais. As atividades de revegetação das planícies e margens de rios e outras áreas afetadas, entre o distrito de Bento Rodrigues e o município de Santa Cruz do Escalvado, foram iniciadas em 8 de dezembro de 2015 pela empresa Agrofior Engenharia e Meio Ambiente. A segunda empresa, RG Bioengenharia, iniciou as semeaduras um pouco mais tarde, no dia 17 de fevereiro de 2016, na fazenda de Bicas e procedeu à revegetação de uma área total de 680,35 hectares (RG Bioengenharia, 2016).”

O plantio de espécies de ciclo curto e a adição de insumos (fertilizantes e compostos orgânicos) ao rejeito se mostraram necessárias para impedir (ou ao menos amenizar) a erosão das margens, carregando ainda mais partículas de rejeito para o leito do rio. No entanto, essas ações foram de caráter emergencial e, portanto, seus efeitos em longo prazo são perdidos caso o manejo das pastagens não seja constante.

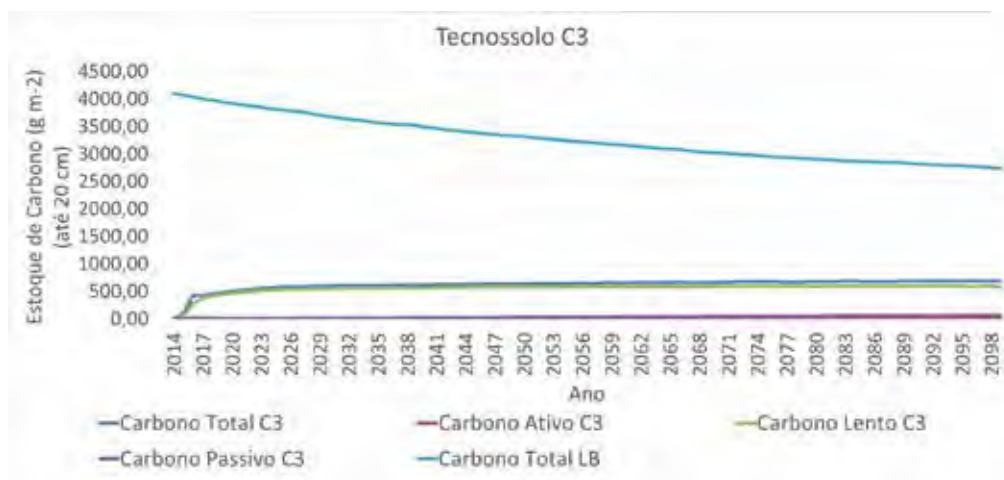
Ainda para o C3, entre os anos de 2017 e 2100 foram incluídos aos eventos, com relação ao pastoreio, o desenvolvimento anual da braquiária e a prática de adubação nitrogenada. Entre os anos de 2017 e 2020, considerou-se, adicionalmente, que uma adubação de manutenção para manter os teores de nutrientes no solo em níveis médios (MED, fert.100) previamente ao ciclo chuvoso.

É evidente que as práticas realizadas, mesmo que de forma emergencial, promovem incrementos nos compartimentos ativo e lento, que, por consequência, aumentam o estoque total (Figura 23), conforme se observa pela taxa de incremento crescente nos primeiros anos, que se estabiliza na sequência. No entanto, o *pool* passivo não é alterado, pois a teoria de acúmulo de C no solo é baseada em mecanismos de estabilização e leva em conta a interação do material orgânico com os minerais do solo e sua proteção pelo efeito de agregação, sendo que o incremento de C pela estabilização química é considerado um processo de muito longo prazo (ALVES et al., 2008). A fração passiva do C se mantém praticamente inalterada no cenário 3, pois o horizonte de tempo simulado é inferior à escala de tempo necessária para a reconstrução dessa fração (séculos a milênios) (RICE et al., 2006). Assim, mesmo considerando um período de tempo de 85 anos, a recuperação passiva não promoveria a recuperação total dos estoques de C da linha base (estoque de C total no ano de 2100 no C3: 690 g m⁻²) em função da necessidade de reconstrução das substâncias húmicas no Tecnossolo.

Vale ressaltar, no entanto, que tal medida emergencial, ou seja, o plantio realizado pela RENOVA, gerou ganhos ambientais ao habitat ao reduzir significativamente a continuidade da erosão do Tecnossolo para o rio Doce.

O gráfico da Figura 23 exibe o comportamento do estoque de carbono no solo no cenário C3 segregado por componente de carbono, e o compara com a curva do carbono total simulada para a linha base, o que possibilita visualizar o que foi explicado nos parágrafos anteriores, que as ações emergenciais entre novembro de 2015 e 2017 oportunizaram um aumento no incremento do C do solo, mas que se estabiliza nos anos seguintes devido a não continuidade dessas ações.

Figura 23 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário Tecnossolo C3, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base.



Fonte: Lactec, 2021.

Com base no comportamento do carbono total do cenário Tecnossolo C3 foi calculada a perda de carbono no solo para a sociedade, neste contexto de recuperação natural que considera as ações emergenciais e medidas reparatórias da RENOVA. A Tabela 14 traz os números utilizados para o cálculo da perda descontada, sendo que a coluna identificada como *Tecnossolo - C3 g/m²* traz o comportamento do carbono total (CT) em g/m² de solo entre 2015 – 2100. Com o intuito de obter o quantitativo total de carbono perdido no solo em toda a área afetada (687 ha), multiplicou-se a quantidade em g/m² pelos 6.870.000 m². Após esse cálculo fez-se a conversão de gramas no m² total para toneladas, e desta forma, a curva de recuperação natural do CT é a coluna *Tecnossolo - C3 estoque total de CT (em toneladas)*, que mostra a evolução do retorno do CT ao longo do tempo no solo após o desastre, conforme mostrado na Figura 24 que compara essa evolução com a linha de base. Na sequência, é calculada a perda de C do solo a cada ano, por meio da diferença entre o estoque de carbono existente no cenário C3 e o estoque de carbono que deveria existir, estimado no cenário de linha base, exposto na Figura 25. Essa diferença é a perda de carbono promovida pelo desastre, que está apresentada também, na coluna *Perda de Carbono do Cenário C3 (em toneladas)*. Por fim, o valor da perda de carbono de cada ano é trazido a valor presente (valores de 2015) por meio da aplicação do desconto anual de 8% a.a. gerando assim os resultados apresentados na coluna *Perda Descontada de Carbono do Cenário C3 (em toneladas)*.

Tabela 14 – Tabela de valores considerados para o cálculo da perda descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos

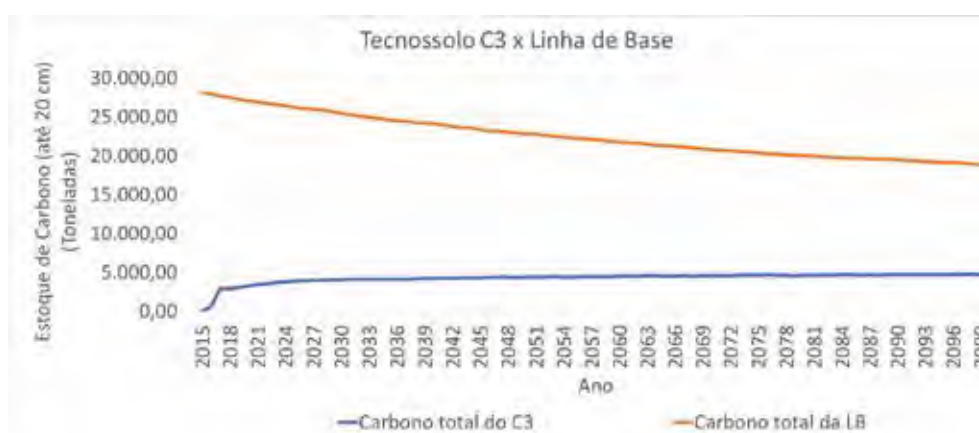
Ano	Tecnossolo - C3 g/m ²	Tecnossolo - C3 estoque de carbono total na área (gramas no m ² total)	Tecnossolo - C3 estoque de carbono total em tonelada	Perda de Carbono do Cenário C3 em toneladas	Perda Descontada de Carbono do Cenário C3 em toneladas
2015	0,00	0,00	0,00	28.127,70	28.127,70
2016	87,48	600.960.120,00	600,96	27.381,79	25.353,51
2017	425,56	2.923.583.460,00	2.923,58	24.804,43	21.265,80
2018	421,39	2.894.969.910,00	2.894,97	24.588,00	19.518,75
2019	447,47	3.074.118.900,00	3.074,12	24.208,66	17.794,09
2020	473,07	3.249.970.290,00	3.249,97	23.825,02	16.214,91
2021	497,66	3.418.951.680,00	3.418,95	23.508,90	14.814,59
2022	519,34	3.567.893.280,00	3.567,89	23.161,94	13.514,77
2023	538,67	3.700.690.380,00	3.700,69	22.900,37	12.372,36
2024	551,12	3.786.173.790,00	3.786,17	22.676,64	11.343,97
2025	563,36	3.870.276.330,00	3.870,28	22.365,28	10.359,45
2026	576,13	3.958.033.710,00	3.958,03	22.147,39	9.498,64
2027	582,43	4.001.294.100,00	4.001,29	21.983,70	8.730,03
2028	583,30	4.007.243.520,00	4.007,24	21.915,27	8.058,20
2029	591,87	4.066.133.160,00	4.066,13	21.622,52	7.361,63
2030	592,57	4.070.921.550,00	4.070,92	21.393,63	6.744,16
2031	597,42	4.104.302.880,00	4.104,30	21.189,73	6.185,08
2032	601,26	4.130.656.200,00	4.130,66	20.972,13	5.668,12
2033	601,40	4.131.624.870,00	4.131,62	20.792,12	5.203,21
2034	603,28	4.144.506.120,00	4.144,51	20.699,76	4.796,38
2035	601,15	4.129.886.760,00	4.129,89	20.532,56	4.405,22
2036	603,69	4.147.322.820,00	4.147,32	20.349,98	4.042,64
2037	601,89	4.134.949.950,00	4.134,95	20.299,72	3.733,94
2038	611,64	4.201.932.450,00	4.201,93	20.076,79	3.419,38
2039	614,29	4.220.192.910,00	4.220,19	20.031,19	3.158,91
2040	617,71	4.243.688.310,00	4.243,69	19.900,69	2.905,86
2041	617,58	4.242.788.340,00	4.242,79	19.710,24	2.664,86
2042	620,16	4.260.471.720,00	4.260,47	19.530,99	2.445,02
2043	624,67	4.291.510.380,00	4.291,51	19.327,05	2.240,27
2044	625,28	4.295.639.250,00	4.295,64	19.257,74	2.066,89
2045	626,61	4.304.810.700,00	4.304,81	19.061,29	1.894,26
2046	633,38	4.351.286.250,00	4.351,29	18.876,12	1.736,91
2047	638,23	4.384.605.750,00	4.384,61	18.759,79	1.598,34
2048	638,31	4.385.175.960,00	4.385,18	18.630,68	1.469,75
2049	636,52	4.372.885.530,00	4.372,89	18.536,68	1.354,02
2050	638,08	4.383.575.250,00	4.383,58	18.449,76	1.247,84
2051	639,32	4.392.135.270,00	4.392,14	18.393,15	1.151,86
2052	641,72	4.408.643.880,00	4.408,64	18.217,25	1.056,34

Ano	Tecnossolo - C3 g/m ²	Tecnossolo - C3 estoque de carbono total na área (gramas no m ² total)	Tecnossolo - C3 estoque de carbono total em tonelada	Perda de Carbono do Cenário C3 em toneladas	Perda Descontada de Carbono do Cenário C3 em toneladas
2053	646,17	4.439.153.550,00	4.439,15	18.084,78	970,98
2054	642,63	4.414.847.490,00	4.414,85	18.014,58	895,57
2055	642,80	4.416.001.650,00	4.416,00	17.893,73	823,66
2056	646,82	4.443.667.140,00	4.443,67	17.746,34	756,37
2057	650,33	4.467.753.360,00	4.467,75	17.658,04	696,86
2058	648,97	4.458.389.550,00	4.458,39	17.573,58	642,15
2059	652,97	4.485.910.770,00	4.485,91	17.392,13	588,45
2060	659,16	4.528.401.720,00	4.528,40	17.264,72	540,87
2061	656,28	4.508.616.120,00	4.508,62	17.220,42	499,52
2062	658,04	4.520.741.670,00	4.520,74	17.119,64	459,81
2063	664,46	4.564.840.200,00	4.564,84	16.938,84	421,25
2064	664,96	4.568.295.810,00	4.568,30	16.818,65	387,28
2065	657,93	4.519.972.230,00	4.519,97	16.771,96	357,60
2066	660,66	4.538.741.070,00	4.538,74	16.682,06	329,34
2067	665,75	4.573.729.980,00	4.573,73	16.577,02	303,02
2068	660,41	4.536.989.220,00	4.536,99	16.471,20	278,78
2069	664,32	4.563.871.530,00	4.563,87	16.313,36	255,66
2070	663,94	4.561.240.320,00	4.561,24	16.245,97	235,74
2071	665,57	4.572.465.900,00	4.572,47	16.134,38	216,78
2072	669,43	4.598.997.840,00	4.599,00	16.062,18	199,83
2073	679,24	4.666.385.670,00	4.666,39	15.910,31	183,27
2074	676,29	4.646.084.820,00	4.646,08	15.837,31	168,92
2075	676,69	4.648.874.040,00	4.648,87	15.746,75	155,51
2076	680,77	4.676.917.380,00	4.676,92	15.591,45	142,57
2077	675,93	4.643.645.970,00	4.643,65	15.557,38	131,72
2078	673,56	4.627.384.680,00	4.627,38	15.538,64	121,82
2079	670,79	4.608.299.820,00	4.608,30	15.483,75	112,40
2080	675,14	4.638.198.060,00	4.638,20	15.388,28	103,43
2081	674,70	4.635.216.480,00	4.635,22	15.309,31	95,28
2082	677,47	4.654.232.640,00	4.654,23	15.229,02	87,76
2083	678,01	4.657.921.830,00	4.657,92	15.150,34	80,84
2084	686,01	4.712.909.310,00	4.712,91	15.023,41	74,22
2085	683,22	4.693.742.010,00	4.693,74	14.993,82	68,59
2086	678,16	4.658.938.590,00	4.658,94	14.997,13	63,52
2087	680,51	4.675.096.830,00	4.675,10	14.941,01	58,60
2088	679,33	4.666.969.620,00	4.666,97	14.882,30	54,04
2089	681,18	4.679.685.990,00	4.679,69	14.879,60	50,03
2090	685,85	4.711.810.110,00	4.711,81	14.773,87	46,00
2091	684,67	4.703.710.380,00	4.703,71	14.695,81	42,36
2092	683,32	4.694.387.790,00	4.694,39	14.642,95	39,08

Ano	Tecnossolo - C3 g/m ²	Tecnossolo - C3 estoque de carbono total na área (gramas no m ² total)	Tecnossolo - C3 estoque de carbono total em tonelada	Perda de Carbono do Cenário C3 em toneladas	Perda Descontada de Carbono do Cenário C3 em toneladas
2093	682,64	4.689.716.190,00	4.689,72	14.589,44	36,06
2094	682,93	4.691.701.620,00	4.691,70	14.519,88	33,23
2095	685,54	4.709.666.670,00	4.709,67	14.433,41	30,58
2096	685,16	4.707.028.590,00	4.707,03	14.434,89	28,32
2097	688,26	4.728.318.720,00	4.728,32	14.309,05	25,99
2098	688,48	4.729.830.120,00	4.729,83	14.227,18	23,93
2099	685,31	4.708.093.440,00	4.708,09	14.155,15	22,05
2100	689,83	4.739.152.710,00	4.739,15	14.069,20	253,61

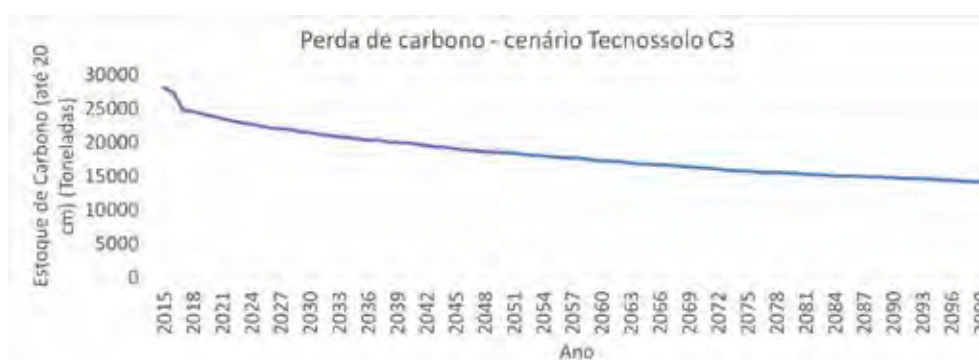
Fonte: Lactec, 2021.

Figura 24 – Comportamento do estoque de carbono total do solo (0-20 cm), para toda a área afetada, simulado para o cenário Tecnossolo C3, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base.



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 25 – Perda do estoque de carbono total do solo em toda área afetada (cenário Tecnossolo C3).



Fonte: Lactec, 2021.

Após os cálculos apresentados na Tabela 14, calculou-se a perda de carbono total do solo descontada no tempo. No entanto, antes de detalhar tais resultados, cabe mencionar que devido ao extenso tempo que o carbono leva para retornar aos níveis da linha base, este dano foi considerado perpétuo, pois para fins de desconto dos valores no tempo, quanto mais distante um valor é trazido

ao valor presente, maior é o desconto, logo sua contribuição ao acréscimo da perda descontada é ínfimo. Além disso, por ser um dano cuja recuperação ocorre no longo prazo (mais 85 anos), para algumas das futuras gerações de fato o dano permanecerá, o que reforça a premissa assumida sobre a perpetuidade.

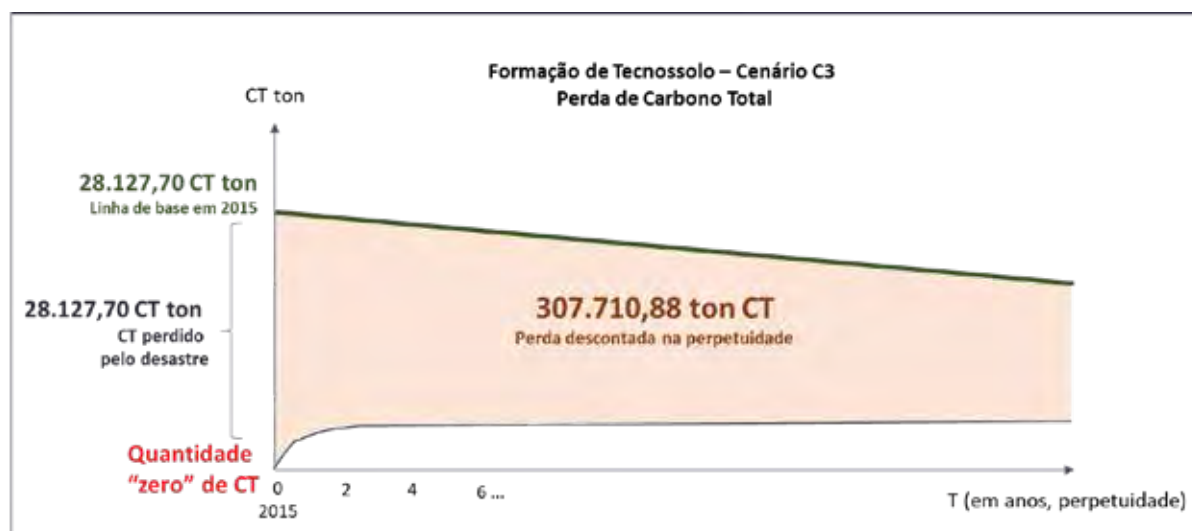
Assim, os valores da coluna *Perda de Carbono do Cenário C3 (em toneladas)* foram trazidos a valor presente (ano do desastre, 2015) por meio da taxa de desconto social de 8% ao ano e no último valor (no ano 2100) foi aplicada a fórmula da perpetuidade, calculando para o valor presente os demais valores após esse período considerado. O resultado do cálculo de perda descontada está exposto na Tabela 15, na qual se verifica que, no tempo perpétuo, a quantidade de carbono total perdida no solo a valor presente (2015) representa 307.710 toneladas. O gráfico da Figura 26 exibe o resultado de maneira visual.

Tabela 15 – Resultado do cálculo da perda descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua no tempo

Total de perdas descontadas de carbono do solo cenário Tecnossolo C3	Valor em toneladas
<i>Perda de carbono no solo descontada (em toneladas)</i>	307.710,88
Quantidade de carbono em tonelada perdido inicialmente em 2015	28.127,70

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 26 – Gráfico da perda descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua no tempo.



Fonte: Lactec, 2021.

4.2.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO EXTERNA E CÁLCULO DA PERDA INTERINA

Após o detalhamento do cenário da recuperação natural, este tópico detalha o cenário de recuperação externa e cálculo da perda interina, cujo contexto é a implantação de ações humanas que busquem acelerar/aumentar a incorporação de carbono no solo. Considera-se também que essas

ações não geram efeitos adversos ao meio ambiente, ou seja, não resultam em outros danos, mas geram apenas benefícios. A ação com melhor desempenho identificada para este fim, foi a restauração da vegetação nativa sobre os 687 hectares de pastagens soterrados pelo Tecnossolo, pois, no geral, a floresta possui capacidade de maior incorporação de carbono ao solo pela quantidade elevada de matéria orgânica gerada, quando comparada a pastos degradados.

Nesse sentido, expõe-se que a MOS pode ser considerada um atributo chave na recuperação do Tecnossolo, pois o reestabelecimento de, no mínimo, os teores de COS da linha base, facilitará os processos biogeoquímicos e promoverá o condicionamento das características químicas, físicas e biológicas nesse novo ambiente edáfico. Como exemplo, em se promovendo a recuperação dos níveis de C do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC) irá aumentar e, com isso, a fertilidade desse material (que é baixa); o incremento de C promoverá agregação das partículas, resultando na formação de estruturas que, por consequência, resultarão na diminuição da densidade (que é elevada) e no aumento de porosidade (que é baixa), favorecendo o ambiente de crescimento para raízes, trocas gasosas e dinâmica da água (diminuição do escoamento superficial e da erosão, e aumento da infiltração); o aumento da MOS estimulará o reestabelecimento da micro, meso e macrofauna edáfica, que são responsáveis em grande parte pela ciclagem de nutrientes e pelos processos ecológicos no solo.

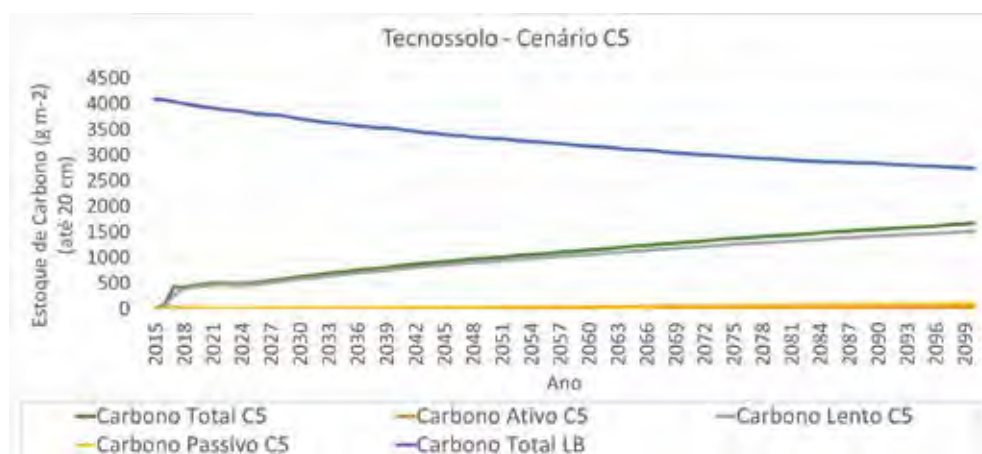
Por isso, Bhattacharya et al. (2016) e Teixeira et al. (2020) ressaltam a importância da restauração florestal para a recuperação do *pool* de C nos ecossistemas terrestres. Nesse sentido, o cenário C5 foi criado para simular a recuperação da vegetação nativa a partir do ano de 2022, considerando o mesmo período de tempo das demais simulações (2015-2100). É importante ressaltar que foi utilizado o mesmo sub-modelo de floresta do cenário de equilíbrio (PRTP *tree.100*), ou seja, a partir do primeiro ano de restauração florestal, foi considerada a presença de uma floresta já em estágio avançado de sucessão (adulta), o que denota um cenário otimista. A consideração do estabelecimento de uma floresta já adulta no primeiro ano de plantio foi adotada devido a limitações do modelo. Dessa forma, optou-se por considerar que o plantio florestal realizado atinge a idade adulta logo no primeiro ano, sendo uma premissa conservadora.

O cenário 5 mostrou ser o mais promissor em promover a recuperação do estoque de C total no Tecnossolo (recuperação de 61% em 85 anos) (Figura 27). Para este cenário, que considera a restauração florestal como alternativa de recuperação dos solos afetados, os estoques de C do solo nas frações ativa e lenta atingiriam a linha base após 48 e 52 anos do desastre, respectivamente, ou seja, ao segregar o carbono, verifica-se que a fração ativa do C5 atinge a fração ativa da linha base e a fração lenta do C5 atinge a fração lenta da linha base (Figura 28). A fração ativa da MOS, embora presente em menor proporção devido à sua maior labilidade (ROSENDO; ROSA, 2018), é a engrenagem responsável por alimentar as funções bioquímicas do solo e, com isso, é fundamental para a ciclagem de nutrientes (e da própria MOS) e pela regulação da disponibilidade e fluxo de elementos no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006. SANDERMAN; AMUNDSON, 2014).

No entanto, na fração passiva, a recomposição dos estoques no compartimento são insuficientes para promover a recuperação total do C no horizonte de tempo considerado para a simulação de eventos, da mesma maneira que o ocorrido no cenário 3. A diferença entre o cenário de linha base e o C5, contudo, é bem menos significativa (2.738 e 1.669 g m⁻², respectivamente) em comparação à diferença entre a linha base e o C3, além de se manter em uma taxa crescente superior aos demais cenários em que a recuperação se daria com intervenções na pastagem. Levando em consideração que a formação do Tecnossolo se deu em áreas que originalmente são protegidas por lei (áreas de preservação permanente – APPs) de acordo com o Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), o cenário C5 se mostra, portanto, o mais relevante em todos os aspectos, para a recomposição dos serviços ecossistêmicos perdidos e para a atenuação dos danos ao solo ocorridos em função do desastre.

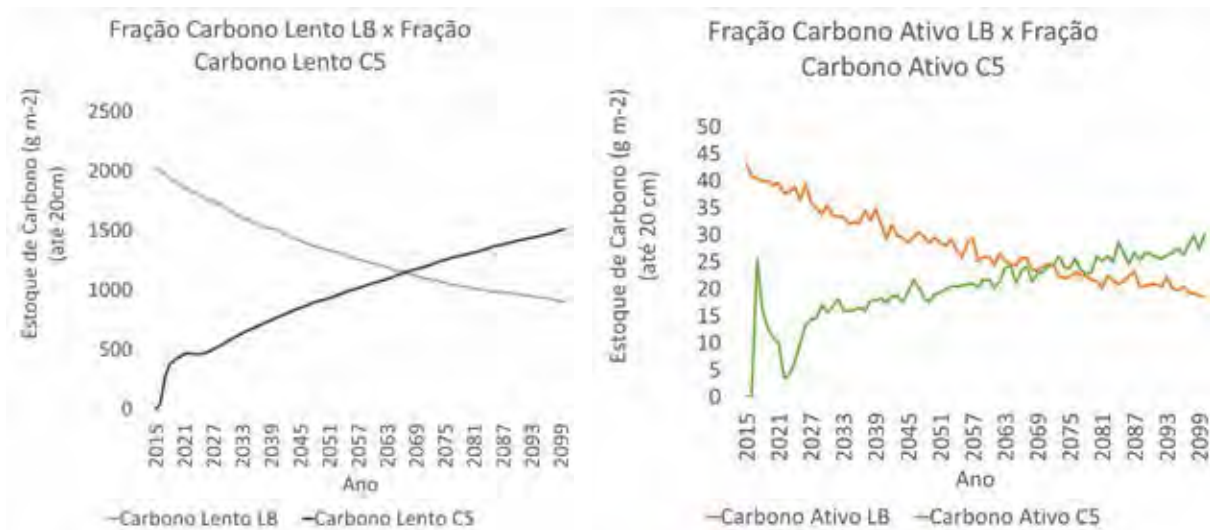
Além do incremento de carbono, a restauração florestal também se expressa como uma mudança de uso do solo que gera benefícios adicionais à sociedade, quando comparado com a pastagem. Dessa forma, ao realizar uma recuperação externa como essa, os ganhos qualitativos vão além do incremento de carbono ao solo. Para capturar esses benefícios, foi definida uma taxa de equivalência de 1,6. O detalhamento para a construção desta taxa está exposto no item 4.2.6 adiante. A taxa de 1,6 significa que para cada serviço ecossistêmico que a pastagem fornece, a floresta fornece 60% a mais de serviços ecossistêmicos, ou seja, a floresta traz benefícios que valem qualitativamente 60% a mais do que os benefícios trazidos pela pastagem. Posto isto, o valor de 1,6 entra no cálculo multiplicando anualmente a quantidade de carbono incorporada ao solo após o início da restauração florestal, se tornando um peso matemático que eleva o valor do carbono incorporado, representado assim os benefícios adicionais obtidos. A Tabela 16 mostra a adição desse valor.

Figura 27 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para o cenário Tecnossolo C5, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 28 – Estoques de C do solo (camada 0-20 cm; *pools* lento e ativo) simulados para as frações lenta e ativa da linha base e do cenário Tecnossolo C5



Fonte: Lactec, 2021.

Com base no comportamento do carbono total do cenário Tecnossolo C5 foi calculada a perda interina de C do solo para a sociedade, no contexto de recuperação externa que considera as ações de restauração florestal. Relembrando que o termo perda interina é utilizado apenas quando se refere a perda total no tempo comparada a outras opções de recuperação. Isto significa que, quando a sociedade sofre uma perda ambiental, se nada for feito (recuperação natural) o tempo de espera e perda é um determinado valor. Mas se a parte responsável realizar ações que acelerem o processo de recuperação, então o tempo de espera e consequentemente a perda são menores. Ao comparar a perda no contexto natural com a perda no contexto de ação externa, verifica-se que o menor tempo possível de espera e perda, é aquela diante do cenário de recuperação externa, sendo essa chamada de perda interina, pois é, a perda que a parte responsável não consegue evitar que a sociedade sofra. A perda interina é, portanto, a dívida a ser cobrada da parte responsável. Há também casos, nos quais a perda é irreversível, pois não há como prover ações de recuperação que acelerem ou reduzam o tempo de espera. Nesse contexto a perda também é chamada de perda interina, pois é inevitável e independe dos esforços realizados.

A Tabela 16 traz os números utilizados para o cálculo da perda interina no cenário 5, incluindo o fator de equivalência a partir do ano 2022, ano em que se inicia a restauração florestal. A coluna identificada como *Tecnossolo - C5 g/m²* traz o comportamento do carbono total (CT) em g/m² de solo entre 2015 – 2100 no cenário com a restauração florestal. Importante destacar que o cenário C5 incorpora o cenário C3, ou seja, considerando que a restauração florestal é realizada apenas a partir de 2022, nos anos anteriores (2015 – 2021) o comportamento do carbono total reflete as ações do cenário C3, e é após 2022 que os efeitos da restauração florestal interferem no comportamento do carbono e inicia-se o cenário C5.

O mesmo processo de cálculo apresentado no cenário C3 é trazido aqui. Com o intuito de obter o quantitativo total de carbono no solo em toda a área afetada (687 ha), multiplicou-se o estoque em g/m² pelos 6.870.000 m². Após esse cálculo fez-se a conversão de gramas no m² total para toneladas. Desta forma a curva de recuperação externa do CT é a coluna *Tecnossolo – C5 estoque total de CT (em*

tonelada), que mostra a evolução do retorno do CT ao solo após o desastre, com restauração florestal. Na sequência, é inserido o fator de equivalência de 1,6 multiplicando os valores anuais de estoque de CT em toneladas por esse fator, a partir de 2022, gerando assim a coluna: *Tecnossolo - C5 estoque de carbono total (em toneladas) com equivalência de 1,6 a partir de 2022*. O próximo passo foi calcular a perda de C do solo a cada ano, por meio da diferença entre o estoque de carbono total considerando a equivalência, estimado para o cenário C5, e o estoque de carbono que deveria existir, estimado no cenário de linha base, exposto na Figura 30. Essa diferença é a perda de carbono promovida pelo desastre, considerando restauração florestal e equivalência, e apresentada na coluna *Perda Cenário C5 (em toneladas) com equivalência*.

Tabela 16 – Tabela de valores considerados para o cálculo da perda interina descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos

Ano	Tecnossolo C5 g/m ²	Tecnossolo - C5 estoque de carbono na área (gramas no m ² total)	Tecnossolo - C5 estoque de carbono total em tonelada	Tecnossolo - C5 estoque de carbono total em toneladas com equivalência de 1,6 a partir de 2021	Perda Cenário C5 em toneladas com equivalência	Perda Descontada de Carbono do Cenário C5 em toneladas
2015	0,00	0,00	0,00	0,00	28.127,70	28.127,70
2016	87,48	600.960.120,00	600,96	600,96	27.381,79	25.353,51
2017	425,56	2.923.583.460,00	2.923,58	2.923,58	24.804,43	21.265,80
2018	421,39	2.894.969.910,00	2.894,97	2.894,97	24.588,00	19.518,75
2019	447,47	3.074.118.900,00	3.074,12	3.074,12	24.208,66	17.794,09
2020	473,07	3.249.970.290,00	3.249,97	3.249,97	23.825,02	16.214,91
2021	497,66	3.418.951.680,00	3.418,95	3.418,95	23.508,90	14.814,59
2022	494,66	3.398.321.070,00	3.398,32	3.398,32	23.331,52	13.613,72
2023	489,67	3.364.046.640,00	3.364,05	5.382,47	21.218,58	11.463,74
2024	489,55	3.363.194.760,00	3.363,19	5.381,11	21.081,70	10.546,10
2025	501,88	3.447.908.730,00	3.447,91	5.516,65	20.718,90	9.596,86
2026	520,56	3.576.260.940,00	3.576,26	5.722,02	20.383,41	8.742,09
2027	546,10	3.751.727.610,00	3.751,73	6.002,76	19.982,23	7.935,22
2028	570,13	3.916.765.620,00	3.916,77	6.266,82	19.655,68	7.227,35
2029	593,79	4.079.344.170,00	4.079,34	6.526,95	19.161,70	6.523,81
2030	619,83	4.258.225.230,00	4.258,23	6.813,16	18.651,39	5.879,70
2031	642,44	4.413.583.410,00	4.413,58	7.061,73	18.232,30	5.321,83
2032	665,24	4.570.178.190,00	4.570,18	7.312,29	17.790,50	4.808,22
2033	687,94	4.726.175.280,00	4.726,18	7.561,88	17.361,87	4.344,79
2034	708,86	4.869.833.850,00	4.869,83	7.791,73	17.052,53	3.951,28
2035	726,00	4.987.585.650,00	4.987,59	7.980,14	16.682,31	3.579,16
2036	747,41	5.134.679.220,00	5.134,68	8.215,49	16.281,82	3.234,48
2037	764,80	5.254.176.000,00	5.254,18	8.406,68	16.027,99	2.948,20
2038	786,51	5.403.330.570,00	5.403,33	8.645,33	15.633,40	2.662,61
2039	806,70	5.542.029.000,00	5.542,03	8.867,25	15.384,14	2.426,07
2040	827,31	5.683.640.310,00	5.683,64	9.093,82	15.050,55	2.197,65
2041	846,39	5.814.671.820,00	5.814,67	9.303,47	14.649,56	1.980,65

Ano	Tecnossolo C5 g/m ²	Tecnossolo - C5 estoque de carbono na área (gramas no m ² total)	Tecnossolo - C5 estoque de carbono total em tonelada	Tecnossolo - C5 estoque de carbono total em toneladas com equivalência de 1,6 a partir de 2021	Perda Cenário C5 em toneladas com equivalência	Perda Descontada de Carbono do Cenário C5 em toneladas
2042	863,40	5.931.544.260,00	5.931,54	9.490,47	14.300,99	1.790,30
2043	883,34	6.068.532.060,00	6.068,53	9.709,65	13.908,91	1.612,23
2044	901,57	6.193.751.550,00	6.193,75	9.910,00	13.643,38	1.464,31
2045	918,33	6.308.892.750,00	6.308,89	10.094,23	13.271,87	1.318,92
2046	935,65	6.427.942.980,00	6.427,94	10.284,71	12.942,69	1.190,94
2047	954,74	6.559.077.540,00	6.559,08	10.494,52	12.649,87	1.077,77
2048	968,94	6.656.617.800,00	6.656,62	10.650,59	12.365,27	975,48
2049	979,85	6.731.576.370,00	6.731,58	10.770,52	12.139,05	886,70
2050	991,49	6.811.522.560,00	6.811,52	10.898,44	11.934,90	807,21
2051	1.007,75	6.923.228.760,00	6.923,23	11.077,17	11.708,12	733,22
2052	1.022,91	7.027.384.830,00	7.027,38	11.243,82	11.382,08	660,00
2053	1.042,24	7.160.216.280,00	7.160,22	11.456,35	11.067,59	594,22
2054	1.056,52	7.258.292.400,00	7.258,29	11.613,27	10.816,16	537,71
2055	1.071,07	7.358.244.030,00	7.358,24	11.773,19	10.536,54	485,01
2056	1.087,60	7.471.777.650,00	7.471,78	11.954,84	10.235,17	436,24
2057	1.102,31	7.572.869.700,00	7.572,87	12.116,59	10.009,21	395,00
2058	1.115,86	7.665.985.680,00	7.665,99	12.265,58	9.766,40	356,87
2059	1.132,41	7.779.649.830,00	7.779,65	12.447,44	9.430,60	319,08
2060	1.146,96	7.879.628.940,00	7.879,63	12.607,41	9.185,72	287,77
2061	1.158,32	7.957.685.880,00	7.957,69	12.732,30	8.996,74	260,97
2062	1.170,96	8.044.474.590,00	8.044,47	12.871,16	8.769,22	235,53
2063	1.187,21	8.156.146.440,00	8.156,15	13.049,83	8.453,84	210,24
2064	1.205,23	8.279.936.970,00	8.279,94	13.247,90	8.139,05	187,42
2065	1.221,08	8.388.785.250,00	8.388,79	13.422,06	7.869,87	167,80
2066	1.235,38	8.487.067.470,00	8.487,07	13.579,31	7.641,50	150,86
2067	1.253,38	8.610.686.250,00	8.610,69	13.777,10	7.373,65	134,79
2068	1.265,47	8.693.792.640,00	8.693,79	13.910,07	7.098,12	120,14
2069	1.279,05	8.787.059.760,00	8.787,06	14.059,30	6.817,94	106,85
2070	1.292,67	8.880.622.290,00	8.880,62	14.209,00	6.598,21	95,75
2071	1.306,62	8.976.479.400,00	8.976,48	14.362,37	6.344,48	85,24
2072	1.321,38	9.077.887.470,00	9.077,89	14.524,62	6.136,56	76,34
2073	1.339,79	9.204.384.780,00	9.204,38	14.727,02	5.849,68	67,38
2074	1.356,54	9.319.409.190,00	9.319,41	14.911,05	5.572,34	59,43
2075	1.368,70	9.402.989.610,00	9.402,99	15.044,78	5.350,85	52,84
2076	1.382,84	9.500.131.410,00	9.500,13	15.200,21	5.068,16	46,34
2077	1.395,01	9.583.718.700,00	9.583,72	15.333,95	4.867,07	41,21
2078	1.405,10	9.653.009.520,00	9.653,01	15.444,82	4.721,21	37,01
2079	1.414,51	9.717.669.960,00	9.717,67	15.548,27	4.543,78	32,98
2080	1.427,95	9.810.023.370,00	9.810,02	15.696,04	4.330,44	29,11

Ano	Tecnossolo C5 g/m ²	Tecnossolo - C5 estoque de carbono na área (gramas no m ² total)	Tecnossolo - C5 estoque de carbono total em tonelada	Tecnossolo - C5 estoque de carbono total em toneladas com equivalência de 1,6 a partir de 2021	Perda Cenário C5 em toneladas com equivalência	Perda Descontada de Carbono do Cenário C5 em toneladas
2081	1.439,22	9.887.455.140,00	9.887,46	15.819,93	4.124,60	25,67
2082	1.451,31	9.970.472.220,00	9.970,47	15.952,76	3.930,49	22,65
2083	1.464,40	10.060.441.740,00	10.060,44	16.096,71	3.711,55	19,80
2084	1.479,87	10.166.706.900,00	10.166,71	16.266,73	3.469,58	17,14
2085	1.496,52	10.281.099.270,00	10.281,10	16.449,76	3.237,81	14,81
2086	1.507,37	10.355.645.640,00	10.355,65	16.569,03	3.087,04	13,08
2087	1.516,96	10.421.528.940,00	10.421,53	16.674,45	2.941,66	11,54
2088	1.527,76	10.495.711.200,00	10.495,71	16.793,14	2.756,13	10,01
2089	1.539,11	10.573.713.180,00	10.573,71	16.917,94	2.641,34	8,88
2090	1.552,08	10.662.803.340,00	10.662,80	17.060,49	2.425,20	7,55
2091	1.561,25	10.725.766.890,00	10.725,77	17.161,23	2.238,29	6,45
2092	1.571,07	10.793.230.290,00	10.793,23	17.269,17	2.068,17	5,52
2093	1.580,33	10.856.873.970,00	10.856,87	17.371,00	1.908,16	4,72
2094	1.591,61	10.934.374.440,00	10.934,37	17.495,00	1.716,58	3,93
2095	1.603,76	11.017.831.200,00	11.017,83	17.628,53	1.514,55	3,21
2096	1.614,69	11.092.920.300,00	11.092,92	17.748,67	1.393,24	2,73
2097	1.626,50	11.174.027.520,00	11.174,03	17.878,44	1.158,92	2,11
2098	1.642,88	11.286.558.120,00	11.286,56	18.058,49	898,52	1,51
2099	1.656,89	11.382.841.170,00	11.382,84	18.212,55	650,70	1,01
2100	1.668,65	11.463.639.240,00	11.463,64	18.341,82	466,53	8,41

Fonte: Lactec, 2021.

Observa-se que o fator de equivalência aumentou, apenas matematicamente, a quantidade de carbono total incorporado ao solo aproximando-o após 85 anos da linha base. Mesmo com esse alcance, por representar um período de longo prazo, quase um século, mantém-se a premissa de que o dano é perpétuo.

Figura 29 – Comportamento do estoque de carbono total do solo simulados para o cenário Tecnossolo C5 em toda a área afetada e incluindo o fator de equivalência, em comparação com o carbono total simulado para a linha de base.



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 30 – Perda do estoque de carbono total do solo, cenário Tecnossolo C5, incluindo o fator de equivalência.



Fonte: Lactec, 2021.

Da mesma forma como foi feito na recuperação natural, para a recuperação externa, após os cálculos apresentados na Tabela 16, calculou-se a perda de carbono total do solo descontada no tempo, considerando a equivalência.

Assim, os valores da coluna *Perda Cenário C5 (em toneladas) com equivalência* foram trazidos a valor presente (ano do desastre, 2015) por meio da taxa de desconto social de 8% ao ano e no último valor (no ano 2100) foi aplicada a fórmula da perpetuidade, calculando para o valor presente os demais valores após esse período considerado.

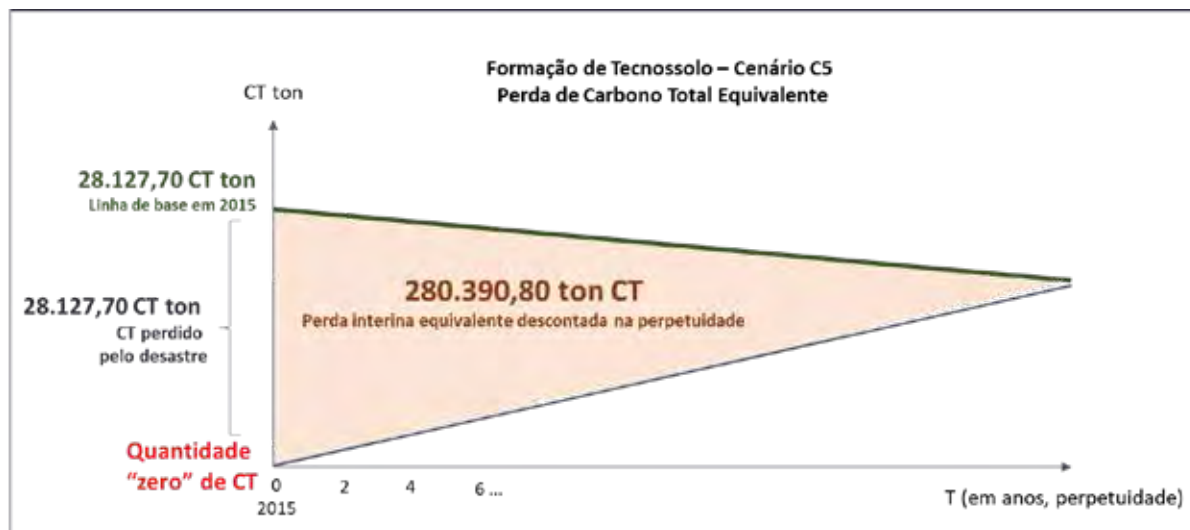
O resultado está exposto na Tabela 17, na qual se verifica que, no tempo perpétuo, a quantidade de carbono total perdido no solo a valor presente (2015) representa 280.390,80 toneladas, conforme gráfico da Figura 31 que exibe o resultado de maneira visual. Sendo este o valor da perda interina final devido à sociedade em decorrência dos danos ao solo causados pelo rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 17 – Resultado do cálculo da perda interina descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua no tempo

Total de perdas interinas descontadas de carbono do solo cenário Tecnossolo C5	Valor em toneladas
<i>Perda interina descontada de carbono no solo (em toneladas)</i>	280.390,80
Quantidade de carbono em tonelada perdido inicialmente em 2015	28.127,70

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 31 – Gráfico da perda interina equivalente descontada de carbono no solo (em toneladas) nos 687 hectares de pastagens soterrados pela lama de rejeitos, considerando perda perpétua.



Fonte: Lactec, 2021.

4.2.5 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPENSAÇÃO

Após a obtenção da perda interina, o valor obtido de 280.390,80 toneladas de carbono total representa a quantidade que deverá ser compensada à sociedade devido a espera necessária para se obter o recurso novamente, em decorrência dos danos causados ao solo pelo rompimento da barragem de Fundão. Assim, após calculada a perda interina, buscaram-se alternativas para a transformação desse quantitativo de carbono em hectares, a fim de mensurar a quantidade em área para ser alvo das ações compensatórias, como forma de equiparação ao prejuízo ambiental causado ao solo e à sociedade.

Conforme já apontado, a restauração florestal se mostrou a ação mais efetiva para a reconstrução dos estoques originais de C no Tecnossolo. Dessa maneira, as ações de compensação aqui sugeridas também se referem à conversão de áreas com pastagens degradadas na bacia do rio Doce, para áreas reflorestadas com espécies da Mata Atlântica, especialmente em áreas degradadas e legalmente protegidas por lei (APPs) (BRASIL, 2012). Adiciona-se que no caso dessas áreas, as mesmas se referem a locais não afetados pelo desastre, logo o solo não foi atingido pelo rejeito, tratando-se de restauração florestal sobre solo natural.

Neste trabalho não se pretende pré-definir a localização das áreas a serem alvo da restauração florestal para compensação, isto porque esta definição exige o conhecimento de informações prévias, principalmente se as áreas selecionadas são de propriedade pública ou privada. Por isso, a delimitação dos locais não será feita. Por outro lado, a equipe apresenta neste estudo, mais especificamente no item 4.1.7, que trata do detalhamento das ações de recuperação e compensação do habitat vegetação, as características importantes a serem consideradas como critério para a seleção dessas áreas. A apresentação dessas características tem como objetivo direcionar a escolha de áreas que tenham semelhança com a vegetação da região afetada e que gerem o maior número de serviços ambientais possíveis, garantindo o benefício excedente calculado pela equivalência. Já o cálculo do quantitativo de áreas necessárias para promover a compensação em igual proporcionalidade aos danos causados,

ou seja, que compense a perda interina calculada, é o objetivo desta etapa. Para tanto, alguns passos foram seguidos. Primeiramente, buscou-se na literatura uma taxa anual média de incremento de carbono ao solo por hectare (compatível com 20 cm de profundidade), promovido por uma floresta. Na sequência, o tempo de crescimento de uma floresta, até que esta atinja o ápice do crescimento e posteriormente estabilize, também foi determinada com base na literatura. Por fim, a partir do tempo necessário para que a floresta incorpore carbono ao solo em um hectare por ano (até 20 cm), foi construída a série de incremento a ser utilizada pela valoração.

Destaca-se que para a compensação não foi utilizado o modelo Century para a obtenção da série de incrementos de C, pois não há informações e dados suficientes sobre essas áreas alvo de compensação que possibilitem a alimentação do modelo. Neste contexto, embora a taxa de incorporação de C ao solo possa variar em função de diversos fatores site-específicos (especialmente clima e tipo de solo) e da própria dinâmica da vegetação, para fins da valoração, assumiu-se uma taxa média de incremento anual de carbono como sendo fixa e linear no tempo.

Posto isso, a fim de identificar o valor médio de incremento de carbono ao solo, foram selecionados estudos que possuíam informações sobre esse incremento após a restauração florestal em áreas cujo uso do solo prévio eram pastagens sobre solos naturais (DON; SCHUMACHER; FREIBAUER, 2011; LIMA et al., 2011; LOPES et al., 2020; ROCHA et al., 2015; SILVER; OSTERTAG; LUGO, 2000) (Tabela 18 e Tabela 19).

Foram priorizados estudos de florestas nativas, mas incluíram-se também as taxas de incremento de C no solo para uma área de floresta plantada (LIMA et al., 2011), devido à semelhança com as taxas obtidas para vegetação nativa e por se tratar de um trabalho específico para a bacia do Rio Doce. Estes autores demonstraram que a floresta plantada (eucalipto) pode atingir o mesmo estoque de C no solo quando comparado a uma floresta nativa que não sofreu distúrbios. Adicionalmente ao trabalho de Lima et al. (2011), as regiões de abrangência dos demais estudos incluíram os municípios de Viçosa (MG) (LOPES et al., 2020) e Garça (SP) (ROCHA et al., 2015), além de estudos globais realizados em florestas tropicais (DON; SCHUMACHER; FREIBAUER, 2011; SILVER; OSTERTAG; LUGO, 2000). Os estudos de Don; Schumacher; Freibauer (2011) e Silver; Ostertag; Lugo (2000), apesar de não representarem unicamente o bioma Mata Atlântica, foram considerados pois tratam-se de meta-análises para florestas tropicais, contemplando uma grande variação global.

A partir da literatura selecionada foram considerados apenas os estudos que possuíam dados mensurados em restauração florestal com série histórica mínima de quatro anos, buscando contemplar os trabalhos com sensibilidade para identificar os efeitos da mudança de uso do solo.

A conversão de pastagens degradadas em florestas pode promover incremento de carbono no solo, embora pastagens bem manejadas também possam ser equivalentes ou mesmo superarem vegetações nativas em termos de sequestro de C no solo (ALVES et al., 2008; CERRI et al., 2004). Como foram considerados pastos degradados no contexto do desastre, para representar a condição média

observada na bacia do rio Doce (HIRSCH, 2003; LIMA et al., 2008), considera-se que a restauração florestal nas áreas de compensação irá promover o incremento da MOS, mas que essa taxa varia ao longo do tempo. Os maiores incrementos ocorrem normalmente nos primeiros anos do estabelecimento da floresta (SILVER; OSTERTAG; LUGO, 2000) (Tabela 1) e com o avanço do estágio sucessional, as taxas tendem a diminuir. Porém, como o objetivo é obter uma taxa de incremento fixa e linear, esta variação não foi considerada. Para tanto, as taxas de incorporação de C no solo reportadas para florestas jovens não foram consideradas, buscando selecionar uma taxa de incremento de C que represente o comportamento a longo prazo, de maneira a obter uma média anual estável ao longo dos anos (taxa média representativa para o crescimento de uma floresta por 30 anos), (Tabela 19). Ressalta-se, novamente, que o tipo de solo (classe, mineralogia, textura, fertilidade, drenagem, profundidade, etc.) e o próprio clima da região também influenciam diretamente nas taxas de incorporação e sequestro de C no solo; porém, como não é possível indicar os locais exatos para as ações de compensação, conforme mencionado, as taxas médias foram selecionadas buscando representar regiões tropicais, de forma generalizada, sem considerar especificidades dos solos.

No que se refere ao tempo de crescimento da floresta assumido nesse estudo (30 anos), a decisão para esta premissa se baseou no fato de que, em áreas antropizadas, a restauração florestal se baseia em sucessão secundária, na qual, ao longo do tempo, a floresta passa por uma série de processos ecológicos até se estabilizar em uma vegetação complexa. Embora nem sempre seja possível recuperar todos os parâmetros de riqueza, diversidade e composição florística em áreas impactadas, mesmo após muitos anos de recuperação (processo conhecido como secundarização) (ROCHA-SANTOS; TALORA, 2012), florestas tropicais secundárias podem acumular tantas espécies quanto existem em florestas maduras em menos de 80 anos (FINEGAN, 1996). Em comparação com o tempo assumido no processo de valoração do habitat vegetação, quando este adotou 10 anos para a restauração florestal, a diferença se encontra no alvo a ser alcançado pela floresta; no caso da vegetação, no contexto de recuperação, a floresta atinge a linha base quando esta alcança seu estágio médio, situação em que se encontrava antes do desastre. Já no habitat solos, no contexto de compensação, busca-se verificar a incorporação de carbono ao solo por todo o período de crescimento de uma área reflorestada até o alcance do seu ápice, sendo este de 30 anos, quando alcança um estágio maduro.

Finegan (1996) afirma que a sucessão secundária de florestas neotropicais pode ser descrita em três fases, durante as quais, a altura do dossel da floresta e a densidade e área basal das árvores às vezes atinge níveis encontrados em florestas maduras em menos de 30 anos. Na primeira fase, ocorre a colonização por uma vegetação densa de ervas, arbustos e trepadeiras durante os primeiros 10 anos; na segunda fase (10-30 anos), ocorre a emergência de árvores pioneiras de vida curta e de crescimento rápido, formando um dossel lenhoso contínuo em menos de três anos, sob a sombra da qual as espécies da primeira fase desaparecem em grande parte; e por fim, na terceira fase da sucessão, as pioneiras são substituídas por árvores dominantes de vida longa e por espécies tolerantes à sombra, nos subseqüentes 70 a 120 anos (FINEGAN, 1996; MARQUES et al., 2014).

Tabela 18 – Incremento do estoque de carbono no solo em florestas com idades inferiores a 20 anos.

Referência	Local	Profundidade (cm)	Uso	Condição da pastagem	Pastagem (P) t C ha ⁻¹	Floresta (F) t C ha ⁻¹	Delta (F-P) t C ha ⁻¹	Tempo (anos)	Incremento anual (t C ha ⁻¹ ano ⁻¹)
LOPES et al. (2020)	Viçosa - MG	0-10 cm	Pastagem - floresta secundária	Degradada	28,67	50,64	21,97	15	1,46
LOPES et al. (2020)	Viçosa - MG	0-10 cm	Pastagem - floresta secundária	Degradada	23,68	39,42	15,74	15	1,05
ROCHA et al. (2015)	Garça - SP	0-20 cm	Pastagem - Floresta	Degradada	9	12	3,00	4	0,75
ROCHA et al. (2015)	Garça - SP	0-20 cm	Pastagem - Floresta	Degradada	9	13	4,03	9	0,45

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 19 – Incremento do estoque de carbono no solo em florestas com idades superiores a 20 anos.

Referência	Local	Profundidade (cm)	Uso	Condição da pastagem	Pastagem (P) t C ha ⁻¹	Floresta (F) t C ha ⁻¹	Delta (F-P) t C ha ⁻¹	Tempo (anos)	Incremento anual (t C ha ⁻¹ ano ⁻¹)
LIMA et al. (2011)	Belo Oriente - MG (Rio Doce)	0-20 cm	Pastagem - floresta plantada (Eucalipto)	Degradada	31,54	41,55	10,01	34	0,29
LIMA et al. (2011)	Virginópolis - MG (Rio Doce)	0-20 cm	Pastagem - floresta plantada (Eucalipto)	Degradada	54,99	69,72	14,73	33	0,45
DON; SCHUMACHER; FREIBAUER (2011)	Global (trópicos)	Amostragem total	Pastagem - floresta nativa	-	-	-	12,44	28	0,44
SILVER; OSTERTAG; LUGO (2000)	Global (trópicos)	-	Pastagem - Floresta	Degradada	-	-	-	20-100	0,49
									Média
									0,42

Fonte: Lactec, 2021.

Ainda, Rocha-Santos e Talora (2012) afirmam que áreas onde ocorreu o processo de corte e queima (*slash and burn*) apresentam menor riqueza de espécies apenas nos primeiros 5 a 20 anos, mas que após 40 a 60 anos de recuperação, essas florestas apresentam valores que são semelhantes e talvez até maiores do que os de florestas tropicais menos perturbadas. Essa informação traz um tempo maior que 30 anos para o alcance do equilíbrio da restauração florestal. Desta forma, a equipe tem ciência de que há autores que assumem valores maiores que 30 anos, mas apesar disso, os levantamentos de informações feitos permitem assumir esse período de tempo como referência para a compensação.

Rozendaal et al. (2019) realizaram uma meta análise de estudos em 56 florestas neotropicais de 10 países, e relatam que a recuperação da riqueza de espécies e da biomassa é mais rápida em relação à composição de espécies, mas que a recuperação dos dois primeiros parâmetros já pode promover a provisão de serviços ecossistêmicos importantes, tais como o estoque e sequestro de carbono. Os autores reportam que a recuperação de 90% da riqueza de espécies ocorre em até 31 anos após a restauração florestal em áreas onde houve perturbação antrópica, o que está em concordância com o trabalho de Liebsch; Marques e Goldenberg (2008), que analisou a sucessão secundária em 18 fragmentos florestais da Mata Atlântica brasileira. Teixeira et al. (2020), ainda, afirmam que muitos atributos estruturais, taxonômicos e de diversidade funcional em áreas de florestas em recuperação na zona da mata de Minas Gerais convergiram para valores encontrados em florestas primárias após 25-50 anos de sucessão, sendo que o C do solo e a ciclagem de nutrientes foram parâmetros de recuperação rápida (atingindo o patamar encontrado em florestas primárias após 15 anos de sucessão).

Nesse sentido, considerando que a recuperação da vegetação nativa pode ser acelerada em processos de restauração ativos (com a possibilidade de plantios de mudas e sementes em área total, nucleação, controle de formigas e plantas competidoras, etc. ou seja, projetos de restauração florestal/revegetação), é razoável estabelecer um horizonte de 30 anos para o reestabelecimento da vegetação florestal, que proporcionará os incrementos de carbono ao solo na etapa de compensação de danos.

Portanto, a partir das explanações anteriores, a taxa média de incremento de C no solo obtida, devido à conversão de pastagens degradadas em florestais tropicais (considerando que a dinâmica da floresta se estabiliza em aproximadamente 30 anos após o início de sua recuperação), foi de 0,42 t de C ha⁻¹ ano⁻¹, sendo essa a taxa de referência fixa e linear utilizada no método de valoração, na etapa de compensação.

Conforme já apontado, após obter a taxa de incremento de carbono e o tempo de crescimento da floresta, foi construída a série de valores a serem utilizadas no cálculo do quantitativo de áreas a serem alvo de compensação. A Tabela 20 mostra o detalhamento dos valores utilizados, evidenciando que, anualmente, um hectare de área reflorestada incrementa 0,42 t de C ao solo até 20 cm de profundidade. Sendo esse incremento fixo ao longo do tempo, tem-se que após 30 anos esse mesmo hectare acumulou um incremento total de 12,6 t de C no período. A coluna *equivalência de 1,6*, mostra que, sendo a incorporação realizada pela restauração florestal, há benefícios adicionais trazidos à sociedade devido aos serviços ecossistêmicos da floresta. Desta forma, cada tonelada de C incorporada ao solo pela vegetação nativa acrescenta 60% de benefícios a mais do que ocorreria em pastagens, e por isso o valor de 1,6 é também multiplicado pela quantidade de carbono total incorporado ao solo. Essa multiplicação resulta na coluna, *incremento anual em 1ha com equivalência*.

Após a construção da série de valores da coluna *incremento anual em 1ha com equivalência*, aplicou-se o desconto sobre eles, considerando a taxa de desconto social de 8% ao ano e cujos resultados estão na coluna, *incremento anual em 1ha, com equivalência, descontado e na perpetuidade*. A perpetuidade é considerada pois os benefícios gerados, assim como os danos mensurados, são perpétuos. O somatório dessa coluna descontada resulta no valor de 58,42 t de C incorporados em um hectare de solo a 20 cm de profundidade, durante 30 anos, descontados a valor presente de 2015 e gerando benefícios perpétuos.

Posto isso, sabendo-se que a perda interina descontada (débito à sociedade em decorrência dos danos causados ao solo em função do desastre), é de 280.390,80 toneladas de carbono total, e que após a recuperação da vegetação nativa em um hectare de solo natural (das áreas a receberem ações de compensação) ocorre incorporação de 58,42 t de C (descontados na perpetuidade), tem-se que a quantidade de área, em hectares, a serem reflorestadas para compensar os danos em 687 ha de solo sob pastagens é de 4.799,30 hectares, pois é esse quantitativo que garante que a sociedade obterá de volta a quantidade de carbono perdida, ou seja a perda interina.

Tabela 20 – Valores utilizados para o cálculo dos ganhos da compensação, mediante ações de restauração florestal, considerando ganhos perpétuos no tempo.

Ano	Incremento anual em 1ha	Equivalência de 1,6	Incremento anual em 1ha com equivalência	Incremento anual em 1ha c/ equiv. DESCONTADO e na PERPETUIDADE
2022	0,00	1,6	0,000	0,000
2023	0,42	1,6	0,672	0,363
2024	0,84	1,6	1,344	0,672
2025	1,26	1,6	2,016	0,934
2026	1,68	1,6	2,688	1,153
2027	2,10	1,6	3,360	1,334
2028	2,52	1,6	4,032	1,483
2029	2,94	1,6	4,704	1,602
2030	3,36	1,6	5,376	1,695
2031	3,78	1,6	6,048	1,765
2032	4,20	1,6	6,720	1,816
2033	4,62	1,6	7,392	1,850
2034	5,04	1,6	8,064	1,869
2035	5,46	1,6	8,736	1,874
2036	5,88	1,6	9,408	1,869
2037	6,30	1,6	10,080	1,854
2038	6,72	1,6	10,752	1,831
2039	7,14	1,6	11,424	1,802
2040	7,56	1,6	12,096	1,766
2041	7,98	1,6	12,768	1,726
2042	8,40	1,6	13,440	1,683
2043	8,82	1,6	14,112	1,636
2044	9,24	1,6	14,784	1,587
2045	9,66	1,6	15,456	1,536

Ano	Incremento anual em 1ha	Equivalência de 1,6	Incremento anual em 1ha com equivalência	Incremento anual em 1ha c/ equiv. DESCONTADO e na PERPETUIDADE
2046	10,08	1,6	16,128	1,484
2047	10,50	1,6	16,800	1,431
2048	10,92	1,6	17,472	1,378
2049	11,34	1,6	18,144	1,325
2050	11,76	1,6	18,816	1,273
2051	12,18	1,6	19,488	1,220
2052	12,60	1,6	20,160	1,167
Total			312,480	58,423

Fonte: Lactec, 2021

Logo, conclui-se que, na etapa de recuperação externa, a área diretamente impactada deverá ser reflorestada com espécies nativas da Mata Atlântica, sendo relativos aos 687 hectares de pastagens soterrados pelo Tecnossolo, e na etapa de compensação, deverão ser reflorestados mais 4.799,30 hectares em áreas não impactadas da bacia do rio Doce, mas que apresentem pastagens degradadas. Ao todo, a área alvo de restauração florestal para o habitat solo é de 5.486,30 hectares. O projeto e o custo para a execução dessa ação, considerando esse quantitativo total, estão expostos nos itens 4.2.7 e 4.2.8.

4.2.6 TAXA DE EQUIVALÊNCIA DA RECUPERAÇÃO EXTERNA E DA COMPENSAÇÃO

Antes de detalhar os custos e o projeto de restauração florestal, cabe apresentar o detalhamento que resultou na definição do valor da taxa de equivalência. O fator, ou taxa de equivalência, reflete em termos qualitativos a recuperação externa e a compensação, sendo que é possível definir uma taxa diferente para cada um ou utilizar uma mesma taxa para ambos. O objetivo do fator de equivalência é mostrar se, em relação à linha base, o quanto foi retornado à sociedade é melhor, igual ou pior pela perspectiva da qualidade. A taxa de equivalência pode ser menor que um se a qualidade devolvida for inferior àquela existente antes do desastre; pode ser igual a um se essa qualidade for igual, ou pode ser maior que um, se os benefícios gerados tem qualidade superior àqueles perdidos.

A ação de recuperação externa e a ação compensatória dos danos ao solo, sugerida no presente trabalho como sendo a melhor alternativa no contexto do desastre, se resume a restauração florestal da área de pastagem recoberta com Tecnossolo no compartimento 1, bem como a restauração florestal de pastagens degradadas em outras áreas da bacia do rio Doce não impactadas pelo desastre, de modo a compensar a perda interina do estoque de C na área afetada. Contudo, compreende-se que a recomposição da mata nativa em áreas cujo uso do solo prévio era o de pastagens degradadas, resulta na devolução de uma condição de qualidade ambiental superior em comparação à realidade impactada. Ressalta-se que, tanto para recuperação quanto para compensação, por se tratar da mesma ação, será adotada a mesma taxa de equivalência.

Ditt et al. (2010) indicam que há um aumento progressivo no fornecimento de Serviços Ecossistêmicos (SE) em função de diferentes usos da terra na região do bioma Mata Atlântica na seguinte ordem: áreas urbanas/solo descoberto < pastagens < plantações de eucalipto < florestas nativas. Seguindo esse raciocínio, buscou-se a obtenção de um fator que representasse a qualidade ambiental potencialmente fornecida pela recomposição da vegetação nativa em relação aos benefícios ambientais resultantes de áreas com pastagens com base nos SE fornecidos por ambos os usos do solo.

Segundo o levantamento de SE afetados em decorrência do desastre (informações podem ser obtidas no capítulo sobre serviços ecossistêmicos no TOMO I de Acompanhamento de Danos), os sistemas ambientais correlacionados aos usos do solo transversais ao presente estudo (floresta nativa e pastagens) são: Mata nativa - Sistema formado por vegetação nativa de alto porte, caracterizado por duas formações vegetais: Floresta Estacional Semidecidual, com indivíduos arbóreos de até 30 m de altura que não formam cobertura superior contínua, e Floresta Ombrófila Densa, com fanerófitos lianas lenhosas e epífitas em abundância; Vegetação secundária - Sistema caracterizado por vegetação em estágio inicial de regeneração natural, com predominância de indivíduos jovens e espécies pioneiras; e Produção agropecuária - Sistema composto por terras cultivadas, incluindo lavouras temporárias e permanentes, e pastagens, onde o solo é coberto por vegetação de gramíneas ou leguminosas.

Considerando os dois sistemas de vegetação nativa (mata nativa e vegetação secundária) foram levantados 21 SE potenciais associados a esses sistemas, sendo quatro SE de provisão; dez SE de regulação; cinco SE de suporte; e dois SE culturais. No entanto, para o sistema ambiental de Produção Agropecuária (que engloba, também, as pastagens), apenas quatro SE foram identificados (Tomo I – Acompanhamento de Danos), sendo dois de provisão (provisão de alimento e de matéria-prima) e dois culturais (herança e expressão cultural e espiritual; e relações sociais e modo de vida). Porém, Bengtsson et al. (2019) e Zhao; Liu; Wu (2020) ressaltam que os SE fornecidos por pastagens muitas vezes são subestimados, especialmente àqueles relacionados com os SE de sequestro e estoque de carbono e regulação da erosão. Portanto, foram listados os principais serviços de provisão, suporte, regulação e cultural reportados para mata nativa, vegetação secundária, produção agropecuária e pastagens, de acordo com o Tomo I (Acompanhamento de Danos), Bengtsson et al. (2019) e Zhao; Liu; Wu (2020) (Tabela 21).

Tabela 21 – Serviços Ecosistêmicos prestados pelos sistemas ambientais que incluem vegetação nativa e pastagens

SISTEMAS AMBIENTAIS	SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS		FONTE
	Categoria	Serviços	
Mata nativa / Vegetação secundária	Provisão	Provisão de alimento	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Provisão de matéria-prima	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Provisão de recursos bioenergéticos	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Provisão de recursos genéticos e bioquímicos	Tomo I – Acompanhamento de Danos
	Regulação	Sequestro e fixação de carbono	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Retenção de solo e sedimentos	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Retenção de material particulado da atmosfera	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Regulação térmica	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Regulação hidrológica	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Tamponamento de mudanças hidrológicas/meteorológicas rápidas	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Decomposição de resíduos e remediação de contaminantes	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Regulação de teias tróficas e manutenção da biodiversidade	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Polinização	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Regulação biológica (pragas, doenças, espécies invasoras)	Tomo I – Acompanhamento de Danos
	Suporte	Disponibilidade de áreas vitais para espécies flora e fauna	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Formação de corredores de fluxo gênico	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Formação de solo	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Produção primária	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Ciclagem de nutrientes	Tomo I – Acompanhamento de Danos
	Cultural	Recreação, lazer e educação	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Herança e expressão cultural e espiritual	Tomo I – Acompanhamento de Danos

SISTEMAS AMBIENTAIS	SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS		FONTE
	Categoria	Serviços	
Produção Agropecuária / Pastagens	Provisão	Provisão de alimento	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Provisão de matéria-prima	Tomo I – Acompanhamento de Danos
	Regulação	Regulação do clima	ZHAO; LIU; WU (2020)
		Sequestro de carbono	ZHAO; LIU; WU (2020)
		Controle de erosão	BENGTSSON et al. (2019); ZHAO; LIU; WU (2020)
		Regulação da água	BENGTSSON et al. (2019); ZHAO; LIU; WU (2020)
		Regulação da qualidade do ar	ZHAO; LIU; WU (2020)
		Acumulação/formação de solo	ZHAO; LIU; WU (2020)
		Ciclo de nutrientes	ZHAO; LIU; WU (2020)
		Controle de pragas	ZHAO; LIU; WU (2020)
		Serviço de polinização	ZHAO; LIU; WU (2020)
	Cultural	Herança e expressão cultural e espiritual	Tomo I – Acompanhamento de Danos
		Relações sociais e modo de vida	Tomo I – Acompanhamento de Danos

Fonte: Lactec, 2021

Foram inclusos nove SE de regulação propostos por Bengtsson et al. (2019) e Zhao; Liu; Wu (2020) à listagem de SE potencialmente oferecidos para o sistema de Produção Agropecuária/Pastagem de acordo com o levantamento realizado pelo Lactec (TOMO I de Acompanhamento de Danos), totalizando 13 serviços. Os autores listaram outros SE transversais para esse sistema (especialmente serviços culturais), que não foram incorporados à Tabela 21 para não haver duplicidade, pois tratam-se de SE que já estão incorporados aos listados na tabela.

Ações de restauração da vegetação nativa (recuperação e compensação), portanto, resultariam no fornecimento de 21 SE potenciais, enquanto a eventual manutenção das pastagens como uso do solo nas ações de recuperação e compensação apresentaria potencial de fornecer 13 SE. Devido à dificuldade e falta de dados e informação, não foi possível identificar pesos relativos entre SE e, por isso, consideramos todos os serviços igualmente importantes, isto é, com pesos iguais. Assim, é razoável considerar um fator de equivalência ambiental como a razão entre serviços recuperados/compensados e de serviços perdidos de 1,6 entre os dois sistemas, ou seja, a razão entre 21 e 13. Tal razão mostra que a restauração florestal de vegetação nativa traz 60% a mais de benefícios adicionais a sociedade, em comparação com as pastagens, devido ao maior número de SE prestados. Assim, conclui-se que esse fator de equivalência mede a mudança de uso do solo de pastagem para floresta e foi utilizado como ponderação tanto para as ações de recuperação externa quanto para as ações compensatórias.

4.2.7 DETALHAMENTO DAS AÇÕES PARA RECUPERAÇÃO EXTERNA E AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA OS DANOS CAUSADOS AO SOLO

Conforme abordado, as ações de recuperação e compensação selecionadas para os danos causados ao solo, é a restauração florestal. O escopo do projeto de restauração florestal é exatamente o mesmo descrito no item 4.1.7 -Detalhamento das Ações para Recuperação Externa e Ações Compensatórias para os danos causados à Flora, baseado no escopo técnico de restauração do

Programa de Recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Recarga Hídrica (Programa 26) e do Programa de Recuperação de Nascentes da Bacia do Rio Doce (Programa 27). Por isso, a informação não será transcrita novamente.

4.2.8 VALOR MONETÁRIO DO DANO

Do mesmo modo como o escopo do projeto de restauração florestal considerado para o habitat solo é exatamente o mesmo utilizado para o habitat vegetação, o orçamento utilizado também é o mesmo, elaborado com base no Programa 27 da RENOVA e contendo as mesmas adaptações feitas seguindo o escopo final consolidado no habitat vegetação. Portanto, os valores obtidos no processo de valoração dos danos à vegetação serão utilizados aqui para obter o valor do dano causado ao habitat solo, principalmente os custos unitários descontados.

Desse modo, apresenta-se a mesma orçamentação dos custos para execução dessas atividades de restauração florestal. A Tabela 22 mostra o orçamento de forma simplificada, com os custos em R\$/hectare separados pelas macroetapas. Ressalta-se que tais valores foram definidos em maio de 2019 conforme a data do documento que apresenta o Programa 27 e, por isso, foi necessário corrigir os valores finais para março de 2021, conforme informações expostas na Tabela 23.

Igualmente ao que foi realizado no habitat vegetação, para os solos também há a diferenciação de valores entre restauração florestal sobre o rejeito e sobre solo natural. Como os 687 hectares de solos valorados, que serão alvo da recuperação, foram recobertos pelo Tecnossolo, tem-se que a restauração florestal será sobre o rejeito. No caso da compensação, os 4.799,30 hectares serão alvo de restauração florestal sobre o solo natural. O custo em R\$/hectare da recuperação é maior do que da compensação devido à atividade de pesquisa específica para acompanhar a evolução da vegetação plantada sobre o rejeito.

Tabela 22 – Orçamento do projeto de restauração florestal, como forma de recuperação e compensação dos danos ambientais causados ao solo, preços de maio de 2019

	Etapas	Custo Renova (R\$/ha.)
1	Priorização (<i>Pesquisa de predisposição para restauração</i>)	320,51
2	Sementes e Mudanças	2.794,65
3	Mobilização e Engajamento	2.615,38
4	PIP (Projeto Individual da Propriedade)	1.600,00
5	Implantação e Manutenção	30.355,39
5.1	Plantio e manutenção (Serviços e insumos para plantio)	20.661,88
5.2	Cercamento e manutenção (Insumos e serviços terceiros)	4.027,49
5.3	<i>Proteção florestal (incêndio)</i>	5.666,03
6	Monitoramento	4.159,93
7	Gerenciamento	8.554,94
	Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais	50.400,80
8	Pesquisa e Desenvolvimento (área da recuperação)	1.708,02
	Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecnossolo	52.108,83

Fonte: Programa 27 da RENOVA, maio de 2019.

Utilizando a variação do índice de preço ao consumidor amplo (IPCA), acumulado entre maio 2019 a março de 2021, cujo valor foi 8,98%, a Tabela 23 mostra os valores atualizados pela correção monetária.

Tabela 23 – Valores atualizados, não descontados, do projeto de restauração florestal, preços de maio de 2019 para março de 2021

Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais (Preços maio/2019)	50.400,80	Total (R\$/hectare) – compensação em solos naturais (Preços março/2021)	54.926,80
Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecno solo (Preços maio/2019)	52.108,83	Total (R\$/hectare) – recuperação em Tecno solo (Preços março/2021)	56.788,20

Ainda aplicando-se os dados de monetização do habitat vegetação, após a atualização dos valores a serem utilizados como custo unitário não descontado da restauração florestal, em R\$/hectare, obteve-se o valor total dos projetos de recuperação e compensação, considerando a quantidade de hectares a serem recuperados e compensados no habitat vegetação, sendo o valor total da recuperação da vegetação não descontada R\$ 48.803.780,04 e o valor total da compensação da vegetação não descontada R\$ 241.326.099,54. A partir desses valores, construiu-se o cronograma financeiro, conforme a execução do projeto, e foi realizada a aplicação da taxa de desconto. No caso da recuperação, o valor total descontado do dano causado à vegetação foi de R\$ 40.154.299,61 a preços de março de 2021 e a valor presente de 2021 (Tabela 24). Já no caso da compensação, o valor total descontado do dano causado à vegetação foi de R\$ 198.555.941,71 a preços de março de 2021 e a valor presente de 2021 (Tabela 25). A partir desses valores totais descontados, o custo unitário descontado da recuperação da vegetação foi de R\$ 46.723,64/hectare e o custo unitário descontado da compensação da vegetação foi de R\$ 45.192,14/hectare. Esses valores unitários da recuperação e compensação do habitat vegetação foram utilizados como custos unitários descontados para a recuperação e compensação do habitat solos (Tabela 24 e Tabela 25). Utilizando tais valores e multiplicando-os pelas áreas em hectare a serem recuperadas e compensadas, obteve-se o valor total da recuperação do solo descontado no montante de R\$ 32.099.143,39, e valor total da compensação do solo descontado no montante de R\$ 216.890.730,53.

Tabela 24 – Custo da Recuperação em Tecno solo da Vegetação, como Referência para Restauração Florestal para Recuperação do Solo, valor presente de 2021 e preços de março de 2021

Valor total do projeto de recuperação da vegetação descontado VP 2021 e preços correntes 2021	R\$ 40.154.299,61
Total hectares a serem recuperados para o habitat vegetação	859,40
Custo unitário do hectare descontado VP2021 e preços correntes 2021	R\$ 46.723,64
Total hectares a serem recuperados para o habitat solo	687,00
Valor da recuperação do solo (descontado a VP 2021 e a preços correntes de 2021)	R\$ 32.099.143,39

Fonte: Lactec, 2021

Tabela 25 – Custo da Compensação em Solos Naturais da Vegetação, como Referência para Restauração Florestal para Recuperação do Solo, valor presente de 2021 e preços de março de 2021

Valor total do projeto de compensação da vegetação descontado VP 2021 e preços correntes 2021	R\$ 198.555.941,71
Total hectares a serem compensados descontado para o habitat vegetação	4.393,60
Custo unitário do hectare descontado VP2021 e preços correntes 2021	R\$ 45.192,14
Total hectares a serem compensados para o habitat solo	4.799,30
Valor da compensação (descontado a VP 2021 e a preços correntes de 2021)	R\$ 216.890.730,53

Fonte: Lactec, 2021

Após a obtenção do valor para recuperar e para compensar os danos ao solo, apresenta-se na Tabela 26 o resultado final da valoração econômica dos danos ambientais causados ao hábitat solo do rio Doce, por meio da aplicação do MEH/MER.

Tabela 26 – Resultado final da valoração dos danos causados ao solo devido ao rompimento da barragem de Fundão

Danos	Valores em Reais (preços de março de 2021 e valor presente 2021)
Valor do dano da recuperação	R\$ 32.099.143,39
Valor do dano da compensação	R\$ 216.890.730,53
Valor total dos danos causados ao solo	R\$ 248.989.873,92

Fonte: Lactec, 2021.

4.3 ÁGUA (RIO DOCE)

4.3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS CAUSADOS À ÁGUA DO RIO DOCE

Com o rompimento da barragem de Fundão, o rio Doce e seus afluentes foram atingidos pela onda de rejeitos minerários, de modo que tiveram suas condições alteradas. O desastre resultou em um volume de cerca de 44 milhões de m³ de rejeitos de mineração, água e materiais, liberados no meio ambiente em novembro de 2015, resultando na contaminação de cerca de 675 km de cursos d'água. Segundo a ANA (2016), a onda de lama resultante da ruptura da barragem avançou sobre a planície de inundação dos rios tributários, levando consigo parte da vegetação e do substrato. Esses materiais somaram-se à própria lama de rejeitos, agravando os danos nos trechos de cabeceira.

Na etapa do diagnóstico ambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão foram identificados três danos concernentes à qualidade da água dos rios atingidos pela lama de rejeitos, a saber: redução das concentrações de oxigênio dissolvido, aumento das concentrações de sólidos e aumento das concentrações de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Os referidos danos foram avaliados a partir de diferentes indicadores. No entanto, conforme será explicado no item a seguir, a turbidez foi o indicador mais confiável estatisticamente para representar o dano e sua evolução no tempo. Desta forma o dano a ser valorado está vinculado ao aumento das concentrações de sólidos nos corpos hídricos atingidos por meio da análise do parâmetro turbidez, que faz parte dos padrões de qualidade da água conforme Resolução CONAMA nº 357, de 2005.

Com a passagem da lama de rejeitos minerários pelos corpos hídricos, a turbidez atingiu valores elevadíssimos, com valores que chegaram a superar o limite legislado (100 UNT) em 6.000 vezes. O aumento da turbidez da água resulta na diminuição da transparência da água bem como na passagem da luz pela superfície do líquido. Em decorrência disso, organismos dependentes da fotossíntese tiveram tal processo comprometido. Entre esses organismos destaca-se a comunidade fitoplanctônica, que é a base da cadeia trófica. Para essa comunidade o que se constatou após o rompimento foi a diminuição drástica de espécies que estavam acostumadas a habitar as regiões, sendo estas então substituídas ao longo do tempo por outras mais resistentes às novas condições ambientais.

Os organismos heterotróficos, que são aqueles que não são capazes de produzir seu próprio alimento, também foram penalizados pelas alterações do ambiente em que residiam. A comunidade zooplanctônica, que é composta por organismos microscópicos na coluna d'água, compõe o segundo elo da cadeia alimentar, sendo considerados os consumidores primários. Sua principal forma de obtenção do alimento é a filtração, com destaque para o fitoplâncton. Em decorrência do desastre, constatou-se a redução ou até mesmo a ausência de organismos zooplanctônicos em alguns locais. Além de serem bioindicadores da qualidade ambiental do meio, esses organismos são de extrema importância para o equilíbrio ecológico de águas continentais, visto que servem de alimento para uma variedade de peixes, crustáceos, entre outros. A redução ou ausência do zooplâncton influencia diretamente a sobrevivência das comunidades biológicas de níveis tróficos superiores.

As modificações sofridas pelas comunidades planctônicas causaram restrições à dieta alimentar dos peixes, interferindo em sua saúde e tornando-os menos resistentes a doenças. Para alguns organismos a consequência da significativa elevação da concentração de sólidos na água, e consequentemente da turbidez, foi ainda mais severa, levando-os a óbito por asfixia, dada a impregnação de sólidos nas brânquias impedindo as trocas gasosas. O ambiente aquático mais turvo dificultou a visibilidade dos peixes, favorecendo a ação de predadores, alterando os locais de reprodução, de postura de ovos e dos movimentos naturais e migratórios dos peixes.

Desse modo, fica evidente como o ecossistema aquático foi influenciado pelas alterações na turbidez da água. Além disso, o aporte bastante significativo da lama de rejeitos aos corpos hídricos resultou na redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água, sendo inclusive constatada anóxia em alguns locais, bem como no aumento exorbitante das concentrações de EPTs nos corpos hídricos atingidos, fatores que também acarretaram impactos negativos ao sistema aquático e biota relacionada.

Logo, identificou-se que o aumento da turbidez no rio Doce traduz os danos causados à qualidade da água em decorrência do rompimento da barragem de Fundão, identificados no diagnóstico socioambiental realizado (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020c). Sendo assim, o dano a ser valorado nesse habitat será o de aumento dos sólidos na água, por meio da análise da turbidez.

Dada a considerável extensão da área de passagem da lama, para a avaliação dos danos à qualidade da água dos rios, a equipe técnica do Lactec subdividiu a área de abrangência da análise em quatro compartimentos (1, 2A, 2B e 3), conforme abaixo:

- Compartimento 1: Inicia na barragem de Fundão e vai até a barragem da UHE Risoleta Neves;
- Compartimento 2A: Inicia no final do compartimento 1 e vai até a barragem da UHE Baguari;

- Compartimento 2B: Inicia no final do compartimento 2A e vai até a barragem da UHE Mascarenhas;
- Compartimento 3: Inicia no final do compartimento 2B e vai até a foz do rio Doce.

Esta mesma subdivisão foi considerada para a aplicação do método, resultando assim em quatro análises, uma para cada compartimento, sendo que o processo e as decisões metodológicas permaneceram as mesmas para as quatro regiões. A segmentação da análise ocorreu apenas para que as diferenças de magnitude do dano não fossem significativamente atenuadas, como seriam no caso de uma análise única por um comportamento médio. A Figura 32 exibe a divisão em compartimentos da área analisada.

Figura 32 – Divisão do Rio Doce em Compartimentos.



Fonte: BRASIL (MPF)/ LACTEC, (2020c).

4.3.2 SELEÇÃO DA MÉTRICA E CONSTRUÇÃO DA LINHA BASE

Como já mencionado, foram utilizados diferentes indicadores para a mensuração dos danos à qualidade da água. No momento da decisão da métrica, muitos desses indicadores foram testados estatisticamente, por meio de ensaios de curvas de recuperação natural utilizando cada um deles.

Ressalta-se que para esses ensaios e análises foram utilizados softwares estatísticos, como o ambiente computacional R (R Core Team 2018). E além das funções presentes nos pacotes que formam a base da linguagem, alguns pacotes adicionais foram instalados:

- Para a manipulação dos dados foi utilizado os pacotes *dplyr* (Wickham et al. 2018) e *tidyr* (Wickham and Henry 2019);

- Os gráficos foram construídos utilizando-se do pacote *ggplot2* (Wickham 2016);
- Alguns recursos do pacote *gamlss* (Rigby and Stasinopoulos 2005) também foram utilizados.

Os resultados apontaram que a turbidez foi o indicador que apresentou o melhor ajuste estatístico quanto ao coeficiente de determinação, chamado de R^2 . O valor desse coeficiente é a correlação (medida de relação linear) entre os valores observados em campo e os preditos pelo modelo, ou seja, quanto maior o valor de R^2 , maior se espera que seja a precisão das estimativas feitas pelo modelo, indicando assim o bom ajuste do mesmo.

Além disso, a qualidade da água na região estudada depende muito do período do ano em que é avaliada. No período seco (abril a setembro), a qualidade da água nos rios, na maioria dos casos, apresenta melhores condições, enquanto no período chuvoso (outubro a março), a qualidade da água apresenta-se mais degradada. Isso ocorria mesmo antes do rompimento da barragem de Fundão. Assim, tendo em vista que a qualidade da água é dependente do período do ano, essa condição também foi considerada para a definição da métrica. Novamente, a turbidez foi a que representou melhor essa influência da sazonalidade.

Com relação ao aspecto químico, se a turbidez apresenta alterações, pode-se esperar que os outros parâmetros de qualidade de água também não atendam suas condições ideais, visto que a absorção com sólidos é considerada como caminho majoritário para o transporte de elementos tóxicos em águas naturais (JI, 2008). Assim, a turbidez possui a capacidade de representar direta ou indiretamente os demais indicadores utilizados no diagnóstico de danos.

Além das vantagens estatísticas, sazonais e químicas, a turbidez também tem como vantagem a existência de um consistente banco de dados históricos, isto é, a existência de bancos de dados atualizados periodicamente, e que permite comparação no tempo. Por exemplo, em algumas estações de monitoramento localizadas no rio Doce, já haviam registros de turbidez desde o ano de 1997. Com o rompimento da barragem, no dia 05/11/2015, foi iniciado o monitoramento diário da turbidez em alguns trechos do rio, que com o tempo passou a ser medida mensalmente.

Por todos esses motivos, a turbidez foi a variável selecionada para compor a construção da métrica para a valoração desse habitat. No entanto, ressalta-se que a turbidez auxilia na construção da métrica, mas a mesma não é a métrica propriamente dita, utilizada na aplicação do método MEH/MER. A métrica selecionada é a quantidade de água, em metros cúbicos, afetada pelo desastre no tempo, e o processo de sua construção é explicado no decorrer deste documento. Isto porque, a turbidez se trata de uma propriedade física dos fluídos, a qual se manifesta na redução da transparência do mesmo em virtude da presença de sólidos em suspensão, que influenciam a passagem da luz através da água. Isto é, quanto mais transparente, melhor a qualidade da água, quanto menor a transparência, pior a qualidade, de um modo geral (BRASIL, 2014). Porém, mesmo a turbidez sendo uma propriedade física, ela não permite neste caso medir diretamente a quantidade de água afetada. Por isso, ela ainda não se configura como a métrica em si, mas sim um parâmetro para construção da mesma.

Assim, para a construção do modelo estatístico de predição da turbidez, foram selecionadas 15 estações de monitoramento, dispostas ao longo do trajeto percorrido pela lama de rejeitos, na bacia do rio Doce. Estas estações estão contidas dentro dos compartimentos (I, II A, II B e III). A Tabela 27

mostra a localização destas estações e o tempo da série de dados que foi considerado, sendo a primeira coleta a data do primeiro dado disponível e a última coleta como o último dado da série utilizado.

Tabela 27 – Localização Geográfica de cada estação de monitoramento ao longo do rio Doce

Compartimento	Estação	Longitude	Latitude	Primeira coleta	Última coleta
Compartimento I	RD071	-20,283	-20,283	01/10/08	09/12/19
Compartimento I	RD072	-20,248	-20,248	01/10/08	09/12/19
Compartimento II A	RD019	-20,015	-20,015	02/09/97	10/12/19
Compartimento II A	RD023	-19,749	-19,749	16/09/97	10/12/19
Compartimento II A	RD035	-19,490	-19,490	05/08/97	10/12/19
Compartimento II A	RD033	-19,321	-19,321	30/07/97	10/12/19
Compartimento II A	RD083	-19,096	-19,096	08/07/08	11/12/19
Compartimento II B	RD044	-18,883	-18,883	21/02/00	11/12/19
Compartimento II B	RD045	-18,861	-18,861	30/07/97	11/12/19
Compartimento II B	RD053	-18,975	-18,975	04/09/97	11/12/19
Compartimento II B	RD058	-19,165	-19,165	22/02/00	12/12/19
Compartimento II B	RD059	-19,350	-19,350	04/09/97	12/12/19
Compartimento II B	RD067	-19,506	-19,506	25/03/98	12/12/19
Compartimento III	P2	-19,528	-19,528	18/05/99	12/12/19
Compartimento III	P4	-19,411	-19,411	18/05/99	17/12/19

Fonte: Lactec, 2021.

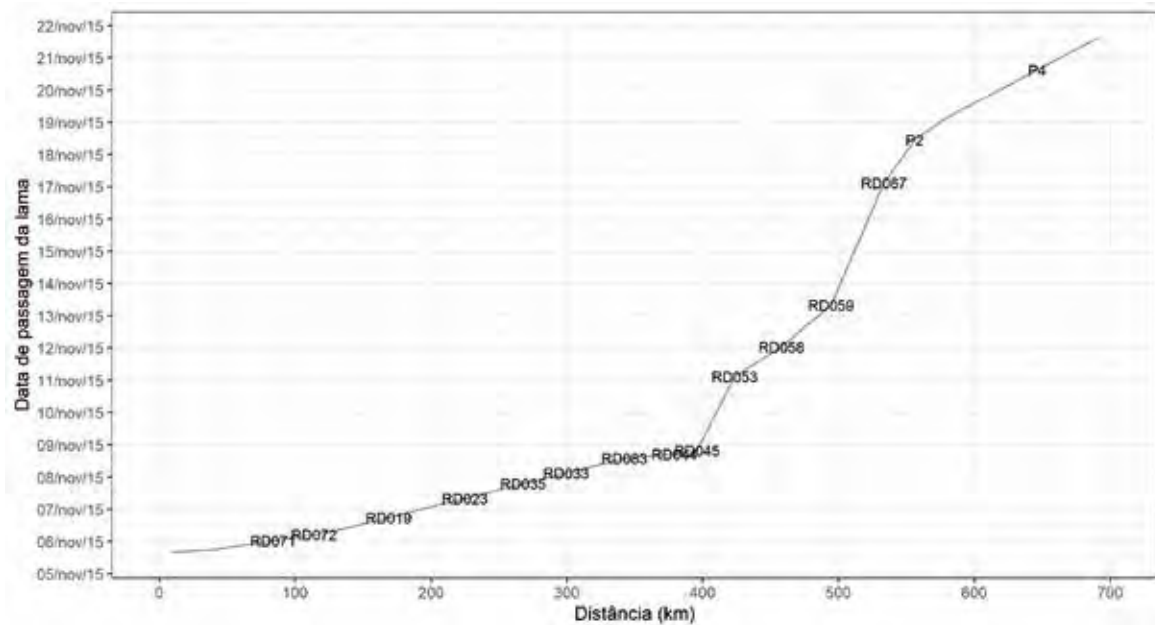
Foram selecionadas as variáveis Turbidez (UNT) e Vazão (m^3/s), sendo que a vazão é proveniente de coletas com periodicidade diária, enquanto que a turbidez é proveniente de coletas com periodicidade variável, conforme o órgão responsável. Diversas foram as fontes para a obtenção de dados para a construção do modelo de recuperação natural dos níveis da turbidez. Assim, as medições de turbidez utilizadas são provenientes das bases disponibilizadas pelos seguintes órgãos e instituições: Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA); Fundação Renova; e os dados coletados pela equipe do Lactec. A combinação de todas essas fontes, permitiu construir uma série de dados sobre os níveis de turbidez. Mais detalhes a respeito da localização das estações e períodos de dados avaliados podem ser encontrados no Tomo II – Ambientes Aquáticos Continentais do Diagnóstico Socioambiental (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c).

Para a coleta de dados da vazão, a base de dados utilizada foi a do Portal HidroWeb, ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA). Nos casos de estações em que não havia a coleta desta informação, foi utilizado o método de transposição pela vazão específica, explicado no item que trata do modelo de predição da turbidez.

Além disso, para o modelo foi necessário definir as datas de passagem da lama. Para tanto, foi considerada como data de passagem da lama na estação de monitoramento, a primeira data, após o desastre, em que houve o pico de turbidez, conforme coleta realizada. Como as estações mais próximas à barragem de Fundão demoraram mais para serem monitoradas, não havia dados disponíveis para tal aproximação. Portanto, para estimar a data de passagem da lama para as três primeiras estações de monitoramento, foram consideradas as datas declaradas pelos moradores locais, as quais foram

obtidas por meio de consulta às reportagens produzidas na época do desastre. E então, com base nesses dados foi possível fazer uma interpolação linear entre os pontos, como mostra a Figura 33, e estimar a data da passagem da lama para as três primeiras estações. A Tabela 28 expressa as datas de passagem da lama que foram consideradas para a aplicação do modelo.

Figura 33 – Interpolação linear para definição das datas de passagem da lama em cada estação de monitoramento, 2019



Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 28 – Datas aproximadas da passagem da lama em cada estação de monitoramento ao longo do rio Doce, 2015

Estação	Data	Estação	Data
RD071	06/11/15	RD045	10/11/15
RD072	06/11/15	RD053	11/11/15
RD019	06/11/15	RD058	12/11/15
RD023	07/11/15	RD059	13/11/15
RD035	08/11/15	RD067	17/11/15
RD033	08/11/15	P2	20/11/15
RD083	09/11/15	P4	25/11/15
RD044	10/11/15		

De posse dos dados de turbidez e de vazão, foi estimada a curva de permanência para cada um desses indicadores. A curva de permanência também é conhecida como curva de duração, pois ela está relacionada à variável analisada e à permanência no tempo em que esta variável é maior ou igual ao valor especificado. Assim, a elaboração desta curva consistiu na construção de um gráfico que informa com que frequência a vazão ou a turbidez de dada magnitude é igualada ou excedida durante o período de registro das informações (BRITES, 2010).

Desse modo, as curvas de permanência foram calculadas tanto para a turbidez (Figura 34) quanto para as vazões¹⁰ (Figura 35), e para cada compartimento, considerando apenas os períodos que antecedem a data de passagem da onda de rejeitos, representando assim o comportamento histórico, ou seja, sem a influência do desastre, auxiliando na construção das linhas-base, uma para cada compartimento.

Figura 34 – Curvas de Permanência da Turbidez – Pré-Desastre

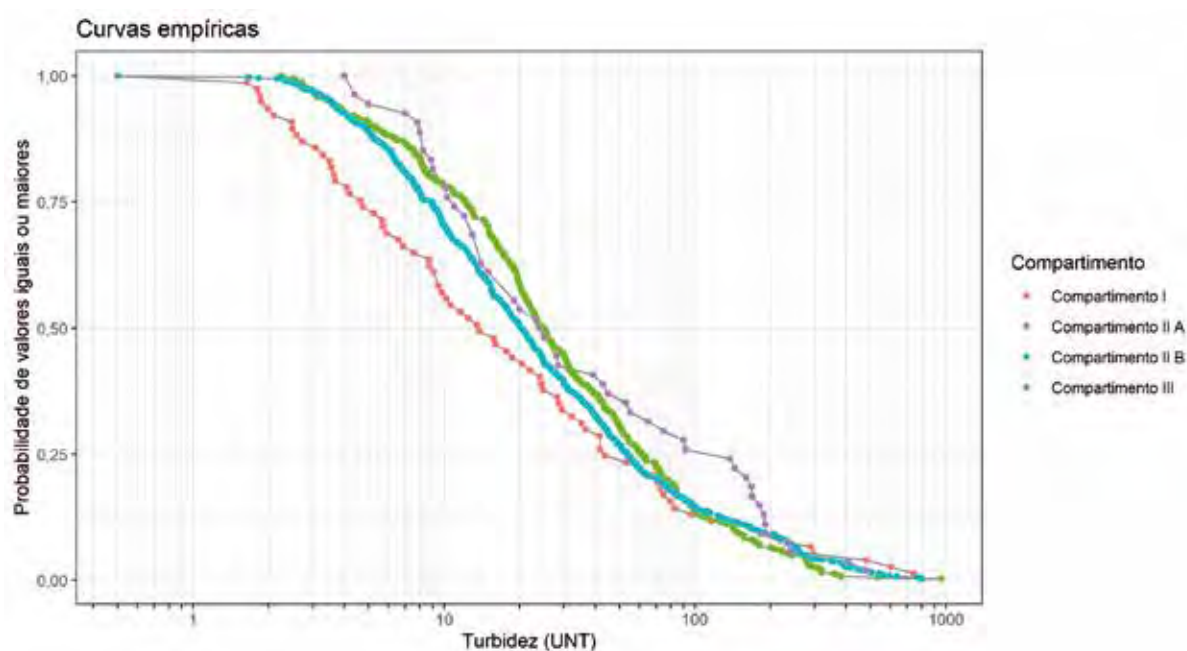
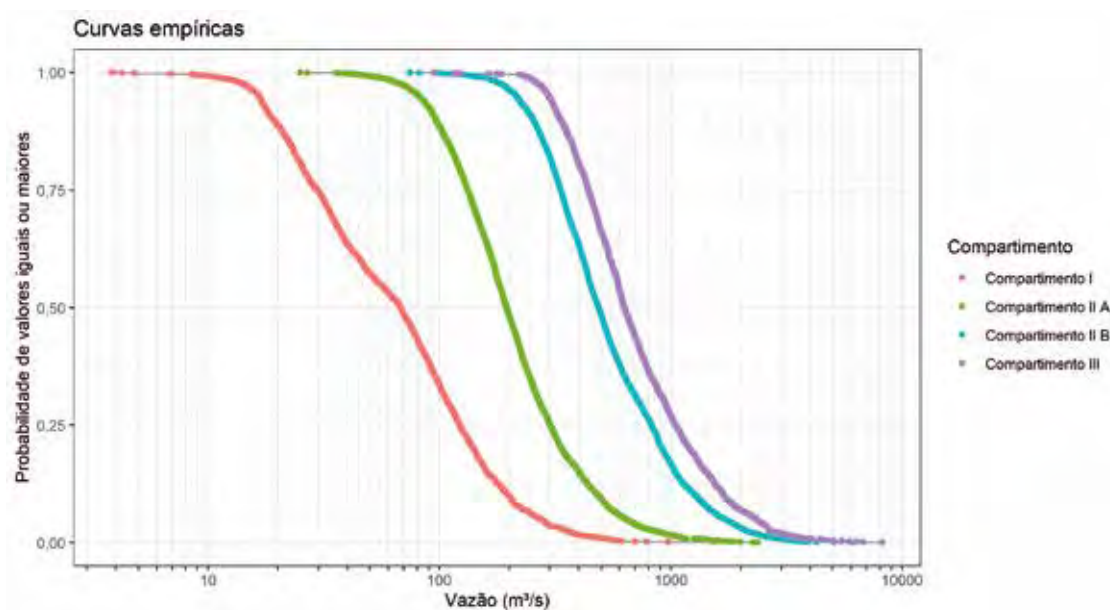


Figura 35 – Curvas de Permanência da Vazão (m³/s) – Pré Desastre



¹⁰ Pela grande quantidade de dados de vazão (m³/s), foi retirada uma amostra aleatória de tamanho 10.000 para compor o próximo gráfico (Figura 26).

A Tabela 29 mostra algumas medidas resumo para as curvas de permanência de vazão. A coluna Q20, por exemplo, apresenta as vazões que são igualadas ou superadas em 20% do tempo em cada um dos compartimentos.

Tabela 29 – Média e Quantis das Curvas de Permanência Calculadas (m³/s)

Compartimento	Média	Q80	Q50	Q20
Compartimento I	92,573	24,98	66,42	138,45
Compartimento II A	263,226	121,41	194,70	348,46
Compartimento II B	650,586	306,93	484,32	898,29
Compartimento III	882,707	405,04	630,31	1189,75

Fonte: Lactec, 2021.

O próximo passo do método foi fixar o valor de linha-base (LB). A linha-base representa a condição do ambiente antes do desastre. Como a turbidez é o indicador de melhora ou piora das condições, a LB também foi calculada e fixada em termos de turbidez média.

Importante destacar que, o rio Doce, muito antes do desastre de 2015, já era um ambiente impactado por ações antrópicas, tais como: falta de saneamento básico, agropecuária, indústria e outros, que contribuíram para que os registros de valores de turbidez estivessem aquém da recomendação legal. E ainda, ao verificar a turbidez registrada nos meses anteriores ao desastre no ano de 2015, observou-se que os valores registrados eram muito menores do que o comportamento histórico da região, ou seja, os valores de turbidez estavam mais baixos do que geralmente é observado no rio Doce. Isto foi devido a um período de seca histórica (atípica), mas que não representa a realidade geral do rio. Tal comportamento evidencia a relação existente entre turbidez e vazão onde, quando ocorrem vazões baixas, espera-se valores baixos de turbidez e vice-versa.

Desta forma, buscando trabalhar com uma LB mais próxima possível da realidade anterior, optou-se por utilizar a média histórica mensal da turbidez, englobando o intervalo de 1997 até 2015. Este comportamento médio foi analisado juntamente com um comportamento médio da vazão correspondente. Em outras palavras, a LB foi definida por meio do comportamento esperado (médio) da turbidez, levando em conta os dados históricos antes da data do rompimento, para um valor médio de vazão. Considerou-se tal procedimento como adequado, pois permite analisar de forma pragmática o dano aqui contabilizado.

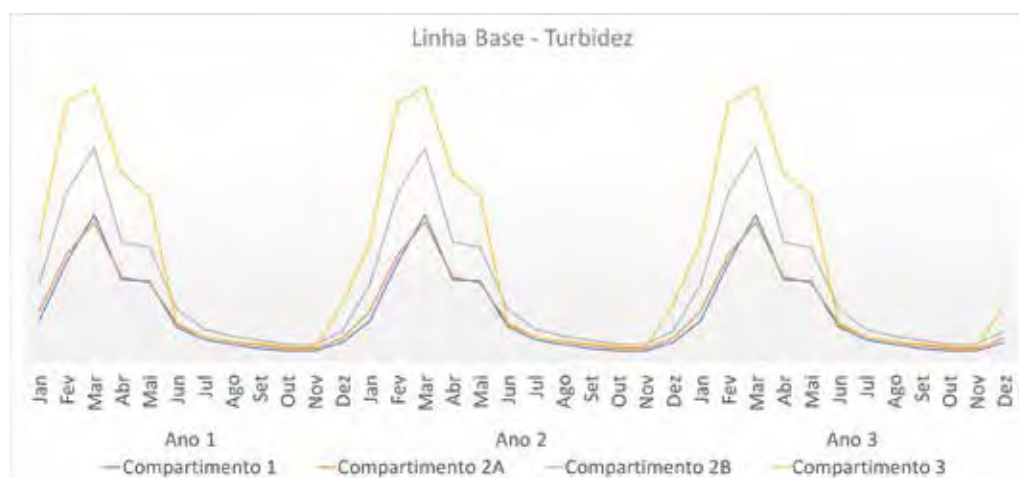
Os valores das linhas-base, bem como a estimativa da quantidade de água afetada pelo desastre foram medidos considerando a periodicidade mensal. Esta escolha foi feita, a fim de levar em conta a sazonalidade existente na série de turbidez, por conta das diferentes vazões, possibilitando uma avaliação mais refinada do tempo de retorno, uma vez que os valores podem ter retornado a linha-base em períodos de baixa vazão e não ter retornado em períodos de altas vazões. Este aspecto será mais bem explicado no decorrer do relatório. Ele é adiantado aqui apenas para esclarecer que como as estimativas são mensais, há também uma LB mensal média para cada compartimento e para cada mês, dentro do tempo considerado na análise da valoração.

Como já abordado, a análise dos danos foi realizada subdividindo a região acometida pelo desastre em quatro compartimentos, e o processo de valoração também seguiu a mesma segmentação. Por isso, para a contabilização da perda interina, cada compartimento foi analisado e contabilizado

separadamente. As decisões metodológicas, o processo dos cálculos e os modelos estatísticos foram os mesmos para todos eles, modificando-se apenas os valores dos dados utilizados, de acordo com o que havia disponível em cada compartimento. Como resultado, cada compartimento tem um valor diferenciado de LB, métrica e curvas de recuperação. Isto porque o dano do aumento da concentração de sólidos na água, que é medido pela turbidez, se comportou de forma diferente ao longo dos compartimentos. Pois, obter uma curva única de recuperação de uma grande área de extensão, causaria atenuações significativas ao modelo estatístico, e que seriam prejudiciais à análise.

A periodicidade da análise é mensal, no entanto, a escala do modelo é anual, e este é o motivo pelo qual o mês é apresentado em valores decimais. Os modelos foram construídos com base a respeitar as variações sazonais. Desta forma, os dados das linhas-base foram avaliados separadamente, de acordo com essa sazonalidade e de acordo com o compartimento analisado, gerando uma linha-base por mês. A Figura 36 mostra as curvas de LB por compartimento e por mês, utilizadas como referência nos modelos de predição de turbidez, e consequentemente nas curvas de recuperação. O gráfico mostra apenas o período de 3 anos (36 meses) (Figura 36), pois o intuito foi evidenciar de maneira visual o comportamento padrão da turbidez no rio Doce. Conforme observa-se, o compartimento III foi o que apresentou o maior resultado de média histórica da turbidez.

Figura 36 – Curvas de Linha Base da Turbidez – Pré Desastre



Fonte: Lactec, 2021.

Após a definição das linhas de base e da métrica, a equipe passou então para a construção do modelo estatístico de predição da turbidez, que permitiu, na sequência, a construção das curvas de recuperação da qualidade da água por compartimento do rio Doce, considerando apenas a recuperação natural.

No entanto, cabe ressaltar que embora a recuperação natural seja definida como uma recuperação sem intervenção humana, é importante destacar que no caso do habitat da água, os dados de turbidez utilizados refletem possíveis benefícios ambientais obtidos por meio das ações para controle de erosão nas margens do rio Doce realizadas pela RENOVA. Após a ocorrência do desastre, uma das ações emergenciais executadas, foi o plantio de vegetação nas margens do rio Doce, a fim de evitar uma erosão contínua, aumentando a carga de solo juntamente com rejeito para o mesmo. Essa ação de recuperação foi realizada no habitat vegetação, no entanto, pela sinergia que existe no meio ambiente, faz com que os resultados obtidos pela recuperação interfiram diretamente no habitat água.

Assim, essa ação de revegetação das margens é classificada no método como a recuperação externa feita no habitat vegetação, pois não se trata de uma intervenção direta ao habitat água, o que não altera a classificação de recuperação natural da água, apresentada neste estudo. Porém, o método considera que as ações desenvolvidas em outro habitat e que trazem benefícios ao habitat analisado, precisam ser contabilizados, a fim de computar o dano da maneira mais realista possível, considerado a interação que o mesmo possui com outros ambientes. E desta forma, esses benefícios já estão contabilizados nos dados de turbidez utilizados.

4.3.3 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO NATURAL E CÁLCULO DA PERDA INTERINA

O próximo passo após a definição da métrica e construção da linha de base foi a construção da curva de comportamento (predição) da turbidez, que é a base para a construção da curva de recuperação natural em quantidade de água (m³).

4.3.3.1 Construção da Curva de Predição da Turbidez

Foi construído um modelo de tendência para a curva de recuperação da turbidez, sendo uma das covariáveis deste modelo a vazão do rio. Conforme mencionado anteriormente, a vazão é um fator determinante para a turbidez. A vazão é o volume de determinado fluido que passa por uma determinada seção, por unidade de tempo. A vazão dos rios aumenta em períodos chuvosos, o que promove a ressuspensão dos sólidos e aumenta a turbidez (BERNARDO, 2006). Por isso, o modelo elaborado considerou as estações chuvosa e seca, que influenciam diretamente nos valores do indicador. Quando os dados de vazão se mostraram indisponíveis, foram feitas transposições pela vazão específica para se obter a série. Assim, para encontrar as vazões de um determinado ponto em um rio, é necessário que haja ao menos uma estação (a montante ou a jusante) com dados de vazão no curso desse rio, e que essa não sofra interferência oceânica. Dessa maneira, foi possível identificar que a vazão específica nos dois pontos é cada vez mais parecida em um mesmo instante (essa dedução também serve para dados médios) quanto menor é a distância entre esses pontos. Então, obteve-se uma estimativa de vazão para o ponto desejado apenas multiplicando a vazão específica pela sua área de drenagem.

$$Q = q \cdot A$$

em que q é a vazão específica; Q é a vazão média ou instantânea e A é a área de drenagem.

4.3.3.1.1 Equação do modelo de predição da turbidez

A função proposta para modelar a média da turbidez no pós-desastre é descrita pela equação:

$$\bar{y}_i = f(x_i, v_i, p_i, \beta) = \beta_3 + \frac{\beta_4}{x_i^{\beta_5} + 1} + \beta_6 \cdot v_i + \beta_7 \cdot p_i$$

em que $\bar{y}_i$ é a média do $\log_{10}$ da turbidez na coleta i ; x_i é o tempo, medido em anos em relação ao desastre, em que foi realizada a coleta i ; β_3 é o valor da média quando o tempo tende a infinito; β_4 é a diferença entre a média no tempo zero e o parâmetro β_3 , ou seja, mede a amplitude da curva no

eixo das abscissas; β_5 é relacionado com a taxa de decaimento da curva. Já β_6 e β_7 são coeficientes que medem o efeito da vazão (v_i) e do período (p_i), sendo:

$$p_i = \begin{cases} 1 & \text{período}_i = \text{chuvoso} \\ -1 & \text{c.c} \end{cases}$$

Para a modelagem da curva completa foi utilizada a regressão por partes, já que uma equação linear modela adequadamente o comportamento pré-desastre, mas não modela o pós-desastre.

Como covariáveis foram utilizadas as datas, vazões e o período de coleta. As datas foram transformadas em anos antes e após o desastre, de acordo com as estimativas da data de passagem da lama. Já os dados de vazão média diária do compartimento foram log transformados (log na base 10) e centrados no logaritmo da média pré-desastre do compartimento, permitindo que o coeficiente do modelo, relacionado a essa variável, tenha interpretação.

Assim a equação que define o modelo fica dada por:

$$\bar{y}_i = f(x_i, v_i, p_i, \beta) = \beta_0 + \beta_1 \cdot v_i + \beta_2 \cdot p_i + I(x_i \geq 0) \left[\beta_3 + \frac{\beta_4}{x_i^{\beta_5} + 1} + \beta_6 \cdot v_i + \beta_7 \cdot p_i \right]$$

em que:

- x_i é o tempo, medido em anos relativos ao desastre, em que foi realizada a coleta ;
- v_i é o log da vazão da coleta centrada no log da média da vazão pré-desastre;
- p_i é uma variável relacionada ao período em que foi realizada a coleta :

$$p_i = \begin{cases} 1 & \text{período}_i = \text{chuvoso} \\ -1 & \text{c.c} \end{cases}$$

- β_0 é o valor médio da variável resposta no pré-desastre para uma vazão média pré-desastre, em um período intermediário (transição entre seco e chuvoso);
- β_1 representa a modificação que o aumento de uma unidade no da vazão causa na variável resposta no pré-desastre;
- β_2 representa o efeito, na variável resposta, causado por uma mudança de período no pré-desastre;
- β_3 é a mudança esperada no valor médio pré-desastre da variável resposta quando o tempo tende a infinito;
- β_4 representa a diferença entre o valor médio estimado para a variável resposta na data de passagem da lama e o valor médio estimado quando o tempo tende a infinito;
- β_5 é relacionado com a taxa de decaimento da curva, ou seja, quão rápido os valores da variável resposta diminuem após a ocorrência do desastre;
- β_6 e β_7 são coeficientes que medem a diferença no efeito da vazão () e do período () do pós-desastre em relação ao pré-desastre.

Dentro do compartimento há várias estações, as quais podem medir a turbidez no mesmo dia. Quando isso ocorre, para o tratamento de dados é mantido todos os valores, como se fossem réplicas das medidas do mesmo compartimento para uma mesma vazão média diária.

4.3.3.1.2 Estimação da curva de predição da turbidez

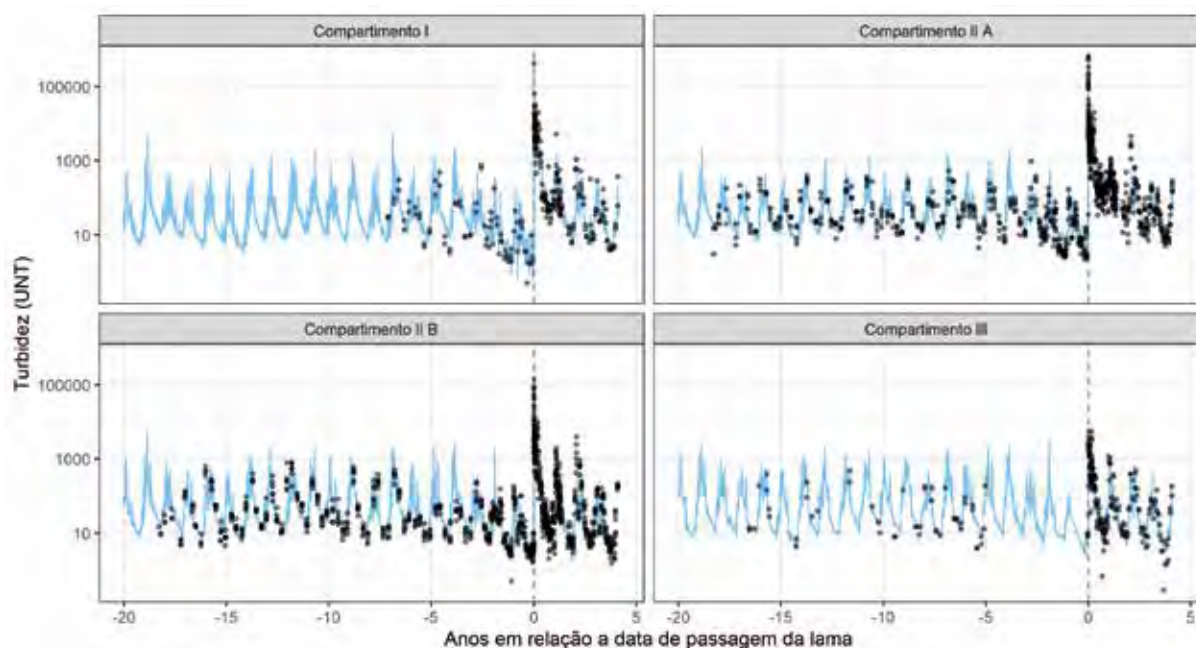
A curva modelada apresenta o comportamento médio da turbidez ao longo dos anos dado o período (seco ou chuvoso) e a vazão, ou seja, partindo da LB, passando pela data do rompimento (05/11/2015) e demais períodos com dados observados (até dezembro/2019) e, a partir de então, estima valores “médios” de turbidez para os anos seguintes, incluindo aqueles nos quais ainda não foram registrados dados, considerando-se para tanto a vazão média histórica e um período intermediário (entre o seco e chuvoso). Deste modo, é possível observar a evolução da curva ao longo do tempo e seu retorno ao valor médio de turbidez existente antes do desastre.

Cabe nesse momento lembrar que o tempo considerado no modelo captura possíveis melhorias na turbidez oriundas de ações de recuperação vegetal nas margens dos tributários. Este aspecto é importante, pois evidencia que a perda em quantidade de água, aqui calculada, já considera outros benefícios oriundos de outros habitats.

A estimação foi feita por mínimos quadrados não lineares, utilizando-se da função **nls()** do pacote stats, parte dos pacotes que formam a base do R (R Core Team, 2018). Como valor inicial para o parâmetro utilizou-se a média pré-desastre. Já para o parâmetro γ , foi utilizada a diferença entre a média do primeiro ano e a pré-desastre. O valor inicial para parâmetro foi definido como 2 e para o restante dos parâmetros como 0. A definição desses valores não devem influenciar no resultado final, se eles estiverem em uma faixa de valores plausíveis, cujo qual depende do modelo.

A Figura 37 mostra os resultados das estimativas, que evidenciam o comportamento médio da turbidez. Os resultados foram segregados por compartimento, pois conforme já explicado, a análise foi realizada de forma segmentada, pois o comportamento da turbidez é diferenciado em cada trecho.

Figura 37 – Predição do Comportamento da Turbidez Média – Pré-Desastre e Pós-Desastre

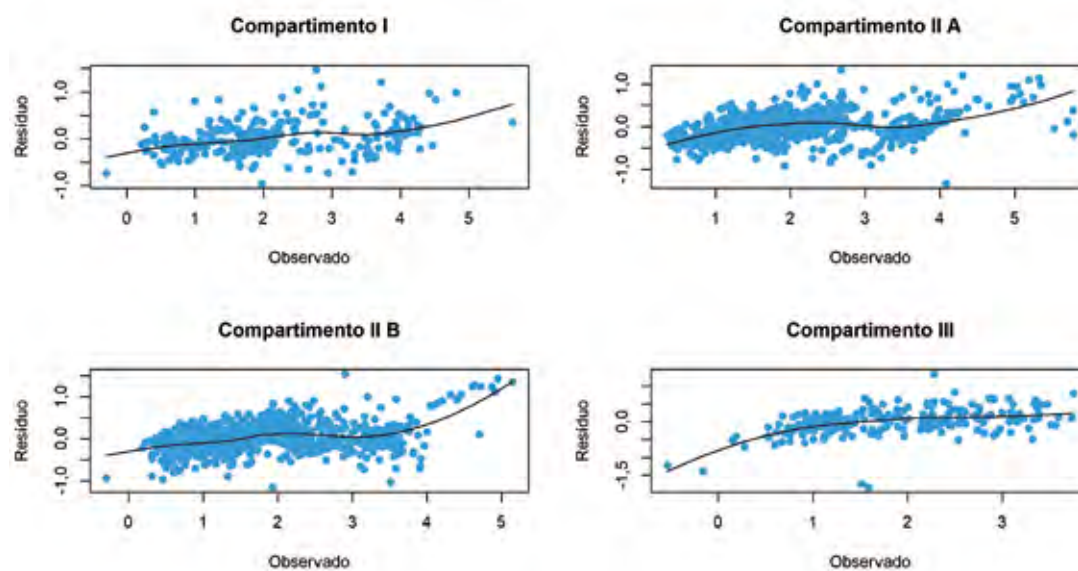


Fonte: Lactec, 2021.

Na Figura 38 são exibidos os gráficos dos resíduos do modelo versus os valores observados, ou seja, são comparados os valores de turbidez média obtidos pela estimação do modelo com os valores

de turbidez registrados nas estações de monitoramento avaliadas. Isto permite averiguar a proximidade dos valores estimados pelos modelos dos valores medidos nas estações de monitoramento. É possível verificar que há uma tendência de valores observados maiores gerarem resíduos maiores, padrão que reflete a dificuldade de ajuste do modelo nos dados do dia da chegada da onda de rejeitos.

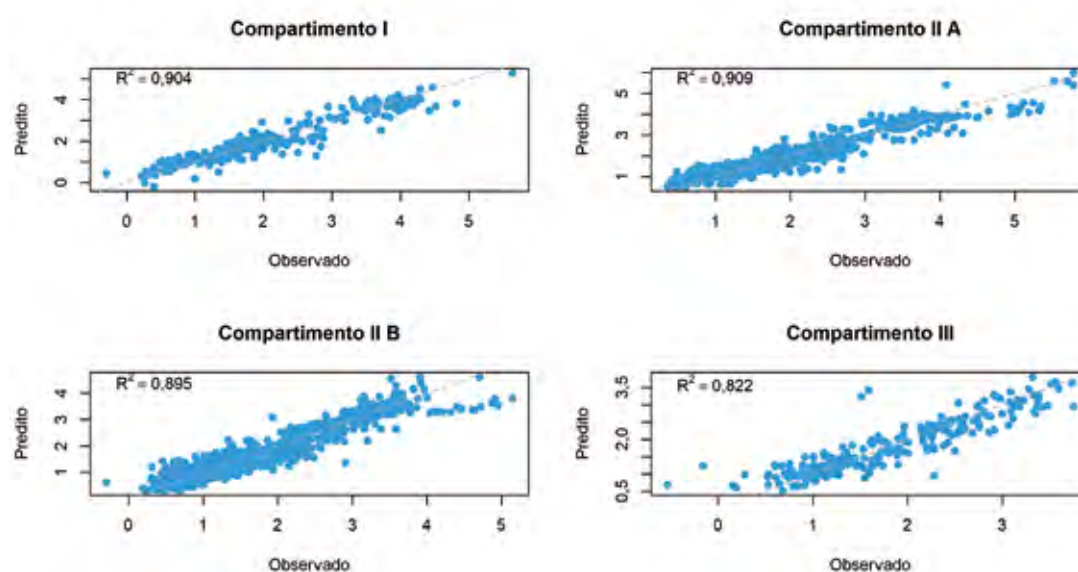
Figura 38 – Gráficos de Resíduos- Comparação entre Predição do Comportamento da Turbidez Média e a Turbidez Observada



Fonte: Lactec, 2021.

No entanto, apesar do exposto na Figura 38, o ajuste do modelo foi satisfatório, uma vez que as predições são altamente correlacionadas com os valores observados, fato que é demonstrado nos gráficos da Figura 39.

Figura 39 – Gráficos de Resíduos- Comparação entre Predição do Comportamento da Turbidez Média e a Turbidez Observada



Fonte: Lactec, 2021.

O R^2 é uma medida estatística que permite medir a diferença entre os resíduos e os dados observados, evidenciando o quão próximo os dados observados estão da linha de regressão ajustada, isto é, da curva estimada. Ele também é conhecido como o coeficiente de determinação ou o coeficiente de determinação múltipla para a regressão múltipla. O R^2 pode ser definido como a porcentagem da variação da variável resposta que é explicada por um modelo, estando sempre entre 0% e 100% (neste caso expresso em valores entre 0 e 1), sendo que quanto mais perto de zero menor a relação explicativa entre as variáveis e quanto mais perto de 100% maior é essa relação explicativa, o que indica que o modelo estimado está bem ajustado. A Tabela 30 exibe os valores de R^2 dos modelos de comportamento da turbidez estimados por compartimento.

Tabela 30 – Coeficientes de Correlação R^2 por Compartimento

Compartimentos	
Compartimento I	0,904
Compartimento II A	0,909
Compartimento II B	0,895
Compartimento III	0,822

Fonte: Lactec, 2021.

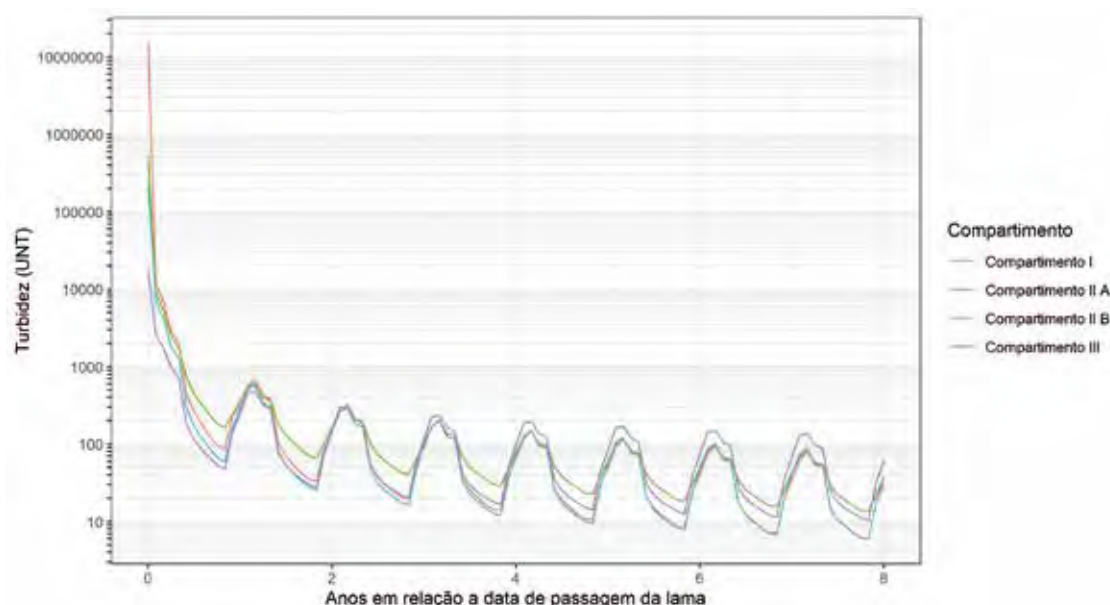
Os coeficientes estimados da equação do modelo estão dispostos na Tabela 31.

Tabela 31 – Coeficientes estimados do modelo de comportamento da turbidez média por compartimento

Compartimento I	Compartimento II A	Compartimento II B	Compartimento III
1,608	1,661	1,808	1,849
1,934	1,560	1,763	1,365
0,082	0,080	0,080	0,253
-3,900	-2,333	-2,426	-1,510
9,311	6,328	5,743	3,705
4,466	3,196	3,128	3,048
-0,612	-0,535	-0,406	-0,182
0,119	-0,002	0,120	-0,056

Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 13 mostra o gráfico com os valores preditos de turbidez, que são resultantes dos modelos estimados, variando-se a vazão mensalmente de acordo com a média mensal pré-desastre. O gráfico permite observar a tendência de comportamento da turbidez pós desastre, sendo que o padrão de comportamento da curva com aumentos e declínios padronizados exibem o comportamento sazonal dos períodos secos e chuvosos, no entanto, ainda assim é possível acompanhar uma tendência de queda no sentido da linha base da turbidez, isto é, o nível desta variável antes do dano, definida pela turbidez média histórica.

Figura 40 – Curva de Predição do Comportamento da Turbidez, por Compartimento

Fonte: Lactec, 2021.

Com base no gráfico da Figura 40, foi possível estimar, por compartimento, o tempo que levará para o rio Doce retornar aos níveis médios de turbidez anteriores ao desastre, isto é, considerando uma recuperação natural. A Tabela 32 mostra o tempo estimado. Importante destacar que, tais tempos estimados são frutos das variáveis adotadas para a construção das curvas de predição, sendo estas variáveis, vazões e turbidez médias, que não representam adequadamente valores outliers. Além disso, a qualidade da água depende do comportamento de outras variáveis, além da turbidez, o que significa dizer que, as curvas elaboradas representam apenas o retorno a linha base de uma variável, mas esta não reflete exatamente a qualidade do rio Doce como um todo. Este contexto torna essa análise conservadora, e ressalta que, ao findar o tempo estimado, o rio Doce pode ainda não estar totalmente recuperado. Entretanto, relembra-se que a escolhada turbidez como variável para a construção da métrica e medição da perda interina se deu devido ao atendimento desta aos critérios necessários para a aplicação do método MEH/MER, e por ser, dentre as demais variáveis a que captura de forma mais abrangente os desdobramentos sofridos pelo habitat após o desastre.

Tabela 32 – Tempo estimado de recuperação natural da turbidez, por compartimento

Compartimento	Tempo de recuperação (em anos)
Compartimento I	6,9
Compartimento IIA	7,8
Compartimento IIB	3,9
Compartimento III	3,8

Fonte: Lactec, 2021.

4.3.3.2 Construção da Curva de Recuperação Natural

Após a definição dos modelos de turbidez, os valores resultantes foram utilizados para derivar a curva de recuperação natural da qualidade da água, que permite posteriormente derivar a curva de quantidade de água em metro cúbico impactada pelo desastre a cada ano, até alcançar a linha-base. Desse modo, para fins de valoração, foi calculado o montante de água atingido pelo desastre, não apenas no momento da ocorrência, mas também pela permanência do dano ao longo do tempo, traduzindo em números a quantidade de água que teve sua qualidade afetada devido aos efeitos do desastre.

Tal relação foi construída, conforme anteriormente explicado, uma vez que a turbidez não permite a mensuração direta da quantidade de água afetada. Por isso, ela não poderia se configurar como a métrica do método, mas sim um parâmetro para construção dessa métrica.

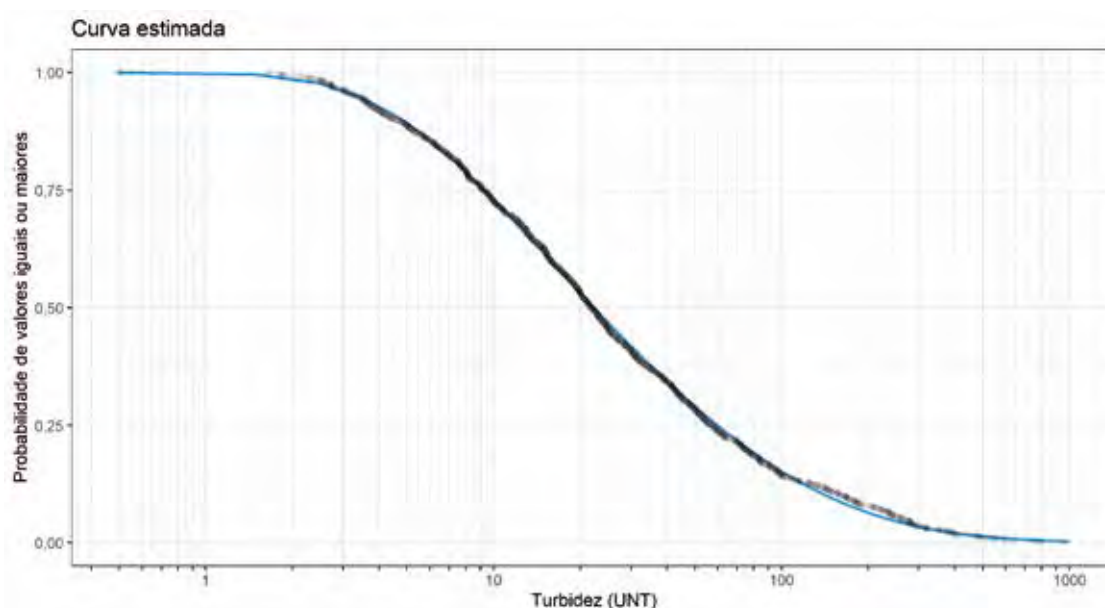
O decaimento matemático da turbidez é percebido na avaliação temporal após o desastre. A título de exemplo, no momento do desastre, devido à enorme quantidade de rejeitos que alcançaram o rio, a turbidez atingiu valores nunca registrados na região. No mês seguinte, devido à própria hidrodinâmica dos corpos hídricos, os valores de turbidez já se mostravam inferiores o que fez com que a turbidez se reduzisse. Em termos numéricos, a redução foi bastante expressiva. No entanto, analisando apenas matematicamente, essa redução aparenta uma melhoria significativa, e até mesmo dá indícios de uma tendência ao retorno a linha-base bastante acelerado. Porém, apesar do decaimento significativo da turbidez, valores observados nos meses seguintes ao desastre continuam sendo extremamente elevados para qualquer ambiente aquático, muito acima do limite máximo legislado para ambientes de classe 2, conforme Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Desta forma, observou-se a necessidade de avaliar a turbidez não somente no aspecto numérico, mas também de relevância ambiental. Assim, a partir da turbidez foi avaliada a qualidade da água, e então quantificada a variação dessa qualidade em termos de quantidade ao longo do tempo. Essa quantificação foi realizada por meio da transformação numérica do índice de turbidez para o índice de qualidade da água, a fim de averiguar o comportamento da regeneração do rio da maneira mais real possível.

Em resumo, a partir da curva de recuperação da turbidez foi possível obter a curva de recuperação da qualidade da água, por meio da qual derivou-se a curva de recuperação da quantidade de água em metro cúbico, o que permitiu calcular a variação da quantidade de água recuperada anualmente, sendo esta última a curva de recuperação adotada para aplicação do método MEH/MER.

O objetivo foi compreender o quanto de recurso hídrico foi perdido pela sociedade e pelo meio ambiente em decorrência do desastre, quantificar essa perda e mensurar os esforços de recuperação e compensação, a fim de retornar às pessoas e à natureza o recurso perdido.

Desse modo, o próximo passo do processo de construção da métrica, foi traduzir os valores de turbidez médios utilizados no modelo estatístico, em qualidade da água. Esta conversão foi feita considerando a linha base média histórica mensal de cada compartimento. Para a elaboração da curva de qualidade da água, foi construída uma curva de permanência, agrupando-se os dados pré-desastre de todas as estações sob estudo. Utilizou-se então o pacote *gamlss* (Rigby; Stasinopoulos, 2005) para ajustar um modelo para a curva. Dentre as distribuições testadas, a que melhor se ajustou foi a The Sinh-Arcsinh 2 (SHASHo2), cujo gráfico (Figura 32) é apresentado abaixo, sendo este a curva de permanência observada (curva preta) juntamente com a curva de permanência estimada (curva azul).

Figura 41 – Curva de Permanência da Turbidez



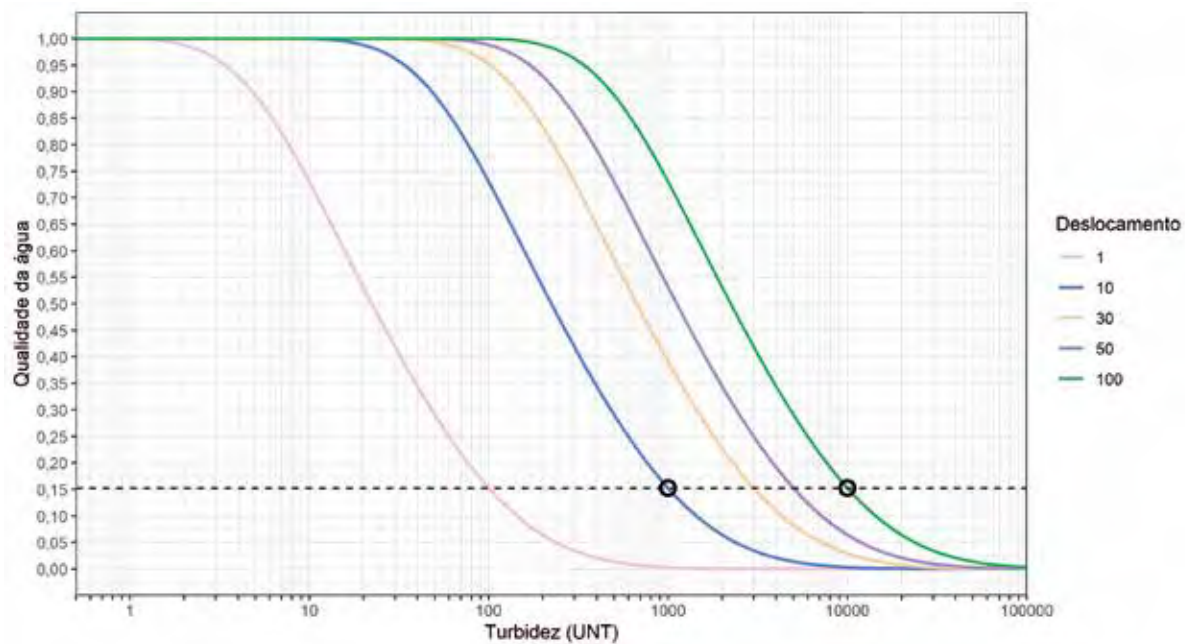
Fonte: Lactec, 2021.

Para transformação na curva de qualidade da água, para cada mês e em cada compartimento, a curva de permanência foi deslocada e ajustada, de forma que sempre o valor 1 estivesse disposto no respectivo valor médio histórico (Figura 42). Sendo assim, quando os valores de turbidez atingem o valor médio histórico mensal do compartimento (linha base), a qualidade da água atinge 100%, e assim, quanto maior os valores de turbidez, menor é a qualidade da água. Como exemplo, se utilizadas as curvas com deslocamento de 10 e 100¹¹ (Figura 42), nessa ordem, um valor de aproximadamente 15% de qualidade (0,15 no gráfico da Figura 42) é resultante de um valor de turbidez igual a 1.000 NTU na primeira e 10.000 NTU na segunda, mostrando que quanto pior os valores de linha base, maior pode ser o valor da turbidez para atingir um mesmo valor de qualidade.

A Figura 43 traz as curvas de recuperação da qualidade da água, sendo o resultado de todo o processo de cálculo até aqui descrito.

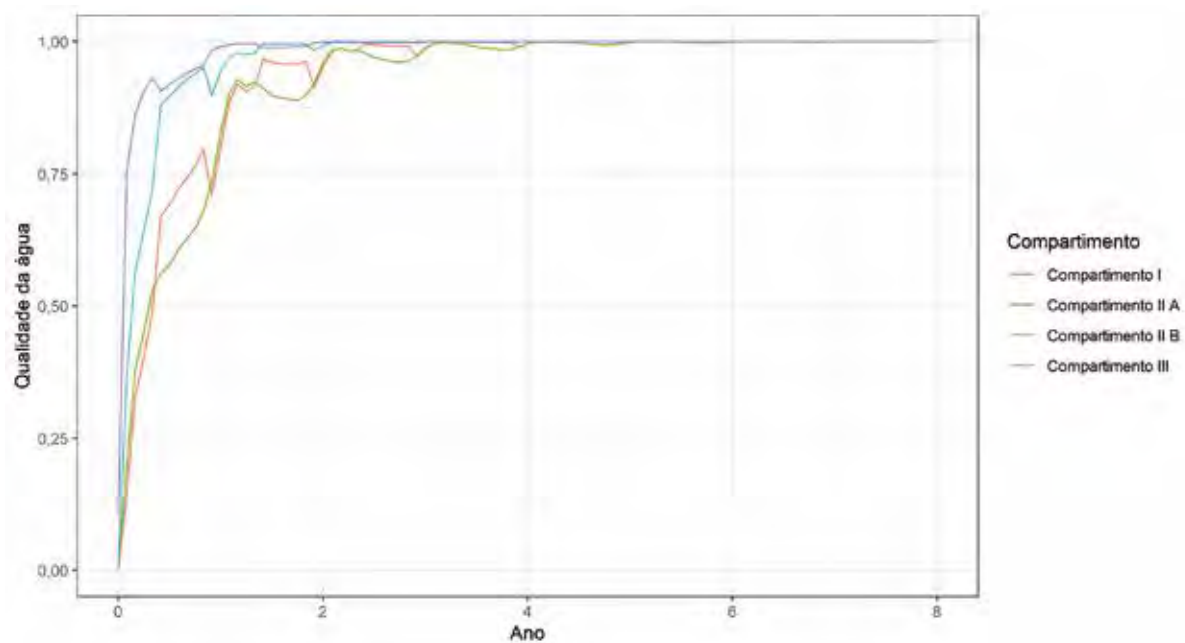
¹¹ Equivalente a uma turbidez de 10 UNT e 100 UNT na linha base, respectivamente.

Figura 42 – Gráfico de exemplo do deslocamento da curva de permanência



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 43 – Curva de Recuperação da Qualidade da Água (%)



Fonte: Lactec, 2021.

Após a construção dessa curva de recuperação da qualidade da água, foi então possível mensurar a quantidade de água em metros cúbicos recuperados e não recuperados, considerando os anos até o alcance da linha-base. Mais adiante, será detalhado esse processo.

4.3.3.3 Cálculo da Perda Interina: quantidade de água (m³) afetada pelo desastre

A partir dos resultados dos modelos de predição da turbidez e das curvas de recuperação da qualidade da água, incluindo o tempo de recuperação, o quantitativo de água afetada foi calculado a partir de várias etapas, conforme descritas a seguir:

- Multiplicada a vazão pelo total de segundos do mês, para obter o total aproximado de quantidade de água mensal no rio Doce, no respectivo compartimento;
- Realizada a correção da quantidade de água mensurada no compartimento em relação ao compartimento anterior, isto é, descontar a água do compartimento anterior, a fim de não calcular o mesmo recurso mais de uma vez;
- Multiplicada essa quantidade de água mensal ajustada, pelo valor em decimal do índice de qualidade da água, obtendo assim a diferença entre o quantitativo de água já recuperada e o quantitativo de água ainda afetada pelo rejeito (não recuperada);
- Ao fazer esses cálculos mensalmente, tem-se uma série de valores de água recuperada e água afetada, sendo que a série de água afetada foi a utilizada no método, e submetida ao desconto temporal, isto é, cada valor de cada respectivo mês foi trazido a valor presente, para o ano de 2015, pelo fator de desconto (8% ao ano)¹²;
- Somatório dos valores de água afetada descontada, a fim de obter o quantitativo total de água afetada no tempo, pelo desastre, isto é, a perda interina.

No Apêndice F estão as tabelas de dados com os valores calculados conforme explicados nesta listagem.

No total, foram elaborados 15 cenários, utilizando-se de diferentes análises entre eles, como por exemplo, o uso de diferentes vazões, vazão média, vazão moda, vazão observada. Em alguns dos cenários essas vazões eram fixadas como se fossem permanentes, eliminando o efeito sazonal de cheias e secas do rio, e em outros era mantida a variação respeitando as mudanças de vazão ao longo dos meses, como foi o caso do uso da vazão mensal observada.

A construção de diversos cenários permitiu a obtenção de vários valores de perda descontada de água no tempo, promovido pelo desastre, e que variaram de 3.195.002.318,14 m³ até 23.639.693.020,17 m³.

O valor de perda descontada obtida pelo cenário selecionado como o mais adequado para ser considerado como o número final da perda de recursos hídricos ocasionado pelo desastre é de 4.927.090.939,28 m³. Este valor representa a perda interina, o quantitativo total de água em m³ que foi afetada pelo rejeito, considerando o tempo de permanência do dano em cada compartimento, ou seja, até o retorno a linha-base, e trazidos ao tempo presente, isto é, descontado.

¹² Acrescenta-se que a quantidade de água afetada pelo rejeito passa a ser contabilizada apenas 30 dias depois do desastre, ou seja, a partir do segundo mês. Isto porque, as mensurações de turbidez ocorrem mensalmente, logo para que toda a água existente no compartimento avaliado no rio Doce naquele mês seja afetada pelo rejeito, é necessário considerar um horizonte temporal para que o material afete toda água ali existente, isso não poderia ocorrer instantaneamente no momento do desastre, por isso a contabilização da água afetada só pode ser contabilidade após 30 dias de ocorrência do desastre, pois a partir desse período é factível assumir que toda a água do compartimento foi prejudicada.

Esse cenário foi escolhido devido ao grupo de análises que foram realizadas e os aspectos considerados, o que o tornou mais condizente com a realidade do rio Doce. Para a construção deste cenário, utilizou-se:

- **Vazão mensal observada:** Do mesmo modo que os valores de turbidez possuem um vasto banco de dados de monitoramento, a vazão também apresenta a mesma vantagem. Por isso, foi possível utilizar o dado de vazão mensal observada de cada mês considerando o período 05/11/2015 até 05/12/2019, pois foi o período definido pela equipe como o horizonte temporal para uso de dados secundários, visto que a valoração se iniciou em setembro de 2019. Para os períodos posteriores a dezembro de 2019, a vazão utilizada foi a média histórica mensal, ou seja, a média histórica da vazão observada de cada mês. A partir destas vazões, foi estimada a quantidade de água mensal do rio Doce, subdividido por compartimento. A escolha de se trabalhar com a vazão mensal é que a mesma permite adicionar a sazonalidade na análise, tendo em vista que a cada mês a vazão se altera. Além disso, permite também que o rio seja avaliado mediante ao seu fluxo natural, realidade dinâmica, ao invés de uma realidade estática, o que aproxima a avaliação dos efeitos e tendências naturais do ambiente.
- **Quantidade de água ponderada pela área de drenagem:** Ficou evidente que não realizar nenhum desconto da quantidade de água entre os compartimentos, causaria uma sobreposição nos cálculos. Assim, a melhor forma de fazer esse ajuste foi considerando a área de drenagem entre os compartimentos. Esta área compreende a área onde devido ao relevo geográfico, a água da chuva escorre para um rio principal e seus afluentes, trata-se desse modo da área de contribuição a montante do ponto de interesse. Desse modo, para realizar o desconto entre os compartimentos foi calculada a área de drenagem de cada um deles em quilômetros quadrados. Cada área de drenagem calculada para cada compartimento foi dividida pela área de drenagem total de todos os 4 compartimentos somados, o gerou os números decimais entre 0,1090 até 0,1050 (Tabela 33). Esses valores foram utilizados como um peso da seguinte forma: No compartimento I não foi necessário deduzir nenhuma quantidade de água, pois é o primeiro compartimento, onde se iniciam os cálculos da perda. A partir do compartimento IIA o desconto na quantidade de água a montante, isto é, a água que vem do compartimento I para o IIA, precisou ser aplicado, a fim de evitar contabilizar a “mesma” água mais de uma vez. Para tanto, a área de drenagem do compartimento I (0,1090) foi utilizada, multiplicando a mesma pela quantidade de água total existente no compartimento IIA, obtendo assim a quantidade de água que veio do compartimento I, e esse quantitativo foi deduzido do compartimento IIA, diminuindo a quantidade de água total considerada. A mesma lógica foi utilizada para os demais compartimentos, no entanto, de forma acumulada, ou seja, no compartimento IIB a área de drenagem considerou tanto o compartimento I quanto o IIA, por isso foi utilizado o peso acumulado de 0,4568, e no compartimento III foi utilizado o peso acumulado de 0,8950 pois ele considera a área de drenagem de todos os compartimentos anteriores. Este último peso acumulado (0,8950) não totaliza 1, pois ainda resta a área de drenagem do próprio compartimento III (0,1050) que não é deduzida, pois pertence ao próprio compartimento III e deve ser contabilizado no quantitativo de água ali considerado.

Tabela 33 – Área de Drenagem dos Compartimentos do Rio Doce

Compartimentos	Área de drenagem em km ²	Peso	Peso Acumulado
Compartimento I	9.141,8	0,1090	-
Compartimento IIA	29.169,20	0,3478	0,1090
Compartimento IIB	36.748,40	0,4382	0,4568
Compartimento III	8.803,40	0,1050	0,8950
Total	83.862,80	-	-

Fonte: Lactec, 2021.

A Tabela 34 exibe o quantitativo de perda descontada por compartimento, e o valor total sendo este o somatório de todos os compartimentos.

Tabela 34 – Valores de perda descontada da água, por compartimento, recuperação natural

Compartimento	Valor total descontado da perda de água (m ³)
COMPARTIMENTO I	961.908.474,14
COMPARTIMENTO II A	2.328.669.362,41
COMPARTIMENTO II B	1.507.526.306,07
COMPARTIMENTO III	128.986.796,67
Total dos compartimentos (Perda interina descontada)	4.927.090.939,28

Fonte: Lactec, 2021.

Já a Figura 44 mostra em gráfico a série de valores da quantidade de água descontada afetada pelo desastre. Percebe-se que os números decrescem com o tempo, o que mostra que a parcela de quantidade de água com redução da qualidade vai diminuindo temporalmente, como resultado da recuperação natural do rio.

No entanto, cabe ressaltar que esta melhoria estimada no tempo, considera apenas o comportamento previsto matematicamente para a turbidez, que é apenas um dos parâmetros de qualidade da água. A melhora aqui apresentada não exclui outros efeitos negativos e danos oriundos do desastre e que ainda podem estar atuando nesse habitat, haja vista que o rejeito ainda permanece no leito do rio e eventualmente, devido ao aumento de chuvas e consequentemente da vazão, podem causar piora na qualidade da água, que mesmo que temporários, ainda assim são prejuízos que tem como origem o rompimento da barragem. Além disso, há também a presença constante dos elementos químicos oriundos do rejeito no leito do rio, que pode levar a disponibilização dos mesmos na coluna d'água, diante de uma variação das características físico-químicas do corpo hídrico (alteração do pH, potencial redox, oxigênio dissolvido, incidência de chuvas e outros).

Figura 44 – Quantidade de perda descontada de água afetada pelo desastre em metros cúbicos



Fonte: Lactec, 2021.

4.3.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO EXTERNA

Relembra-se que as ações de recuperação externa se referem a intervenções humanas, que visam por meio de ações e atividades estabelecidas por projetos acelerar o processo de recuperação, isto é, retornar para a sociedade o habitat/recurso perdido em um horizonte temporal mais curto. Essa modalidade de recuperação tem como critério a condição de não gerar outros danos ao habitat, ou seja, não pode haver outros efeitos colaterais que também gerem perdas de habitat/recurso para a sociedade.

No processo de avaliação de possíveis projetos a serem implementados, a fim de acelerar o processo de recuperação do rio Doce, percebeu-se que não há um modo de promover uma recuperação mais rápida e eficiente que a própria recuperação natural.

Duas opções de intervenção foram discutidas: a retirada do rejeito no leito do rio por meio de dragagem e a instalação de Estações de Tratamento de Água Fluvial (ETAfs) ao longo do rio Doce, a fim de realizar a filtragem direta da água do rio e retornar uma água mais limpa para o habitat. Ambas as opções se mostram inviáveis para serem consideradas como recuperação externa.

No caso da retirada do rejeito pela dragagem, considera-se que promover tal ação gerará outros efeitos negativos ao habitat rio Doce, não apenas na ressuspensão do rejeito e mais um ciclo de intenso aumento da turbidez na água e disponibilização de EPTs, como também os efeitos da dragagem sobre o ecossistema como um todo. Além disso, há a questão do resíduo resultante da ação, que deverá ser conduzido para local adequado, afetando um novo ambiente. Entre outros fatores estariam relacionadas também questões técnicas para a viabilização da dragagem ao longo da considerável extensão do rio Doce bem como sua real eficiência de remoção, o elevado tempo necessário para cumprir o objetivo, o aumento do tráfego de caminhões nas regiões impactadas, e que na prática os rejeitos já se encontram misturados com os sedimentos de fundo do leito dos rios, o que elevaria a quantidade de material bem como o tempo para a sua dragagem.

Com relação a instalação de ETAfs, o modo de funcionamento dessas estruturas não garante uma capacidade de retirada de rejeito na magnitude necessária para acelerar o processo de recuperação, e

que ao mesmo tempo justifique o investimento financeiro. Além disso, há o mesmo entrave identificado na opção da dragagem em relação ao destino do rejeito retirado pela infraestrutura.

Diante dessas questões, percebeu-se que o processo de recuperação natural é o processo mais eficiente e sem novos efeitos colaterais ao habitat. Por isso, considerou-se que para o rio Doce, não existe recuperação externa, não há ações e projetos que acelerem o processo de recuperação suficiente para justificar o investimento e sem a geração de danos adicionais. Posto isso, a quantidade de água afetada no tempo e devida em decorrência ao desastre, será totalmente compensada.

A compensação será feita por meio da universalização do saneamento básico preconizada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) no documento Atlas Esgotos: despoluição de bacias hidrográficas (ANA, 2017). O objetivo é mensurar a quantidade de água limpa em metro cúbico por meio do saneamento básico, contabilizando esse benefício gerado até que o mesmo compense todo o volume de água afetado pelo desastre. Os detalhes desse processo estão expostos nos itens subsequentes.

4.3.5 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPENSAÇÃO

A fim de compensar à sociedade a perda interina, optou-se por retirar do rio Doce outro contaminante, já que a possibilidade de retirada do rejeito não é viável, assim preferiu-se pela universalização do sistema de esgotamento sanitário, considerando tanto a população que não é atendida por esse serviço atualmente, como também a população futura. Isto porque, segundo o Atlas Esgoto (ANA, 2017), o elevado déficit na cobertura do esgotamento sanitário no país, tem resultado em uma elevada quantidade de domicílios cujos dejetos são lançados diretamente nos corpos hídricos brasileiros, e se consolidando como uma fonte de contaminação, comprometendo a qualidade da água para diversos usos, afetando a saúde pública e o equilíbrio do meio ambiente. Desta forma, a ação compensatória a ser realizada, a fim de retornar à sociedade a quantidade de água comprometida pelo aporte dos rejeitos de Fundão, a perda interina calculada na etapa anterior, será a implantação do esgotamento sanitário na magnitude que trate o mesmo quantitativo de água mensurada na perda interina.

Cabe lembrar que a gestão das águas no Brasil, instituída pela Lei Federal nº 9.433/1997, se baseia no atendimento ao uso múltiplo das águas e na gestão por bacias hidrográficas, tendo como um de seus objetivos “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”. Para tanto, não se pode pensar apenas na disponibilidade do recurso, mas principalmente na qualidade da sua oferta, por isso, além do abastecimento, devem ser considerados os demais componentes do saneamento, em especial aqueles relacionados ao controle da poluição hídrica (ANA, 2017).

Por se tratar de um trabalho complexo e que exige um levantamento acurado da situação atual do esgoto, bem como um extenso tempo de realização, optou-se por utilizar o trabalho já realizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) denominado Atlas Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas publicado em 2017. Este trabalho trata da interface entre saneamento e recursos hídricos, com o objetivo de qualificar a tomada de decisão e orientar o desenvolvimento de ações e a aplicação dos recursos financeiros do setor de saneamento com a visão da bacia hidrográfica e do uso sustentável dos recursos hídricos. Assim, este trabalho contempla o diagnóstico do esgotamento

sanitário no Brasil, com dados detalhados por município, com destaque para as implicações na qualidade dos corpos d'água receptores, os investimentos necessários de tratamento e a proposta de diretrizes e estratégia integrada para a realização das ações (ANA, 2017).

O levantamento de dados realizado pelo Atlas, permitiu a caracterização dos sistemas de esgotamento sanitário a partir das informações coletadas em visitas de campo e reuniões técnicas, abrangendo 3.005 municípios e de dados secundários dos demais 2.565 municípios. Essas informações foram organizadas em um banco de dados. O levantamento ocorreu mediante a separação entre os municípios que seriam visitados para coleta de dados *in loco* (Grupo 1), e municípios cujas informações seriam coletadas via dados secundários (Grupo 2). Para tanto, o Grupo 2 foi formado por municípios com população inferior a 50.000 habitantes, cujas fontes de coleta foram o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS e estudos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, incluindo o Censo Demográfico de 2010, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB de 2000 e de 2008 e a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD de 2001 a 2011. O Grupo 1 reuniu os municípios com prestador de serviço institucionalizado (companhias estaduais, autarquias municipais e concessionárias privadas) e/ou municípios com população superior a 50.000 habitantes. O refinamento das informações por meio do levantamento de dados primários para o Grupo 1, que concentra a maior parcela da população urbana, permitiu caracterizar a situação do esgotamento sanitário e dos corpos receptores nesses municípios para além dos índices de cobertura tradicionalmente utilizados (ANA, 2017).

Desse modo, o Atlas do Esgoto (ANA, 2017) traz a situação do esgotamento sanitário da população urbana por município no ano de 2013, apresentando o quantitativo de pessoas atendidas ou não pelo sistema de esgotamento sanitário, separando aqueles que possuem coleta e tratamento, apenas coleta e sem tratamento, sem coleta e sem tratamento, e aqueles que possuem solução individual. O Atlas também traz a quantidade de esgoto gerado em termos de vazão (litro/segundo) para cada uma dessas modalidades analisadas, a carga orgânica de esgoto gerada, em KgDBO/dia, em cada modalidade, o índice de atendimento em percentual também para cada modalidade, a população urbana existente no referido ano, e por fim, o atlas mensura o investimento necessário para a universalização do esgoto até o ano de 2035. Esta universalização considera tanto os domicílios em 2013 que precisam do atendimento, ou seja, o aumento da cobertura de saneamento para aqueles que no tempo presente considerado não possuem tal serviço, quanto o aumento dessa cobertura no tempo, devido ao aumento do esgoto gerado pelo crescimento anual da população.

A lei do saneamento básico (Lei Federal nº 11.445/2007) engloba uma série de diretrizes essenciais para essa integração, e considera a bacia hidrográfica como unidade de referência para o planejamento das ações (ANA, 2017). Por esta razão, e também pelo fato de o rio Doce ser a área afetada pelo desastre, optou por delimitar geograficamente a ação compensatória na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), a fim de garantir que esta seja a área prioritária para receber as ações compensatórias e todos os benefícios ambientais gerados por ela.

A partir da base de dados do atlas foi possível mensurar a quantidade de esgoto gerado na BHRD e que não é destinado da forma correta, considerando o período entre 2013 e 2035. Essa quantidade de esgoto é medida em metro cúbico (mesma métrica usada na mensuração da perda interina), a fim

de contabilizar o total de esgotamento sanitário a ser coletado e tratado. O quantitativo final obtido representa o quanto que é possível compensar em termos de tratamento de esgoto, considerando os municípios pertencentes a Bacia do Rio Doce e comparar esse quantitativo com o volume de água, em m^3 , devida à sociedade em decorrência do desastre.

Antes de detalhar o processo de cálculo realizado, é necessário esclarecer que há três modalidades de não atendimento consideradas, e que a mensuração é feita separadamente para cada uma, para no fim somar os três resultados. Estas modalidades são:

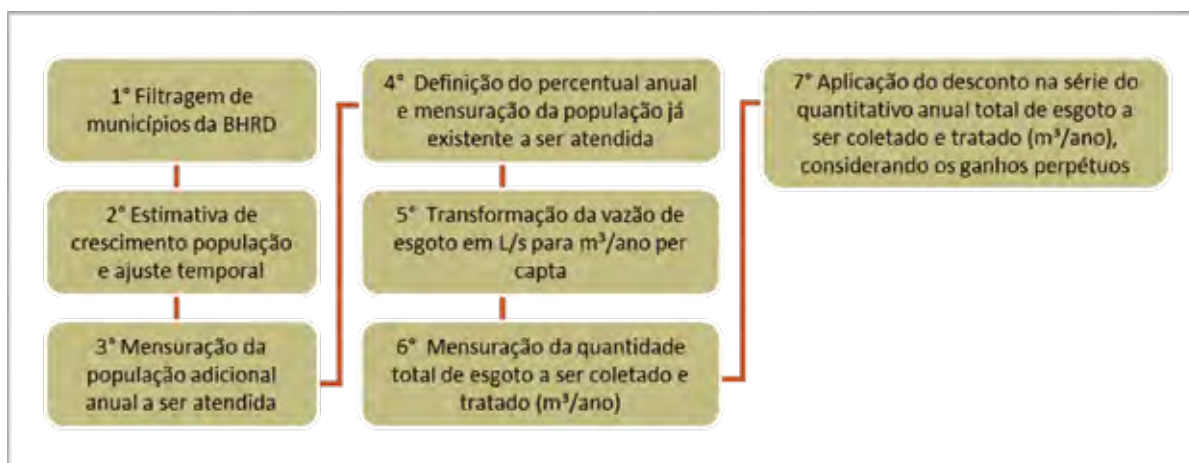
- Esgotamento sanitário sem coleta e sem tratamento adicional devido ao incremento populacional;
- Esgotamento sanitário sem coleta e sem tratamento da população atual (2013); e
- Esgotamento sanitário com coleta e sem tratamento da população atual (2013).

Cabe esclarecer que o levantamento feito pelo Atlas em 2013 identificou inúmeros domicílios sem a destinação adequada do esgoto doméstico. Isto significa que, a ampliação planejada pelo Atlas envolve não apenas a população futura, mas a população presente ainda não atendida. Por isso, é feita a separação entre o esgoto a ser coletado e tratado adicional, pois este representa apenas o quantitativo de esgoto futuro que virá a existir conforme a evolução populacional, e as outras duas modalidades se referem a quantidade de esgoto presente (2013) não destinado corretamente (sem coleta e sem tratamento, e com coleta e sem tratamento) (ANA, 2017).

Ressalta-se também que o esgoto tratado nesta compensação se refere apenas ao esgoto doméstico. Não estão inclusos nessa análise resíduos oriundos de atividades industriais e outras modalidades correlatas que podem ter outros elementos, como por exemplo, metais pesados. Adiciona-se que a tecnologia utilizada no país para tratamento de esgoto se concentra, primordialmente, na remoção de matéria orgânica, o que representa dizer que outros elementos químicos não são removidos de forma eficiente pela tecnologia convencional de saneamento doméstico empregada.

Finalmente, com o objetivo de tornar claro os passos dessa mensuração, o processo de cálculo é exposto de forma sistêmica na Figura 45, sendo cada etapa detalhada na sequência.

Figura 45 – Etapas seguidas para a mensuração da quantidade de esgoto tratado pela compensação por esgotamento sanitário na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.



Fonte: Lactec, 2021.

4.3.5.3.1 1ª Etapa: Filtragem de municípios da BHRD na planilha de base de dados do Atlas:

A base de dados do Atlas do Esgoto traz todos os municípios brasileiros, logo foi necessário filtrar na planilha os municípios pertencentes à Bacia do Rio Doce. A BHRD possui 230 municípios sendo 202 localizados em Minas Gerais e 28 no Espírito Santo. Esta filtragem garantiu que os dados utilizados e trabalhados sejam oriundos apenas da bacia impactada pelo desastre da barragem de Fundão.

4.3.5.3.2 2ª Etapa: Estimativa de crescimento anual da população e ajuste temporal da análise, por município:

Conforme já abordado anteriormente, o período analisado pelo Atlas é de 2013 a 2035. A estimativa futura da população urbana está pautada no crescimento populacional observado nos últimos censos demográficos, bem como o grau de urbanização do censo demográfico de 2010. Desta forma o Atlas a partir da população urbana de 2013 estimou a população urbana esperada para 2035, sendo esta última o período final de análise do estudo, contemplando um horizonte temporal de 22 anos.

No entanto, para a presente valoração, o período a ser analisado precisa iniciar a partir de 2022, pois é esse o ano considerado como o ano de início da geração dos benefícios da compensação. Diante disso, houve a necessidade de extrapolar a população urbana até 2044, e considerar para os demais cálculos o quantitativo populacional obtido entre 2022 e 2044.

Para fins de simplificação, dado que a informação não está disponível, foi considerado que entre os anos 2013 até 2022, nenhuma das projeções de ampliação do serviço feita pelo Atlas ocorreu. Para extrapolar a população urbana anualmente foi aplicado a fórmula que calcula a taxa de crescimento populacional anual, por município, conforme equação:

$$\text{taxa de crescimento populacional anual} = \left(\left(\frac{pf}{pi} \right)^{(1/t)} - 1 \right) * 100$$

Onde: pf = população do ano final; pi= população do ano inicial; t= período de anos considerado.

Ao obter a taxa por município, multiplicou-se a mesma pela população dos anos seguintes considerados, conforme equação abaixo:

$$\text{populacional estimada} = pa + (pa * (tx/100))$$

Onde: pa = população do ano anterior; tx= taxa de crescimento populacional anual.

Com base nesta última fórmula, foi estimada a população urbana a partir de 2014 até 2044, obtendo assim uma série anual do comportamento da população nesse período. Esta série traz o quantitativo total de indivíduos residentes na área urbana anualmente de cada município.

Nesta segunda etapa, até aqui, o que foi descrito foi utilizado para os cálculos das 3 modalidades de não atendimento. É o uso dado a essa série populacional, que se altera conforme a modalidade calculada, cujas diferenças estão descritas no tópico a seguir.

4.3.5.3.3 3ª Etapa: Mensuração da população anual a ser atendida, por município.

- População adicional, modalidade sem coleta e sem tratamento

Para a mensuração da população adicional futura a nascer, considerou-se as metas de atendimento determinadas pelo Atlas. Segundo esse documento, é previsto como universalização do serviço, o alcance da meta entre 90% e 100% de Índice de Atendimento com Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) até 2035, considerado a possibilidade de haver entre 0,1% e 10% de solução individual (como fossas sépticas). Para cada município o índice de atendimento foi determinado conforme a análise do estudo. Logo, para se estimar a população adicional a ser atendida anualmente, a partir de 2022, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$\text{População adicional a ser atendida} = (\text{pc} - \text{pa}) * \text{iat}$$

Onde: pc = população do ano corrente avaliado; pa = população do ano anterior; iat = Índice de Atendimento com Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).

Desta forma obtêm-se a população adicional a ser atendida anualmente considerando o período entre 2022 e 2044.

- População atual, modalidade sem coleta e sem tratamento

Para a modalidade sem coleta e sem tratamento da população atual existente que não é atendida por esse serviço, os dados da população urbana total estimada, foram utilizados para estimar a população urbana sem coleta e sem tratamento já existente no ano de 2022. O Atlas traz índice sem coleta e sem tratamento do ano de 2013, como premissa, assumimos que tal índice não se alterou desde a publicação do estudo. Logo, para saber quantos indivíduos em 2022 não eram atendidos pelo serviço esgotamento sanitário, bastou aplicar a seguinte fórmula:

$$\text{populacional urbana sem coleta e sem tratamento 2022} = (\text{pt}_{2022}) * \text{isct}_{2013}$$

Onde: pt = população urbana de 2022; isct = Índice sem coleta e sem tratamento do ano de 2013.

Utilizou-se tal resultado para estimar a quantidade de esgoto a ser coletada e tratada, a ser explicada mais adiante.

- População atual, modalidade com coleta e sem tratamento

Do mesmo modo foi feito para a modalidade com coleta e sem tratamento. O Atlas identificou domicílios cujos dejetos eram coletados, porém eram destinados a corpos hídricos sem passarem por tratamento adequado. O estudo também trouxe o Índice sem atendimento - com coleta e sem tratamento do ano de 2013, cuja premissa utilizada foi a mesma, sem alteração desde a publicação do documento. Para saber quantos indivíduos em 2022 possui o esgoto coletado, mas não tratado, bastou aplicar a seguinte fórmula:

$$\text{populacional urbana com coleta e sem tratamento 2022} = (\text{pt}_{2022}) * \text{iccst}_{2013}$$

Onde: pt = população total de 2022; iccst = Índice com coleta e sem tratamento do ano de 2013.

Utilizou-se tal resultado para estimar a quantidade de esgoto a ser tratada, explicada adiante.

4.3.5.3.4 4ª Definição do percentual anual e mensuração da população urbana sem coleta e sem tratamento e com coleta e sem tratamento, a ser atendida em 5 anos, por município

Diante da existência de um quantitativo de pessoas sem atendimento adequado em 2022, conforme estimativas já calculadas, identifica-se que, para este público a ampliação do atendimento é emergencial. Devido a magnitude deste público, não é viável deduzir que, em um único ano a ampliação do esgotamento sanitário atenderia a todos. Por isso, decidiu-se por escalonar a ampliação deste serviço, para este grupo da população dentro de um horizonte temporal de 5 anos, considerando que a cada ano 20% desta população seria atendida, obtendo assim uma série de valores de 5 anos de ampliação do esgoto gerado por este segmento, por município e o somatório da bacia.

Ressalta-se que os cálculos são feitos de forma desagregada, logo esse público representa o quantitativo de pessoas sem coleta e sem tratamento e com coleta e sem tratamento, já existentes em 2022, e é esse quantitativo fixo, da população já existente, que vai sendo atendido ao longo dos próximos 5 anos. Deste modo, esses valores não se misturam ao cálculo da população adicional a ser atendida conforme aumento da população urbana.

A população urbana total das modalidades de não atendimento e a evolução da expansão anual do atendimento desta população estão expostos na Tabela 97 e nas Figura 46 e Figura 47.

Tabela 35 – Quantidade total da população urbana existente em 2022 na BHRD, enquadrada nas modalidades de não atendimento e que deverão ser atendidas em 5 anos.

Segmento populacional urbano da modalidade não atendimento	População urbana em 2022
Total da população urbana sem coleta e sem tratamento (2022) na BHRD	423.387,68
Total da população urbana com coleta e sem tratamento (2022) na BHRD	2.305.326,74

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 46 – Evolução da ampliação do esgotamento sanitário da população sem coleta e sem tratamento, no período de 5 anos, considerando 20% de expansão anual.



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 47 – Evolução da ampliação do esgotamento sanitário da população com coleta e sem tratamento, no período de 5 anos, considerando 20% de expansão anual.



Fonte: Lactec, 2021.

4.3.5.3.5 5ª Transformação da vazão de esgoto gerado, em litro por segundo (L/s) para metro cúbico ao ano (m³/ano) per capita, por município.

O Atlas do Esgoto traz em seu banco de dados a vazão em L/s do esgoto gerado pela população sem coleta e sem tratamento e com coleta e sem tratamento. A fim de obter a quantidade de esgoto gerado em metro cúbico¹³ anual per capita, foram feitos cálculos para a transformação partindo da vazão em L/s, para tanto seguiu-se os seguintes passos:

1º Multiplicar a vazão litro por segundo de 2013 (VI/s_{2013}) pelo total de segundos no mês (S_{mes}), obtendo assim a vazão litro por mês de esgoto gerado em 2013 (VI/m_{2013});

$$VI/m_{2013} = VI/s_{2013} * S_{mes}$$

2º Multiplicar a vazão litro por mês de 2013 (VI/m_{2013}) por doze para obter a vazão litro anual de esgoto gerado em 2013 (VI/a_{2013});

$$VI/a_{2013} = VI/m_{2013} * 12$$

3º Partindo dos valores em litros por ano, dividiu-se por mil para obter a unidade metro cúbico por ano, e posteriormente dividiu-se a vazão metro cúbico por ano pela população urbana obtendo a vazão anual em metro cúbico por habitat no ano 2013 ($Vm^3/hab.ano_{2013}$)

Para fins de simplificação, pois não está disponível a evolução deste dado no tempo, utilizou-se o valor da vazão metro cúbico por ano em 2013 per capita ($Vm^3/hab.ano_{2013}$) como parâmetro fixo para estimar a quantidade total de esgoto gerado pela população ao longo do tempo, por cada município pertencente à bacia do rio Doce.

Tal procedimento foi feito para as três modalidades de não atendimento, sendo que a vazão metro cúbico por ano em 2013 per capita ($Vm^3/hab.ano_{2013}$) do esgoto gerado pela população sem coleta e sem atendimento é utilizada nos cálculos tanto para a população adicional quanto para a população carente deste serviço já existente em 2022, e a $Vm^3/hab.ano_{2013}$ do esgoto gerado pela população com coleta e sem atendimento é utilizada nos cálculos apenas para a população carente deste segmento já existente em 2022.

¹³ A necessidade de transformar a unidade de medida de litros para metros cúbicos, é devido a unidade de medida da perda interina que também é metros cúbicos. Logo, a quantidade de esgoto tratado deverá representar a mesma quantidade de água afetada pelo desastre perdida pela sociedade ao longo do tempo (perda interina), ou seja, a mesma métrica.

4.3.5.3.6 6ª Mensuração da quantidade total de esgoto gerado a ser coletado e tratado em m³/ano, por município e somatório de todos os valores para obter total da bacia:

Após a obtenção da $Vm^3/hab.ano_{2013}$, o próximo passo foi estimar a quantidade de esgoto total, em cada uma das modalidades de não atendimento, que a população a ser atendida tanto no presente quanto no futuro, gera e deverá ser destinado de maneira correta. Para tanto, em cada uma das modalidades o procedimento de cálculo foi o mesmo: multiplicar a vazão per capita pela população a ser atendida do presente e no futuro, ou seja, anualmente, conforme será explicado separadamente.

- População adicional, modalidade sem coleta e sem tratamento

A população adicional a ser atendida é aquela que se refere ao acréscimo da população com base na taxa de crescimento anual (conforme já explicado na etapa 2). Para conhecer a quantidade de esgoto total gerado por essa população por ano, foi multiplicada a vazão $Vm^3/hab.ano_{2013}$ da modalidade sem coleta e sem tratamento pela população adicional referida de cada ano, considerando o período de 2022 e 2044. Após a multiplicação de cada ano para cada município, realizou o somatório de todos os valores, obtendo a quantidade de esgoto adicional sem coleta e sem tratamento da BHRD, por ano, que deverá ser atendido até 2044 por meio dos investimentos que visam solucionar tal problema. A Figura 48 traz esse quantitativo total da bacia.

Figura 48 – Quantidade total de esgoto adicional, em m³/ano, gerado pela população adicional durante o período de 2022 e 2044, na Bacia Hidrográfica do Rio Doce.



Fonte: Lactec, 2021.

- População atual, modalidade sem coleta e sem tratamento

No caso da população já existente em 2022 e que era carente de esgotamento sanitário por não ter coleta e nem tratamento, a quantidade de esgoto total gerado por essa população por ano, foi multiplicada pela vazão $Vm^3/hab.ano_{2013}$ da modalidade sem coleta e sem tratamento pela população a cada ano, a ser atendida no horizonte temporal de 5 anos, que reflete o avanço anual de 20% da ampliação da cobertura, mostrada na etapa 4, ou seja, considerando o período de 2022 e 2026. A Figura 49 traz o quantitativo total de esgoto gerado a ser atendido na bacia para esta segmentação.

Figura 49 – Quantidade total de esgoto em m³/ano, gerado pela população urbana já existente em 2022 na BHRD, que não possui coleta e nem tratamento, durante o período de 2022 e 2026.



Fonte: Lactec, 2021.

- População atual, modalidade com coleta e sem tratamento

Do mesmo modo, a população já existente em 2022 e que possui coleta e não possui tratamento, a quantidade de esgoto total gerado por essa população por ano, foi multiplicada pela vazão Vm³/hab.ano₂₀₁₃ da modalidade com coleta e sem tratamento, considerando a população a ser atendida no horizonte temporal de 5 anos (período de 2022 e 2026), refletindo o avanço anual de 20%, conforme mostrado na etapa 4. A Figura 50 traz o quantitativo total de esgoto gerado a ser atendido na bacia para esta segmentação.

Figura 50 – Quantidade total de esgoto em m³/ano, gerado pela população urbana já existente em 2022 na BHRD, que possui coleta, mas não possui tratamento, durante o período de 2022 e 2026.



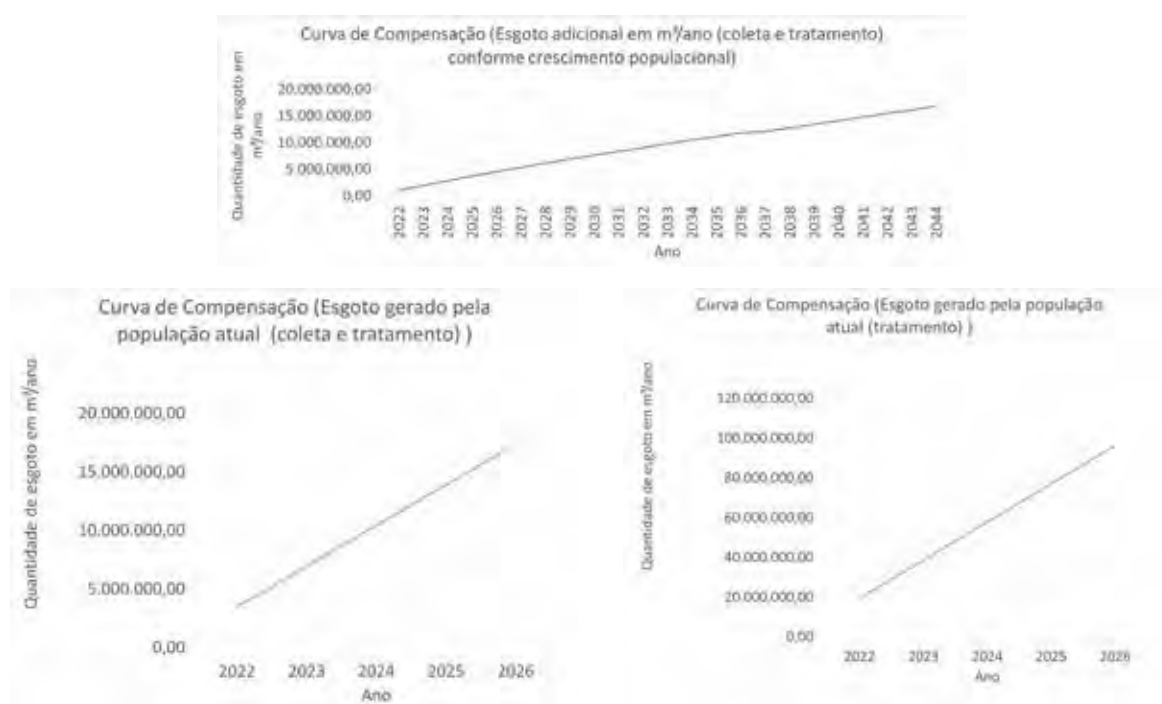
Fonte: Lactec, 2021.

4.3.5.3.7 7ª Aplicação do desconto na série do somatório anual da quantidade total de esgoto gerado, considerando os ganhos perpétuos, e obtendo o somatório descontado dos benefícios obtidos:

Após obter o quantitativo total de esgoto gerado na bacia do rio Doce, sem a destinação correta, em m³/ano, aplica-se sobre esse quantitativo a taxa de desconto social (8% ao ano) obtendo a série descontada, sendo que no último valor descontado é adicionada a perpetuidade, dado que os benefícios gerados continuarão a gerar ganhos para a sociedade. Esta série reflete a quantidade de esgoto que passará a ser coletado e tratado como resultado dos investimentos em saneamento básico, sendo esse quantitativo os ganhos ambientais obtidos como compensação à degradação ocasionada a água do rio Doce, devido ao desastre da barragem de Fundão.

Pra fins de representação as curvas de compensação do dano por meio da promoção do esgotamento sanitário são expostas na Figura 51, na qual exibe as quantidades de esgoto em m³/ano gerado sem desconto.

Figura 51 – Curvas de compensação da quantidade de esgoto em m³/ano, gerado pela população urbana na BHRD, durante o período de 2022 e 2044, a ser coletado e tratado após investimentos em esgotamento sanitário.



Fonte: Lactec, 2020.

A Tabela 36 traz os valores apresentados na Figura 51 descontados e considerando a perpetuidade no final da série de valores de cada modalidade analisada.

Tabela 36 – Benefício promovido pela compensação: Esgoto gerado em m³/ano nas três modalidades de não atendimento a ser atendido pelos investimentos em esgotamento sanitário, após aplicação da taxa de desconto social (valores descontados).

Ano	Esgoto coletado e tratado gerado pela população adicional (Descontado)	Esgoto coletado e tratado gerado pela população atual de 2022 sendo atendido em 5 anos (Descontado)	Esgoto tratado gerado pela população atual de 2022 sendo atendido em 5 anos (Descontado)	Total (Descontado)
2022	568.608,27	2.028.818,30	11.232.080,26	13.829.506,83
2023	1.030.400,64	3.757.070,92	20.800.148,64	25.587.620,20
2024	1.402.030,95	5.218.154,05	28.889.095,33	35.509.280,33
2025	1.697.609,46	6.442.165,50	35.665.549,79	43.805.324,75
2026	1.929.098,00	93.202.625,83	515.994.643,95	611.126.367,78
2027	2.106.642,40			2.106.642,40
2028	2.238.852,43			2.238.852,43
2029	2.333.037,50			2.333.037,50
2030	2.395.405,41			2.395.405,41
2031	2.431.229,91			2.431.229,91

Ano	Esgoto coletado e tratado gerado pela população adicional (Descontado)	Esgoto coletado e tratado gerado pela população atual de 2022 sendo atendido em 5 anos (Descontado)	Esgoto tratado gerado pela população atual de 2022 sendo atendido em 5 anos (Descontado)	Total (Descontado)
2032	2.444.992,23			2.444.992,23
2033	2.440.500,56			2.440.500,56
2034	2.420.991,03			2.420.991,03
2035	2.389.213,23			2.389.213,23
2036	2.347.502,52			2.347.502,52
2037	2.212.876,47			2.212.876,47
2038	2.167.082,14			2.167.082,14
2039	2.114.996,05			2.114.996,05
2040	2.058.050,35			2.058.050,35
2041	1.997.453,20			1.997.453,20
2042	1.934.222,09			1.934.222,09
2043	1.869.212,01			1.869.212,01
2044	22.539.242,96			22.539.242,96
TOTAL	67.069.249,82	110.648.834,60	612.581.517,97	790.299.602,39

Fonte: Lactec, 2021.

Desse modo, identifica-se que na BHRD, a implantação do esgotamento sanitário, a fim de atender a população atual, bem como a população futura, que não possui cobertura de coleta e/ou tratamento de esgoto, durante o período entre 2022 e 2044, e considerando a perpetuidade dos benefícios, consegue coletar e tratar o total de 790.299.602,39 m³ de esgoto descontado. Já a perda interina descontada calculada, sendo esta a quantidade de água do rio Doce degradada pelo rejeito da barragem de Fundão, foi de 4.927.090.939,28 m³. A Tabela 37 compara os dois valores, e permite identificar que o esgotamento sanitário em toda a bacia não compensa totalmente a perda interina. Logo, o primeiro caminho considerado foi de ampliar o quantitativo de municípios a serem alvo das ações de expansão do atendimento do serviço de coleta e tratamento de esgoto. Porém, essa expansão até o quantitativo necessário que compensasse totalmente a perda interina, direcionaria investimentos para municípios e bacias distantes do local alvo do desastre. Por isso, optou-se por dividir a perda interina pela quantidade de esgoto coletado e/ou tratado da bacia, obtendo assim a proporção de quantas vezes em que o esgoto tratado na bacia caberia no quantitativo da perda interina, sendo esta 6,23 vezes. Esta proporção será o multiplicador dos custos totais de investimento em esgotamento sanitário na BHRD, representando assim o quantitativo de investimento adicional que deverá ser feito na região além das ações no esgotamento sanitário.

Tabela 37 – Resultados da valoração do dano causado ao rio Doce, devido ao rompimento da barragem de Fundão, pela perspectiva do recurso ambiental, comparação entre o quantitativo de recurso de água perdido (Perda Interina) e a compensação proposta pelo esgotamento sanitário.

Perda Interina (água em m ³ descontada)	4.927.090.939,28
Compensação (esgoto tratado em m ³ descontado)	790.299.602,39
Quantas vezes o esgotamento sanitário da BHRD cabe na perda interina	6,23

Fonte: Lactec, 2021.

4.3.6 TAXA DE EQUIVALÊNCIA DA COMPENSAÇÃO

Relembramos que a taxa de equivalência é a taxa que traduz qualitativamente os benefícios ambientais obtidos pelas ações compensatórias em relação à qualidade ambiental existente antes do desastre. Desse modo, este item apresenta a taxa de equivalência da compensação adotada para o rio Doce, ou seja, as ações compensatórias de universalização do esgotamento sanitário.

A taxa de equivalência que foi definida é igual a 1, ou seja, isso significa que o volume de água limpa oriunda da universalização do esgotamento sanitário é em termos qualitativos igual a água existente no rio Doce antes do dano. Sabe-se, de antemão, que as características físico-químicas da água dos rios atingidos são completamente diferentes da água proveniente do lançamento nos corpos hídricos receptores do esgoto tratado, assim sendo, dentro do viés de qualidade da água, é de fato inviável a definição da taxa de equivalência dentro do espectro físico-químico.

Portanto, considerando que a taxa de equivalência é uma referência para a compensação de danos ambientais não mitigáveis e, conforme citado por Jordão et. al. (2005), o lançamento de efluente doméstico sem tratamento ou com tratamento ineficiente promovem não só a perda de vida aquática, mas também têm efeitos diretos na saúde humana, como o desenvolvimento de diversas doenças. Os ganhos da promoção do esgotamento sanitário trazem benefícios significativos e compensam, de forma justa, os diversos danos ambientais causados pelo aporte de sólidos nos rios atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão. Adicionalmente, cabe destacar que a presença do rejeito no leito do rio Doce será de longo prazo, mas os benefícios do esgotamento sanitário serão perpétuos, haja vista que uma vez implantados, não há limite de tempo para a expiração do seu funcionamento. Portanto, dentro da impossibilidade do estabelecimento técnico de uma taxa de equivalência, definiu-se como coerente, conforme já exposto ao longo desse trabalho, a utilização igualitária entre os volumes de água contaminada com rejeito de mineração e os volumes de efluente doméstico que será compensado via implantação de um sistema de tratamento, adicionando que se trata de uma decisão conservadora, que não promove cobranças adicionais.

4.3.7 DETALHAMENTO DAS AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA OS DANOS CAUSADOS À ÁGUA DO RIO DOCE

Conforme apontado no item que trata da curva de compensação, a ação adotada como compensação é a universalização do esgotamento sanitário na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD). Tal solução já foi elaborada e orçada pela Agência Nacional de Águas (ANA), em parceria com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, que elaborou o ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas, que contempla as soluções de saneamento necessárias para cada município brasileiro, bem como os investimentos financeiros necessários para a realizar tais ações (ANA, 2017). Por ser tratar de um documento amparado por um órgão federal, cujas ações foram elaboradas em um contexto imparcial, sem relação com eventos adversos, bem como por possuir um detalhamento das ações necessárias de acordo com a realidade e necessidade de cada município, e ainda, ser um trabalho finalizado, consolidado e disponibilizado para o público em geral, a equipe técnica da valoração decidiu por utilizar todo o escopo construído e os valores financeiros determinados por esse documento como sendo o processo de compensação a ser realizado para o rio Doce. Posto isto,

este item traz de forma resumida o escopo adotado para a universalização do esgotamento sanitário na BHRD com base no Atlas Esgoto. Se porventura, houver a necessidade de maiores informações e detalhamentos recomenda-se que seja consultado o documento original, ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas publicado em 2017.

O Atlas Esgoto inicia o processo da universalização, partindo do diagnóstico da situação do esgotamento atual em cada município. A geração de esgotos na área urbana está diretamente associada à população, por isso é natural que as capitais e os principais aglomerados urbanos concentrem a maior quantidade dos esgotos gerados, isto justifica o porquê que a universalização do esgoto elaborada pelo Atlas contempla apenas a população urbana (ANA, 2017).

A estimativa da carga de esgotos foi feita com base na Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO¹⁴, usualmente empregado na avaliação de impactos nos corpos receptores e no dimensionamento de processos de tratamento. Nessa estimativa foi considerado o valor “per capita” de 54 g DBO/hab.dia e dados de população urbana obtidos a partir de projeções do IBGE ou fornecidos diretamente pelos prestadores do serviço de esgotamento sanitário de cada município (ANA, 2017).

Os índices de cobertura em termos de coleta e tratamento de esgotos nas áreas urbanas, são insatisfatórios, sendo um passivo histórico, pois apenas 61% da população urbana no país tem rede coletora de esgoto. O destino dos esgotos não coletados é diverso, tais como: fossas sépticas ou negras, lançamento em rede de águas pluviais ou em sarjetas, disposição direta no solo ou nos corpos d’água. Além da coleta, uma avaliação completa da situação do esgotamento sanitário no País exige também a análise dos níveis de eficiência de tratamento, bem como a quantificação das cargas remanescentes dos esgotos com potencial de alcançar os corpos hídricos (ANA, 2017).

A má destinação dos esgotos, principalmente aqueles direcionados para os corpos hídricos sem o adequado tratamento resulta no comprometimento da qualidade da água, e impacta a saúde da população, a condição ambiental do corpo hídrico, e pode até mesmo inviabilizar o abastecimento humano (ANA, 2017).

De modo geral, o tratamento de esgotos sanitários objetiva a redução da matéria orgânica, dos microrganismos patogênicos, dos sólidos em suspensão e, em circunstâncias especiais, dos nutrientes presentes nos esgotos sanitários. Este método não inclui o tratamento de resíduos tóxicos provenientes, por exemplo, de indústrias. A seleção dos processos de tratamento de esgotos está relacionada, dentre outros aspectos, às características do corpo receptor e da legislação vigente. A fim de reduzir os riscos que os efluentes possam gerar à saúde da população ou danos significativos ao meio ambiente, os normativos requerem padrões de qualidade bastante amplos (ANA, 2017).

No País é encontrada uma grande variedade de processos de tratamento, que podem ser agrupados por faixas de eficiência de remoção de carga orgânica, em termos de DBO, da seguinte forma: menor do que 60%, entre 60% e 80%, maior do que 80% e maior do que 80% com possibilidade de remoção de nutrientes (Fósforo e/ou Nitrogênio). A predominância existente no país é a presença de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) com eficiência média de remoção de DBO na faixa de 60 a 80% (ANA, 2017).

14 A DBO é o parâmetro que caracteriza a parcela orgânica dos efluentes provenientes de esgotamento sanitário

Os processos de tratamento podem ser divididos em físicos, biológicos e químicos. Os processos físicos são aqueles que removem materiais grosseiros, sólidos sedimentáveis e materiais flutuantes (óleos, graxas, etc.) através de separações físicas, tais como gradeamento, peneiramento, caixas separadoras, sedimentação e flotação. Em geral são utilizados como tratamento preliminar e/ou parte dos demais processos (ANA, 2017).

Os processos biológicos fazem uso da atividade microbiana para alcançar bons níveis de purificação das águas residuárias. São amplamente utilizados no tratamento de esgotos para a remoção de matéria orgânica e de nutrientes e são derivados de processos aeróbios e anaeróbios que ocorrem na natureza. Os principais processos biológicos para o tratamento de esgotos sanitários são: lagoas de estabilização; sistemas de lodos ativados e variantes; sistemas anaeróbios e sistemas aeróbios com leito fixo (ANA, 2017).

Por fim, o tratamento químico consiste na adição de produtos químicos, associados aos processos biológicos e físicos para maior eficiência, podendo acarretar em aumento significativo do custo operacional (ANA, 2017).

Em resumo, o Atlas conclui que o panorama geral dos serviços de esgotamento sanitário para a população urbana do País está aquém do recomendado, pois 43% da população possui esgoto coletado e tratado e 12% utilizam-se de solução individual, ou seja, 55% da população urbana brasileira é atendida de forma adequada. Além desses, há outros 18% que têm seu esgoto coletado, mas não tratado; e outros 27% que não possuem coleta nem tratamento, ou seja, sem atendimento do serviço de esgotamento sanitário. Essa precariedade do atendimento gera uma parcela da carga total de esgotos que alcança os corpos d'água, sendo ela denominada de carga remanescente (ANA, 2017).

Para a estimativa dessa parcela, a equipe de elaboração do Atlas Esgoto utilizou o balanço de cargas, que compreende a divisão do esgoto gerado considerando suas diferentes formas de destinação, sendo as principais: coleta (com ou sem tratamento), solução individual (fossa séptica) e lançamento a céu aberto ou solução precária (sem coleta e disposição em fossa negra). Estas parcelas estão baseadas nos conceitos apresentados pelo Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB, que subdivide o atendimento em três grupos (ANA, 2017):

- (i) atendimento adequado: aquele suprido por fossa séptica (pressupõe-se a “fossa séptica sucedida por pós-tratamento ou unidade de disposição final, adequadamente projetados e construídos”) ou por rede coletora de esgotos seguida de tratamento;
- (ii) atendimento precário: serviço é ofertado em condições insatisfatórias, potencialmente comprometedoras da saúde humana e da qualidade do meio ambiente;
- (iii) sem atendimento: parcelas que não se enquadram em nenhuma das classes anteriores é considerada como “sem atendimento” (sem coleta e sem tratamento).

A estimativa de cada parcela da carga orgânica associada ao esgoto (expressa na forma de DBO) utilizou dados de população urbana, de cobertura de esgoto, de eficiências de remoção dos processos de tratamento empregados e de população atendida por solução individual (ANA, 2017).

Além dos aspectos já tratados até aqui, o Atlas definiu um indicador que sintetizasse a capacidade de diluição dos esgotos em relação à população das cidades, de forma a subsidiar o planejamento

do tratamento de esgotos. A fim de categorizar o principal corpo receptor de cada sede urbana, em função de seu potencial de diluição dos efluentes sanitários, utilizou-se a relação entre a disponibilidade hídrica e a população urbana residente na área de contribuição de cada corpo receptor. Na distribuição das categorias dessas foram avaliadas faixas de capacidade de diluição dos corpos receptores em função do potencial de atendimento às classes de enquadramento para água doce, prescritas na Resolução CONAMA nº 357/2005, e da remoção de carga orgânica aplicada ao total gerado pela respectiva população urbana da área de contribuição de cada trecho de rio avaliado. Foram delimitadas sete categorias: ilimitada, ótima, boa, regular, ruim, péssima e nula (ANA, 2017).

Após a análise de todos os aspectos necessários sobre a condição atual, utilizou-se tais informações para a elaboração do planejamento da universalização do atendimento do esgotamento sanitário, partindo de 2013 até o horizonte de 2035. A análise dos efeitos dos efluentes sanitários nos corpos hídricos foi elaborada para o horizonte de 2035, com base na população urbana projetada e na premissa da universalização do atendimento dos serviços de esgotamento sanitário. Os níveis de cobertura por rede coletora e tratamento no horizonte 2035 foram considerados iguais ou superiores a 90%, sendo complementados por soluções individuais (fossas sépticas), considerando os mesmos índices de solução individual atualmente observados 10%. Os dados da projeção populacional urbana e da estimativa da respectiva carga orgânica remanescente (expressa em termos de DBO) foram utilizados nessa análise futura do impacto do lançamento dos esgotos nos recursos hídricos (ANA, 2017).

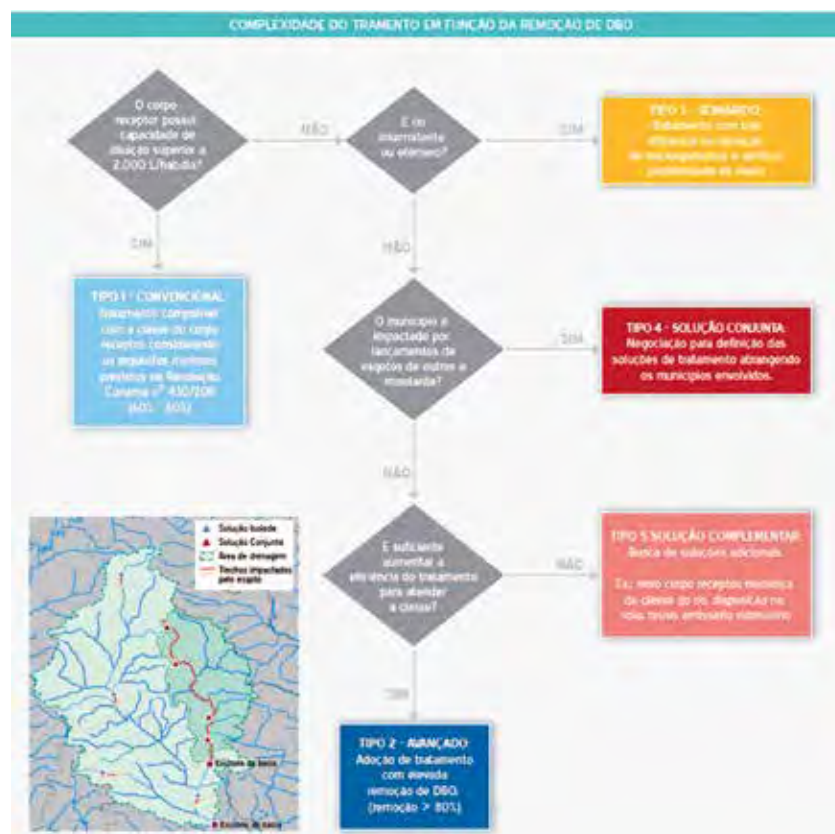
De acordo com Atlas (ANA, 2017), a modelagem de qualidade de água, considerando a interação entre os lançamentos de todas as cidades e utilizando a bacia hidrográfica como unidade de análise, forneceu subsídios para a definição das eficiências requeridas, com base nos limites das classes de enquadramento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. A partir disso, determinou-se, então, a remoção de DBO necessária para cada ETE existente ou prevista a partir do modelo, organizadas por processos convencionais (60 a 80% de eficiência) ou avançados (acima de 80%). Não foram considerados tratamentos com eficiência inferior a 60%, mesmo quando o corpo receptor possuía elevada disponibilidade hídrica. Adicionalmente, a análise foi ampliada contemplando os potenciais efeitos negativos das cargas de Fósforo e de Nitrogênio. Nos casos cuja máxima eficiência de remoção de carga orgânica não foi suficiente para atender às recomendações legais, foram consideradas soluções complementares, como a disposição no solo ou reuso do efluente. Como produto dessas análises os municípios foram organizados por tipologias de soluções para o tratamento e destinação final do efluente, da seguinte forma (ANA, 2017):

- Tipo 1 (Solução com Tratamento Convencional): Município cujo principal corpo receptor possui capacidade hídrica suficiente para diluir os esgotos, mantendo-se as concentrações de DBO dentro dos limites para a classe 2 com tratamento mínimo (remoção entre 60 e 80%).
- Tipo 2 (Solução com Tratamento Avançado): Município cujo principal corpo receptor requer tratamento com elevada remoção de DBO (maior que 80%) para se enquadrar nos requisitos da classe 2. Essa situação ocorre em municípios com corpos receptores com baixa capacidade de diluição para os efluentes lançados, nos quais a solução de ampliação da eficiência de remoção de DBO é suficiente.

- Tipo 3 (Solução para o Semiárido): Município cujo principal corpo receptor é intermitente ou efêmero e está localizado no Semiárido Brasileiro. Além dos requisitos de remoção de DBO, é importante considerar a possibilidade de reuso do efluente tratado e/ou priorizar processos de tratamento que resultem em elevada remoção de microrganismos patogênicos. Outra opção para os municípios localizados no Semiárido é a disposição no solo (subsuperficial ou superficial).
- Tipo 4 (Solução Conjunta): Município cujo principal corpo receptor é impactado por lançamentos de efluentes a montante, exaurindo a capacidade de assimilação do corpo receptor e inviabilizando o lançamento de outros efluentes de jusante. Nesse caso, os níveis de tratamento de esgotos a serem adotados em cada município requerem uma discussão mais ampla, sendo conveniente uma discussão entre os municípios envolvidos de modo a alcançar uma solução conjunta considerando as diferentes capacidades institucionais e financeiras.
- Tipo 5 (Solução Complementar): Município cujo principal corpo receptor não possui capacidade de diluição devido à baixa relação entre a disponibilidade hídrica e a carga orgânica lançada. É necessário buscar soluções adicionais, tais como: a escolha de um novo corpo receptor, a disposição do efluente no solo, o reuso do efluente tratado, dentre outras.

A racionalidade utilizada para definição da tipologia de tratamento necessária para cada município seguiu os passos exibidos na Figura 52, elaborada pelo Atlas (ANA, 2017).

Figura 52 – Racionalidade para definição de tipologia de tratamento por município.



Fonte: ANA, 2017.

Além das tipologias de tratamento o Atlas também se preocupou em considerar a necessidade de tratamento para remoção do Fósforo. Tal situação está atrelada a existência de reservatórios a jusante do lançamento de efluente doméstico, o que exige a adoção de tecnologias de tratamento que removam o Fósforo. As simulações de Fósforo Total foram realizadas para o horizonte de 2035, considerando uma base de informações produzida pela ANA para 854 lagos e reservatórios distribuídos no País. O Fósforo é um importante elemento no processo de eutrofização de corpos d'água em regiões de clima temperado e a sua concentração em excesso desequilibra o crescimento de algas com consequências negativas na qualidade da água (ANA, 2017).

Além do fósforo também foi considerada a necessidade de remoção do nitrogênio. As simulações do Nitrogênio Total realizadas para o horizonte 2035, foram consideradas a fim de garantir a proteção das captações para abastecimento público, utilizando as informações levantadas no âmbito do ATLAS Brasil: Abastecimento Urbano de Água. A existência de captações a jusante requer investigação que defina a necessidade de utilização de processos de tratamento que incluam a nitrificação e desnitrificação biológica, visando reduzir a concentração de nitratos nas águas de abastecimento público. Além dessa questão, o Nitrogênio, assim como o Fósforo, é um nutriente essencial para o crescimento de algas, podendo conduzir, quando em altas concentrações, à eutrofização dos corpos hídricos (ANA, 2017).

Por fim, a partir da conjuntura dos três parâmetros analisados pelo Atlas Esgotos (DBO, Fósforo e Nitrogênio), os municípios foram classificados conforme a eficiência de remoção de DBO requerida e a necessidade de atenção quanto à remoção de Fósforo e Nitrogênio. As definições tiveram como foco soluções que viabilizem a melhoria da qualidade da água e garantam os demais usos a jusante, levando em conta a capacidade de diluição dos corpos receptores e o potencial impacto dos lançamentos dentro do arranjo espacial da bacia hidrográfica onde estão inseridos (ANA, 2017).

O Atlas Esgoto (ANA, 2017), a partir dessas análises, gerou como parte do produto final dos estudos realizados, uma base de dados completa com todas as informações utilizadas, bem como as informações geradas por meio do planejamento para universalização do esgoto, por município. Por meio dessas informações, ao filtrar apenas os municípios da BHRD é possível verificar quais as tipologias de tratamento, considerando a necessidade de remoção de DBO, foram definidas para a região acometida pelo desastre, bem como a necessidade de atenção ao Fósforo e ao Nitrogênio. O resultado está exposto na Figura 53.

Figura 53 – Tipologia de Tratamento definida para os municípios da BHRD, considerando a remoção de DBO, valores absolutos e relativos em percentual.



Fonte: Base de Dados do Atlas Esgoto – ANA, 2017.

Além das informações expostas no gráfico da Figura 53, adiciona-se também que em 2013 na BRHD, dentre os 202 municípios mineiros, que totalizavam no referido ano 2.603.906 habitantes, 11%, ou seja, 292.959 habitantes não tinham acesso ao serviço de esgotamento sanitário (sem coleta e sem tratamento). Adicionalmente a esses, havia 70%, ou seja, 1.834.469 habitats mineiros que possuíam coleta, porém sem tratamento dos efluentes. No caso da população capixaba, dentre os 28 municípios com 620.319 habitantes, havia 16% (96.843) sem coleta e tratamento e 53% (327.450) com coleta e sem tratamento. Essas foram as populações alvo das ações compensatórias medidas no item sobre a construção da curva de compensação (4.1.3.5).

Após a exposição do trabalho realizado pela ANA, o próximo tópico busca evidenciar o quantitativo de investimento financeiro necessário para viabilizar tais soluções aqui apresentadas.

4.3.8 VALOR MONETÁRIO DO DANO

A fim de propor soluções para os problemas do esgotamento sanitário, o ATLAS Esgotos verificou alternativas para todos os municípios brasileiros, englobando tanto a ampliação nas eficiências de tratamento de sistemas já existentes, quando necessário, quanto a proposta de solução para as cidades que ainda não possuem coleta e tratamento de seus esgotos (ANA, 2017).

As alternativas foram elaboradas levando em consideração as peculiaridades das cidades ou regiões e os enquadramentos vigentes nos corpos receptores dos efluentes. Lembrando que o alvo é a universalização dos serviços de esgotamento sanitário no horizonte de 2035 e proposto tratamento com eficiência mínima de 60% de remoção de matéria orgânica, mesmo quando o rio apresentava vazão suficiente para diluir os efluentes sanitários sem tratamento. A partir da identificação das eficiências de remoção requeridas e do conjunto de municípios que impactam captações e reservatórios, o ATLAS elaborou curvas de custos de coleta e tratamento de esgotos, a fim de mensurar os recursos financeiros necessários para a universalização do atendimento (ANA, 2017).

Ressalta-se que essa estimativa do investimento necessário, não considerou os custos associados aos seguintes aspectos (ANA, 2017):

- Construção e manutenção das fossas sépticas, utilizadas nas soluções individuais;

- Reposição de redes coletoras antigas que não poderão ser aproveitadas em novos projetos dos sistemas de esgotamento sanitário ou substituição de sistemas coletores mistos ou unitários por sistemas do tipo separador absoluto;
- Adequação do tratamento em função de esgotos combinados (águas pluviais e esgotos sanitários); e
- Aproveitamento e/ou processamento de subprodutos, como o lodo e o biogás.

A análise dos custos, tanto de coleta quanto de tratamento, envolveu o levantamento de projetos existentes para que fossem obtidas curvas que fornecessem o custo médio por habitante para o serviço desejado. No caso do tratamento, foram selecionadas as alternativas técnicas mais representativas para cada faixa de remoção adotada pelo Atlas Esgotos, para que as mesmas fossem utilizadas na estimativa de custo para cada município. Ressalta-se que, diante de vários tipos de tratamento disponíveis para uma mesma faixa de eficiência de remoção, a escolha do processo a ser utilizado foi compatível com a realidade local (ANA, 2017).

No caso dos municípios que requerem solução conjunta para o tratamento de efluentes, foram adotados os custos referentes à eficiência de tratamento requerida em função dos resultados da modelagem de qualidade de água, considerando a lógica de montante para jusante, sem levar em conta o que seria o melhor arranjo possível encontrado após a discussão entre os municípios da bacia (ANA, 2017).

Com relação a estimativa dos custos de coleta, por ser uma aproximação mais complexa, os resultados obtidos devem ser tratados com cautela uma vez que o Atlas Esgotos se constitui em um instrumento de planejamento. Isto porque a implantação de rede coletora de esgoto é afetada por diversas variáveis, tais como adensamento populacional, topografia, tipo de solo e número médio de pessoas por residência o que pode influenciar substancialmente no investimento financeiro necessário para tal estrutura (ANA, 2017).

A avaliação dos custos e orçamentos das intervenções propostas no âmbito do ATLAS Esgotos foi efetuada para todas as unidades componentes dos sistemas de esgotamento sanitário. Foram considerados os custos de projetos existentes atualizados pelo Índice Nacional de Custo da Construção – INCC sendo 2015 o ano de referência do valor orçado e regionalizados para a coleta e transporte pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI (ANA, 2017).

A partir dos custos de rede coletora, estações elevatórias de esgoto, linhas de recalque e interceptores, foram realizadas simulações para portes variados de municípios, considerando o crescimento populacional proporcional para cada um. O objetivo da simulação foi calcular um custo médio per capita para coleta e transporte de esgotos, para permitir a construção de curvas de custo (ANA, 2017).

A metodologia para a determinação dos custos das estações de tratamento considerou quatro processos de tratamento com diferentes percentuais de eficiência de remoção de DBO. Para cada processo de tratamento foi apresentada uma curva de custo, adotada em função da eficiência requerida para atender os limites do corpo receptor. Quando as soluções requeridas implicaram em processos de elevada eficiência de remoção de carga orgânica, foram avaliados complementarmente os custos de alternativas que levassem em conta o lançamento do efluente tratado em trecho de rio mais a jusante ou em outro corpo receptor. Nesses casos foram computados os custos de implantação de emissário

para conduzir o esgoto tratado até o ponto de lançamento alternativo, adicionados ao custo da nova eficiência de remoção de carga requerida e selecionada a solução de menor custo total (ANA, 2017).

No caso dos municípios costeiros, cujos rios não tinham disponibilidade hídrica suficiente para a diluição dos efluentes lançados, foi considerada como solução a implantação de emissários submarinos, precedidos de tratamento com eficiência de remoção de carga orgânica entre 60 e 80%. Para a determinação dos custos destes emissários foram atualizados os custos de literatura, considerando as condições normais de marés (amplitudes de ondas, profundidades e zona de arrebenção) (ANA, 2017). A Figura 54 traz os gráficos das curvas de custos resultantes expostas no estudo (ANA, 2017).

Figura 54 – Curvas de custos obtidas pelas estimativas realizadas no Atlas Esgoto, valores de 2015.



Fonte: ANA, 2017.

A partir de tais valores estimados e também expostos na Base de Dados do Atlas Esgoto por município, foi possível estimar o investimento necessário para a universalização do esgotamento sanitário na BHRD. Lembrando que o Atlas realizou os estudos no horizonte temporal de 2013 a 2035 e os valores financeiros estão a valor presente de 2015 e a preços de dezembro de 2015. Para o MEH/MER realizamos os ajustes para as medidas de compensação para 2022 e 2044 e os valores serão trazidos a valor presente de 2021 e a preços de março de 2021. Posto isso, os processos realizados

para a mensuração do investimento necessário para a implantação de redes de coleta e tratamento de esgoto, seguiu os seguintes passos:

- 1° Somatório do investimento necessário para tratamento e coleta dos 230 municípios da BHRD, a valores de 2015, obtidos na base de dados do Atlas Esgoto;
- 2° Correção monetária do somatório obtido, de dezembro de 2015 para março de 2021, por meio da aplicação do INCC acumulado entre 2015 e 2021, obtendo o valor total do investimento necessário na BHRD atualizado;
- 3° Multiplicação do valor total atualizado pelo fator multiplicador de 6,23 estabelecido na compensação, obtendo o valor total do investimento necessário na bacia acrescido do esforço adicional para compensar todas as perdas interinas (Tabela 38);

Tabela 38 – Atualização dos valores do investimento em esgotamento sanitário necessários para universalização do serviço na BHRD e apresentação do valor atualizado considerando o multiplicador.

Valor do investimento em esgotamento sanitário 2015	R\$ 2.046.142.615,82
Valor do investimento em esgotamento sanitário 2021	R\$ 2.774.333.636,39
Valor total do investimento em implantação do esgotamento sanitário 2021 (com multiplicador) não descontado	R\$ 17.284.098.554,72

Fonte: Lactec, 2021.

- 4° Estimação do custo operacional anual da infraestrutura implantada em reais por metro cúbico;
- 5° Definição de percentual de depreciação, sendo este de 20% ao ano;
- 6° Construção do fluxo de caixa financeiro para desembolso dos valores ao longo do tempo, considerando o início do projeto em 2022 e finalizando em 2044, sendo que para os custos operacionais e a depreciação foi aplicada a perpetuidade, por se tratar de estruturas que continuarão a prover benefícios e exigirão investimentos para operação e manutenção por tempo indefinido;
- 7° Aplicado o fator o desconto tanto sobre os valores de investimento de implantação, custo operacional e depreciação, e feitos os somatórios para obter o valor total do investimento necessário para a universalização do esgoto na BHRD, incluindo o multiplicador 6,23, obtendo assim o valor total do dano causado a água do rio Doce, devido ao desastre do rompimento da barragem de Fundão.

O custo operacional utilizado para este projeto compensatório foi obtido por meio do trabalho de Filipe Santos, denominado de “Análise Comparativa dos Custos Operacionais de 44 Estações de Tratamento de Esgoto na Região Sudeste do Brasil”, de 2018, cujo objetivo da pesquisa foi analisar e comparar os custos operacionais dessas estações de tratamento, com vistas à avaliação de diferentes tecnologias de tratamento. Tal trabalho será exposto neste estudo de forma resumida, assim recomenda-se que para obtenção de maiores detalhamentos, seja consultado o documento original.

Segundo Santos (2018), o custo operacional do serviço de coleta e tratamento de esgoto é composto majoritariamente pelas rubricas: pessoal, energia elétrica, serviços de terceiros, taxas fiscais e/ou tributárias, e outras despesas não definidas. Diante desse arranjo, Santos (2018) avaliou, por meio

de métodos quantitativos, com análises de dados secundários de custos e parâmetros indicadores de 44 estações de tratamento de esgoto, de um único prestador estadual, da região sudeste do Brasil.

Para cada sistema de coleta e tratamento de esgoto, os custos operacionais diferem, pois são influenciados pela conformação da bacia de contribuição, da quantidade de redes e estações elevatórias de esgoto componentes do sistema de coleta e do processo de tratamento, entre outros fatores. O trabalho de Santos (2018), considera apenas a análise dos custos unitários relacionados à etapa de tratamento, incluindo as elevatórias integrantes dos processos e localizadas no interior das áreas das ETEs. Não foram considerados os custos de coleta, recalque de esgoto de elevatórias componentes do sistema de coleta (fora das ETEs), a manutenção das redes coletoras e interceptores e os custos administrativos (SANTOS, 2018).

Assim, para estimar o custo operacional, utilizou-se dados de vazão, volumes de esgoto tratado por mês, eficiências de remoção de DBO e custos operacionais mensais, para o ano de 2016, das 44 estações de tratamento de esgoto consideradas. E ainda, o custo operacional total de cada estação contempla a soma de diferentes gastos, sendo estes: pessoal, água, energia elétrica, vigilância, serviço de manutenção e conservação, materiais de consumo e manutenção, ordem de manutenção, transporte de lodos, e outros custos menores e esporádicos. As tecnologias de tratamento abraçadas pela análise foram majoritariamente o tratamento secundário convencional (SANTOS, 2018).

Para obter o custo por m^3 de esgoto tratado (R\$/ m^3) de cada item realizou-se a divisão do custo total anual de cada item pelo volume tratado durante o ano. A soma dos gastos de todos os itens, dividida pelo volume total tratado, resultou no custo unitário total de cada ETE (em R\$/ m^3), que foi comparado entre as ETEs analisadas (SANTOS, 2018).

Por meio da correção monetária Santos (2018) padronizou o valor monetário dos custos mensais obtidos para a data base de janeiro de 2017, por meio do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, medido mensalmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

Resumindo, o custo unitário de cada ETE, em R\$/ m^3 , foi calculado com base na soma de todos os gastos no período de janeiro a dezembro de 2016, depois corrigidos para janeiro de 2017, dividido pela soma dos volumes mensais tratados no mesmo período. Nos agrupamentos de dados, para comparação entre as ETEs, foi calculada a mediana dos valores das ETEs em cada grupo. A escolha pela mediana para comparação entre os grupos e entre as ETEs se deu pela grande diferença de porte e custo operacional das ETEs, uma vez que este dado estatístico não é influenciado por valores muito discrepantes (SANTOS, 2018). Desse modo, a mediana geral de R\$ 0,96/ m^3 , é o custo unitário que representa o custo operacional do tratamento do esgotamento sanitário, sendo este o valor utilizado por este estudo. Esse valor está atualizado para janeiro de 2017, por isso foi necessário atualizá-lo novamente, para março de 2021, pela variação do IPCA acumulado para o período. Desse modo, o custo operacional utilizado por esta valoração a preços de 2021 foi R\$1,22/ m^3 tratado.

Após o cálculo do investimento total para implantação da coleta e tratamento do esgoto na bacia, bem como a obtenção do custo operacional em R\$/ m^3 seguiu-se adiante os cálculos conforme apresentado na Tabela 39. Retomando a partir do 5º passo, estabeleceu-se uma depreciação do maquinário em 20% ao ano, conforme está contabilizado na coluna *Depreciação (descontado com*

perpetuidade) que é calculada por meio da multiplicação entre o percentual e o *Valor anual da compensação descontado*, acrescida a perpetuidade.

Posterior a essa definição se construiu o fluxo de caixa apresentado na coluna *Fluxo de caixa em (%)*, este fluxo foi mensurado a partir da ampliação do atendimento do esgotamento sanitário para a população conforme apresentado na curva de compensação, ou seja, a cada ano um quantitativo de pessoas será atendido pelo serviço, tanto pelo crescimento populacional quanto por aqueles que já residem no município mas não possuem o esgotamento sanitário. É com base nesses valores e na evolução anual dos mesmo que foi definido o percentual de investimento anual necessário para a execução do projeto compensatório, isto é com base na população atendida, gerando o fluxo de caixa em termos percentuais, por meio da multiplicação do percentual de cada ano sobre o valor total do investimento em implantação do esgotamento sanitário 2021 (com multiplicador) não descontado, que resultou na coluna *Valor anual da compensação (não descontado)*. O fator de desconto de 8% ao ano é aplicado sobre essa coluna resultando na coluna *Valor anual da compensação (descontado)*.

O *Custo operacional R\$/m³ ANO (não descontado)* é obtido por meio da multiplicação do *Custo operacional R\$/m³ tratado* pela quantidade de esgoto tratado em m³ a cada ano, sendo por fim aplicado o fator de desconto de 8% gerando a coluna *Custo operacional R\$/m³ ANO (descontado com perpetuidade)* que considera a perpetuidade.

Tabela 39 – Cálculos realizados para mensuração do valor do dano causado a água do rio Doce, devido ao desastre da barragem de Fundão.

Ano	Fluxo de caixa em (%)	Valor anual da compensação (não descontado)	Fator de desconto	Valor anual da compensação (descontado)	Depreciação (descontado com perpetuidade)	Custo operacional R\$/m³ tratado	Custo operacional R\$/m³ ANO (não descontado)	Custo operacional R\$/m³ ANO (descontado com perpetuidade)
2022	4,26%	R\$ 118.151.377,75	0,9259	R\$ 109.399.423,84	R\$ 2.187.988,48	R\$ 1,22	R\$ 28.915.640,20	R\$ 26.773.740,92
2023	8,51%	R\$ 236.094.433,90	0,8573	R\$ 202.412.923,44	R\$ 4.048.258,47	R\$ 1,22	R\$ 57.780.297,05	R\$ 49.537.291,71
2024	12,75%	R\$ 353.851.856,68	0,7938	R\$ 280.899.012,38	R\$ 5.617.980,25	R\$ 1,22	R\$ 86.599.523,14	R\$ 68.745.493,53
2025	16,99%	R\$ 471.444.168,34	0,7350	R\$ 346.525.537,65	R\$ 6.930.510,75	R\$ 1,22	R\$ 115.378.340,95	R\$ 84.806.524,97
2026	21,23%	R\$ 588.889.938,04	0,6805	R\$ 400.788.596,73	R\$ 8.015.771,93	R\$ 1,22	R\$ 144.121.294,99	R\$ 98.086.531,70
2027	0,95%	R\$ 26.444.885,79	0,6301	R\$ 16.664.763,81	R\$ 333.295,28	R\$ 1,22	R\$ 6.471.958,41	R\$ 4.078.431,61
2028	1,09%	R\$ 30.352.893,59	0,5834	R\$ 17.710.621,88	R\$ 354.212,44	R\$ 1,22	R\$ 7.428.380,16	R\$ 4.334.388,47
2029	1,23%	R\$ 34.160.176,50	0,5402	R\$ 18.455.680,45	R\$ 369.113,61	R\$ 1,22	R\$ 8.360.151,12	R\$ 4.516.729,52
2030	1,37%	R\$ 37.879.232,11	0,5002	R\$ 18.949.046,74	R\$ 378.980,93	R\$ 1,22	R\$ 9.270.329,87	R\$ 4.637.472,94
2031	1,50%	R\$ 41.521.394,04	0,4631	R\$ 19.232.439,34	R\$ 384.648,79	R\$ 1,22	R\$ 10.161.690,14	R\$ 4.706.828,70
2032	1,63%	R\$ 45.096.946,41	0,4288	R\$ 19.341.307,32	R\$ 386.826,15	R\$ 1,22	R\$ 11.036.748,80	R\$ 4.733.472,38
2033	1,75%	R\$ 48.615.227,16	0,3971	R\$ 19.305.775,58	R\$ 386.115,51	R\$ 1,22	R\$ 11.897.791,15	R\$ 4.724.776,56
2034	1,88%	R\$ 52.084.721,24	0,3677	R\$ 19.151.443,91	R\$ 383.028,88	R\$ 1,22	R\$ 12.746.893,76	R\$ 4.687.006,38
2035	2,00%	R\$ 55.513.144,65	0,3404	R\$ 18.900.063,04	R\$ 378.001,26	R\$ 1,22	R\$ 13.585.944,98	R\$ 4.625.484,97
2036	2,12%	R\$ 58.907.520,31	0,3152	R\$ 18.570.107,14	R\$ 371.402,14	R\$ 1,22	R\$ 14.416.663,56	R\$ 4.544.733,60
2037	2,16%	R\$ 59.971.595,12	0,2918	R\$ 17.505.136,94	R\$ 350.102,74	R\$ 1,22	R\$ 14.677.078,67	R\$ 4.284.099,36
2038	2,29%	R\$ 63.428.955,20	0,2702	R\$ 17.142.877,21	R\$ 342.857,54	R\$ 1,22	R\$ 15.523.211,68	R\$ 4.195.442,14
2039	2,41%	R\$ 66.856.787,02	0,2502	R\$ 16.730.846,04	R\$ 334.616,92	R\$ 1,22	R\$ 16.362.118,12	R\$ 4.094.604,17
2040	2,53%	R\$ 70.261.220,65	0,2317	R\$ 16.280.372,45	R\$ 325.607,45	R\$ 1,22	R\$ 17.195.298,23	R\$ 3.984.358,04
2041	2,65%	R\$ 73.647.848,56	0,2145	R\$ 15.801.013,89	R\$ 316.020,28	R\$ 1,22	R\$ 18.024.120,67	R\$ 3.867.042,78
2042	2,78%	R\$ 77.021.779,26	0,1986	R\$ 15.300.819,14	R\$ 306.016,38	R\$ 1,22	R\$ 18.849.835,69	R\$ 3.744.628,20
2043	2,90%	R\$ 80.387.685,61	0,1839	R\$ 14.786.551,65	R\$ 295.731,03	R\$ 1,22	R\$ 19.673.586,87	R\$ 3.618.769,54
2044	3,02%	R\$ 83.749.848,47	0,1703	R\$ 14.263.879,25	R\$ 285.277,59	R\$ 1,22	R\$ 20.496.421,89	R\$ 3.490.853,92
Valores com Perpetuidade					R\$ 607.339,16			R\$ 338.778.827,44
Total		R\$ 2.774.333.636,39		R\$ 1.654.118.239,83	R\$ 33.689.703,96			R\$ 743.597.533,59
Total com multiplicador (6,23)		R\$ 17.284.098.554,72		R\$ 10.305.156.634,12	R\$ 209.886.855,66			R\$ 4.632.612.634,27

Fonte: Lactec, 2021.

Considerando os valores apresentados na Tabela 39 chega-se ao valor total que representa o valor do dano causado à água do rio Doce, sendo este de R\$ 15.147.656.124,05 devido ao rompimento da barragem de Fundão, por meio da soma dos totais descontados da implantação, depreciação e operação conforme exposto na Tabela 40.

Tabela 40 – Resultado final da valoração dos danos ambientais causados à água do rio Doce

Valor da implantação da Compensação (descontado) (com multiplicador 6,23)	R\$ 10.305.156.634,12
Valor da depreciação do maquinário (descontado) e com perpetuidade (com multiplicador 6,23)	R\$ 209.886.855,66
Custo operacional total BHRD com multiplicador (descontado c/ perpetuidade) (com multiplicador 6,23)	R\$ 4.632.612.634,27
Valor total dos danos causados à água do rio Doce	R\$ 15.147.656.124,05

Fonte: Lactec, 2021.

4.4 ICTIOFAUNA

4.4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS CAUSADOS À ICTIOFAUNA

Da mesma forma como ocorreu com os outros habitats/recursos, a ictiofauna foi atingida pelos 44 hm³ de rejeito de mineração (minério de ferro) com altas concentrações de metais, água e materiais utilizados em sua construção, que foram lançados ao rio devido ao rompimento da barragem de rejeitos de Fundão (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018b). Conforme apontado, o rejeito foi transportado e depositado ao longo de toda a extensão do rio Doce, alcançando, após 17 dias, a foz deste no oceano Atlântico, na localidade de Regência, município de Linhares, estado do Espírito Santo (IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; SEDRU, 2016; SEGURA et al., 2016; SILVA et al., 2016; UFES, 2016a; VARGAS et al., 2016; CARMO et al., 2017; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017; LEONARDO et al., 2017; MAIA, 2017; SARTORI et al., 2017; UFES, 2017; UFVJM, 2017).

Devido a isso, a área de abrangência percorrida para a elaboração do diagnóstico de danos da fauna aquática contemplou os compartimentos 1, 2 e 3 da bacia do rio Doce, na qual foram identificados oito danos causados à ictiofauna da região, são eles: mortandade de peixes; alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes, simplificação da estrutura trófica; aumento da riqueza e abundância de peixes introduzidos (exóticos), redução da diversidade genética, alteração da dinâmica populacional, alterações nas condições corporais e/ou na saúde dos peixes e aumento na bioacumulação. Todos os danos listados afetaram diretamente a composição e o aspecto quantitativo e qualitativo das comunidades de peixes.

Dentre os danos listados, o dano primário identificado que é responsável pela maioria dos demais danos é o dano de mortandade de peixes. A lama de rejeitos em associação com a elevada carga de sedimentos e outros elementos carreados ao longo do rio Doce, causou a morte de inúmeras espécies de peixes, muitas delas ameaçadas de extinção e endêmicas da bacia do rio Doce (BRANDT, 2016; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Segundo laudo técnico emitido pela empresa Brandt Meio Ambiente (2016), a morte dos peixes em toda a extensão acometida pela lama de rejeitos

aconteceu por asfixia, devido ao excesso de material em suspensão e a redução drástica nos níveis de oxigênio na água, resultado esse, corroborado pela exposição, inchaço e colapamento das brânquias dos peixes encontrados mortos (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; SARTORI et al., 2017). A ocorrência da asfixia se deu, em grande parte, pelo reduzido tamanho das partículas do rejeito, as quais apresentam entre 1 e 200 μm e, por conseguinte, elevado potencial para adsorção de elementos traços conferindo à essas partículas alta toxicidade (SEGURA et al., 2016; UFES, 2016a; HATJE et al., 2017).

Além da elevada mortandade por asfixia, houve também o soterramento de indivíduos. Posteriormente, ocorreram alterações ambientais, decorrentes da presença e acúmulo da lama de rejeitos, que resultaram em perda de áreas de alimentação, reprodução e desenvolvimento, interrupções de conexão entre corpos d'água, diminuição da qualidade da água e alterações nas teias de interações (RT DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016, Fernandes et al., 2016) que, provavelmente, impediram ou reduziram a capacidade das espécies em recompor suas populações ou mesmo recolonizar o ambiente. Desse modo, diante de todo o contexto de dano apresentado, considera-se que o dano a ser valorado (mortandade de peixes), abraça todos os demais danos listados, principalmente as alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes e o dano de bioacumulação, sendo este último incorporado de forma indireta, já que não foi possível utilizar variáveis que mostram a bioacumulação nos modelos matemáticos utilizados.

Na ocasião na qual foi escrito o Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais, entregue em janeiro/2020 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020a), pensava-se em utilizar o índice de riqueza como a métrica que melhor refletia o dano de alteração na composição das comunidades. No entanto, a equipe técnica amadureceu as análises e decisões ao longo do tempo e identificou que o uso do índice de riqueza como métrica para aplicação do método MER/MEH não era viável devido aos seguintes fatores:

- A recuperação externa identificada, cuja métrica, índice de riqueza se adequaria, seria o ordenamento pesqueiro. No entanto, esta ação trata-se de um tema complexo a ser sugerido na região, que acaba por atingir diretamente um grupo dependente economicamente do recurso e influenciar questões socioeconômicas que não fazem parte do escopo desta valoração. Os danos socioeconômicos estão sob responsabilidade de outra instituição.
- Outro problema identificado foi que o índice de riqueza representa grupos de espécies, ou seja, é a composição de várias espécies em uma região, e não permite a contabilização por indivíduo, o que dificulta uma precificação por recurso na etapa de valoração por meio de ações de recuperação externa e restauração (compensação);
- A questão decisiva foi a incompatibilidade entre a análise da valoração e a análise do diagnóstico de danos. No diagnóstico, os danos identificados à ictiofauna foram considerados graves, pois mostram a ocorrência de contaminação dos peixes (bioacumulação), devido à presença do rejeito no leito do rio. Essa condição causa problemas de médio a longo prazo e podem, no pior cenário, levar algumas espécies à extinção. Se a avaliação do dano considerasse apenas o índice de riqueza, os danos decorrentes da bioacumulação seriam mascarados, pois apresentaria uma melhora muito acelerada da ictiofauna no rio Doce. No entanto, isso ocorre porque o índice de riqueza mede apenas o valor numérico de espécies em uma determinada

área geográfica (MARQUES et al., 2013), assim, esse número pode ser inflado por espécies exóticas/invasoras, trazendo a sensação de retorno à linha base. É importante ressaltar que uma vez presentes no ambiente, os EPTs estarão disponíveis à ictiofauna, portanto, o retorno rápido à condição de linha base através do índice de riqueza trata-se de uma melhoria inexistente. Além disso, em cenários onde há a presença de espécies exóticas normalmente ocorrem desequilíbrios à **natureza** (ROCHA et al., 2005). Em suma, as curvas estatísticas utilizadas para previsão do comportamento do índice de riqueza mostravam um retorno à linha base muito acelerado e que não vai de encontro ao que tem sido observado no local, dada a contaminação da ictiofauna pelo rejeito, efeito muito visível e marcante para a população local atingida.

Desse modo, a equipe técnica da ictiofauna juntamente com a equipe da valoração optou por mudar a estratégia de valoração dos danos sofridos por esse grupo faunístico decidindo por selecionar o dano de mortandade de peixes como o dano principal a ser valorado e adotando uma espécie chave representante do dano selecionado e alterando a métrica para quantidade de indivíduos.

4.4.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO DANO DE BIOACUMULAÇÃO

Diferentemente dos demais habitats tratados neste estudo, a ictiofauna apresenta um dano que embora não seja diretamente valorado, torna-se parte importante no contexto que justifica a necessidade de valorar a ictiofauna afetada pelo desastre, mesmo diante da aplicação do método MEH/MER na água do rio Doce. Trata-se do dano de bioacumulação. Os resultados apresentados no habitat da água mostram que, considerando o comportamento da turbidez, em aproximadamente oito anos, esta variável retorna ao seu comportamento de linha base em todos os compartimentos. No entanto, ao avaliar a saúde dos peixes, a condição destes não melhora na medida em que a turbidez recupera seus níveis anteriores, isto porque a presença do rejeito que permanece no leito do rio se estabelece como fonte constante de contaminação, que afeta todo grupo ictiofaunístico seja pelas brânquias ou por meio da cadeia trófica.

Resíduos de mineração são particularmente preocupantes aos ecossistemas uma vez que possuem em sua composição diferentes Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) (HORA et al., 2012; POEMAS, 2015; LOTTERMOSER, 2010 *apud* GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017). EPTs apresentam elevada correlação com a presença de ferro, metal abundante no rejeito extravasado com o desastre (JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017), porque este apresenta altos teores de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) que possui elevada capacidade de complexação, adsorção e retenção de EPTs (PEREIRA et al., 2008; PIRES et al., 2003; SILVA et al., 2016; UERJ, 2016; VERONEZ et al., 2016; SARTORI et al. 2017 *apud* COSTA, 2001; JUNCÁ et al., 2017). Deste modo, a presença do rejeito no ambiente, por si só, configura-se uma grave ameaça para a qualidade da água, sedimentos, solo, organismos aquáticos e terrestres, incluindo pessoas que vivem à jusante de barragens (POEMAS, 2015; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017), uma vez que esses contaminantes químicos são persistentes, tendem a se acumular nos sedimentos e, deste modo, tornam-se fontes recorrentes de contaminação ao longo do tempo (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; CHAPMAN et al., 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; SOUZA, 2007; VAREJÃO, 2008; RHODES, 2010; SILVA, 2010; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013;

IBAMA, 2015; POEMAS, 2015; SOUZA et al., 2015; IBAMA, 2016; HATJE et al., 2017), o qual poderá variar entre décadas a mais de um século (POEMAS, 2015; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016). Ainda, considerando o tamanho das partículas e a facilidade dessas em aderirem-se as brânquias dos peixes, bem como de muitos EPTs terem a capacidade de competirem por elementos essenciais em sítios ativos e transportadores branquiais (REFS) e, conseqüentemente causarem danos drásticos à saúde desses organismos, optou-se pela valoração dos danos à ictiofauna de forma independente.

Resultados apresentados por diferentes estudos realizados, desde a ocorrência do desastre, sugerem que o mesmo provocou a mobilização significativa de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) não associados a atividade de mineração, bem como elevou os níveis daqueles diretamente relacionados a esta atividade (FAURG, 2016 b; ICMBio, 2016 a; b; c; e; UFES, 2016 a; b; RRDM, 2019). Todos estes compostos contribuem para diferentes alterações na dinâmica das regiões afetadas, sejam elas físicas, químicas ou biológicas como, por exemplo, alterações na composição e estrutura das comunidades planctônicas e, conseqüentemente, de toda a cadeia alimentar (BRASIL, 2015; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016e; UFES, 2016 a; b; 2017, RRDM, 2019). A desestruturação das interações tróficas determina um novo fluxo de nutrientes nos ecossistemas (OTTO et al., 2007), podendo ocasionar alterações na abundância, biomassa e produtividade de uma comunidade (PACE et al., 1999; HUNT & MCKINNELL, 2006). Do mesmo modo, contribuem para bioacumulação de EPTs em organismos da biota aquática da região e, para a geração de alterações ecotoxicológicas prejudiciais à saúde destes organismos (ECONSERVATION, 2016; FAURG, 2016a; b; ICMBio 2016 a; b; c; d; e; SAMARCO, 2016; RRDM, 2019).

Os estudos realizados pelo LACTEC indicam que no ambiente fluvial, os efeitos advindos do desastre, como a deposição de sedimentos, o assoreamento, perda de habitat e o aumento da turbidez, causaram danos na composição e estrutura das comunidades de peixes, assim como provocaram graves alterações na saúde dos organismos. Os resultados indicam, ainda, que a ictiofauna vem apresentando alterações nos mais diferentes biomarcadores de avaliação de saúde, bem como acumulando EPTs em diferentes concentrações (ECONSERVATION, 2016; FAURG, 2016a; b; ICMBio 2016 a; b; c; d; e; SAMARCO, 2016; UFVJM, 2017; RRDM, 2019; BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c). Esses efeitos são totalmente compatíveis com a elevada disponibilidade de EPTs identificada após a ocorrência do desastre e do sinergismo das diferentes alterações físico-químicas que aconteceram ao longo de toda a extensão do rio Doce acometida pela passagem da onda de lama (FAURG, 2016a; b; GOLDER ASSOCIATES, 2016; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016 a; b; d; f; NETO et al., 2016; UFES, 2016 a; b; 2017). Muito embora diferentes espécies tenham sido afetadas, os resultados demonstram que as espécies bentônicas, ou seja, aquelas com hábito de vida associado ao substrato (fundo), são as que sofreram os piores efeitos (UFVJM, 2017; BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c).

Os danos sobre a ictiofauna, considerando os diferentes níveis hierárquicos de organização biológica, como unidades funcionais e estruturais dos indivíduos (e.g. tecidos), populações e comunidades, têm como consequência a simplificação da biodiversidade aquática e a perda de serviços ecossistêmicos de provisão (alimentação fornecida pelo pescado), de suporte (manutenção de ambientes para a reprodução dos peixes) e culturais (lazer e recreação da pesca, valor científico e educacional da biodiversidade aquática). Entretanto, medir e elaborar curvas de tendência dos danos à saúde dos peixes, ao processo de bioacumulação ou aos danos a todo o ecossistema em decorrência das alterações

ao longo de toda a rede trófica se mostrou inviável, o que impediu que este fosse o dano selecionado para aplicação do método MEH/MER. Assim, optou-se pelo dano de mortandade de peixes e a métrica quantidade de indivíduos. Neste sentido, e em decorrência do exposto, justifica-se a realização da valoração econômica da comunidade ictiológica de forma independente ao processo de valoração econômica da qualidade da água, pois independente do desempenho do índice de turbidez (indicador utilizado para construção da métrica na valoração do rio Doce), a presença do rejeito no sedimento é a origem do problema do dano aqui valorado, esta justificativa também corrobora para a constatação de que não há sobreposição entre as valorações do rio Doce e da Ictiofauna.

Cabe destacar que na valoração pelo método de Valoração Contingente, que captura o valor do dano pela disposição a pagar da população entrevistada, no questionário utilizado foi capturada a questão sobre a toxicidade no meio aquático. Na descrição dos danos sofridos pela vida aquática e mencionados ao entrevistado, relata que “a lama dificulta a vida aquática e os peixes estão mais contaminados por metais pesados em quantidade acima do que havia antes do incidente. Os efeitos dos metais pesados nos peixes causam tumores e dificuldades respiratórias e de reprodução”. Logo, o valor aceito a pagar pelo entrevistado contempla a toxicidade por este ter ciência da sua ocorrência. Porém, não foi possível mensurar essa toxicidade para o método de valoração por equivalência (MEH/MER), pois esse demanda uma taxa de variação da contaminação ao longo do tempo, informação que depende de monitoramento de, no mínimo, 3 anos, ou seja, **não está** disponível para o uso desse estudo no presente momento.

4.4.3 DEFINIÇÃO DA ESPÉCIE CHAVE REPRESENTANTE DOS DANOS À ICTIOFAUNA

Após a exposição de todo o contexto do dano selecionado, passa-se agora a explanação sobre a espécie chave selecionada para ser alvo da valoração e que melhor representa o dano apontado. Dentre as diferentes espécies capturadas ao longo da APDL, o cascudo *Hypostomus affinis* (Figura 55) foi escolhido como representante da comunidade ictiológica local e como modelo das respostas da qual toda a valoração será realizada. O cascudo *Hypostomus affinis* 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). Por ser bentopelágica, habita diferentes ambientes, desde riachos até reservatórios com fundos rochosos, arenosos ou lamosos (Vieira et al., 2015), onde apresenta hábito alimentar detritívoro. Apresenta cuidado parental, sendo seus ovos grandes e, comparativamente com outros grupos de peixes, pouco numerosos (Duarte e Araújo, 2002). Suas larvas geralmente são encontradas próximas à vegetação ripária (local bastante afetado pelo depósito da lama de rejeitos) (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 do Desastre da Samarco (RT DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016), o que possibilitou a construção de estimativas populacionais mais precisas.

Além disso, a escolha dessa espécie veio do fato desta ser nativa do rio Doce e endêmica da Mata Atlântica (PEREZ, 2018) e ocorrer ao longo de toda a extensão do ambiente aquático continental acometido pelo desastre (VIEIRA, 2010; BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c). Ainda, trata-se de uma espécie bentônica, de hábito alimentar detritívoro que, junto aos itens que lhe servem de alimento, ingerem

enorme quantidade de sedimento. Assim, é reconhecida pelo importante papel ecológico de acelerar os processos de reciclagem biogeoquímica e, conseqüentemente, do fluxo de energia e nutrientes, bem como de depuração dos corpos de água que habitam (MAZZONI; CARAMASCHI, 1995; FLECKER, 1996; DANGLES et al., 2002; CARDONE, 2006; SOUZA, 2010; DUARTE et al., 2011; GANDINI, 2011), tornando-se parte relevante no dano da bioacumulação na cadeia trófica, visto que se alimenta do sedimento. Devido a estas características e ao fato dos fatores essenciais à sua sobrevivência terem sido, direta ou indiretamente, afetados pelo desastre e, ainda, como modelagens matemáticas indicaram que a mesma corre elevado risco de ser extinta na região estudada, mesmo se considerada a melhora na qualidade de água (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c), a valoração desta espécie permitirá a melhor representação dos danos causados pela passagem da onda de lama sobre a dinâmica das diferentes populações de peixes da bacia do rio Doce.

Figura 55 – Cascudo (*Hypostomus affinis*), espécie de peixe selecionado como indicadora da ictiofauna na abordagem de valoração dos danos. Na foto estão indivíduos coletados nas estações de coleta da bacia do rio Doce.



Fonte: Lactec, 2021.

4.4.4 SELEÇÃO DA MÉTRICA E CONSTRUÇÃO DA LINHA BASE

A métrica definida para a medição do dano selecionado foi o número de indivíduos de peixes cascudo da espécie *Hypostomus affinis*. A partir dessa definição, para a construção da linha base a ser considerada para a valoração, foram utilizados modelos populacionais. O Apêndice G traz os detalhes do método aplicado para a construção do modelo matemático¹⁵ populacional, enquanto que os próximos parágrafos trazem as informações consolidadas dessas estimativas.

Devido a ausência de trabalhos pretéritos ao Desastre da Samarco que tenham avaliado o tamanho populacional dessa espécie de peixe, os tamanhos populacionais de *Hypostomus affinis* foram estimados para 2018 integrando dados de amostragens realizadas pelo Lactec (e.g. número de indivíduos coletados, histograma de frequência de idades nas populações), de esforço de coleta e de literatura da espécie-alvo ou, quando ausentes, de espécies filogeneticamente próximas. Resumidamente, uma vez que a probabilidade de captura de um indivíduo é proporcional ao tamanho populacional da espécie

¹⁵ **Modelo Matemático Baseado em Indivíduos:** modelagem computacional no qual todos os indivíduos de uma população são modelados explicitamente. Portanto, os indivíduos interagem entre si e cada indivíduo possui probabilidades de sobreviver, de se reproduzir ou de se movimentar, de acordo com regras definidas no modelo matemático.

na área de amostragem, o tamanho populacional de *H. affinis* foi estimado considerando o número de indivíduos coletados entre 2018 e 2019 nas áreas de cobertura das redes, corrigido pela suas seletividades, ao longo das 12 estações de amostragem da APDL, e extrapolados para toda a área da APDL do Rio Doce. Convém aqui destacar dois pontos relevantes:

- 1) Conforme apontado *H. affinis* é uma espécie presente em toda a extensão do rio Doce. No entanto, a quantidade de indivíduos coletados nos diferentes pontos de amostragem foi diferente, indicando concentrações populacionais diferenciadas. Essas diferenças foram consideradas nos cálculos realizados, justamente porque as estimativas utilizaram os dados de coleta de campo; e
- 2) Sabe-se que antes do desastre, o rio Doce provavelmente oportunizava diferentes ambientes para diversas espécies de peixes e mesmo as mais generalistas poderiam se distribuir de forma desigual ao longo do rio. Porém, após o desastre, houve uma significativa homogeneização dos habitats ao longo do rio, o que pode ter atenuado o processo de escolha das espécies quanto a características específicas do habitat, tornando tal escolha indiferente. Esse aspecto auxilia na certeza de que a população de *H. affinis* está presente ao longo de todo o rio, pois já possui a característica de espécie generalista, e diante de um habitat homogêneo sua distribuição tornar-se ainda mais favorável.

A quantidade de peixes (C) de tamanho g coletados por uma rede de pesca l é determinada pelo tamanho populacional da espécie da área de coleta (N), pela capturabilidade da rede (q - proporção de indivíduos removidos pela rede de pesca), pela capacidade do petrecho de pesca em reter os indivíduos (P), pela seletividade da rede considerando o tamanho e as características da espécie (S), e pelo esforço de captura (E - tempo de exposição e número de redes utilizadas), de acordo com a fórmula (ver Hovgard e Lassen, 2000 para detalhes).

$$C_{l,g} = N_l * q_{l,g} * P_g * S_l * E_g$$

Para *H. affinis* das áreas coletadas, o parâmetro C , que representa o total de indivíduos amostrados na área, é conhecido. Devido à presença extensiva de espinhos na espécie-alvo e a utilização de redes com diferentes malhas, a probabilidade de um indivíduo ser capturado ao ocorrer o contato com a rede é alta, de forma que se usa uma abordagem inicialmente conservadora de que o valor de P é máximo (*i.e.* 1,0). Seguindo essa abordagem, a quantidade de peixes coletados é resultado apenas dos fatores q e N , cujo produto representa o número de peixes que encontram a rede para determinado esforço de coleta e pelo conhecido esforço de coleta (E , *i.e.* 6 redes de 20 metros cada, expostas por 12 horas consecutivas em cada ponto).

Inicialmente, a partir de valores de vagilidade¹⁶ de um indivíduo de *H. affinis* foi possível estimar a área ao redor da rede à qual os indivíduos poderiam se locomover, encontrar a rede e, eventualmente, ser coletado (*i.e.* se um indivíduo se locomove x metros durante 1 hora, apenas indivíduos mais próximos do que x metros da rede podem ser coletados caso a rede fique exposta por 1 hora). Devido à ausência de estimativas de vagilidade da espécie-alvo, a capacidade de natação de *Rhinepsis aspera* foi utilizada como indicador da capacidade de locomoção de um indivíduo de *H. affinis*, uma vez que

¹⁶ **Vagilidade:** o quanto um indivíduo se locomove ao longo de uma hora.

ambas as espécies compõem a mesma subfamília *Hypostominae*, segundo resultados descritos por Wagner *et al.* (2012). Nesse estudo, indivíduos de *R. aspera* foram marcados com *PIT-tags* (*Passive Frequency Identification*) e liberados na região da UHE Sérgio Motta, no Rio Paraná, entre novembro de 2009 e fevereiro de 2010. Do total de 314 indivíduos marcados, 206 foram liberados 1.100 metros à jusante da entrada da escada de peixes e 108 foram liberados dentro da escada de peixes, 85 metros à montante de sua entrada. Ao longo da escada de peixes, 8 antenas de *RFID* (*Radio Frequency Identification*) foram instaladas para calcular o tempo e a porcentagem de indivíduos que realizaram a migração na escada de peixes. O intervalo total entre a primeira (instalada 100 metros à montante da entrada da foz da escada de peixes) e a oitava (instalada 50 metros à jusante da saída da escada) compôs 322,43 metros, com inclinações de aproximadamente 5° em cada trecho. Considerando que os indivíduos soltos à jusante da UHE e aqueles liberados dentro da escada transpassaram as 8 antenas, em média, em 104,5 e 178,9 horas, respectivamente, estima-se a vagilidade de *R. aspera* entre 1,80 (aqui denominada estimativa *sup*) e 3,08 (aqui denominada estimativa *inf*) metros por hora. Uma vez que a capacidade de natação de espécimes de peixes é dependente do seu tamanho de corpo, a vagilidade de *R. aspera* foi extrapolada para *H. affinis* de acordo com a fórmula, na qual:

$$\ln(V) = a \cdot \ln(L) + b$$

- *V* é a velocidade de natação em cm/s;
- *L* é o tamanho total do espécime em cm (aqui considerando os tamanhos máximos de corpo dessas espécies descritos em Weber, 2001);
- *a* é o coeficiente angular; e
- *b* é o intercepto (e.g. Katopodis e Gervais, 2016).

Devido à ausência de estimativas dos parâmetros *a* e *b* para *Hypostominae* ou *Loricariidae*, foi utilizado o valor de *a* descrito para o, também Siluriformes, *p. maculatus* (i.e. 0,7, Santos *et al.*, 2008, 2012). Dessa forma, as vagilidades de *H. affinis* foram estimadas em 1,56 (*sup*) e 2,55 (*inf*) metros por hora.

Em seguida, as estimativas de vagilidade de *H. affinis* foram multiplicados pelo tamanho total linear das redes utilizadas e pelo número de horas de exposição dessas para estimar as áreas de cobertura das redes (i.e. áreas nos quais os indivíduos podem ser amostrados). Nessa etapa, não foi considerada a altura das redes, uma vez que *H. affinis* é uma espécie relacionada ao fundo dos corpos d'água, de forma que o volume de água (i.e. profundidade) provavelmente tem menor influência sobre o tamanho populacional da espécie do que a área de fundo da APDL. Portanto, considerando as 6 redes de espera de 20 metros, totalizando 120 metros lineares de rede, expostas 12 horas consecutivas, as áreas de cobertura das redes, por estação de coleta, de 2.239,7 (*sup*) e 3.834,4 (*inf*) m² por lado de rede, ou 4.479,4 (*sup*) e 7.668,8 (*inf*) m² considerando os 2 lados da rede de coleta. Ao longo das 12 estações de coleta, portanto, as áreas totais amostradas na APDL compõem 53.754,5 (*sup*) e 92.025,7 (*inf*) m².

Para estimar o tamanho populacional no final de 2018 e início de 2019 nas áreas de cobertura das redes foram considerados apenas os indivíduos coletados nas estações da APDL nas coletas das fases 3 (outubro de 2018) e 4 (fevereiro de 2019), quando *H. affinis* está em período reprodutivo e os espécimes

apresentam maiores vagilidades e, também, porque coincide com o período no qual foi realizado o trabalho de Wagner *et al.* (2012) para *R. aspera* (utilizado como referência). Devido a presença de apenas uma coleta entre o final do ano 2019 e início de 2020, o que aumenta a possibilidade de interferência por eventos externos, o tamanho populacional de *H. affinis* nesse período não foi estimado.

Entre outubro de 2018 e fevereiro de 2019, um total de 34 indivíduos de *H. affinis* foram amostrados na APDL, sendo 13 em outubro de 2018 e 21 em fevereiro de 2019. Contudo, sabe-se que redes de coleta são seletivas com relação ao tamanho dos indivíduos amostrados (parâmetro S), de forma que indivíduos de menor tamanho são frequentemente subamostrados (ver Hovgard e Lassen, 2000 para detalhes). Dessa forma, o número de indivíduos amostrados para cada classe de idade dessas coletas foi corrigido seguindo as mortalidades¹⁷ naturais (*i.e.* independentes de idade) estimadas para as populações de *H. affinis* da APDL segundo os valores de k da VBGF de 0,4 e L_{∞} de 45,5 (ver subitem Parâmetros Populacionais no Apêndice G). Essas estimativas foram divididas pelo número de coletas desses indivíduos (*i.e.* 2 fases: outubro/2018 e fevereiro/2019). Como os indivíduos na área de cobertura da rede podem se locomover em direção à rede ou em direção oposta a ela, por simplificação consideradas probabilidades iguais (*i.e.* 50%), considerou-se que a área de exposição da rede coletaria metade dos indivíduos presentes na área. Assim, o tamanho populacional estimado na área de cobertura das redes ao longo das 12 estações da APDL é o dobro daquelas estimadas no passo anterior.

Por fim, os números de indivíduos estimados nas áreas de cobertura das redes da APDL (*i.e.* *sup*: 53.754,5, e *inf*: 92.025,7 m²) foram extrapolados para toda a área da APDL. Sabe-se que grandes rios possuem condição ambientais heterogêneas ao longo de sua extensão. Contudo, os 12 pontos de coleta representam trechos com diferentes condições ambientais, algo suportado pelas diferenças no número de indivíduos coletados ao longo das estações de coleta. Portanto, as estações de coleta apresentam diferentes condições ambientais que, provavelmente, são uma amostragem representativa das condições ambientais da APDL do rio Doce, de forma que nenhuma correção foi realizada considerando a heterogeneidade ambiental da APDL.

Considerando a média de 17 indivíduos amostrados nas estações da APDL em outubro de 2018 e novembro de 2019 e a sua distribuição de idades, estima-se um total de 408.9 indivíduos de *H. affinis* nas áreas de cobertura das redes (Tabela 41). Uma vez que as áreas de cobertura das redes compreendem aproximadamente 0,0246 (*sup*) ou 0,0421 (*inf*) % da APDL segundo as diferentes estimativas de vagilidade, estima-se que o tamanho populacional de *H. affinis* para toda a APDL entre final de 2018 e início de 2019 seja de 1,66 milhão (*sup*), e 972 mil (*inf*) indivíduos, respectivamente.

¹⁷ **Mortalidade natural:** mortalidade de uma população por todas as causas, exceto pesca.

Tabela 41 – Média de indivíduos ($\bar{N}$) amostrados e estimados (N_E) de *H. affinis* nas estações da APDL nas fases de outubro de 2018 e fevereiro de 2019, por idade, número de indivíduos totais estimados na APDL nesse período segundo estimativas a (N_{TS}) e b (N_{TI}).

Idade	$\bar{N}$	N_E	N_{TS} (x 1000)	N_{TI} (x 1000)
1	0,0	297,6	1.211	707
2	3,5	81,0	330	193
3	11,5	22,0	90	52
4	1,0	6,0	24	14
5	1,0	1,6	7	4
6	0,0	0,4	2	1
7	0,0	0,1	0	0
Total	17	408,9	1.664	972

Fonte: Lactec, 2021.

Tais estimativas, contudo, se basearam em pressupostos conservadores. Primeiro, a vagilidade de *H. affinis* foi estimada usando *R. aspera* como modelo. Apesar de serem da mesma subfamília (*Hypostominae*) e, conseqüentemente, possuírem característica semelhantes, tais espécies possuem alguns aspectos ecológicos distintos que podem influenciar as estimativas de vagilidade. Especificamente, *R. aspera* é uma espécie migradora, se deslocando longas distâncias durante um período reprodutivo anual curto, apresenta alta fecundidade, pequenos ovos e ausência de cuidado parental (Carolsfeld *et al.*, 2003). A estimativa de vagilidade de *R. aspera* considerou a migração reprodutiva, momento em que os animais estão mais vageis. Alternativamente, *H. affinis* é uma espécie com comportamento migratório restrito (Carolsfeld *et al.*, 2003), de forma que sua vagilidade é, provavelmente, menor do que aquelas apresentadas por *R. aspera* durante sua migração reprodutiva. Uma vez que não há estimativas da diferença de vagilidade das espécies, usou-se uma abordagem conservadora de que a vagilidade das duas espécies é semelhante, corrigido apenas pelo tamanho de corpo.

Além disso, foi considerado que a capacidade do petrecho de pesca em reter os indivíduos (P) é, conservadoramente, máxima. Apesar das espécies de cascudo apresentarem extensiva presença de espinhos que maximiza a capturabilidade das redes de pesca, provavelmente alguns indivíduos entram em contato com as redes por estruturas sem espinhos e/ou com tamanhos incompatíveis com as malhas das redes (e.g. tamanho de perímetro de cabeça maior do que o tamanho da malha), não sendo coletados. O número desses indivíduos, devido à ausência de suas estimativas, não foi considerado, de forma que a capacidade de reter indivíduos pelas redes foi definido como o valor máximo de 1,0.

A verossimilhança das estimativas poderia ser testada comparando com estimativas de estudos empíricos de tamanho efetivo populacional de espécies de cascudo utilizando metodologias padrão-ouro, como marcação-recaptura. Agostinho *et al.* (1995), por exemplo, estimou o tamanho populacional de *R. aspera* em um trecho de 7 km do Rio Paraná na região de Guaíra – PR em 812 mil indivíduos em uma área de aproximadamente 17,7 milhões de m². Considerando as mesmas densidades populacionais de *R. aspera* na região de Guaíra e *H. affinis* na bacia do Rio Doce, esperaríamos aproximadamente 10 milhões indivíduos de *H. affinis* na APDL. Portanto, considerando os pressupostos conservadores utilizados nos cálculos e os valores descritos para *R. aspera* da bacia do Rio Paraná, as

estimativas populacionais de *H. affinis* para a APDL da bacia do Rio Doce apresentados nesse estudo são, provavelmente, subestimadas e, conseqüentemente, conservadoras para o método de valoração, e cujo número estimado e considerado na valoração como linha de base é 1.687.000 indivíduos.

4.4.5 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO NATURAL E CÁLCULO DA PERDA INTERINA

Apesar de essencial para a definição de estratégias de recuperação, prever as conseqüências de tal desastre sobre as populações presentes na APDL (área de passagem e deposição da lama de rejeitos) considerando as novas condições ambientais da bacia frente ao ocorrido é frequentemente difícil. Entretanto, modelos matemáticos podem auxiliar em tais previsões, permitindo estimar quais são as conseqüências do desastre (e.g. recuperação, manutenção de baixas densidades populacionais, extinção de populações), bem como seus respectivos tempos de ocorrência.

Modelos matemáticos consistem em expressões matemáticas ou regras de comportamento que podem ser usadas para descrever ou prever processos ecológicos (PASTOROK et al., 2002). Assim, esses modelos são ferramentas especialmente importantes quando testes experimentais são inviáveis, como no caso do rompimento da barragem de Fundão. 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.

Dessa forma, no presente projeto, 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 da bacia do rio Doce, considerando 3 possíveis cenários:

- um cenário sem recuperação, em que as condições em que a espécie é submetida atualmente na APDL é inalterada ao longo do tempo. Este cenário fornece a perda inicial, pelo qual se estima a quantidade de peixes mortos no momento do desastre, devido ao impacto agudo. Os detalhes desse cenário estão expostos no subitem Estimativa dos parâmetros populacionais no Apêndice G;
- um cenário que simula a recuperação ambiental natural da APDL, ou seja, que desconsidera qualquer intervenção humana;
- um cenário de recuperação externa com as populações suplementadas através da realização de peixamento. O modelo foi implementado para a espécie de cascudo, *Hypostomus affinis*. No entanto, esse modelo será apresentado no item 4.4.6 que trata da curva de recuperação externa (com intervenção humana).

Assim, após a construção da estimativa populacional inicial dos peixes cascudos, tendo assim o estabelecimento de um valor referencial populacional de linha base (cenário pré-desastre antes de 2015), o próximo passo foi o cálculo da perda inicial e a construção da curva de recuperação natural, por meio da previsão da dinâmica populacional. Esta curva está condicionada a um cenário no qual não há nenhuma intervenção humana, logo a evolução populacional da espécie selecionada ocorre unicamente pela diferença entre a natalidade e mortalidade e os fluxos migratórios. Para melhor

compreensão esse item será separado por subtítulos e tratará dos dois cenários apresentados, sem recuperação (perda inicial) e recuperação ambiental natural.

- **Cálculo da perda inicial devido ao impacto agudo do rompimento da barragem**

Devido à ausência de dados sobre a intensidade de redução dos tamanhos populacionais como resultado imediato da passagem da lama de rejeitos na APDL, foram simulados diferentes cenários pós-desastres considerando díspares quedas populacionais decorrentes do impacto agudo da passagem da lama sobre as populações. Após a análise desses diferentes cenários, para a definição da perda inicial, ou seja, a alta mortalidade (o choque agudo) promovido pelo desastre em 2015, foi considerado que 95% dos indivíduos, considerando a população de linha base, foi a óbito em decorrência do rompimento da barragem de fundão.

A definição desse percentual está amparada nos níveis de oxigênio dissolvido presentes na água do rio Doce, tanto no momento do desastre, quanto dias após a ocorrência do mesmo. Conforme exposto detalhadamente no Diagnóstico socioambiental, as baixas concentrações de oxigênio dissolvido na água (inferiores a 1 mg/L) foram registradas após o rompimento da barragem. Essas baixas concentrações possivelmente foram causadas pelo aporte significativo de lama no meio aquático bem como à demanda de oxigênio necessária para a degradação da matéria orgânica arrastada pela onda de rejeitos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c).

As baixas concentrações de oxigênio dissolvido no ambiente aquático podem limitar a sobrevivência de diversas espécies componentes da biota. Em termos gerais é necessário um nível de 2 e 5 mg/L de oxigênio dissolvido para a sobrevivência da maior parte das espécies (LIBÂNIO, 2010). A exposição de peixes a reduzidas concentrações de oxigênio dissolvido pode ser prejudicial à saúde desses organismos, com alterações no crescimento (KARIM et al., 2002; WU, 2002; WILHELM FILHO et al., 2005; MAFFEZZOLLI; NUÑER, 2006), na estrutura e na função de tecidos branquiais (WU, 2002), na capacidade reprodutiva (KARIM et al., 2002) e na sobrevivência (BRAUN et al., 2006), conforme exposto em (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c).

Os dados analisados no Diagnóstico mostram que na primeira semana após o desastre, os níveis de oxigênio dissolvido ficaram muito abaixo do mínimo necessário, logo, é possível assumir que houve 95% de mortandade da população de *H. affinis*, tanto devido ao baixo nível de oxigênio dissolvido registrado quanto pelo número de dias que esta condição se estendeu. Logo, a estimativa da perda inicial calculada considerada no método de valoração foi de 1.603.000 indivíduos de *H. affinis*.

A curva sem recuperação deste cenário é apresentada no subitem Estimativa dos parâmetros populacionais no Apêndice G, a qual mostra o quantitativo populacional que a espécie atingiria (estabiliza) se as condições ambientais no rio Doce não se alterassem ao longo do tempo. O resultado é que a população se estabiliza em 59% da sua população estimada original (linha base). Logo, esses resultados da dinâmica populacional adaptada para as condições da bacia do rio Doce indicam perda de 41% da população original em decorrência dos efeitos crônicos do deposição da lama de rejeitos do rompimento da barragem de Fundão, caso as condições ambientais e, conseqüentemente, a taxa de mortalidade permaneça como a estimada a partir das coletas de 2018. Essas predições 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).

Esclarece-se que a mortalidade foi calculada de acordo com métodos bastante utilizados em estudos ecológicos com peixes, e baseada nos dados de coleta de indivíduos nos trechos tidos como controle (tributários) e na APDL (calha principal do Rio Doce). Basicamente, é feita a estimativa de idade dos indivíduos a partir dos dados de comprimento total. Então, a probabilidade de sobrevivência é estimada (Sobrevivência = $1 - \text{mortalidade}$) pelo decaimento da frequência dos indivíduos a cada classe de idade. Para o controle (linha base) este valor foi igual a 0,42, para a APDL foi 0,30.

Este percentual não se refere ao quantitativo de peixes mortos em novembro de 2015 no momento do desastre, e sim, o quantitativo que a população de *H. affinis* alcança ao longo do tempo, considerando que a qualidade ambiental do rio Doce permaneça como está. Apesar deste cenário apresentar tal perda, ele não pode ser adotado como curva de recuperação natural, justamente por não considerar melhorias ambientais naturais, aspecto que não pode ser excluído do processo de construção da curva de recuperação natural.

Cabe aqui inserir mais um esclarecimento quanto a melhorias promovidas por recuperação externa em outros habitats, nesse caso na própria água do rio Doce. O processo de valoração dos danos causados ao habitat água do rio Doce definiu que a compensação do dano será a universalização do saneamento básico na região, gerando melhorias na qualidade da água por meio da retirada de outros contaminantes, já que não é possível retirar o rejeito. Porém, no caso do *H. affinis*, a remoção do esgoto no rio traz poucos ganhos ambientais para a espécie, pois, ela especificamente se alimenta do sedimento e do material orgânico ali presente, logo, o esgoto acaba por ser uma dessas fontes orgânicas disponíveis.

Além disso, o saneamento a ser promovido é residencial, cujo esgoto é composto, majoritariamente, por água e matéria orgânica em suspensão, sendo que o tratamento desse tipo de esgoto se resume na remoção desta fração sólida, não havendo tecnologias, nessa modalidade de tratamento, que retire metais pesados. Isso significa dizer que os ganhos ambientais obtidos por meio da redução do esgoto doméstico (ou sanitário) no rio Doce trazem benefícios pouco significativos à espécie-chave aqui valorada, cuja mensuração é dispensável. Outro fator é que por se tratar de uma espécie bentopelágica, isto é, que reside próximo ao leito do rio, isto a torna uma espécie adaptada a condições de alta turbidez da água, logo a redução dessa turbidez com a retirada do esgoto não se traduz necessariamente em um ganho ambiental para a espécie selecionada. É por isso que os ganhos ambientais obtidos pelo saneamento básico não são considerados na curva de recuperação natural a ser apresentada.

• **Lógica metodológica para construção da curva de recuperação natural**

Assim, nesse projeto, um modelo matemático para a previsão da dinâmica populacional de espécies de peixes da bacia do rio Doce foi desenvolvido e implementado para *Hypostomus affinis* considerando os efeitos da lama de rejeitos provenientes do desastre. Para isso, o modelo desenvolvido por Brito *et al.* (2017) foi adaptado para as condições ambientais da bacia do rio Doce, bem como para os dados disponíveis da espécie.

O modelo implementado é uma Modelagem Baseada em Indivíduo (IBM), composto por entidades discretas agrupadas em populações sob as condições da APDL e sob as condições pré-desastre, essa inferida com base nas estimativas das populações controle. A cada ciclo do modelo (i.e. ano), a população recebe novos indivíduos juvenis (aqui nomeado recrutamento¹⁸) provenientes tanto de

18 **Recrutamento:** número de indivíduos que sobrevivem a idade juvenil e entram na maturidade sexual.

reprodução quanto de migração de outras áreas da bacia, e seus indivíduos são submetidos a probabilidades de sobrevivência. Tais fatores determinarão a dinâmica populacional ao longo dos anos simulados. Os resultados dos danos do desastre sobre as populações simuladas são estimados pela diferença no tamanho populacional do cenário pré-desastre e pós-desastre.

Peixes, geralmente, apresentam grande fecundidade (milhares a centenas de milhares de ovos por fêmea (FAVARO e CHAVES, 1999), de forma que o modelo de Brito *et al.* (2017) e o derivado desse, apresentado no presente projeto, sofre pouca influência de variações nos valores de recrutamento. Além da adição de indivíduos pela reprodução, o recrutamento considerado no modelo também inclui a dispersão de indivíduos para a APDL. Contudo, devido à ausência de estimativas de dispersão entre as duas áreas, considerou-se um cenário otimista em que o número de alevinos (fruto de reprodução ou dispersão) é sempre maior do que a capacidade de suporte¹⁹ ao final do primeiro ano de vida. Assim, o recrutamento é modelado como valor máximo de capacidade de suporte de juvenis chegando na idade 1 (indivíduos com menos de um ano de vida completo).

Para as estimativas de sobrevivência, utilizou-se os dados das populações de peixes da própria bacia do rio Doce (i.e. número de indivíduos por classe de tamanho e tamanho de corpo), amostrados pela equipe de ictiofauna, dados esses disponíveis para coletas entre junho de 2018 e novembro de 2019 (7 campanhas amostrais). Os dados dos pontos de controle definiram a probabilidade de sobrevivência na condição pré-desastre e os pontos da APDL da condição pós-desastre. Para (a) aumentar o número de indivíduos amostrados, aumentando a confiabilidade das estimativas populacionais, e (b) diminuir a influência de fatores ambientais específicos de determinadas estações de coleta, as estações controle (RD06/07, RD09, RD12, RD15, RD17, RD19, RD21, RD26 e SA) foram agrupados entre si, assim como as estações da APDL (RD05, RD08, RD10, RD11, RD13, RD14, RD16, RD18, RD20, RD22, RD25 e Dique S4), independente do compartimento.

- **Definição do horizonte temporal de análise**

Além da definição da perda inicial populacional devido ao desastre e a construção do modelo matemático foi adotado o tempo de 163 anos como o horizonte temporal de análise da evolução da população de *H. affinis*. A adoção desse tempo foi feita devido aos efeitos adversos causados pela bioacumulação. Conforme já apontado no item 4.4.2 o dano de bioacumulação causa efeitos inadequados à saúde da fauna aquática do rio Doce devido à contaminação branquial ou via cadeia trófica como consequência da presença do rejeito no leito do rio. Considerando essa presença, sabe-se que enquanto a mesma se manter no local, a fonte de contaminação não cessa e mantém a ocorrência do dano de bioacumulação. Por isso, tem-se como premissa que durante 163 anos o rejeito continuará no rio Doce causando tais efeitos negativos sobre a saúde dos indivíduos e prejudicando, dentre outros aspectos, a capacidade de reprodução dos mesmos. Por isso, o modelo projeta sua análise considerando este horizonte temporal, a fim de verificar a evolução populacional inserida nesse cenário de permanência da bioacumulação. Destaca-se que a questão da bioacumulação, aqui apresentada, suporta a suposição da equipe técnica que o *H. affinis* não irá apresentar níveis significativos de recuperação antes do período de 163 anos adotado, justamente devido ao fato de ser uma espécie de fundo, que se

¹⁹ **Capacidade de suporte:** máximo tamanho populacional que um ambiente pode suportar dado seus recursos e condições, como disponibilidade de alimento, água e habitat.

alimenta diretamente do sedimento, onde há a maior deposição e, conseqüentemente, concentração de EPTs (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; BEVILACQUA, 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; PUPPIM, 2014; SOUZA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016; IBAMA, 2016; MAIA, 2017; JUNCÁ et al., 2017).

O tempo de 163 anos, adotado no presente estudo, tem como base os cálculos realizados pela equipe técnica do Lactec que mensurou o tempo necessário para que todo o rejeito extravasado pelo rompimento da barragem de Fundão seja escoado do rio para o mar, por meio do transporte dos sedimentos. No TOMO II – Ambientes Aquáticos Continentais do Relatório de Acompanhamento de Danos, está descrito, em detalhes, a metodologia utilizada para estimar esse tempo.

Esse intervalo temporal foi adotado, pois, com o rompimento da barragem de Fundão foram liberados 44 hm³ de rejeitos. Destes, 5,81 hm³ permaneceram entre Fundão e Santarém; antes da UHE Risoleta Neves ficaram retidos na calha do rio 2,9 hm³ e 10,75 hm³ na porção extracalha. Ainda, cerca de 9,9 hm³ ficaram retidos na barragem de Risoleta Neves enquanto 14,64 hm³ seguiram seu curso para jusante da barragem (BRASIL (MPF)/ Lactec, 2020b). Ensaios geotécnicos em áreas onde se observa depósitos de rejeitos oriundos de Fundão, obtiveram valores entre 2,0 e 2,1 t/m³ como o peso específico do sedimento seco composto por areia, silte, argila e rejeito. Adotando o peso específico igual a 2,0 t/m³ e os aportes de sedimentos dos períodos pré-desastre e pós-desastre foi possível fazer uma estimativa simplificada do tempo esperado (em anos, após o rompimento) para a retirada natural do rejeito do leito do rio Doce. Assim, foi possível prever que para um volume de 14,64 hm³, o tempo para retirada natural dos rejeitos do Rio Doce entre Candonga e Colatina, caso eles tivessem sido depositados inteiramente no trecho analisado e, estivessem disponíveis para serem removidos naturalmente pela erosão fluvial ao longo do tempo, está entre 37 e 54 anos. Caso a mesma estimativa, de remoção natural pela erosão fluvial ao longo do tempo, seja feita para todo o volume de rejeitos extravasado de Fundão, a previsão está entre 113 e 163 anos.

Em suma, levando-se em consideração apenas o processo natural de transporte de sedimento do rio ao oceano, o deslocamento do rejeito ocorrerá de forma gradativa, não havendo deslocamentos de volumes de rejeito significativos de forma brusca, repentina, tornando o período de 163 anos o prazo mais próximo do processo natural.

O motivo pelo qual o tempo de 163 foi selecionado ao invés do período de 37 ou 54 anos foi porque os modelos matemáticos elaborados já foram construídos de maneira bastante otimista e conservadora, considerando todas as variáveis na melhor perspectiva possível. No entanto, sabe-se que os efeitos dos EPTs podem, no médio e longo prazo, apresentarem danos e efeitos prejudiciais que não são contabilizados no tempo presente desse estudo. Além disso, a estimativa feita para o período de 163 considera o escoamento do rejeito de toda a calha do rio, e não apenas de um trecho. Adiciona-se que não há um quantitativo de rejeitos que seja considerado inóxico aos organismos vivos que estão em contato com ele. Por isso, optou-se por adotar o tempo de 163 anos como o horizonte temporal da análise.

É relevante lembrar que a bioacumulação devido a presença de EPTs não está sendo medida diretamente nos modelos e estimativas realizadas. Embora tais variáveis não sejam inseridas nos cálculos matemáticos utilizados para a valoração, ainda assim, convém considerar este contexto nas análises e considerações feitas.

• Construção da curva de recuperação natural

Levando em conta o tamanho estimado para as populações da APDL em 2018 (*sup*: 1,7, e *inf*: 1,0 milhão de indivíduos), o tamanho populacional na condição pré-desastre (até 2015) está entre 2,9 (*sup*) e 1,7 (*inf*) milhões de indivíduos (Tabela 42, Figura 56, linha azul) e o valor de linha base considerado foi o limite inferior de 1.687.000 indivíduos.

As simulações do cenário da APDL pós-desastre diante de um cenário sem nenhuma recuperação (nem natural e nem externa) tiveram seu tamanho populacional estabilizado entre 1,7 milhão e 990 mil indivíduos, respectivamente, o que corresponde a aproximadamente 59% dos valores pré-desastre, independentemente da redução populacional imediata causada pelo efeito da lama de rejeitos. Isto é, a população se estabiliza cerca de 40% abaixo do seu quantitativo original. O cenário simulado com recuperação natural da qualidade ambiental (*i.e.* com remoção linear dos rejeitos e diminuição linear da mortalidade até alcançar o estimado para o pré-desastre) apresenta a possibilidade de recuperação da população, alcançando o tamanho populacional estimado para o pré-desastre, cuja estimativa de recuperação ambiental considera o tempo de 163 anos.

Tabela 42 – Média (N) e desvio padrão (DP) (em milhão de indivíduos) para as estimativas superior (*sup*) e inferior (*inf*) do tamanho populacional das populações de *Hypostomus affinis* da APDL da bacia do Rio Doce, segundo diferentes cenários simulados: sem recuperação (R0), com recuperação em 163 anos (R163); efeitos agudos do Desastre da Samarco com redução de 95% (Q95) da população.

Cenário	N_{sup}	DP_{sup}	N_{inf}	DP_{inf}
Controle	2,9	7,9 E-4	1,7	4,6 E-4
APDL: R_0 , Q_{95}	1,7	7,6 E-4	1,0	4,5 E-4
APDL: R_{163} , Q_{95}	2,9	2,7 E-3	1,7	1,6 E-3

Fonte: Lactec, 2021.

A curva de recuperação natural considerada para a valoração está exposta na Figura 56, sendo que seu formato merece detalhamento. Uma curva de recuperação padrão (logística) decorre de 3 fases:

- I. inicialmente, o baixo tamanho populacional e, conseqüentemente, o baixo recrutamento, acarreta uma recuperação lenta.
- II. depois, o aumento do tamanho populacional permite um rápido aumento populacional devido ao alto recrutamento.
- III. finalmente, o alto recrutamento entra em equilíbrio com a mortalidade, reduzindo o crescimento populacional e tornando a população estável.

Na modelagem realizada, a fase I não ocorre pois o recrutamento é sempre máximo, com a população indo direto para a fase II e permitindo uma rápida recuperação já nos primeiros anos. Em seguida, a simulação chega à fase III já próxima aos 5 anos. Assim, a curva de crescimento logístico padrão está presente nos resultados (exceto pela fase I), mas em um período curto de 5 anos. Após isso, o aumento linear da sobrevivência devido à melhora linear da qualidade ambiental (transporte dos sedimentos) acarreta em uma recuperação do tamanho populacional, também linear.

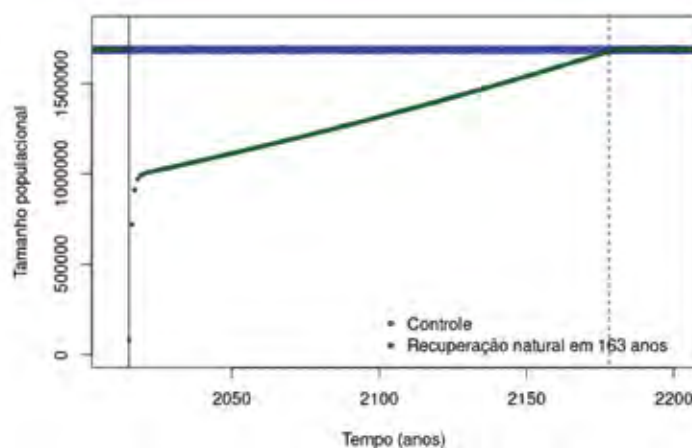
Detalha-se que, o recrutamento máximo é constante ao longo de toda simulação, o que o qualifica como um modelo otimista. Nos primeiros anos pós desastre, a grande perda populacional (95% explicado anteriormente) permite um recrutamento muito maior do que a mortalidade (*i.e.* número

de indivíduos que morrem em um período), possibilitando que essa recuperação populacional seja acentuada. Com o aumento populacional, a mortalidade aumenta (mais indivíduos morrem por a população ser maior) enquanto o recrutamento se mantém máximo, aproximando a população do tamanho máximo possível de acordo com a probabilidade de sobrevivência do momento. Isso reduz seu crescimento e, eventualmente, estabiliza a população dentro de um intervalo, isto diante de um cenário sem recuperação.

Contudo, ao considerar no modelo a melhora das condições ambientais da APDL, a probabilidade de sobrevivência aumenta, permitindo o aumento da população nos cenários com recuperação ambiental, ou seja, são processos diferentes que permitem que a população se recupere antes (recuperação populacional considerando as condições naquele momento) e depois dos 5 anos (recuperação do ambiente permite aumento da sobrevivência e, conseqüentemente, aumento da população, até recuperação total – condição pré-desastre presente nos tributários - em 163 anos).

Importante afirmar que o aumento da probabilidade de sobrevivência é linear desde o primeiro ano após o desastre até atingir os 163 anos estimados para a recuperação do ambiente. Contudo, este crescimento linear só fica evidente no gráfico populacional após todas as classes de idade receberem indivíduos, aproximadamente em 5 anos, quando a população se recupera à condição ambiental daquele momento.

Figura 56 – Dinâmica populacional simulada de *Hypostomus affinis* para as condições pré (azul) e pós-desastre na presença de recuperação natural em 163 anos (verde), considerando a estimativa de tamanho populacional inferior e queda de 95% do tamanho populacional no momento do desastre. A linha vertical contínua corresponde ao momento do Desastre da Samarco (2015) e a tracejada indica o momento em que o rejeito acaba de ser removido do ambiente (2178).



Fonte: Lactec, 2021.

Assim, a curva de cor verde apresentada na Figura 56, representa a curva de recuperação natural da população de *H. affinis*, quando esta alcança a população de linha base após 163 anos. Para o cálculo da perda interina, realizado com base nesta curva, seguiu-se os seguintes passos:

- Calcula-se, anualmente, a diferença entre a população de linha base e a população estimada pós-desastre obtendo, assim, a diferença, a perda anual de indivíduos durante 163 anos;
- Aplica-se sobre essa série de valores de perda o desconto social de 8% trazendo cada valor ao valor presente de 2015, obtendo assim a série de perda descontada;

- Realiza-se o somatório da série de perda descontada obtendo assim a perda interina descontada, que representa a quantidade de indivíduos de *H. affinis* perdidos dentro do horizonte temporal de 163 anos como consequência do desastre da barragem de Fundão (Tabela 43).

Tabela 43 – Valores populacionais estimados pelo modelo e utilizados na valoração para cálculo da perda interina descontada.

Ano	População Pós-Desastre	População Pré-Desastre (linha base)	Perda: diferença entre população pré e pós desastre	Perda Descontada
2015	84.000	1.687.000	1.603.000	1.603.000,00
2016	721.000	1.687.000	966.000	894.444,44
2017	913.000	1.687.000	774.000	663.580,25
2018	972.000	1.687.000	715.000	567.590,05
2019	992.000	1.687.000	695.000	510.845,75
2020	1.001.000	1.687.000	686.000	466.880,07
2021	1.006.000	1.687.000	681.000	429.145,52
2022	1.011.000	1.687.000	676.000	394.439,51
2023	1.014.000	1.687.000	673.000	363.600,96
2024	1.017.000	1.687.000	670.000	335.166,81
2025	1.021.000	1.687.000	666.000	308.486,86
2026	1.025.000	1.687.000	662.000	283.920,45
2027	1.028.000	1.687.000	659.000	261.697,97
2028	1.032.000	1.687.000	655.000	240.842,14
2029	1.036.000	1.687.000	651.000	221.640,14
2030	1.039.000	1.687.000	648.000	204.276,62
2031	1.043.000	1.687.000	644.000	187.977,46
2032	1.047.000	1.687.000	640.000	172.972,13
2033	1.050.000	1.687.000	637.000	159.408,63
2034	1.054.000	1.687.000	633.000	146.673,74
2035	1.058.000	1.687.000	629.000	134.950,82
2036	1.062.000	1.687.000	625.000	124.159,84
2037	1.065.000	1.687.000	622.000	114.411,00
2038	1.068.000	1.687.000	619.000	105.425,16
2039	1.072.000	1.687.000	615.000	96.985,09
2040	1.076.000	1.687.000	611.000	89.216,94
2041	1.079.000	1.687.000	608.000	82.202,67
2042	1.083.000	1.687.000	604.000	75.612,84
2043	1.088.000	1.687.000	599.000	69.432,32
2044	1.091.000	1.687.000	596.000	63.967,20
2045	1.094.000	1.687.000	593.000	58.930,76
2046	1.098.000	1.687.000	589.000	54.197,45
2047	1.102.000	1.687.000	585.000	49.842,03
2048	1.105.000	1.687.000	582.000	45.913,36
2049	1.109.000	1.687.000	578.000	42.220,19
2050	1.114.000	1.687.000	573.000	38.754,59

Ano	População Pós-Desastre	População Pré-Desastre (linha base)	Perda: diferença entre população pré e pós desastre	Perda Descontada
2051	1.117.000	1.687.000	570.000	35.696,01
2052	1.121.000	1.687.000	566.000	32.819,92
2053	1.125.000	1.687.000	562.000	30.174,05
2054	1.129.000	1.687.000	558.000	27.740,08
2055	1.133.000	1.687.000	554.000	25.501,14
2056	1.137.000	1.687.000	550.000	23.441,68
2057	1.141.000	1.687.000	546.000	21.547,40
2058	1.145.000	1.687.000	542.000	19.805,13
2059	1.149.000	1.687.000	538.000	18.202,75
2060	1.152.000	1.687.000	535.000	16.760,42
2061	1.156.000	1.687.000	531.000	15.402,87
2062	1.160.000	1.687.000	527.000	14.154,49
2063	1.164.000	1.687.000	523.000	13.006,53
2064	1.167.000	1.687.000	520.000	11.974,00
2065	1.171.000	1.687.000	516.000	11.001,75
2066	1.175.000	1.687.000	512.000	10.107,84
2067	1.179.000	1.687.000	508.000	9.285,99
2068	1.183.000	1.687.000	504.000	8.530,44
2069	1.187.000	1.687.000	500.000	7.835,87
2070	1.191.000	1.687.000	496.000	7.197,39
2071	1.195.000	1.687.000	492.000	6.610,51
2072	1.200.000	1.687.000	487.000	6.058,64
2073	1.203.000	1.687.000	484.000	5.575,29
2074	1.208.000	1.687.000	479.000	5.108,98
2075	1.211.000	1.687.000	476.000	4.700,91
2076	1.216.000	1.687.000	471.000	4.306,97
2077	1.219.000	1.687.000	468.000	3.962,53
2078	1.224.000	1.687.000	463.000	3.629,81
2079	1.228.000	1.687.000	459.000	3.331,90
2080	1.232.000	1.687.000	455.000	3.302,87
2081	1.236.000	1.687.000	451.000	3.031,32
2082	1.241.000	1.687.000	446.000	2.775,66
2083	1.244.000	1.687.000	443.000	2.552,77
2084	1.248.000	1.687.000	439.000	2.342,34
2085	1.252.000	1.687.000	435.000	2.149,07
2086	1.256.000	1.687.000	431.000	1.971,58
2087	1.260.000	1.687.000	427.000	1.808,59
2088	1.264.000	1.687.000	423.000	1.658,94
2089	1.268.000	1.687.000	419.000	1.521,53
2090	1.273.000	1.687.000	414.000	1.392,01
2091	1.277.000	1.687.000	410.000	1.276,45
2092	1.281.000	1.687.000	406.000	1.170,36

Ano	População Pós-Desastre	População Pré-Desastre (linha base)	Perda: diferença entre população pré e pós desastre	Perda Descontada
2093	1.285.000	1.687.000	402.000	1.072,99
2094	1.290.000	1.687.000	397.000	981,15
2095	1.294.000	1.687.000	393.000	899,32
2096	1.298.000	1.687.000	389.000	824,23
2097	1.302.000	1.687.000	385.000	755,33
2098	1.305.000	1.687.000	382.000	693,93
2099	1.311.000	1.687.000	376.000	632,44
2100	1.316.000	1.687.000	371.000	577,80
2101	1.320.000	1.687.000	367.000	529,23
2102	1.324.000	1.687.000	363.000	484,69
2103	1.327.000	1.687.000	360.000	445,08
2104	1.331.000	1.687.000	356.000	407,53
2105	1.337.000	1.687.000	350.000	370,98
2106	1.341.000	1.687.000	346.000	339,58
2107	1.344.000	1.687.000	343.000	311,70
2108	1.349.000	1.687.000	338.000	284,40
2109	1.354.000	1.687.000	333.000	259,44
2110	1.358.000	1.687.000	329.000	237,34
2111	1.362.000	1.687.000	325.000	217,08
2112	1.367.000	1.687.000	320.000	197,91
2113	1.370.000	1.687.000	317.000	181,53
2114	1.375.000	1.687.000	312.000	165,43
2115	1.380.000	1.687.000	307.000	150,73
2116	1.385.000	1.687.000	302.000	137,29
2117	1.389.000	1.687.000	298.000	125,43
2118	1.393.000	1.687.000	294.000	114,58
2119	1.397.000	1.687.000	290.000	104,65
2120	1.401.000	1.687.000	286.000	95,56
2121	1.406.000	1.687.000	281.000	86,94
2122	1.410.000	1.687.000	277.000	79,35
2123	1.414.000	1.687.000	273.000	72,41
2124	1.420.000	1.687.000	267.000	65,58
2125	1.425.000	1.687.000	262.000	59,58
2126	1.429.000	1.687.000	258.000	54,33
2127	1.433.000	1.687.000	254.000	49,52
2128	1.438.000	1.687.000	249.000	44,95
2129	1.442.000	1.687.000	245.000	40,95
2130	1.447.000	1.687.000	240.000	37,15
2131	1.452.000	1.687.000	235.000	33,68
2132	1.456.000	1.687.000	231.000	30,65
2133	1.461.000	1.687.000	226.000	27,77
2134	1.465.000	1.687.000	222.000	25,26

Ano	População Pós-Desastre	População Pré-Desastre (linha base)	Perda: diferença entre população pré e pós desastre	Perda Descontada
2135	1.470.000	1.687.000	217.000	22,86
2136	1.474.000	1.687.000	213.000	20,77
2137	1.480.000	1.687.000	207.000	18,69
2138	1.484.000	1.687.000	203.000	16,97
2139	1.489.000	1.687.000	198.000	15,33
2140	1.493.000	1.687.000	194.000	13,91
2141	1.498.000	1.687.000	189.000	12,55
2142	1.502.000	1.687.000	185.000	11,37
2143	1.506.000	1.687.000	181.000	10,30
2144	1.511.000	1.687.000	176.000	9,27
2145	1.516.000	1.687.000	171.000	8,34
2146	1.521.000	1.687.000	166.000	7,50
2147	1.526.000	1.687.000	161.000	6,73
2148	1.531.000	1.687.000	156.000	6,04
2149	1.536.000	1.687.000	151.000	5,42
2150	1.541.000	1.687.000	146.000	4,85
2151	1.545.000	1.687.000	142.000	4,37
2152	1.550.000	1.687.000	137.000	3,90
2153	1.555.000	1.687.000	132.000	3,48
2154	1.560.000	1.687.000	127.000	3,10
2155	1.565.000	1.687.000	122.000	2,76
2156	1.569.000	1.687.000	118.000	2,47
2157	1.574.000	1.687.000	113.000	2,19
2158	1.579.000	1.687.000	108.000	1,94
2159	1.585.000	1.687.000	102.000	1,69
2160	1.590.000	1.687.000	97.000	1,49
2161	1.595.000	1.687.000	92.000	1,31
2162	1.599.000	1.687.000	88.000	1,16
2163	1.603.000	1.687.000	84.000	1,03
2164	1.608.000	1.687.000	79.000	0,89
2165	1.612.000	1.687.000	75.000	0,79
2166	1.618.000	1.687.000	69.000	0,67
2167	1.622.000	1.687.000	65.000	0,58
2168	1.628.000	1.687.000	59.000	0,49
2169	1.633.000	1.687.000	54.000	0,42
2170	1.639.000	1.687.000	48.000	0,34
2171	1.644.000	1.687.000	43.000	0,28
2172	1.648.000	1.687.000	39.000	0,24
2173	1.653.000	1.687.000	34.000	0,19
2174	1.658.000	1.687.000	29.000	0,15
2175	1.664.000	1.687.000	23.000	0,11
2176	1.669.000	1.687.000	18.000	0,08

Ano	População Pós-Desastre	População Pré-Desastre (linha base)	Perda: diferença entre população pré e pós desastre	Perda Descontada
2177	1.674.000	1.687.000	13.000	0,05
2178	1.679.000	1.687.000	8.000	0,03
2179	1.684.000	1.687.000	3.000	0,01
2180	1.686.000	1.687.000	1.000	0,00
2181	1.687.000	1.687.000	0	

Fonte: Lactec, 2021.

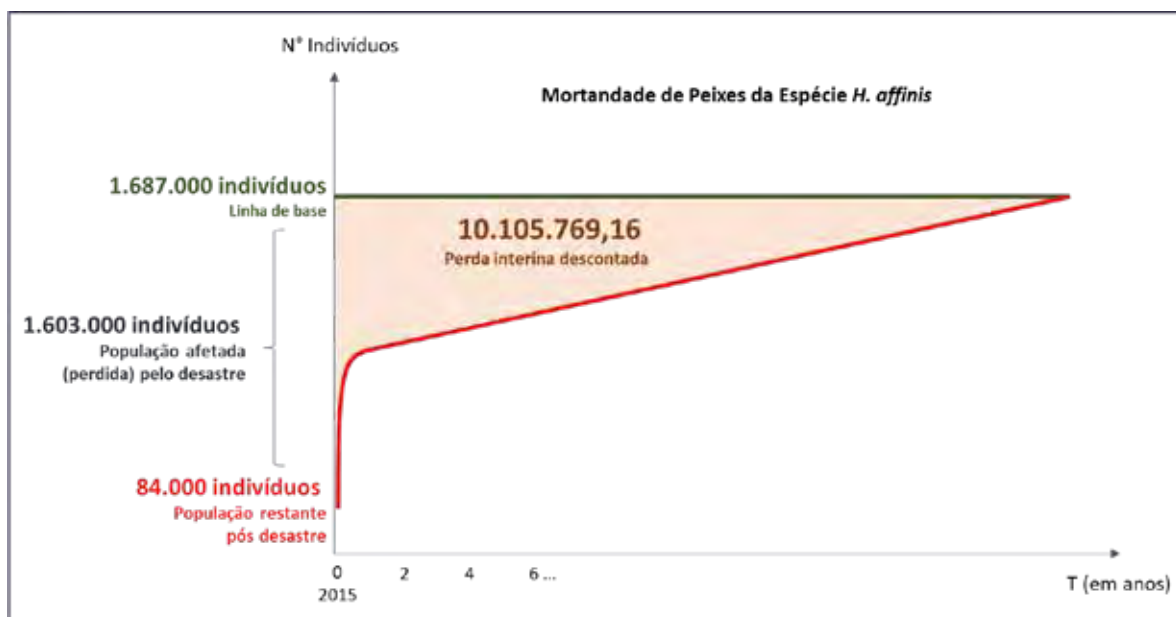
Tabela 44 – Resultado da perda interina descontada, que representa a quantidade de indivíduos da espécie *H. affinis* perdidos devido ao desastre, no horizonte temporal de 163 anos.

Somatório da Perda Interina Descontada (Quantidade de indivíduos <i>H. affinis</i> perdidos devido ao desastre)	
	10.105.769,16
Perda inicial (indivíduos)	1.603.000,00
População Linha-Base (indivíduos)	1.687.000,00

Fonte: Lactec, 2021.

O gráfico da Figura 57 exibe de forma visual o resultado da perda interina descontada calculada pelo método de valoração. É possível verificar que a perda interina obtida representa a perda acumulada do horizonte temporal considerado, sendo o valor da área acima da curva de recuperação natural (linha vermelha) e abaixo da curva de linha base (linha verde). Assim, conclui-se que o desastre causou a perda de 10.105.769,16 indivíduos de *H.affinis* durante 163 anos, sendo este o quantitativo de recurso da ictiofauna devido à sociedade.

Figura 57 – Resultado da perda interina descontada, que representa a quantidade de indivíduos da espécie *H. affinis* perdidos devido ao desastre, no horizonte temporal de 163 anos



Fonte: Lactec, 2021.

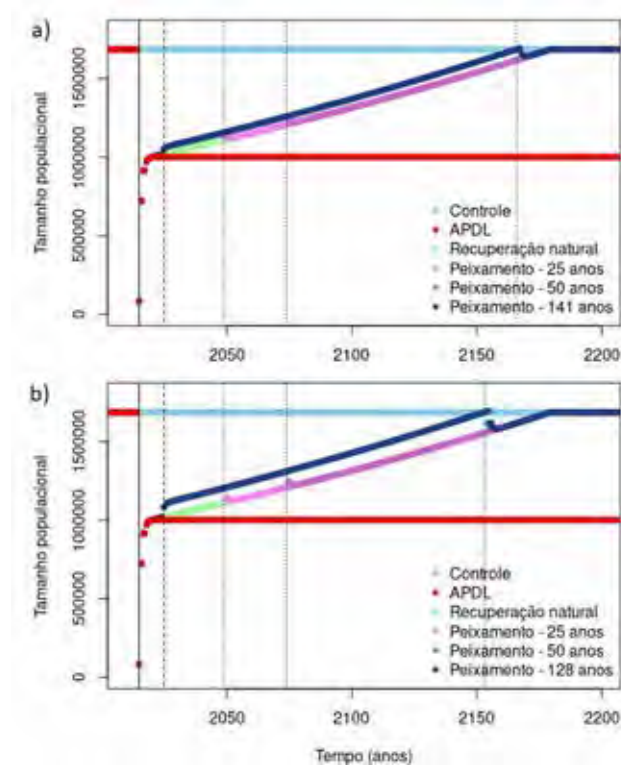
4.4.6 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO EXTERNA

A recuperação externa se refere a recuperação que ocorre mediante a uma ação humana que busca acelerar o processo de recuperação natural. No caso do dano de mortandade de peixes, a recuperação externa selecionada é o peixamento. Segundo Gurgel e Nepomuceno (1988), entende-se por peixamento, a operação que tem como finalidade o povoamento, o repovoamento e a estocagem de coleções d'água, com larvas, pós-larvas, alevinos, juvenis e adultos de peixes, crustáceos, moluscos, mamíferos, etc. No geral, estas ações colaboram para o aumento no número de peixes no local alvo da ação.

Os cenários de peixamento foram construídos para a valoração considerando que o horizonte temporal de 25 e 50 anos não apresentaram redução no tempo de recuperação quando comparados com a curva de recuperação natural. Nessas simulações, tão logo a inclusão de indivíduos na APDL cessa, a população retoma o curso da recuperação natural sem peixamento. Optou-se, então, por simular peixamentos anuais de 100 e 200 mil indivíduos até que o tamanho populacional de cada cenário se igualasse ao da linha base, resultando em 141 e 128 anos de peixamento, o que corresponde, respectivamente, aos anos 2166 e 2153. Contudo, logo após o fim da liberação de novos indivíduos existe uma breve redução do tamanho populacional nos primeiros anos (Figura 58) de aproximadamente 3 e 7% do tamanho populacional da linha base. No ano 2180, ambos os cenários retomam 100% do tamanho populacional da linha base, dois anos após a recuperação total do ambiente, ou seja, após o escoamento do rejeito no leito do rio Doce.

Assim, a Figura 58 exibe a dinâmica populacional simulada de *Hypostomus affinis* para as condições pré e pós-desastre, com queda inicial de 95% da população, estimativa de tamanho populacional inferior e atividade de peixamento de (a) 100 mil e (b) 200 mil indivíduos anuais. As linhas azul claro e vermelha representam, na sequência, a condição pré-desastre (controle) e a população da APDL na ausência de recuperação natural. A linha verde indica a APDL com recuperação natural de 163 anos na ausência de peixamento. As linhas rosa, lilás e azul escuro representam a APDL na presença de recuperação natural e atividade de peixamento por, respectivamente, 25, 50 e 128 anos. As linhas verticais indicam o momento do desastre (linha contínua), o início (linha tracejada) e o fim das atividades de peixamento (linhas pontilhadas).

Figura 58 – Dinâmica populacional simulada de *Hypostomus affinis* para as condições pré e pós-desastre.



Fonte: Lactec, 2021.

Conclui-se que os esforços de peixamento realizados no rio Doce a fim de acelerar o povoamento da espécie *H. affinis* não promove resultados satisfatórios que justifiquem investimentos nessas ações, pois, não aceleram o processo e, quando cessam, os poucos benefícios gerados não se sustentam, sendo a curva de recuperação natural o único comportamento que se mantém. Foi devido a esse resultado que a perda calculada na recuperação natural, foi apresentada como a perda interina descontada devida à sociedade, pois, diante desses cenários, a equipe técnica decidiu considerar que não há recuperação externa viável que acelere a recuperação do dano à ictiofauna. Assim, a quantidade de indivíduos calculados na perda interina deverá ser totalmente compensada.

4.4.7 CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES QUANTO AS DECISÕES CONSERVADORAS PARA A CONSTRUÇÃO DOS MODELOS E ESTIMATIVAS

Embora as simulações não indiquem extinção da espécie avaliada, o cenário é preocupante para a ictiofauna da bacia do Rio Doce. Outras espécies possuem características ecológicas semelhantes a *H. affinis* e, portanto, estão suscetíveis aos mesmos danos. Além disso, os cenários reais podem ser ainda mais drásticos uma vez que as simulações partem de algumas premissas bastante conservadoras:

a) A capacidade de suporte no cenário pós-desastre foi considerada igual àquela pré-desastre. Na ausência de estimativas da densidade populacional máxima nos cenários pré e pós-desastre, considerou-se que não houve redução na capacidade de suporte na APDL após a passagem da lama de rejeitos. Contudo, essa estimativa é conservadora, uma vez que a lama de rejeitos alterou drasticamente a rede alimentar (RT DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016), possivelmente reduzindo a capacidade

de suporte das populações em relação ao cenário pré-desastre, reduzindo a densidade populacional dessas populações e aumentando as probabilidades de extinção.

b) Consideramos os parâmetros reprodutivos do cenário pós-desastre similar ao cenário pré-desastre, permitindo que o máximo de indivíduos juvenis cheguem (por nascimento ou dispersão) à APDL anualmente. Considerando que a espécie se reproduz na vegetação ripária (FROESE e PAULY, 2019), a qual apresentou grande perda em decorrência da passagem e deposição da lama e, que houve destruição de áreas de reprodução e desenvolvimento das populações de peixes (RT DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016, FERNANDES *et al.*, 2016), possivelmente houve uma redução nas suas taxas de recrutamento e diminuição da sobrevivência de juvenis na APDL, reduzindo a capacidade de manutenção de suas populações e aumentando sua probabilidade de extinção local.

c) Devido à ausência de metodologias que permitam estimar o recrutamento a partir dos dados coletados e, assumindo uma postura conservadora, considerou-se o recrutamento anual máximo, introduzindo o teto da capacidade de suporte para indivíduos na idade 1 a cada ciclo do modelo. Contudo, embora testes de sobrevivência de ovos e larvas provenientes da APDL não tenham sido realizados é conhecido que as fases iniciais de desenvolvimento de peixes, especialmente aqueles relacionados ao substrato, como *H. affinis*, são mais suscetíveis a danos causados por agentes tóxicos do que indivíduos adultos. Além de possuírem menos condições fisiológicas para lidar com condições desfavoráveis, devido a imaturidade do seu sistema de defesa, indivíduos nos estágios iniciais de desenvolvimento estão mais expostos aos agentes tóxicos devido a sua alta relação entre área superficial e volume corporal quando comparados a adultos, tornando-os ainda mais suscetíveis a danos causados pelo rejeito depositado. Adicionalmente, devido à menor capacidade de se deslocar na coluna d'água, eles são incapazes de buscar por áreas menos degradadas (HUTCHINSON, SOLBE e KLOEPPER-SAMS, 1998; MALBROUCK e KESTEMONT, 2006; WITECK *et al.*, 2011; TAVARES-DIAS *et al.*, 2013). Dessa forma, a manutenção das populações na APDL se torna bastante dependente de dispersão. Contudo, a espécie apresenta baixa vagilidade, de forma que a dispersão de indivíduos de outras áreas não deve ser extensa.

Pelas razões abordadas nos itens b e c, os cenários de peixamento foram feitos a partir da introdução de indivíduos adultos. Contudo, uma vez que as simulações das populações da APDL nesse projeto utilizaram taxas conservadoramente máximas de recrutamento, ou seja, o número máximo de indivíduos suportados pela capacidade de suporte do ambiente que chega à população da APDL, por nascimento ou migração, todos os anos, o aumento no número de indivíduos da população via peixamento acarreta apenas em um ligeiro aumento populacional em curto prazo, uma vez que esses indivíduos não contribuem para um acréscimo nas taxas de recrutamento ao longo do tempo. Além disso, a longo prazo, o incremento no tamanho populacional através de peixamento cessa logo após a liberação de indivíduos na natureza se encerrar. Isso ocorre devido as maiores taxas de mortalidade nos anos seguintes ao fim do peixamento quando comparadas a mortalidade da linha base. Entretanto, é pouco provável que em uma população real o acréscimo no número de indivíduos não aumente as taxas de recrutamento da espécie. Dessa forma, o modelo aqui apresentado deve ser interpretado como a porcentagem mínima que a população de *H. affinis* perdeu em decorrência do desastre da Samarco.

4.4.8 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPENSAÇÃO

Após a definição da perda interina e das análises dos cenários de recuperação natural e externa, o próximo passo da valoração econômica dos danos causados à ictiofauna do rio Doce, é a construção da curva de compensação.

Conforme os argumentos já apresentados sabe-se que no rio Doce não será viável a execução de ações de recuperação externa via peixamento, desse modo, a outra possibilidade identificada pela equipe técnica foi a execução dessas ações de peixamento como compensação nos tributários do rio Doce. No entanto, ao se debruçar sobre tal possibilidade, a conclusão obtida foi de inviabilidade, devido aos seguintes fatores:

- Não há dados de coleta ao longo dos tributários, nem mesmo disponíveis o suficiente na literatura, que permitam a construção de estimativas. A ausência dessas informações inviabiliza a estimativa do quanto de incremento, de fato, o peixamento poderia oferecer;
- Se os tributários tiverem outros impactos oriundos de outras fontes poluidoras, não há dados suficientes que permitam construir uma linha base dessas populações nos tributários e nem dados sobre as condições desses rios que possibilitem modelar o peixamento e seus efeitos. Assim, mesmo que isso fosse feito em outras bacias que não seja o rio Doce, o problema permanece;
- No caso de realizar o peixamento em um rio mais preservado, a linha base da população nesse ambiente pode já estar em equilíbrio e o próprio sistema não permitir que o peixamento tenha efeitos ou esta atividade pode causar efeitos colaterais por meio da alteração do equilíbrio já existente no local;
- No presente estudo o modelo matemático utilizado para a recuperação natural já considera parâmetros otimistas, o que inviabiliza identificar melhorias oriundas de outras fontes geradoras de benefícios ambientais, como recuperação externa e até mesmo compensação, visto que em outros locais não afetados pelo desastre, entende-se que a situação de linha base encontrada seria uma situação de equilíbrio. Outra possibilidade estudada foi a de alterar o modelo, na tentativa de torná-lo mais realista (pessimista), o que traria uma perda interina muito maior a ser cobrada devido ao desastre. No entanto, considerando o modelo realista como recuperação natural e o modelo otimista como recuperação externa, os benefícios ambientais obtidos não serão maiores do que aqueles já detectados pelo modelo atual (recuperação natural), fornecendo assim a conclusão de que a perda interina não muda, pois não há soluções (ao menos considerando os dados e informações utilizados para a construção do modelo) que façam obter ganhos maiores do que aqueles já estimados pelo resultado atual. Logo, a curva de recuperação natural é o máximo de melhoria obtida e a perda interina calculada é o mínimo de perda gerada pelo desastre.

Diante dos pontos expostos conclui-se que a compensação por peixamento em outros rios que não seja o rio Doce também é algo inviável de se estimar, devido à ausência de informações necessárias para a construção do modelo e ao risco elevado desses ambientes não precisarem de peixamento e o mesmo ser pouco eficaz ou provocar um desequilíbrio ambiental.

Considerando que o método de valoração MEH/MER precifica o dano por meio do custo necessário para execuções de ações de recuperação e compensação ambiental, não há outra possibilidade de precificar o dano causado à ictiofauna e medido pela perda interina sem elaborar um projeto de compensação. Por isso, a solução encontrada, já que as simulações de peixamento como compensação são inviáveis de serem construídas dentro de um cenário aplicado à realidade, é elaborar esse peixamento como uma compensação pecuniária, ou seja, um peixamento hipotético realizado no rio Doce. Hipotético, porque como já explicado, não se recomenda que seja realmente executado no local tendo em vista os danos relacionados a contaminação. Logo, o projeto compensatório hipotético é desenhado apenas para fins de mensuração do custo financeiro necessário para compensar a perda interina da sociedade, sendo uma decisão conservadora.

Tomada esta decisão passou-se então a construção da curva de compensação com base nesse projeto de peixamento hipotético. Conforme o escopo delimitado, explicado com mais detalhes no item 4.4.10, sabe-se que nos primeiros 5 anos, as atividades a serem executadas estão relacionadas com a implementação do projeto, e após esse período, inicia-se o processo de produção e peixamento que perdurará por 10 anos, resultando em um total de 15 anos de duração.

Tal horizonte temporal é levado em consideração pelo MEH/MER, pois os benefícios ambientais obtidos por essa ação compensatória são contabilizados e descontados no tempo considerando o ano da sua efetivação. Assim sendo, o início da obtenção dos benefícios do peixamento hipotético começa em 2027, pois é o ano em que o repovoamento é iniciado no projeto. Obedecendo esse fluxo temporal a Tabela 45 expõe o quantitativo de peixe produzido pelo projeto, considerando uma produção de alevinos de aproximadamente 1.500.000 indivíduos (sendo que a quantidade mínima necessária para equiparar a perda interina é de 1.421.000 indivíduos), taxa de sobrevivência de 50% e uma taxa de reprodução natural de 10%, cujas justificativas encontram-se no item 4.4.10. Com base nesses valores iniciais, tem-se o quantitativo de indivíduos de *H. affinis* inseridos novamente no rio Doce, na coluna “indivíduos adicionados”, sendo este o benefício ambiental não descontado compensado à sociedade, ou seja, não considerando o tempo de retorno desse recurso.

Tabela 45 – Produção e repovoamento de indivíduos do *H. affinis* do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna

Ano	Estocagem	Taxa de sobrevivência (50%)	População (estocagem)	Reprodução Natural (10%)	Indivíduos adicionados (estocagem + reprodução natural)
2027	1.421.000	710.500	500.000	0	500.000
2028	1.421.000	710.500	1.210.500	75.000	1.285.500
2029	1.421.000	710.500	1.921.000	121.050	2.042.050
2030	1.421.000	710.500	2.631.500	192.100	2.823.600
2031	1.421.000	710.500	3.342.000	263.150	3.605.150
2032	1.421.000	710.500	4.052.500	334.200	4.386.700
2033	1.421.000	710.500	4.763.000	405.250	5.168.250
2034	1.421.000	710.500	5.473.500	476.300	5.949.800
2035	1.421.000	710.500	6.184.000	547.350	6.731.350
2036	1.421.000	710.500	6.894.500	618.400	7.512.900

Fonte: Lactec, 2021.

Após a obtenção do quantitativo de indivíduos de *H. affinis* inseridos novamente no rio Doce, é aplicado o desconto nesse quantitativo trazendo tais valores para o valor presente de 2015, obtendo assim, um total de 10.103.155,06 indivíduos adicionados, como compensação aos 10.105.769,16 indivíduos perdidos ao longo do tempo (perda interina) devido ao desastre do rompimento da barragem de Fundão. Apesar do número obtido por meio da compensação ser inferior ao da perda interina, opta-se por aceitar tal valor, como uma forma de arredondamento para baixo. A Tabela 46 mostra que é necessário incrementar 40.005.300,00 indivíduos no rio Doce, para que considerando o desconto, esse valor seja equivalente e próximo ao da perda interina.

Tabela 46 – Ganho ambiental descontado do repovoamento de indivíduos do *H. affinis* do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna

Ano	Fator de desconto	Ganhos da ação de compensação (número de indivíduos)	Ganhos da ação de compensação DESCONTADO (número de indivíduos)
2027	0,397	500.000,00	198.556,88
2028	0,368	1.285.500,00	472.675,68
2029	0,340	2.042.050,00	695.238,47
2030	0,315	2.823.600,00	890.116,48
2031	0,292	3.605.150,00	1.052.308,92
2032	0,270	4.386.700,00	1.185.588,81
2033	0,250	5.168.250,00	1.293.349,54
2034	0,232	5.949.800,00	1.378.640,44
2035	0,215	6.731.350,00	1.444.199,08
2036	0,199	7.512.900,00	1.492.480,77
TOTAL		40.005.300,00	10.103.155,06

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 59 – Curva de compensação do peixamento hipotético do *Hypostomus affinis* no rio Doce, valores descontados.



Fonte: Lactec, 2021.

4.4.9 TAXA DE EQUIVALÊNCIA DA COMPENSAÇÃO

A taxa de equivalência reflete a qualidade ambiental obtida após a execução da ação compensatória, de maneira a determinar se a compensação fornecida é equivalente em termos qualitativos à qualidade ambiental existente antes do desastre. Para o recurso ictiofauna a taxa de equivalência atribuída à compensação foi igual a 1, o que significa que a qualidade ambiental da compensação é

igual a qualidade ambiental do pré-desastre. Tal determinação se deu de forma conservadora, visto que a compensação definida se trata de um projeto hipotético, cuja execução não é recomendada.

Diante do que foi apresentado anteriormente, que não há recuperação externa capaz de acelerar o processo natural, e a ausência de informações que permitam a construção de uma curva compensatório em outro corpo hídrico, acrescentando a dificuldade em incorporar a contaminação no processo de mensuração da valoração, o estabelecimento de uma taxa equivalente diferente de 1 seria duvidoso, a vista da dificuldade de se mensurar corretamente essa diferença, levando a opção conservadora igual a 1.

4.4.10 DETALHAMENTO DAS AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA OS DANOS CAUSADOS À ICTIOFAUNA

Conforme já apontado no item que trata da curva de compensação, a ação compensatória selecionada para precificação dos danos causados à ictiofauna é o peixamento hipotético. Para tanto foram listadas ações para a execução de um projeto e peixamento básico.

O Programa de estocagem aqui elaborado, possui um horizonte temporal de 15 anos (2022-2037) e prevê a realização de diversas ações como o desenvolvimento de um projeto executivo; o estabelecimento de parcerias interinstitucionais; a capacitação e apoio técnico a produtores; a reprodução de espécies nativas, com a definição da produção de espécie prioritária (cascudo *Hypostomus affinis*); a implantação de um programa de repovoamento (estocagem) e o monitoramento de desembarque de pescado.

Cabe destacar que as ações sociais inseridas no escopo desse projeto não tem como objetivo gerar benefícios socioeconômicos, principalmente renda, pelo contrário, são ações sociais padronizadas que são realizadas em qualquer projeto básico de peixamento, isto porque se faz necessário contar com pessoas locais para auxiliar na produção dos alevinos, mesmo que tal atividade não gere renda aos envolvidos. Tal esclarecimento se faz necessário a fim de expor que o custo financeiro exigido por esse projeto não contempla custos vinculados a ações socioeconômicas, que estão fora do escopo ambiental considerado.

Etapas 1: ESTABELECIMENTO DAS DIRETRIZES DO PROGRAMA DE ESTOCAGEM

É necessário o estabelecimento de um projeto executivo para a produção de *Hypostomus affinis* nativos da bacia do rio Doce com a finalidade de recompor as populações naturais desta espécie. Para tanto tem-se como objetivos dessa etapa: estudar as potencialidades de criação de peixes (alevinos) ao longo da bacia do rio Doce, compatibilizando-as com ações de conservação ambiental; e implantar programa de repovoamento e controle de desembarque de pescado ao longo do rio Doce.

Os procedimentos desta etapa são:

- Elaboração de projeto zootécnico para a produção de *Hypostomus affinis*;
- Realização de convênios, contratos de repasse ou acordos de cooperação técnica com instituições que já possuam base operacional de produção;
- Desenvolvimento de pacotes tecnológicos para a produção de *Hypostomus affinis* nativos da bacia do rio Doce, com a finalidade de recompor as populações naturais desta espécie;

- Identificação de interessados em participar da implementação dos projetos;
- Elaboração de plano de ordenamento pesqueiro participativo;

Etapas 2: DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS DE REPRODUÇÃO E ALEVINAGEM

Esta etapa se refere a reprodução e alevinagem do cascudo *Hypostomus affinis* para a realização de atividades de repovoamento (estocagem) e posterior monitoramento e avaliação, considerando a capacidade de produção. O objetivo é desenvolver tecnologias de reprodução artificial, larvicultura e alevinagem de *Hypostomus affinis* nativos da bacia do rio Doce, com a finalidade de recompor as populações naturais desta espécie.

Os procedimentos desta etapa são:

- Obtenção de matrizes e reprodutores de *Hypostomus affinis* nativos da bacia do rio Doce;
- Realização da reprodução, larvicultura e alevinagem de *Hypostomus affinis* visando a produção de pós larvas-juvenis/alevinos para destinação a ações de repovoamento.

Etapas 3: IMPLANTAÇÃO DE ESTRUTURA DE PRODUÇÃO

Implantação e adaptação de unidades de produção aquícola para o cultivo de *Hypostomus affinis*. Os objetivos dessa etapa são a implantação das estruturas de produção de alevinos de *Hypostomus affinis* por meio de parcerias com pisciculturas regionais de pequeno porte, bem como o apoio a organização e estruturação de associações/cooperativas de produtores e, por fim, a disponibilização de fundos para a implantação ou melhoramento dos sistemas produtivos.

Os procedimentos desta etapa são:

- Solicitação de autorizações dos órgãos ambientais:
 - Licenciamento ambiental;
 - Cadastros em agências de fiscalização agropecuária;
 - Cadastro Técnico Federal (CTF) (IBAMA);
 - Cadastro da agência de fiscalização agropecuária;
 - Guia de Trânsito de Animal (GTA);
 - Anotação de Responsabilidade Técnica (ART);
- Estabelecimento de parcerias com piscicultores de pequeno porte para a viabilização da produção de *Hypostomus affinis* nativos da bacia do rio Doce, com a finalidade de recompor as populações naturais desta espécie.
- Implantação/adaptação de unidades de produção aquícola:
 - Infraestrutura;
 - Sistema de abastecimento e drenagem;
 - Tratamento de efluente;
 - Manejo produtivo;
 - Capacitação de produtores em técnicas zootécnicas de criação de *Hypostomus affinis*;

Etapa 4: PRODUÇÃO

O objetivo dessa etapa é realizar a produção de alevinos do cascudo *Hypostomus affinis* para as atividades de povoamento/estocagem na bacia do rio Doce, com a finalidade de recompor as populações naturais desta espécie.

Os procedimentos desta etapa são:

- A produção e a quantidade de alevinos soltos dependem da capacidade produtiva (piscicultura) e obviamente da estratégia reprodutiva da espécie. De acordo com Duarte e Araújo (2002), a fecundidade do gênero *Hypostomus* é baixa, com um pequeno número de óvulos grandes e adesivos (entre 1.235 e 4.304, com uma média de 2374);
- Capacidade de produção: 1.000.000 alevinos/ano;
- Taxa de sobrevivência: Considerando a fecundidade (capacidade de reprodução) de *H. affinis* (MAZZONI & CARAMASCHI, 1997; DUARTE & ARAUJO, 2002) e a estratégia de cuidado parental de cascudos loricariídeos (VAZZOLER, 1996), a taxa de sobrevivência considerada foi de 50%, valor semelhante ao estimado para o cascudo-preto *Rhinelepis aspera* em condições de cultivo (LÓPEZ, 2005; GUERREIRO et al., 2011).

Etapa 5: AÇÕES DE REPOVOAMENTO

Nesta etapa, que ocorre concomitantemente com a etapa 4, se refere a realização do repovoamento do cascudo *Hypostomus affinis* na bacia do rio Doce e posterior monitoramento e avaliação das ações, considerando a capacidade de execução estabelecida.

Os objetivos dessa etapa são: a realização das atividades de repovoamento do cascudo *Hypostomus affinis* na bacia do rio Doce, com a finalidade de recompor as populações naturais desta espécie; a execução do monitoramento por meio de indicadores de produção pesqueira e o estabelecimento de parcerias com setor público, segmentos organizados da sociedade civil, setor produtivo e academia.

Os procedimentos desta etapa são:

- Realização de diagnóstico dos locais onde o repovoamento será realizado;
- Mobilização da comunidade para os eventos de estocagem, com a participação ativa dos presentes na soltura dos alevinos;
- Realização de atividades de estocagem do cascudo *Hypostomus affinis* na bacia do rio Doce.
- Seis repovoamentos por ano;
- Monitoramento da ictiofauna por meio de indicadores de produção pesqueira.

O prazo de execução desta etapa de estocagem foi estimado em 10 anos, considerando que a degradação do ambiente aquático fluvial promoveu o estabelecimento de uma assembleia de peixes simplificada, a qual ainda não apresenta sinais evidentes de retorno aos valores observados nos dados de referência de acordo com os modelos apresentados (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c). Além disso, considerando que os diferentes biomarcadores de avaliação de saúde demonstraram que as espécies bentônicas, como os cascudos, apresentaram os piores efeitos deletérios dos EPTs (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c), a capacidade de assimilação dos resíduos e poluentes pelo ecossistema aquático

atingido não é conhecida. Esta capacidade depende das características do corpo hídrico, da biota atingida e da natureza e quantidade do poluente (BRAGA et al., 2002), que são fatores limitantes da capacidade de autodepuração (VON SPERLING, 1996).

O tempo estimado também abrange todas as intervenções e procedimentos que devem ser adotados na rotina de produção dos organismos, com o objetivo de proporcionar uma maior eficiência produtiva e segurança da criação, maximizando a sobrevivência dos peixes (OSTRENSKY & BOEGER, 1998).

Tabela 47 – Cronograma de execução do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna

Atividades	Ano														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Estabelecimento das Diretrizes do Programa de Estocagem	■														
Desenvolvimento de Estudos de Reprodução e Alevinagem		■	■	■											
Implantação de Estrutura de Produção				■	■	■									
Produção							■	■	■	■	■	■	■	■	■
Ações de Repovoamento							■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fonte: Lactec, 2021.

4.4.11 VALOR MONETÁRIO DO DANO

Após a definição do escopo do projeto de peixamento hipotético no rio Doce da espécie *Hypostomus affinis*, passou-se a fase de orçamentação dos custos para execução dessas atividades. Desse modo, considerando os preços de março de 2021 foi elaborado o orçamento do projeto, conforme mostrado de forma resumida na Tabela 48.

Tabela 48 – Orçamento simplificado do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna

Etapas	Valor
Etapa 1: ESTABELECIMENTO DAS DIRETRIZES DO PROGRAMA DE ESTOCAGEM	R\$ 250.000,00
Etapa 2: DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS DE REPRODUÇÃO E ALEVINAGEM	R\$ 2.500.000,00
Etapa 3: IMPLANTAÇÃO DE ESTRUTURA DE PRODUÇÃO	R\$ 2.500.000,00
Etapa 4: PRODUÇÃO	R\$ 6.200.000,00
Etapa 5: AÇÕES DE REPOVOAMENTO	R\$ 3.800.000,00
Total	R\$ 15.250.000,00

Fonte: Lactec, 2021.

Para a execução do projeto hipotético elaborado é necessário o investimento de R\$ 15.250.000,00. Esse valor é distribuído em um fluxo de caixa considerando o cronograma de execução exposto anteriormente na Tabela 48, e apresentado na Tabela 49. Após a construção do fluxo de caixa, considerando o início do projeto no ano de 2022, é aplicado sobre os valores a taxa de desconto, a fim de obter o valor total do projeto a valor presente de 2021, conforme já explicado no item sobre a metodologia deste documento.

Tabela 49 – Cronograma financeiro de execução do projeto de peixamento hipotético no rio Doce, como forma de compensação dos danos causados à ictiofauna

Ano	Fluxo de caixa do projeto (Valor anual despendido não descontado)	Fator de desconto	Fluxo de caixa do projeto (Valor anual despendido descontado a VP de 2021)
2022	R\$ 250.000,00	0,925925926	R\$ 231.481,48
2023	R\$ 1.250.000,00	0,85733882	R\$ 1.071.673,53
2024	R\$ 1.250.000,00	0,793832241	R\$ 992.290,30
2025	R\$ 1.250.000,00	0,735029853	R\$ 918.787,32
2026	R\$ 1.250.000,00	0,680583197	R\$ 850.729,00
2027	R\$ 1.000.000,00	0,630169627	R\$ 630.169,63
2028	R\$ 1.000.000,00	0,583490395	R\$ 583.490,40
2029	R\$ 1.000.000,00	0,540268885	R\$ 540.268,88
2030	R\$ 1.000.000,00	0,500248967	R\$ 500.248,97
2031	R\$ 1.000.000,00	0,463193488	R\$ 463.193,49
2032	R\$ 1.000.000,00	0,428882859	R\$ 428.882,86
2033	R\$ 1.000.000,00	0,397113759	R\$ 397.113,76
2034	R\$ 1.000.000,00	0,367697925	R\$ 367.697,92
2035	R\$ 1.000.000,00	0,340461041	R\$ 340.461,04
2036	R\$ 1.000.000,00	0,315241705	R\$ 315.241,70
	R\$ 15.250.000,00		R\$ 8.631.730,27

Fonte: Lactec, 2021.

Após a aplicação da taxa de desconto, obtém-se um valor total do projeto a VP de 2021 de R\$ 8.631.730,27 sendo este o valor do dano causado à espécie *Hypostomus affinis*.

Porém, para se obter o valor final do dano causado à ictiofauna do rio Doce, decorrente do rompimento da barragem de Fundão, foi necessário multiplicar o valor do dano do *H. affinis* com o quantitativo total de espécies de peixes nativas da região. De acordo com os inventários que sistematizam o conhecimento da ictiofauna da bacia do rio Doce (e.g. VIEIRA, 2009/2010; MARQUES et al., 2013; VIEIRA et al., 2015), o número de espécies de peixes que foi registrado antes do desastre foi de 104 espécies, o que inclui 84 espécies nativas e 20 exóticas. Esse artifício foi utilizado, a fim de, com base na valoração do dano da espécie chave selecionada, poder extrapolar tal valor para as demais espécies nativas, obtendo assim o valor total do dano causado à ictiofauna do rio Doce. Tal processo é uma simplificação matemática aceita pelo MEH/MER, pois é inviável realizar uma valoração econômica de danos para cada uma dessas espécies inventariadas, principalmente pela dificuldade de se obter dados e informações disponíveis sobre todas.

Assim, este processo tem como base a premissa de que os danos sofridos pela ictiofauna e o investimento financeiro necessário para obtenção do retorno desse recurso natural à sociedade é semelhante aos danos e recursos financeiros mensurados para a espécie chave (*Hypostomus affinis*). É possível que haja espécies de peixes cujo tempo de retorno do recurso seja menor, reduzindo a perda interina, e por outro lado, haja espécies de peixes cujo tempo de retorno seja maior, aumentando esta perda, bem como pode haver peixes cujo custo da compensação seja maior ou menor, por isso ao assumir os valores referentes apenas a uma espécie julga-se que esta representa uma média do comportamento do dano e do esforço financeiro a ser realizado para sua compensação. Logo, ao

multiplicar o valor do dano descontado do *H. affinis* por 84 (número de espécies nativas) tem-se um valor total do dano descontado causado à ictiofauna do rio Doce de R\$ 707.801.882,24 sendo este o valor final da valoração econômica do dano causado a este recurso (Tabela 50).

Tabela 50 – Resultado final da valoração dos danos ambientais causados à ictiofauna do rio Doce

Valor do dano causado à espécie <i>Hypostomus affinis</i>	R\$ 8.631.730,27
Quantidade de espécies nativas do rio Doce	84
Valor total dos danos causados à ictiofauna do rio Doce	R\$ 707.801.882,24

Fonte: Lactec, 2021.

4.5 ÁREA MARINHA

4.5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS CAUSADOS À ÁREA MARINHA

A lama de rejeitos provenientes do desastre ocorrido no dia 05 de novembro de 2015 alcançou a foz do rio Doce no dia 21 de novembro do mesmo ano, atingindo seu estuário e oceano. A intensidade e extensão dos rejeitos na área marinha variou em função da sazonalidade e de eventos climáticos e oceanográficos que ocorreram posteriormente. Foram identificados danos à qualidade da água, sedimentos e às comunidades biológicas.

Conforme já apresentado no diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e), a área de abrangência e os limites considerados nos estudos compreendem: ao sul, a região da Área de Proteção Ambiental Costa das Algas, Aracruz, ES, e ao norte a foz do rio Mariricu, afluente do rio São Mateus, Linhares, ES.

A Zona Costeira e Marinha foi subdividida em duas grandes áreas (compartimentos). O Compartimento 4 (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 Compartimento 5 (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 60). Faz parte do C5, também, as faixas de praia arenosa e os manguezais.

- **Presença de pluma na coluna d'água marinha**

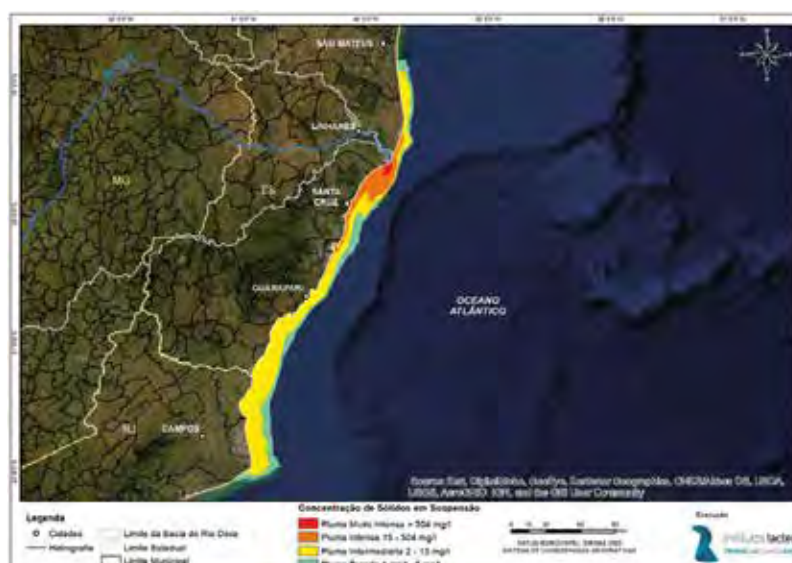
Após o rompimento da barragem de Fundão no dia 05 de novembro de 2015, a lama de rejeitos minerários atingiu a costa do Espírito Santo no dia 21 do mesmo mês. No oceano, a lama de rejeitos se dispersou e passou a ser denominada de pluma de rejeitos. Devido aos constantes processos de mistura e transporte, a área da pluma não é fixa, e variou continuamente ao longo do tempo e até o momento.

Para a definição da área e intensidade da pluma foram utilizadas diferentes metodologias e conjuntos de dados. Aqui, para o contexto da valoração econômica, foi utilizado o resultado da pluma consolidada, que está explicada resumidamente a seguir. Os detalhes do estudo relacionado à pluma de rejeitos do desastre, pode ser consultado em BRASIL (MPF)/LACTEC (2020b).

Para o cálculo consolidado da área da pluma de rejeitos foram utilizados os resultados das modelagens numéricas de concentração de sólidos suspensos que foi confrontado, para verificação, com os dados de turbidez das imagens de satélite do sensoriamento remoto. Para isso, foram aplicados dois cenários, verificando a diferença do traçador, para o percentil de 95%, com e sem o desastre da Samarco, isolando dessa forma quaisquer outros fatores que não aqueles provenientes do rompimento da barragem. O período simulado foi de 21/10/2015 a 20/10/2016. A intensidade da pluma foi calculada com base na diferença da concentração de sólidos em suspensão (com e sem ruptura da barragem), e classificada em áreas nas quais em 5% do tempo ocorreram concentrações (devido à ruptura da barragem de Fundão): maiores que 504 mg/l – muito intensa; entre 15 e 504 mg/l – intensa; entre 2 e 15 mg/l – intermediária; entre 1 e 2 mg/l - branda (detalhes em BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b).

Os resultados mostraram que, para o período considerado, a extensão aproximada da pluma (considerando a pluma branda) junto à costa foi de 93 km para norte (Município de São Mateus – ES) e 325 km para sul (município Campos dos Goytacazes – RJ), com largura variável de 12 e 23 km. Já a pluma intensa foi mais restrita e se estendeu junto a costa em 30 km para norte e 118 km para sul da foz do rio Doce, com largura variável de 4 e 21 km (Figura 61).

Figura 61 – Diferença de concentração (percentil 95%) (com e sem desastre), definida como área de passagem da pluma de rejeitos de Fundão.



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC (2020b).

A chegada da lama de rejeitos e sua dispersão no oceano ocasionaram alterações físicas, químicas e biológicas. Dois danos decorrentes da dispersão dos rejeitos na zona costeira e marinha e da presença da pluma foram utilizados para a valoração econômica e estão descritos abaixo.

- **Incremento na deposição de sedimentos**

A deposição no leito oceânico de material em suspensão que vem dos rios ocorre naturalmente. Com o rompimento da barragem de Fundão e a chegada dos rejeitos até a região costeira, houve um incremento no lançamento e deposição de sedimentos no oceano. Sendo assim, o transporte e deposição de sedimento, além do natural, foi considerado um dano.

Para a análise do incremento na deposição do sedimento foi utilizada a concentração de sólidos totais suspensos vindos do rio Doce, parâmetro utilizado nas simulações matemáticas junto às informações oceanográficas, hidrológicas e meteorológicas. Foram simulados dois cenários, sendo um para calcular a área e espessura da deposição esperada naturalmente, e outro incluindo os efeitos do desastre no período de 21/10/2015 a 20/10/2016 (detalhes da metodologia podem ser consultados em (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b); detalhes dos resultados constam em (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e) .

O incremento da deposição do sedimento devido à chegada do rejeito no oceano ocorreu em uma área de aproximadamente 80 km para norte da foz do rio Doce e 140 km para sul, com uma largura aproximada de 25 km. O incremento observado foi de até 42 vezes maior se comparado à deposição natural simulada para o mesmo período ($FC = 42$), e em praticamente toda a área qualificada a sedimentação foi no mínimo seis vezes maior ($FC = 6$) que a sedimentação típica (Figura 62). A espessura do sedimento depositado variou ao longo da área afetada, sendo que a maior parte da área apresentou em torno de 1 mm de deposição extra, e quanto mais próximo da foz do rio Doce, maior a espessura, chegando a valores próximos de 10 cm para o período calculado (primeiro ano após o desastre).

Figura 62 – 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 (sem desastre).



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC (2020e).

Da mesma forma como foi considerado na valoração dos recursos da ictiofauna e detalhado no TOMO II – Ambientes Aquáticos Continentais do Relatório de Acompanhamento de Danos, o mesmo período temporal para transporte do sedimento para a foz do rio foi considerado na valoração da área marinha, ou seja os 163 anos. O aporte de sedimento ao oceano, associado ao desastre, vem diminuindo, já que a quantidade de sólidos suspensos e sedimentos vindos do rio, provenientes do desastre, estão reduzindo com o tempo.

Ainda assim, a equipe de valoração considerou os estudos feitos sobre o tempo necessário para a retirada do rejeito do rio Doce, considerando o processo natural de transporte de sedimentos feito pelo rio. O tempo para retirada natural dos rejeitos do Rio Doce entre Candonga e Colatina, caso eles tivessem sido depositados inteiramente no trecho analisado e estivessem disponíveis para serem removidos naturalmente pela erosão fluvial ao longo do tempo, está entre 37 e 54 anos. Caso a mesma estimativa

seja feita para todo o volume de rejeitos de Fundão, a previsão está entre 113 e 163 anos, caso eles estivessem disponíveis para serem removidos naturalmente pela erosão fluvial ao longo do tempo.

Além dessa contínua deposição de rejeitos, há também o material que já foi aportado ao oceano e continua presente no ambiente de maneira permanente, apesar de a circulação das correntes marinhas e demais interações do ambiente terem potencial de dispersar ou locomover o sedimento.

Além das alterações físicas do ambiente ocasionadas pela deposição do sedimento, a presença de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) também é ressaltada. Embora tais variáveis não sejam inseridas nos cálculos matemáticos utilizados para a valoração, ainda assim, convém ressaltar esta problemática, pois ela também explica as interações prejudiciais da presença do rejeito com o habitat em si. Átomos de elementos químicos são persistentes no ambiente, e quando se trata de ambiente marinho o tempo de residência é ainda maior devido a influência de fatores como pH e salinidade na velocidade da ciclagem. Cátions abundantes (como K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) podem apresentar tempo de residência de 10^7 anos, enquanto outros como o Mn^{2+} , presentes naturalmente em menores concentrações, porém que foram massivamente disponibilizados em função do desastre ocorrido, tendem a apresentar uma permanência inferior, mas ainda significativa em termos de resiliência ambiental, da ordem de 1400 anos (mais detalhes em (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e). Aspectos sobre a contaminação e seus efeitos e danos ocasionados pelo desastre não estão sendo valorados devido à ausência de informações e dados suficientes que atendam às exigências da metodologia de valoração, no entanto, a existência de EPTs é um fator negativo presente no habitat, e diante da ausência desse aspecto na mensuração do valor do dano, é possível afirmar que o processo de valoração da área marinha é conservador.

- **Degradação da qualidade dos habitats marinhos**

O aporte da lama de rejeitos (pluma) e sua deposição no fundo do oceano, na foz do rio Doce, causaram alterações na qualidade ambiental do habitat marinho que afetaram a biota aquática de diferentes formas. Foram diagnosticados danos aos organismos desde aqueles microscópicos (como o plâncton) até animais topo de cadeia trófica. As espécies selecionadas que permitiram a medição dessa perda em amplitude de área, representando o dano de degradação, considerando suas exigências ambientais, foram a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e o boto-cinza (*Sotalia guianensis*).

O presente estudo partiu da premissa de que o intenso aporte de material oriundo dos rejeitos ocasionou danos diretos e indiretos de grande magnitude sobre as populações de quelônios e cetáceos, sobre seus habitats e/ou sobre seus recursos alimentares, sendo o dano de perda de adequabilidade ambiental aquele que melhor condensa e expressa os danos sofridos por essas espécies. As análises detalhadas podem ser verificadas no diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e).

A modelagem de nicho ecológico foi eficiente em indicar como os habitats marinhos foram prejudicados. Foi também a melhor ferramenta para a avaliação de danos à essas espécies, considerando que a reprodução lenta, grande porte e longevidade dos quelônios e dos mamíferos marinhos, aliada à sua complexidade fisiológica e ecológica, faz com que as respostas a alterações ambientais sejam muito particulares e mais lentas do que o observado para outros organismos.

A escolha das duas espécies (Figura 63) como indicadores chave para mensuração do dano de perda de adequabilidade ambiental, teve como motivo a sensibilidade que as mesmas apresentam no caso de alterações na qualidade do seu habitat, e a disponibilidade de informações especializadas e

com amplitude temporal. Ambas ocorrem na região afetada pelo desastre e utilizam e/ou dependem diretamente de áreas próximas à costa e à foz do rio Doce.

A tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) frequenta a região ao longo de todo o ano, principalmente para alimentação dos juvenis, os quais se alimentam de algas marinhas macrófitas que se desenvolvem incrustadas em rochas e corais; o boto-cinza (*Sotalia guianensis*), apresenta vulnerabilidade e tem preferência, residência e fidelidade de uso dos habitats da foz do rio Doce. As duas espécies apresentam interesse para a conservação pelo *status* de ameaçadas de extinção, segundo a lista oficial brasileira.

Figura 63 – Tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e boto-cinza (*Sotalia guianensis*)

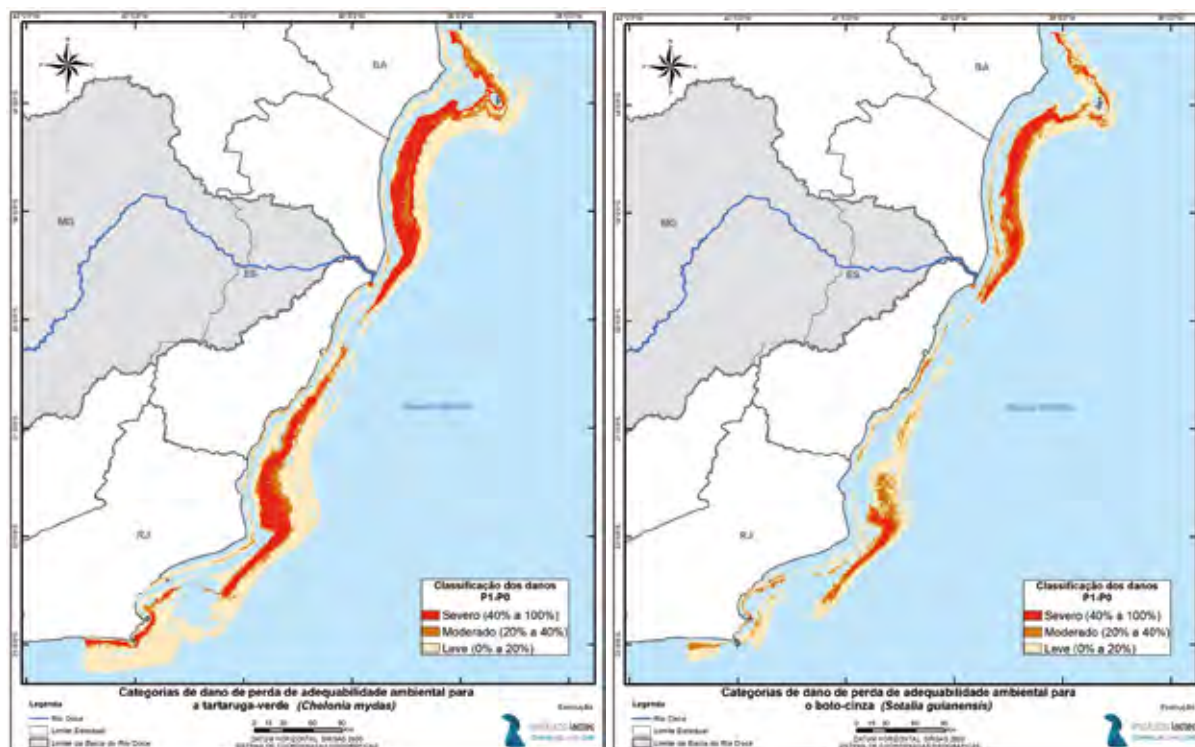


Fonte: Lactec, 2021.

A definição do dano foi realizada por meio de um comparativo com a área de distribuição e adequabilidade do habitat para cada uma das espécies, no período anterior e posterior ao desastre. Para o diagnóstico e mensuração da intensidade do dano, foi utilizado o período de novembro de 2015 a março de 2016, período no qual as alterações na qualidade da água foram mais intensas. As áreas onde houve perda de adequabilidade ambiental foram classificadas conforme a gravidade do dano, porém, essa classificação não é exposta neste estudo, pois, no contexto da valoração, elas não estão sendo utilizadas como parâmetro (as gravidades da deposição do sedimento é que foram utilizadas, e serão detalhadas no item 4.5.3 que trata da construção dos pesos utilizados). Então, para a degradação da qualidade dos habitats, partiu-se do princípio que houve o dano sempre que a adequabilidade ambiental reduziu quando comparado à linha-base.

Os resultados mostraram perda na adequabilidade ambiental para as duas espécies, em uma área total de 29.731,00 km² para a tartaruga-verde e 18.973,00 km² para o boto-cinza, tanto a sul quanto a norte da foz do rio Doce (Figura 64).

Figura 64 – Categorias de perda de adequabilidade ambiental: para a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) – mapa à esquerda; e para o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) – mapa à direita.



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC (2020e).

É importante ressaltar que os resultados das modelagens de nicho não consideraram 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. O método utilizou informações disponíveis por meio de sensoriamento remoto (imagens de satélite). Esse método foi definido uma vez que tem a capacidade de fornecer informações de uma ampla área geográfica. Para outras variáveis, como é o caso da presença de elementos potencialmente tóxicos, a disponibilidade de informações é muito mais restrita. Geralmente, contemplam alguns pontos/estações de coleta, o que ocorreu no diagnóstico em questão e também nos dados pretéritos.

É sabido que a presença de EPTs no ambiente pode acarretar em danos cumulativos a médio e longo prazo a estes organismos e outros que ocupam o mesmo nicho ecológico, de forma direta ou por meio da alimentação de organismos de tróficos inferiores, como as algas, macrofauna bêntica, peixes, entre outros. Portanto, ainda que na impossibilidade de mensuração, é esperado que a gravidade do dano de perda de qualidade dos habitats seja ainda maior do que os resultados da modelagem sugerem, o que permite afirmar que para este dano o processo de valoração também está sendo conservador.

4.5.2 SELEÇÃO DA MÉTRICA E CONSTRUÇÃO DA LINHA BASE

Dentre os danos identificados para a zona costeira e marinha, para a valoração econômica selecionou-se como o dano de referência sob o qual é aplicado o método, o dano de deposição do sedimento no leito oceânico, considerando que o sedimento aportado pelo desastre e depositado no fundo do mar estará presente no ambiente de maneira permanente. Não há viabilidade para a retirada desses sedimentos do mar.

O dano de perda de adequabilidade ambiental, é tratado na valoração como um dano mediante uma perspectiva secundária, como um efeito resultante da chegada e da deposição do rejeito, e a pluma é a manifestação da área de impacto. Para esse habitat, conforme já exposto, a combinação desses três aspectos é necessária, pois eles se complementam. Abordar a deposição de forma isolada não traduz os efeitos negativos que esta traz, por isso a perda de adequabilidade ambiental e a pluma auxiliam na delimitação da área a ser considerada, tendo em vista que a deposição do rejeito variou e ainda varia, de acordo com a sazonalidade das marés.

Posto isso, considerando que o dano base da valoração é a deposição e que o dano de perda de adequabilidade e a pluma complementam o contexto do dano, a métrica selecionada para o método de valoração é área em metros quadrados, que no final dos cálculos é transformada em hectares, para facilitar o uso dos números, já que se trata de uma grande extensão.

Após a definição da métrica passe-se a expor o processo de construção da linha base, que se trata do quantitativo de área inicial, que posteriormente foi afetado pelo desastre. A presença do rejeito no habitat marinho desencadeou outras alterações e danos ambientais à biota aquática. A piora da qualidade ambiental para diferentes espécies marinhas é evidente, bem como outras alterações, incluindo aquelas relacionadas à contaminação por EPTs (detalhes em (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e). Entretanto, no contexto do desastre da Samarco e especialmente a escassez de linha-base não permitiu que fosse realizada uma correlação direta entre o dano de deposição e os danos que foram identificados para a biota como um todo. Por outro lado, especificamente a perda de adequabilidade ambiental diagnosticada para a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e para o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) ocorreu em áreas coincidentes com a deposição do rejeito, e calculada de maneira distribuída espacialmente, assim como a própria deposição. As duas espécies apresentam exigências ambientais e recursos alimentares distintos, englobando diferentes nichos ecológicos representando a degradação da qualidade dos habitats marinhos. Ambas apresentam um comportamento, ao menos em parte, associado ao fundo: a tartaruga-verde se alimenta de algas macrófitas fixadas em rochas e corais principalmente em seu estágio juvenil; já o boto-cinza tem em sua dieta espécies de peixes, moluscos e crustáceos que vivem no fundo do mar. Tal contexto reforça a escolha do dano de deposição do sedimento como o dano principal a ser valorado, pois a presença de rejeito no leito marinho se configura como a fonte para outros desequilíbrios ambientais, principalmente afetando a biota marinha.

Assim, para a contabilização da área a ser valorada na área marinha, foram combinadas as áreas de perda de adequabilidade ambiental, área da pluma e a área de deposição de sedimento. Inicialmente se avaliou a combinação das áreas de perda de adequabilidade ambiental das duas espécies. Como as áreas de identificação do dano para as duas espécies se sobrepõem em determinadas localidades, para se obter uma única área de degradação da qualidade dos habitats, e não incorrer em dupla contagem

de dano, os mapas das duas espécies foram consolidados, gerando uma área única de perda de adequabilidade ambiental, conforme pode ser visualizado na Figura 65.

Figura 65 – Área consolidada de perda de adequabilidade ambiental para a tartaruga-verde (*Chelonia mydas*) e para o boto-cinza (*Sotalia guianensis*).



Fonte: Lactec, 2021.

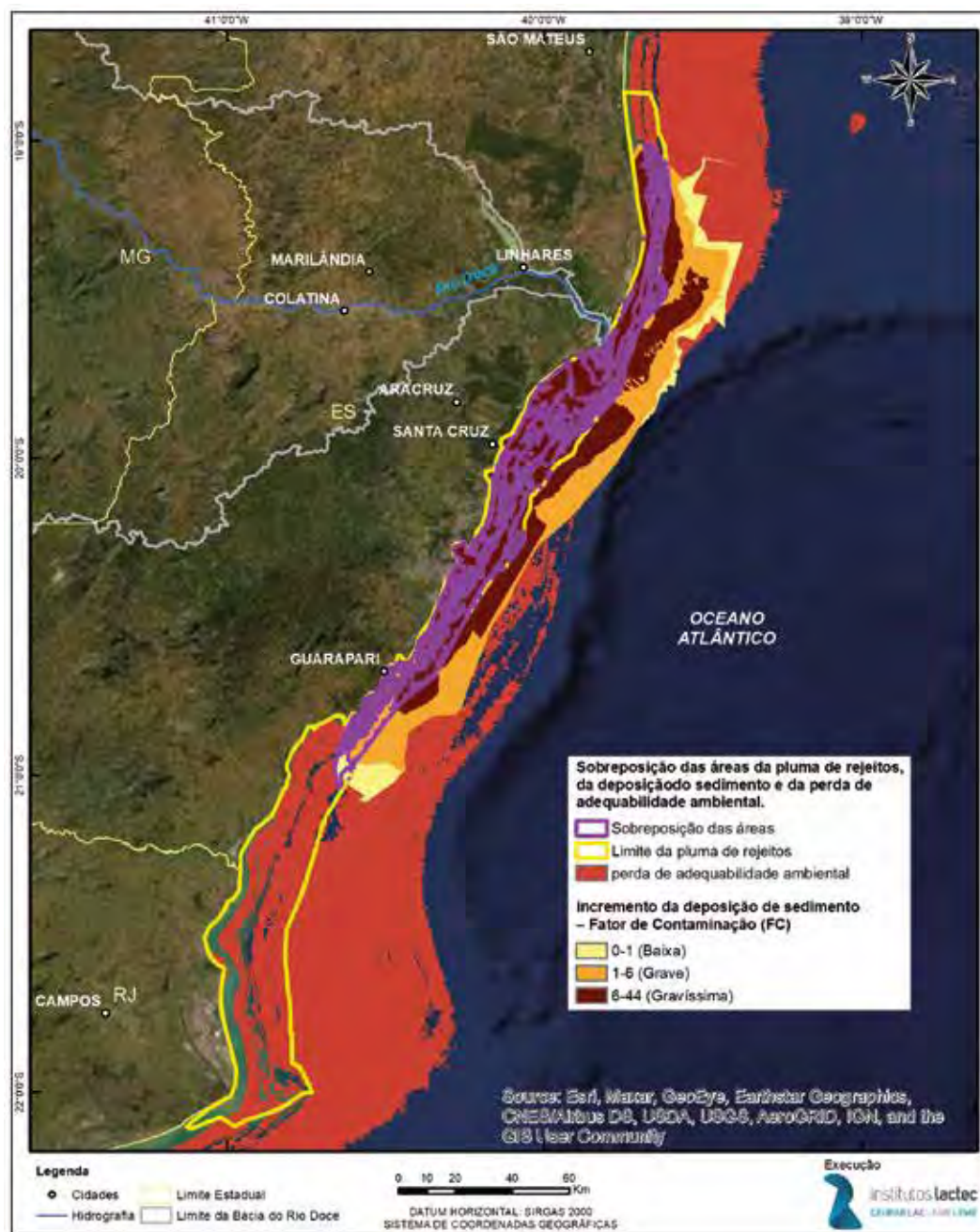
A perda de adequabilidade ambiental para essas espécies, contudo, foi baseada em modelagem de nicho ecológico que utiliza parâmetros disponíveis em imagens de satélite (detalhes podem ser consultados em (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e), que são parâmetros da qualidade da água (coluna da água). Por essa razão, decidiu-se incluir também a pluma de rejeitos como variável a ser contemplada, abordando dessa forma a coluna da água, o leito oceânico e os efeitos na biota de forma integrada. Por isso, o dano à área marinha é avaliado, na valoração, por meio dessas três perspectivas: área da deposição, área de pluma e área de perda de adequabilidade. Sendo assim, foi considerada para a valoração apenas a área em que as três variáveis estão sobrepostas, sendo que áreas em que houve a identificação apenas de uma ou duas das três alterações, não entraram no cálculo. Diante disso, é

possível afirmar que a definição da área de abrangência do dano é conservadora, pois não considera os aportes de rejeito do rio Doce por 163 anos, não considera efeitos em outras espécies, bem como não considera outros efeitos adversos que possam surgir para as espécies de boto e tartaruga consideradas.

Ao não considerar todos esses aspectos, principalmente porque a modelagem matemática para previsão desse comportamento não é trivial, e há ausência de muitos dados que inviabilizam esse cálculo, conclui-se que a área definida como dano a ser valorado é conservadora e é o mínimo a ser compensado à sociedade.

Para a integração das variáveis, foram utilizados os resultados em área, e a métrica selecionada para medição do dano foi área em m^2 transformada posteriormente em hectares. As três áreas foram então sobrepostas em um único mapa para visualização conjunta (Figura 66).

Figura 66 – Áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental.



Fonte: Lactec, 2021.

A Tabela 51 apresenta os valores das áreas sobrepostas das três variáveis consideradas, subdividida pela classe de deposição de rejeito, que representa a gravidade do mesmo. Adianta-se que o detalhamento para a construção dessa gravidade conforme a espessura da deposição será melhor explicada no item 4.5.3 a seguir, que trata dos pesos utilizados sobre essas áreas, pois foi essa gravidade que embasou tais ponderações. Posto isso, a linha base da valoração da zona costeira e marinha se refere a 2.051.816.010,93 m², sendo a área final sobreposta, total e também classificada de acordo com as gravidades do dano de incremento na deposição do rejeito pode ser visualizada na Figura 67. Lembrando-se que a Linha Base na valoração é o valor de referência ao qual o habitat/recurso ambiental

perdido deverá retornar, quando possível sua recuperação natural ou externa. Por isso, há casos em que esse valor também se expressa como a perda inicial ocorrida no momento do desastre.

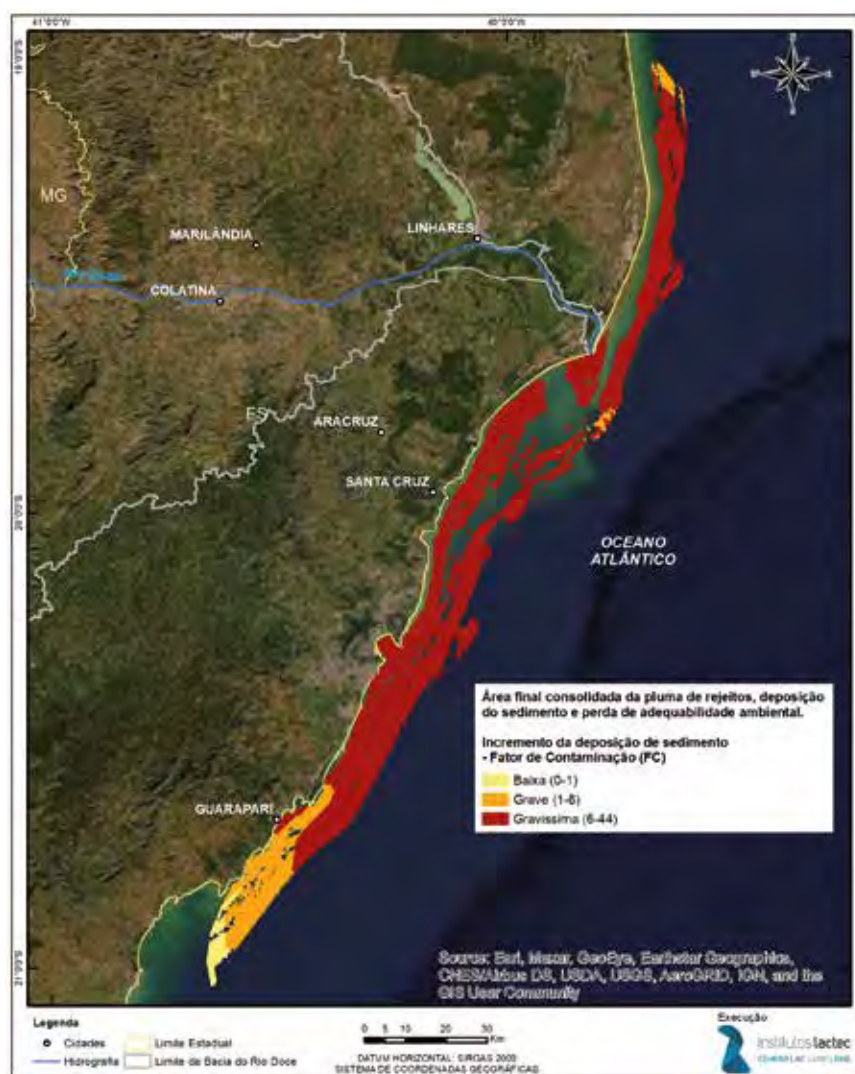
Tabela 51 – Valores das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, por classe de deposição, e linha base.

Classe Deposição de Sedimento	Área sobreposta (m ²)
Baixa (0,01 - 0,99)	54.718.091,80
Grave (1,0 - 5,99)	291.317.657,74
Gravíssima (igual ou maior que 6)	1.705.780.261,39
Área total sobreposta (Linha Base)	2.051.816.010,93

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 67 – Áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental. 1º mapa: área total sobreposta; 2º mapa: área total sobreposta, classificada pela gravidade da deposição do sedimento.





Fonte: Lactec, 2021.

4.5.3 CONSTRUÇÃO DOS PESOS E CÁLCULO DA PERDA INICIAL

Conforme já abordado, o dano de deposição dos sedimentos se refere ao incremento na deposição de sedimentos advindo do rio Doce, devido ao rejeito da barragem de Fundão, após seu rompimento. Assim, o transporte de sedimentos e sua deposição no fundo do mar, se caracteriza como dano devido ao acréscimo ocorrido além do natural (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e).

Assim, de acordo com o detalhamento exposto no Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e), a determinação da área e quantidade de material depositado, devido ao rompimento da barragem de Fundão, foi realizada através de simulações matemáticas de um cenário hipotético, onde não ocorreu o rompimento, para calcular a área e a espessura da deposição esperada naturalmente, e outro cenário incluindo os efeitos do desastre. Os dados ambientais utilizados na modelagem foram as informações oceanográficas, hidrológicas, hidrosedimentológicas e meteorológicas do período simulado (21/10/2015 a 20/10/2016).

Para a estimativa da deposição foi utilizada a concentração de sólidos suspensos vindos do rio Doce. 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 rompimento da barragem de Fundão, foi utilizada a concentração de sedimento em suspensão medida, assim incluindo os efeitos do desastre (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e). Para a avaliação da gravidade desse dano foi utilizado o Fator de Contaminação (FC), que é a relação entre a diferença de espessura entre o cenário com desastre e sem desastre, dividido pela espessura do cenário sem desastre (Tabela 52).

Tabela 52 – Critérios de classificação da gravidade do dano.

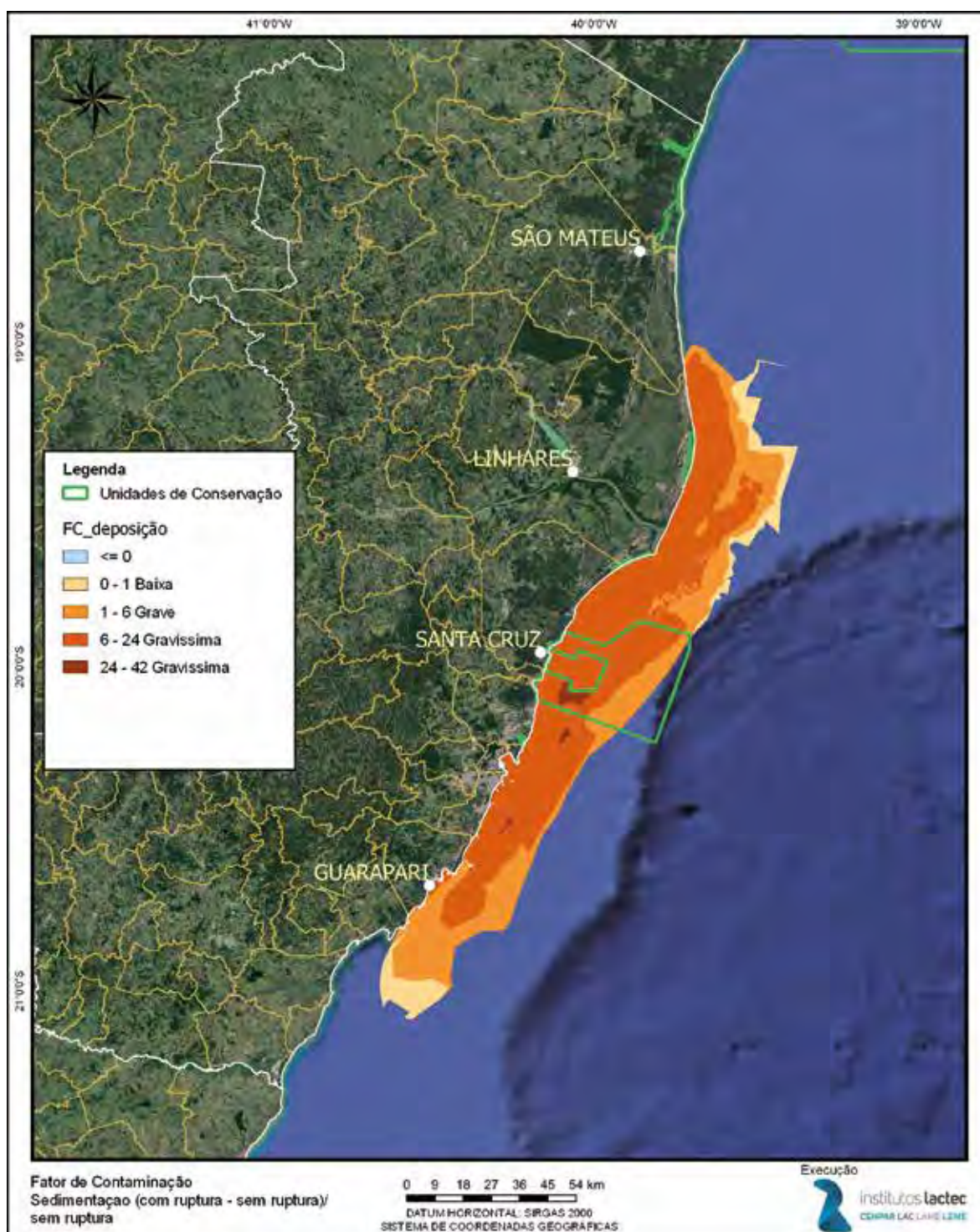
Classificação	FC	Qualidade
Pouco Grave	<1	Baixa contaminação
Grave	1 a 6	Contaminação moderada
Gravíssimo	>6	Alta Contaminação

Fonte: BRASIL (MPF)/ LACTEC (2020e).

A Figura 68 apresenta a região do fundo do oceano afetada pela deposição da lama proveniente do rompimento da barragem de Fundão, calculada pela metodologia já descrita. A referida Figura mostra as regiões com o Fator de Contaminação (FC) correspondente, FC igual a 1 significa que a deposição no cenário com rompimento de Fundão é o dobro do cenário natural (sem rompimento), FC igual a 42 (valor máximo calculado) 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 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e).

Em termos de dimensão absoluta, a deposição extra devido à ruptura da barragem de Fundão foi em grande parte em torno de 1 mm (no primeiro ano), sendo maior que 1 mm (no primeiro ano) em torno da foz do rio Doce (até 35 km para norte e para Sul e 20 km a leste). Quanto mais próximo da foz do rio Doce, a espessura aumenta, chegando a valores próximos a 10 cm (no primeiro ano) junto a foz (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e).

Figura 68 – 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 (sem desastre).



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC (2020e).

Diante de diferentes gravidades na área de deposição de rejeito no sedimento, a equipe identificou a necessidade de ponderar as áreas de acordo com essa gravidade. Para tanto, considerando os intervalos das faixas de espessura do rejeito, que estão expostos na Tabela 53, foi mensurada a moda e a mediana de cada classificação.

A moda estatística é definida como o valor que mais se repete em uma série de valores. Já a mediana é definida como o valor que divide a série exatamente ao meio, para tanto é necessário ordenar os valores da série do menor para o maior (ordem crescente) e identificar qual o valor que fica localizado exatamente ao meio da série. Outra opção seria mensurar a média de cada classe, no entanto, essa opção foi descartada, pois a média absorve em seu cálculo os valores extremos, não sendo, assim, o valor que melhor representa cada classe. Diante das opções optou-se por assumir como peso para ponderação das áreas a mediana, pois verificou-se ser ela o valor que melhor representa cada classificação de dano.

Tabela 53 – Valores dos intervalos da faixa de espessura do rejeito, subdividido pela classificação do dano, juntamente com a moda e mediana de cada classe.

Classificação do Dano	Moda	Mediana
Baixa (0,01 – 0,99)	0,30	0,48
Grave (1,00 – 5,99)	5,25	3,56
Gravíssimo (= ou > 6,00)	6,25	11,73

Fonte: Lactec, 2021.

Assumiu-se que a classificação gravíssima representa 100% de dano para toda a faixa de valores acima de FC=6, sendo assim, não há a necessidade de usar o valor da mediana para essa classificação e sim o seu limite mínimo, o limite de 6. No caso das classes inferiores, elas deveriam apresentar valores relativos, mediante a divisão da mediana dessas classes por 6, visto que o 6 equivale a 100%. Essa divisão mostra o quanto que a mediana das classes inferiores representa em relação a limite mínimo da classificação gravíssima (6), conforme Tabela 54. Este ajuste permitiu reduzir, por meio da ponderação, os valores das áreas referentes as classes baixa e grave, tornando 1 m² dessas classes um valor menor que 1, que representa 8% e 59% desse metro quadrado respectivamente.

Tabela 54 – Peso adotado para ponderação das áreas de deposição de sedimento, subdividido pela classificação do dano, com base na mediana de cada classe.

Classe Deposição de Sedimentos	Mediana/Limite mínimo da última classificação	Peso adotado com base na mediana, considerando 6 = 100%
Baixa	0,48	$0,48/6 = 0,08$
Grave	3,56	$3,56/6 = 0,59$
Gravíssimo	6	$6/6 = 1$ (100%)

Fonte: Lactec, 2021.

Após a apresentação da construção dos pesos para ponderação das áreas a Tabela 55 mostra o valor das áreas sobrepostas ponderadas, e calcula o valor total da perda inicial após o somatório das ponderações. Observa-se que o valor da perda inicial é menor do que o calculado para linha base anteriormente. Isto porque as ponderações feitas reduziram as áreas das classes baixa e grave, cobrando 100% dos valores apenas da classe gravíssima.

Assim tem-se que 1.882.732.595,20 m² é a perda inicial sofrida pela área marinha e que será valorada nesse estudo, devido aos danos de deposição associado com os danos de perda de adequabilidade ambiental, e ainda considerando a extensão da pluma de rejeitos, em decorrência do desastre do rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 55 – Valores das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, por classe de deposição, e linha base.

Classe Deposição de Sedimentos	Área sobreposta (m ²)	Peso (mediana)	Área sobreposta (m ²) ponderada
Baixa (0-1)	54.718.091,80	0,08	4.103.856,89
Grave (1-6)	291.317.657,74	0,59	172.848.476,93
Gravíssima (6-24)	1.705.780.261,39	1,00	1.705.780.261,39
Área total sobreposta (Perda Inicial)	2.051.816.010,93	-	1.882.732.595,20

Fonte: Lactec, 2021.

4.5.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO NATURAL E CÁLCULO DA PERDA INTERINA

Após a definição da métrica, a explanação da construção dos pesos e o cálculo da perda inicial sofrida pela área marinha, passe-se agora ao cálculo da perda interina inserida no contexto de recuperação natural. No entanto, cabe ressaltar que não foi identificada a possibilidade da construção de uma curva de recuperação natural, justamente pelos aspectos já brevemente apontados anteriormente:

- 1) Pela dinâmica das marés, a área de deposição do rejeito tende a aumentar com o tempo. Entretanto, é complexa a construção de modelos matemáticos, com baixas incertezas, que prevejam esse comportamento, bem como exponham como a área de deposição irá evoluir;
- 2) Por cerca de 163 anos, o rio Doce continuará aportando rejeito ao leito marinho, o que evidência que o dano tende a permanecer (e aumentar) por muito tempo na região costeira e marinha;
- 3) No longo prazo, outros possíveis efeitos negativos, tanto para a biota, quanto para o ambiente como um todo, são desconhecidos, o que impede de considerar nesta valoração os danos decorrentes do desastre.

Posto esses aspectos é coerente assumir neste estudo que os danos causados pela deposição são perpétuos, isto porque o dano tende a piorar com o tempo, pela ampliação da área de deposição, e pelo elevado tempo de contínuo aporte do rejeito oriundo do rio Doce. A manutenção dessa condição permite inferir que a perda de adequabilidade ambiental irá se estender na mesma magnitude da ampliação da área de deposição. No entanto, nesse estudo, essa ampliação da área de abrangência afetada não está sendo considerada, justamente porque a predição de tal comportamento não é trivial, e mesmo que fosse feito, haveria muitas incertezas.

Por isso, a equipe delimitou a área de abrangência, já apresentada, que une a sobreposição das áreas de disposição, mais perda de adequabilidade e pluma. A união dessas três áreas é muito menor que a área do dano identificada para cada uma delas, sendo assim, o que se valora é uma área mínima a ser devolvida à sociedade. Área esta que, pela localização, também irá permanecer no ambiente por muito tempo devido aos fatores já explicados, o que torna razoável tratar o dano em um horizonte perpétuo.

É por isso que para a valoração do dano da área marinha não há uma curva de recuperação, ou seja, valores crescentes que desenham uma curva ascendente em um gráfico. O que se tem é uma perda perpétua, gerando assim uma reta, uma constante, cujo valor de perda inicial apontado no

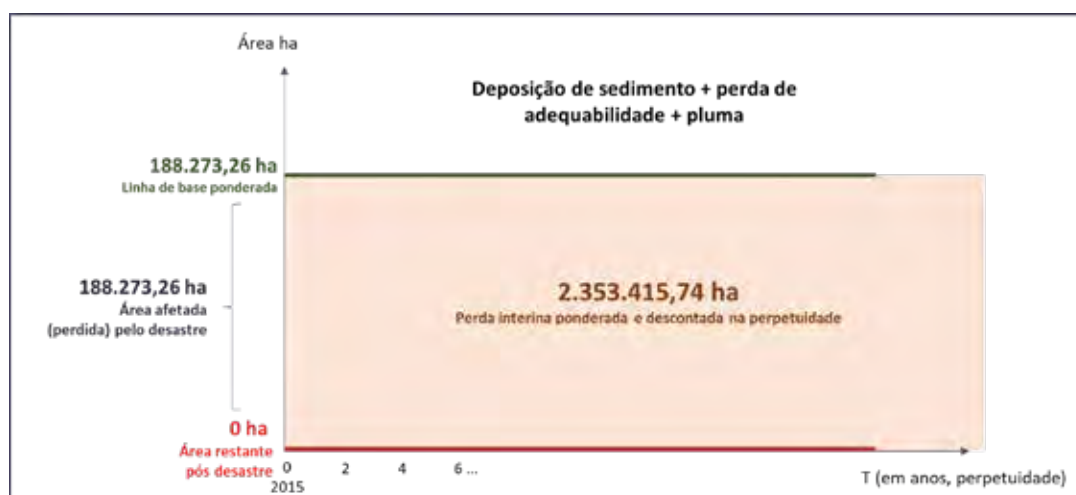
item anterior será descontado na perpetuidade, considerando a taxa de desconto social de 8% ao ano. A Tabela 56 traz os resultados obtidos após a aplicação do fator de desconto no tempo perpétuo, por meio da aplicação da fórmula da perpetuidade. O valor da perda inicial 1.882.732.595,20 m² ao ser descontado no tempo perpétuo representa uma área de 23.534.157.440,00 m² transformados em 2.353.415,74 hectares. Esta é a área que representa a perda interina descontada, sofrida pela sociedade, e que deverá ser compensada. O gráfico da Figura 69 mostra o resultado de forma visual.

Tabela 56 – Perda interina descontada na perpetuidade, das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, da área marinha, em m² e hectare.

	Valor em m ²	Valor em hectare
Quantidade de área perdida inicialmente (ponderada)	1.882.732.595,20	188.273,26
Perda Interina Descontada	23.534.157.440,00	2.353.415,74

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 69 – Perda interina descontada na perpetuidade, das áreas sobrepostas da pluma de rejeitos, da deposição do sedimento e da perda de adequabilidade ambiental, da área marinha, em hectare.



Fonte: Lactec, 2021.

4.5.5 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO EXTERNA

Após o cálculo da perda no contexto de recuperação natural, ou seja, em um contexto onde o homem não intervém, mas apenas os processos da natureza trazem a recuperação, passa-se agora para a etapa de construção da curva de recuperação externa, que representa o contexto de intervenção humana com o intuito de acelerar o processo de recuperação.

O desastre e suas consequências à área marinha, desencadeou dois danos valorados neste estudo, juntamente com a área de pluma: o incremento na deposição do sedimento e a degradação da qualidade dos habitats marinhos. A partir desse entendimento, a equipe buscou ações que tivessem um efeito direto na redução de danos ocasionados pela chegada de sedimentos fluviais ao oceano, considerando tanto efeitos advindos da própria sedimentação quanto da presença de elementos potencialmente tóxicos (ainda que os danos em valoração não tenham considerado diretamente a

presença dos EPTs, o diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e) mostra claramente os danos relacionados à efeitos tóxicos).

No entanto, conforme já abordado no item anterior, o dano provocado pela deposição é considerado perpétuo, justamente porque tende a permanecer no ambiente por muitas gerações, além de ser uma área menor do que aquela de fato alcançada pelos danos analisados. Além disso, não há tecnologias suficientes para a retirada do rejeito depositado no leito marinho, bem como, não há maneiras de evitar os encadeamentos da bioacumulação. Diante disso, a equipe defende que além de não haver recuperação natural, não há também recuperação externa, visto que não existe forma de acelerar o processo de recuperação da natureza, por não haver mecanismos de retirada de rejeito em ambiente marinho. Diante disso, a perda interina continua sendo os 2.353.415,74 ha calculados no item anterior.

4.5.6 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPENSAÇÃO

Considerando a perda interina descontada de 2.353.415,74 ha, e sabendo-se que não há recuperação natural e nem recuperação externa, conclui-se que a totalidade da perda deverá ser compensada à sociedade. Assim, neste item detalha-se o processo de decisão para a escolha da ação compensatória que atenda a dois critérios: primeiro que a execução da ação em si não traga outros impactos negativos ao meio ambiente; e segundo que a ação gere benefícios o mais equivalente possível àqueles perdidos. Ressalta-se que o conceito de equivalência e o processo de construção da taxa de equivalência estão descritos detalhadamente no item a seguir 4.5.7. Adianta-se que o conceito de equivalência na metodologia é equiparação entre benefícios ambientais gerados e perdidos. Logo, para o caso da área marinha, a taxa de equivalência é o fator que transforma, ou seja traduz, a área marinha perdida em área ganha por meio da compensação. A construção dessa taxa contempla a comparação entre os serviços ecossistêmicos prestados pelo oceano e os serviços ecossistêmicos prestados pelos mangues.

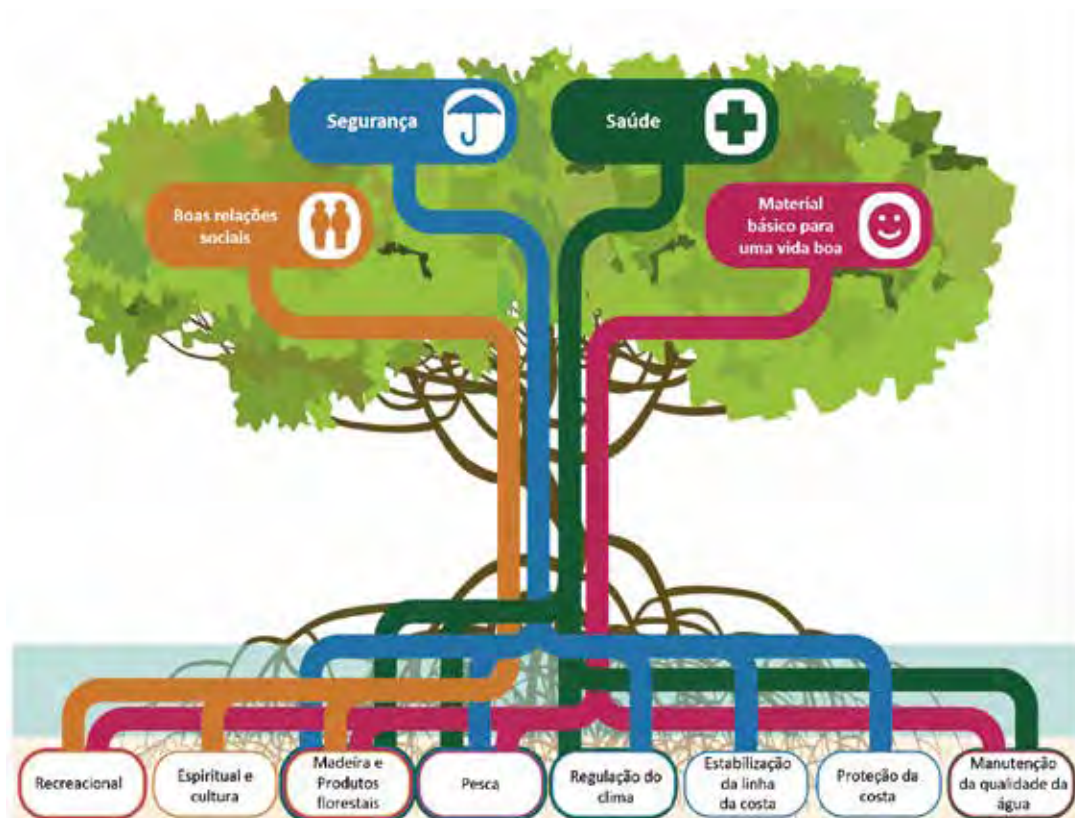
Considerando os danos ocorridos, como opções de ações compensatórias foram consideradas inicialmente ações conhecidas (mais ou menos efetivas a depender das tecnologias existentes, região abordada, objetivo específico, etc.) para a conservação dos oceanos, como a instauração de áreas de preservação marinhas, elaboração e implementação de projetos de ordenamento pesqueiro, criação de recifes artificiais, dentre outros. Porém, considerando os danos específicos em estudo, a presença de manguezais conservados se apresentou como a melhor alternativa, oferecendo todos os serviços ecossistêmicos afetados pelos dois danos definidos, além de outros adicionais. Dessa forma, ações específicas de recomposição de áreas de mangue têm relação direta com a provisão de serviços ecossistêmicos ao oceano, conforme descrito a seguir.

Os manguezais são ecossistemas de transição entre o ambiente terrestre e marinho, no qual interagem plantas, animais e microrganismos com o meio abiótico, e que sofrem influência das marés. É considerado um dos ecossistemas mais produtivos do mundo, além de serem excelentes indicadores de alterações ambientais, como as mudanças climáticas. No Brasil existem manguezais distribuídos ao longo de toda a costa, exceto no Rio Grande do Sul devido às condições climáticas da região (MMA, 2018). Segundo MMA (2010), os manguezais são considerados, pelo artigo segundo da Lei 12.651/2012 do Código Florestal, como áreas de preservação permanente.

Os manguezais tem importância ambiental muito ampla, promovendo benefícios de ordem ambiental, econômica e social, chamados de bens e serviços ecossistêmicos. Tem papel importante no bem-estar humano, especialmente para comunidades locais no que diz respeito ao acesso à materiais básicos de saúde, segurança e boas relações sociais. Proveem fonte importante de alimento, como peixes, crustáceos e moluscos, além de produtos madeireiros e florestais. Proporcionam a proteção da costa, com a redução da energia das ondas, da erosão e de forças destrutivas como ciclones e tsunamis. Além disso, atuam na manutenção da qualidade da água e na regulação do clima, uma vez que são eficientes na absorção de nutrientes, ciclagem de nutrientes e sequestro de carbono. Também oferecem habitat para uma série de organismos, para espécies de interesse pesqueiro e são fundamentais para a manutenção de estoques pesqueiros inclusive de espécies de alto mar, uma vez que utilizam os manguezais em parte do seu ciclo de vida (UNEP, 2014; GASPARINETTI et al., 2018; SLOBODIAN et al., 2018). De modo a aumentar ainda mais a importância desse ecossistema, os manguezais tem grande relevância cultural e fornecem emprego e renda para muitas pessoas. Além disso, os produtos adquiridos no manguezal são, muitas vezes, a única fonte de proteína de comunidades ribeirinhas, contribuindo para a sua segurança alimentar (UNEP, 2014; GASPARINETTI et al., 2018).

É por todas essas funções que os manguezais também contribuem para o atingimento dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, incluindo a erradicação da pobreza e da fome, igualdade de gênero, garantia de meios de subsistência e crescimento econômico, conservação dos ambientes marinhos e mitigação das mudanças climáticas (BLUM; HERR, 2017; SLOBODIAN et al., 2018). Na Figura 70 é possível visualizar um esquema dos serviços ecossistêmicos amplos prestados pelos manguezais.

Figura 70 – Esquema representando os serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais.



Fonte: Adaptado de Slobodian et al. (2018).

Em cada uma das categorias citadas, existe uma série de benefícios que podem ser detalhados. Na Tabela 57 estão descritos brevemente: o conceito de cada um dos serviços identificados e avaliados como afetados na área marinha (detalhes do estudo podem ser consultados no capítulo sobre serviços ecossistêmicos no TOMO I de Acompanhamento de Danos); e a especificidade da provisão de tais serviços pelos manguezais.

Tabela 57 – Serviços Eossistêmicos prestados pelos manguezais e pela área marinha, conceito, afetados pelos danos.

Categoria dos SEs	Serviços Eossistêmicos	Serviço afetado pelo dano de degradação da qualidade dos habitats marinhos.	Serviços afetado pelo dano de incremento na deposição do sedimento
Provisão	Provisão de recursos genéticos e bioquímicos - Provisão de genes usados para reprodução/ melhoramento de plantas e animais e na biotecnologia; materiais biológicos utilizados na fabricação de medicamentos, biocidas e aditivos de alimentos, entre outros.	A especificidade das características de espécies do manguezal, com adaptações às variações de salinidade e de maré, promove um banco genético único, incluindo espécies que nascem nesse local, mas que migram para o oceano para completar seu ciclo de vida (JANA; DESHMUKH, 1994; MITRA, 2013). Esse reservatório genético também é fonte de substâncias e extratos bioativos de elevada importância medicinal (MITRA, 2013). Além disso podem apresentar o potencial de contribuir com seu material genético para o melhoramento de produtos de interesse comercial, aumentando o crescimento ou reduzindo a susceptibilidade a doenças, por exemplo (BANN, 1998).	-

Categoria dos SEs	Serviços Ecossistêmicos	Serviço afetado pelo dano de degradação da qualidade dos habitats marinhos.	Serviços afetado pelo dano de incremento na deposição do sedimento
Regulação	Regulação hidrológica - A cobertura do solo e a configuração do terreno regulam os processos de evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração e armazenamento da água.		A estrutura física do mangue, suas raízes e características do solo dos manguezais tem papel fundamental nos processos de infiltração da água. A existência de tocas de caranguejos, por exemplo, tem influência na infiltração da água da chuva e quanto maior a quantidade de tocas, maior é a redução do escoamento superficial (WOLANSKI; MAZDA; RIDD, 1992).
	Tamponamento de mudanças hidrológicas/meteorológicas rápidas - Ecossistemas e organismos vivos criam buffers contra mudanças hidrológicas/meteorológicas rápidas, como inundações, tempestades, tsunamis, avalanches e deslizamentos de terra.	-	Os manguezais oferecem proteção natural e de baixo custo na redução do risco de desastres naturais, como tsunamis, ciclones e levando em consideração ainda o aumento do nível dos oceanos e a alteração nos regimes de tempestades. A complexa formação dos mangues atua na redução da energia de ondas e ventos, tanto no caso de ciclones quanto de tsunamis, o que interfere também na minimização dos processos erosivos (UNEP, 2014; GASPARINETTI et al., 2018; SLOBODIAN et al., 2018).
	Purificação da água - Processos físicos, químicos e biológicos atuam na remoção de poluentes da água, através de filtração, diluição e decomposição mediada por microrganismos.	-	
	Regulação de teias tróficas e manutenção da biodiversidade - Cascatas tróficas são interações que regulam fortemente a biodiversidade e as funções ecossistêmicas.	-	-

Categoria dos SEs	Serviços Ecossistêmicos	Serviço afetado pelo dano de degradação da qualidade dos habitats marinhos.	Serviços afetado pelo dano de incremento na deposição do sedimento
	Disponibilidade de áreas vitais para espécies flora e fauna - Disponibilidade de refúgio, alimentação, berçário e local para reprodução, necessários para a sobrevivência de indivíduos vegetais ou animais, inclusive de espécies migratórias.	-	A estrutura das plantas e raízes das espécies de mangue abrigam uma série de organismos, como crustáceos (ex. caracas), moluscos (ex. ostras e caramujos) e protegidos do calor excessivo, são substratos ideais para o estabelecimento de algas (MMA, 2018; SANTOS et al., 2018).
	Formação de substrato - Estrutura física na qual se estabelecem os organismos, com características específicas de homogeneidade/heterogeneidade e complexidade espacial.	-	Os manguezais são ecossistemas de transição entre os rios e o mar. Por meio da variação de marés e da movimentação dos organismos entre diferentes ambientes, os nutrientes e detritos orgânicos são transportados dos manguezais para os oceanos, tendo grande efeito na manutenção das teias tróficas e nos ciclos biogeoquímicos marinhos, podendo contribuir com a manutenção dos estoques pesqueiros (KATHIRESAN; BINGHAM, 2001; BARBIER et al., 2011; UNEP, 2014). Por exemplo, espécies de camarões que nascem e se desenvolvem no manguezal são importantes na transferência de carbono remanescente da produção primária desses ecossistemas quando migram para o mar (LEE, 1995).
Suporte	Ciclagem de nutrientes - Transferência e transformação de nutrientes nos e entre os ecossistemas.	-	Os manguezais são conhecidos por sua alta produtividade biológica. A produção primária em si advém tanto da contribuição das árvores do mangue, quanto de outras fontes como o fitoplâncton e o perítton (CLOUGH, 1992). Essa produtividade é essencial em todo o ambiente costeiro e marinho, sendo transportada para outros ecossistemas e para o oceano (UNEP, 2014).
	Produção primária - Formação de material biológico pelas plantas e outros organismos através da fotossíntese, fixação de energia e assimilação de nutrientes.	-	Os manguezais são conhecidos por sua alta produtividade biológica. A produção primária em si advém tanto da contribuição das árvores do mangue, quanto de outras fontes como o fitoplâncton e o perítton (CLOUGH, 1992). Essa produtividade é essencial em todo o ambiente costeiro e marinho, sendo transportada para outros ecossistemas e para o oceano (UNEP, 2014).

Categoria dos SEs	Serviços Ecossistêmicos	Serviço afetado pelo dano de degradação da qualidade dos habitats marinhos.	Serviços afetado pelo dano de incremento na deposição do sedimento
	Recreação, lazer e educação - Ecossistemas provêm espaços que facilitam a interação social, a interação com a natureza e o desenvolvimento de atividades de recreação e turismo. Ecossistemas contribuem para a formação de sistemas de conhecimento científico, tradicional e costumes associados.	Os manguezais podem ser utilizados como áreas de recreação e lazer, e principalmente para aspectos educacionais. Esse ecossistema atrai visitantes para a observação de aves e da vida selvagem em geral, pesca recreativa, entre outros, que contribuem ainda mais para a beleza cênica dessas áreas. Além disso, os manguezais são foco de muitos estudos e servem como laboratórios vivos em pesquisas diversas (UNEP, 2014; GASPARINETTI et al., 2018). Recursos do manguezal são utilizados por comunidades tradicionais para atividades como construção de casa e produção de carvão, e fins medicinais (SOUZA et al., 2018). Além disso, segundo Magalhães et al. (2014), “os sistemas de crenças locais, associados principalmente a entidades míticas e sobrenaturais, constituem elementos de transmissão cultural de geração a geração em comunidades pesqueiras em áreas de manguezais, e de que a relação entre esses povos e o ecossistema é de dependência total ou parcial, principalmente econômica”. Além disso, ainda segundo autores, essa relação das expressões culturais e espirituais auxiliam na conservação desses ecossistemas.	-
Cultural	Herança e expressão cultural e espiritual - A natureza é elemento comum em muitas culturas e inspiração para diferentes práticas culturais e espirituais. Ambientes antropizados dispõem de diversos locais e artefatos que são considerados patrimônios culturais materiais e utilizados para práticas espirituais e culturais (patrimônio imaterial).	As comunidades que vivem em íntima associação com manguezais possuem características próprias na forma de organização social (OLIVEIRA; VIEIRA; JUNIOR, 2017). Os manguezais, como dito anteriormente, fornecem emprego e renda para muitas pessoas. Além disso, os produtos adquiridos no manguezal são, muitas vezes, a única fonte de proteína de comunidades pobres, ribeirinhas e em situação de risco social, contribuindo para a sua segurança alimentar (UNEP, 2014; GASPARINETTI et al., 2018; SOUZA et al., 2018; MMA, 2010).	-W

Fonte: Elaborado por Lactec, 2021.

Por isso, devido aos diversos benefícios ambientais oriundos dos serviços ecossistêmicos prestados, a área marinha perdida será compensada por meio da recuperação em área de manguezais. Para tanto, foi necessário construir a curva compensatória desta recuperação, a fim de contabilizar no tempo os benefícios em área obtidos, para, por fim, comparar com a perda interina, garantindo que a área de manguezal recuperada seja equivalente a área da perda interina calculada. Dessa maneira, o primeiro passo foi buscar na literatura científica a taxa de crescimento dos manguezais para a construção de tal curva.

- Definição da taxa de crescimento dos manguezais

A taxa de crescimento dos manguezais foi estimada empregando-se o modelo FORMAN, adaptado por Chen e Twilley (1998) a partir do conceituado modelo JABOWA-FORET que descreve a dinâmica de sucessão em clareiras (BOTKIN et al., 1972; SHUGART, 1984; BOTKIN, 1993). O modelo FORMAN consagra-se no meio acadêmico por ser o primeiro a simular a dinâmica de sucessão para indivíduos de espécies de mangue em larga escala de tempo, considerando ainda, fatores ambientais que condicionam diferentes respostas de crescimento espécie-específicas.

O modelo baseia-se nas taxas anuais e individuais de crescimento, reprodução e mortalidade de três espécies arbóreas presentes nos manguezais do Caribe, a saber: *Avicennia germinans* (L.) L., *Laguncularia racemosa* (L.) C.F.Gaertn. e *Rhizophora mangle* L. Especificamente para a taxa de crescimento (ΔD , em cm), o modelo relaciona os parâmetros de diâmetro a altura do peito (DAP) e altura de um indivíduo com uma série de constantes espécie-específicas, sendo descrito pela equação abaixo.

$$\Delta D = \frac{G * D * \left(1 - \frac{D * H}{(D_{\max} * H_{\max})}\right)}{274 + 3b_2D - 4b_3D^2} * f_{\text{red}}$$

Onde: D é o diâmetro à altura do peito (DAP) da árvore (cm); H é a altura da árvore (cm); Dmax e Hmax são DAP e altura máximas da espécie utilizada no modelo; G, b2 e b3 são constantes de crescimento da espécie; f_{red} é fator de redução de crescimento, representando limitantes ambientais ao desenvolvimento da planta.

Os parâmetros de ajuste da equação são mostrados na Tabela 58 e foram obtidos no trabalho de Chen e Twilley (1998). Foram utilizados os parâmetros de estrutura (DAP, H, Dmax e Hmax) e as constantes de crescimento (G, b2 e b3) das espécies *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle* pois este arranjo de espécies é também o mais representativo da composição dos manguezais existentes em território nacional. A derivação das constantes é descrita em Botkin (1993) e são todas relacionadas à curva de crescimento dos indivíduos, obtidas por meio de valores de DAP, altura e idade. O DAP da árvore usado no 'ano 0' deste modelo foi definido como 0,1 cm, representando o diâmetro de uma plântula das espécies selecionadas.

Tabela 58 – Parâmetros espécie-específicos de plantas de mangue utilizadas no modelo FORMAN, conforme Chen e Twilley (1998).

Parâmetro	Descrição	<i>Avicennia germinans</i>	<i>Laguncularia racemosa</i>	<i>Rhizophora mangle</i>
G	Constante de crescimento	162	243	267
$D_{\max}$	DAP máximo (cm)	140	80	100
$H_{\max}$	Altura máxima (cm)	3500	3000	4000
b_2	Constante de relação altura-DAP	48,04	71,58	77,26
b_3	Constante de relação altura-DAP	0,172	0,447	0,396

Fonte: Chen e Twilley (1998).

Com relação ao fator de redução de crescimento (f_{red}) da equação anterior, que representa as condições ambientais que limitam o crescimento das espécies do manguezal, seu valor varia de 0 a 1. Quando este fator assume o valor máximo ($f_{\text{red}} = 1$) o modelo representa ausência de influências ambientais que restringem o crescimento da planta (ótimo ambiental para o crescimento da espécie), enquanto no extremo oposto ($f_{\text{red}} = 0$), representa condições inóspitas para o desenvolvimento da planta.

Por fim, para calcular a altura dos indivíduos, utilizou-se a fórmula descrita por Berger e Hildenbrandt (2000), em função do DAP da planta, conforme a equação a seguir.

$$H = 137 + b_2 D - b_3 D^2$$

Onde: b_2 e b_3 são as constantes de crescimento das espécies indicadas anteriormente na Tabela 58; D é o diâmetro.

A partir desta parametrização, foram construídas três curvas de crescimento, uma para cada espécie de mangue (*Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans*), considerando fator de redução constante e ótimo ($f_{\text{red}} = 1$). Este cenário reflete a condição ideal, apenas teórica, de crescimento das plantas, ou seja, sem influências de fatores limitantes como disponibilidade de recursos, salinidade, competição, efeitos de contaminantes, entre outros. A escolha de um fator de redução ótimo ($f_{\text{red}} = 1$) também está condicionada à projeção das ações a serem realizadas como compensação de danos aos ambientes costeiros, especificamente as ações de recuperação de áreas degradadas em manguezais. Nesse contexto o fator de redução ótimo ($f_{\text{red}} = 1$) indica as atividades ativas que idealizam minimizar todas as condições ambientais desfavoráveis ao processo de crescimento dos mangues, incluindo ações de controle, monitoramento, reposição de indivíduos mortos e demais garantias de sucesso dos plantios instalados.

Para definir o momento em que cada curva de crescimento das espécies atinge um valor de 'linha de base' ou 'estabilização', foram utilizados valores reais de área basal obtidos na literatura. A área basal é a expressão numérica da superfície ocupada pelos indivíduos de uma espécie em uma determinada unidade de área e apresenta um limite máximo de crescimento determinado por características intrínsecas de cada espécie. O parâmetro foi selecionado por ser amplamente disseminado em trabalhos de ecologia vegetal e principalmente por representar um fator natural associado aos processos de sucessão natural e/ou restauração ecológica, exprimindo o potencial máximo de crescimento de populações vegetais.

A busca dos dados de base envolveu uma área geográfica mais ampla que a foz do rio Doce, tendo-se estabelecido como critério o segmento VI da distribuição dos manguezais no Brasil (sensu SCHAEFFER-NOVELLI et al., 1990), entre as latitudes 13° e 23°, portanto, englobando integralmente a área danificada pelo desastre (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b). A compilação resultou na inclusão de nove artigos versando sobre estrutura de manguezais nos estados do Espírito Santo, Bahia e Rio de Janeiro (Tabela 59).

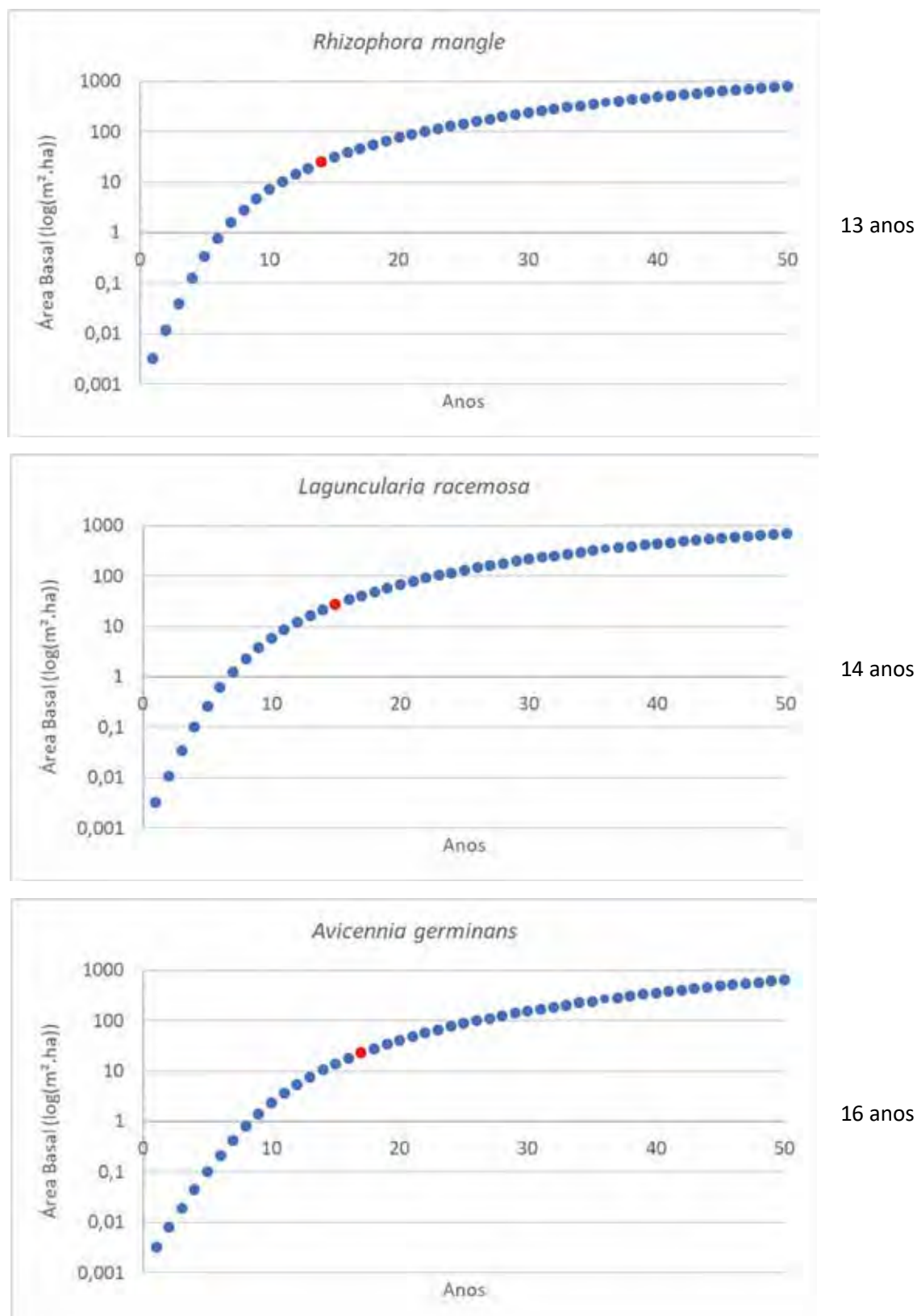
Tabela 59 – Fontes de dados utilizados para definição dos parâmetros área basal e densidade de indivíduos no modelo FORMAN.

Fonte	Localização	Sítios amostrais
SILVA et al. (2005)	São Mateus – ES	4
BERNINI e REZENDE (2011)	Rio Itabapoana – ES/RJ	13
MARTINS et al. (2011)	Rio Cururupe – BA	4
PETRI et al. (2011)	Rio Benevente – ES	20
LONDE et al. (2013)	Rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim – ES	2
BERNINI et al. (2014a)	Rio Itabapoana – ES/RJ	6
BERNINI et al. (2014b)	Rio das Ostras – RJ	8
CALEGARIO et al. (2015)	Rio São João – RJ	4
TOGNELLA et al. (2020)	Centro e Norte do ES	6

Uma vez que os valores brutos obtidos em cada uma das localidades e sítios amostrais contemplados nesses estudos variam consideravelmente, incluindo valores extremos de área basal (72,2 m² ha⁻¹ em PETRI et al., 2011) e densidade (37.467 troncos por hectare em BERNINI et al., 2014b), optou-se por utilizar a mediana da distribuição dessas medidas. A mediana atua excluindo os valores extremos, reduzindo um conjunto de valores em um só, de tendência central. Para o cálculo das medianas foram utilizados valores de 68 sítios amostrais para área basal e 61 sítios amostrais para densidade de indivíduos (Apêndice H). Indica-se que os valores de cada sítio amostral representam valores globais de área basal e densidade para o conjunto de todas as espécies levantadas para aquele local. A escolha por esse parâmetro geral se deu pela falta da informação por espécie na maioria dos trabalhos consultados, sendo então impossível estabelecer medianas de área basal e densidade para cada uma das três espécies utilizadas na aplicação do modelo. Entende-se que para fins desse estudo é razoável a utilização dos parâmetros globais de área basal e densidade pois a aplicação do modelo FORMAN é feita para apenas uma única espécie por vez, resultando em curvas de crescimento mono-específicas dentro de um limiar hetero-específico (mediana dos dados de todas as espécies em área basal e densidade). Em outras palavras, a modelagem indica que em uma determinada área hipotética (no caso, um hectare), uma única espécie de mangue (*Laguncularia racemosa* p.e) poderia se estabelecer até o limite de ocupação natural de todas as demais espécies inseridas no modelo, crescendo tanto em área de ocupação propriamente dita (área basal) quanto em número de indivíduos (densidade).

Assim, define-se como patamar “alvo para restauração” o valor de área basal ocupada pelas espécies dos manguezais de 21,94 m² ha⁻¹, com densidade de 4.209 troncos por hectare, entendendo que esses valores representam populações vegetais em sua máxima expressão regional. A partir destas delimitações, e em condições ótimas de crescimento ($f_{red} = 1$) conforme pressuposto do modelo, os mangues devem demorar 13, 14 e 16 anos para atingir a área basal de referência da região, respectivamente para *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans* (Figura 71).

Figura 71 – Curvas de crescimento resultantes da aplicação do modelo FORMAN para as espécies *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans*, limitadas ao ano 50 do modelo. O eixo vertical é apresentado em escala logarítmica para facilitar a visualização do ano em que se atinge a área basal-alvo de cada espécie (ponto vermelho).



Fonte: Lactec, 2021.

Ressalta-se que as três espécies selecionadas para a aplicação do modelo são táxons arbóreos de elevada densidade e dominância nos manguezais brasileiros, particularmente na área de abrangência do levantamento de literatura (segmento VI de SCHAEFFER-NOVELLI et al., 1990).

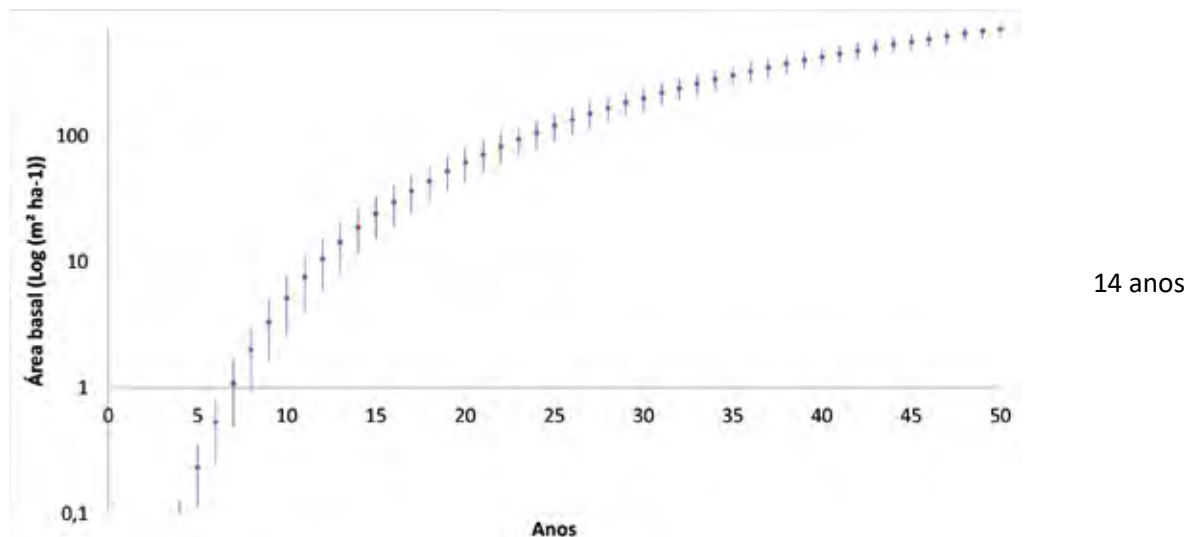
De maneira a condensar as curvas de crescimento das três espécies utilizadas na execução do modelo, tornando as três curvas em apenas 1, foi realizada a média simples dos valores de área basal alcançados por cada espécie ao longo da série de crescimento resultante do modelo FORMAN. A utilização da média simples tem justificativa na contribuição estrutural flutuante de cada espécie no decorrer do processo de sucessão natural dos manguezais, com participação preponderante de uma ou outra espécie a depender do período de análise (as características estruturais de cada espécie, dentre elas a área basal, se alternam sob pressões ambientais). A mesma condição se aplica ao contexto espacial, onde, dependendo do sítio de estabelecimento do manguezal, existe a dominância de uma determinada espécie em detrimento das outras. Desta forma, utilizando a contribuição similar de um terço de participação de área basal das três espécies mais importantes dos manguezais na região de estudo garante-se a construção de uma curva de crescimento genérica, com aplicação independente do quesito tempo e espaço. Como resultado, tem-se que, com a participação de *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans* conjuntamente no modelo, e em condições ótimas ($f_{red} = 1$), as espécies demorariam 14 anos para alcançar os parâmetros estruturais de referência da região (área basal de $21,94 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ e densidade de $4.209 \text{ invds ha}^{-1}$). Conforme dados expostos na Tabela 60 e Figura 72, sendo esta última a curva de crescimento do manguezal.

Tabela 60 – Curva de crescimento resultante do modelo FORMAN após aplicação de média simples para valores de área basal das espécies *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans*

ANO	Média Simples da Área Basal	
	Área Basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$)	Desv. Pad.
0	0,0033	0,000
1	0,0103	0,002
2	0,0314	0,011
3	0,0899	0,041
4	0,2331	0,120
5	0,5358	0,291
6	1,0902	0,597
7	1,9908	1,067
8	3,3239	1,712
9	5,1649	2,533
10	7,5774	3,521
11	10,6150	4,663
12	14,3224	5,949
13	18,7372	7,369
14	23,8911	8,912

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 72 – Curva de crescimento resultante do modelo FORMAN após aplicação de média simples para valores de área basal das espécies *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia germinans*, limitadas ao ano 50 do modelo. O eixo vertical é apresentado em escala logarítmica para facilitar a visualização do ano em que se atinge a área basal-alvo (ponto vermelho).



Fonte: Lactec, 2021.

A exposição de todos os cálculos necessários ao alcance dos resultados é apresentada no Apêndice I.

Após a unificação das curvas, multiplicou-se cada valor anual da série de valores da área basal (Tabela 60) que representa o crescimento tanto em altura quanto em volume do manguezal em 1 hectare, pela taxa de equivalência de 1,6 gerando a coluna **Área Basal ($m^2 ha^{-1}$) com equivalência**. Conforme já apontado, o detalhamento da construção da taxa de equivalência está descrita no item 4.5.7, no entanto esse valor é utilizado na construção da curva de compensação, pois reflete a qualidade ambiental do ambiente após as ações compensatórias. Desta forma, os benefícios ambientais obtidos em área basal de mangue representam 60% a mais, devido ao acréscimo de serviços ecossistêmicos fornecidos em comparação com os que foram perdidos. Após o acréscimo feito pela taxa de equivalência, aplicou-se sobre essa série o desconto por meio do fator de desconto de 8% ao ano, gerando a coluna **Área Basal ($m^2 ha^{-1}$) com equivalência DESCONTADA**, conforme exposto na Tabela 61. No último ano da série foi aplicada a fórmula da perpetuidade, isto porque o estabelecimento de manguezais irá prover serviços ecossistêmicos permanentemente, por isso os benefícios perpétuos precisam ser computados, como parte da compensação gerada. O somatório da coluna descontada, incluindo a perpetuidade, (120,60), representa a área basal total (acumulada) obtida em 1 hectare ao longo de 14 anos.

Tabela 61 – Curva de crescimento da área basal do manguezal, após aplicação da taxa de equivalência, taxa de desconto e perpetuidade

ANO	Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Área Basal (m ² ha ⁻¹) com equivalência	Área Basal (m ² ha ⁻¹) com equivalência DESCONTADA
2022	0,003	0,0053	0,003
2023	0,010	0,0165	0,009
2024	0,031	0,0503	0,025
2025	0,090	0,1438	0,067
2026	0,233	0,3730	0,160
2027	0,536	0,8573	0,340
2028	1,090	1,7444	0,641
2029	1,991	3,1852	1,084
2030	3,324	5,3182	1,677
2031	5,165	8,2638	2,412
2032	7,577	12,1238	3,277
2033	10,615	16,9839	4,250
2034	14,322	22,9158	5,310
2035	18,737	29,9795	6,432
2036	23,891	38,2257	94,922
TOTAL			120,60

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 73 – Curva de crescimento da área basal do manguezal, após aplicação da taxa de equivalência, taxa de desconto e perpetuidade, curva da compensação.



Fonte: Lactec, 2021.

Sabendo-se que em 1 hectare ao longo de 14 anos a área basal acumulada é 120,60 (m² ha⁻¹), para se determinar a quantidade de área em hectare a ser compensada que equivale a área em hectare da perda interina, foi necessário dividir a área da perda interina pela área basal acumulada de 1 hectare, obtendo assim o quantitativo de 19.512,71 hectares de área a ser compensado que é equivalente a perda sofrida pela sociedade no tempo perpétuo.

4.5.7 TAXA DE EQUIVALÊNCIA DA COMPENSAÇÃO

A taxa de equivalência representa o quanto os benefícios gerados por ações de recuperação e de compensação são equivalentes em termos qualitativos aos benefícios perdidos devido ao desastre. Desta forma, sua construção é desenvolvida de maneira personalizada para cada habitat, reunindo e considerando as informações e métodos que permitam a criação de uma taxa que traduza esta comparação entre benefícios.

No caso da área marinha, a taxa de equivalência foi construída com o intuito de mostrar a comparação quantitativa entre os serviços ecossistêmicos prestados pelo oceano e os serviços ecossistêmicos prestados pelos mangues, haja vista que as ações compensatórias são recuperação de áreas de manguezais, de forma a traduzir a conversão de uma área em relação ao outra. Logo, a taxa de equivalência atende a necessidade de comparar a quantidade de serviços obtidos em 1 hectare de mangue recuperado em relação a 1 hectare de área marinha afetada pelo desastre.

Inicialmente, a equipe buscou medições biológicas, químicas e outras, que permitissem uma relação direta quantitativa entre os benefícios obtidos pelos manguezais e os benefícios perdidos no oceano. No entanto, inexistem informações ou métodos desenvolvidos que permitam essa mensuração direta, que fosse capaz de fornecer uma relação clara da representatividade numérica de uma ação de compensação ambiental e a perda sofrida.

Por essa razão, decidiu-se por trabalhar pelo viés qualitativo, a fim de tornar a construção da taxa de equivalência a mais clara e embasada possível. Para tanto, se utilizou a perspectiva dos serviços ecossistêmicos (SE), por meio do estudo realizado voltado aos SEs perdidos em decorrência do desastre, e aqueles providos pelas ações de compensação.

O estudo dos SEs existentes na região e afetados/perdidos devido ao desastre da Samarco constam no capítulo sobre serviços ecossistêmicos no TOMO I de Acompanhamento de Danos. Considerando tal estudo, um recorte exclusivo da área marinha foi utilizado nesse relatório para o embasamento da construção da taxa de equivalência. Na Tabela 62 consta a relação dos 12 serviços afetados tanto pelo dano de deposição do sedimento quanto pela degradação da qualidade dos habitats.

Tabela 62 – Relação dos serviços ecossistêmicos afetados pelo desastre da Samarco na Zona Costeira e Marinha, com ênfase nos danos que estão englobados no processo de valoração.

	Serviços ecossistêmicos / Danos	Incremento na deposição de sedimentos	Degradação da qualidade dos habitats marinhos
1	Provisão de recursos genéticos e bioquímicos		
2	Regulação hidrológica		
3	Tamponamento de mudanças hidrológicas/meteorológicas rápidas		
4	Purificação da água		
5	Regulação de teias tróficas e manutenção da biodiversidade		
6	Disponibilidade de áreas vitais para espécies flora e fauna		
7	Formação de substrato		
8	Ciclagem de nutrientes		
9	Produção primária		
10	Recreação, lazer e educação		
11	Herança e expressão cultural e espiritual		
12	Relações sociais e modo de vida		

Fonte: Lactec, 2021.

Para o contexto da valoração econômica, a Tabela 63 apresenta os serviços afetados pelos danos do desastre da Samarco que estão sendo valorados para a área marinha. Ainda na mesma Tabela constam os serviços que também são prestados pelos manguezais, e que se entende como equivalentes na compensação dos danos.

Assim, a Tabela 63 permite verificar que todos os SE afetados pelos danos decorrentes do desastre e que estão sendo valorados, são também prestados pelos manguezais, logo, as ações compensatórias de recuperação de áreas de mangue, devolve à sociedade os benefícios perdidos devido ao rompimento da Barragem de Fundão.

Tabela 63 – Serviços ecossistêmicos afetados pelos danos do desastre da Samarco na zona costeira e marinha, que estão sendo valorados no presente estudo, e a indicação daqueles prestados pelos manguezais e que se entende serem equivalentes na compensação ambiental.

Serviços Ecossistêmicos ->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dano	Provisão de recursos genéticos e bioquímicos	Regulação hidrológica	Tamponamento de mudanças hidrológicas/meteorológicas rápidas	Purificação da água	Regulação de teias tróficas e manutenção da biodiversidade	Disponibilidade de áreas vitais para espécies flora e fauna	Formação de substrato	Ciclagem de nutrientes	Produção primária	Recreação, lazer e educação	Herança e expressão cultural e espiritual	Relações sociais e modo de vida
Deposição de sedimentos		x	x	x		x	x	x	x			
Degradação da qualidade dos habitats marinhos	x				x	x		x		x	x	x
Serviços prestados também pelos manguezais	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Fonte: Lactec, 2021.

Além dos 12 SE prestados pelo oceano e afetados pelo desastre, e que são providos pelos manguezais, este último também é responsável por mais oito SEs, a saber (BANN, 1998; BARBIER et al., 2011; UNEP, 2014; GASPARINETTI et al., 2018; SOUZA et al., 2018; MMA, 2010):

- Sequestro e fixação de carbono;
- Retenção de solo e sedimentos;
- Regulação hidrológica;
- Tamponamento de mudanças hidrológicas/meteorológicas rápidas;
- Purificação da água;
- Decomposição de resíduos e remediação de contaminantes;
- Regulação biológica (pragas, doenças e espécies invasoras); e
- Regulação de teias tróficas e manutenção da biodiversidade.

Assim, conclui-se que a recuperação de 1 ha de manguezal promoverá 20 SEs para a sociedade, sendo que esta, devido ao desastre perdeu 12 SEs, logo, há 8 SEs adicionais sendo disponibilizados à coletividade. Por isso, a taxa definida é o cálculo da razão entre os 12 serviços perdidos e os 20 serviços totais que o manguezal presta (12/20), o resultado desta razão traz uma taxa de equivalência de 1,6, ou seja, a cada 1ha de mangue recuperado há 60% a mais de ganhos. A contabilização desse percentual adicional é feita por meio da ponderação, na qual 1 ha de manguezal recuperado valerá 1,6 ha, promovendo assim uma relação quantitativa entre benefícios que reflete a relação qualitativa. Esta ponderação já foi utilizada na construção da curva de compensação detalhada no item 4.5.6 anterior.

4.5.8 DETALHAMENTO DAS AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA OS DANOS CAUSADOS À ÁREA MARINHA

Considerando os benefícios ambientais gerados pelo ecossistema manguezal, a recuperação dessa área foi escolhida como ação de compensação ambiental no sentido de compensar os danos gerados à área marinha. Os manguezais são de extrema importância ecológica e econômica, ao atuar na estabilização dos sedimentos fluviomarinheiros, no equilíbrio de relações ecológicas diversas, e na manutenção da vida marinha, possibilitando também a sobrevivência de muitas populações humanas que utilizam esses recursos.

Nesse item apresentam-se as linhas gerais, orientações, técnicas e métodos para aplicação de Programa de Recuperação Ecológica de Manguezais Degradados, tendo como escopo base: recuperação de um hectare de manguezal pela técnica de plantio total, em local com fontes de distúrbios já controlados, pressupostos definidos ao longo do texto.

Ressalta-se que a localização do quantitativo de área a ser compensada (19.512,71 hectares) não será pré-definida pela equipe técnica da valoração. Recomenda-se apenas que as áreas selecionadas sejam no local impactado pelo desastre e/ou o mais próximo possível, a fim de garantir que os benefícios ambientais gerados retornem para a população que sofreu o dano.

- Legislação Aplicável

O Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, instituído pela Lei Federal 7.661/1988, ordena os usos e as atividades na zona costeira, tendo como prioridade a proteção e conservação, entre outros, dos ambientes de manguezal. Ademais, grande parte dos manguezais brasileiros ocorre nos domínios do bioma Mata Atlântica, portanto, também protegidos no âmbito da Lei da Mata Atlântica, instituída pela Lei Federal 11.428/2006.

A principal legislação brasileira que versa sobre a vegetação nativa é o Código Florestal Brasileiro, instituído pela Lei Federal 12.651/2012, que traz várias definições importantes sobre as várias formas de vegetação nativa. Segundo o Código Florestal Brasileiro, os manguezais, em toda sua extensão, em zonas urbanas ou rurais, são considerados áreas de preservação permanente (APP), áreas legalmente protegidas, cujas principais funções estão associadas à preservação dos recursos hídricos, da paisagem, a manutenção da estabilidade geológica e biodiversidade, facilitação do fluxo gênico de fauna e flora, proteção do solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

As ações de recuperação em áreas de preservação permanente (APP) se apoiam na Resolução CONAMA 369/2006, que permite intervenções em APP desde que se configurem como utilidade pública ou interesse social, tais como aquelas que garantem a proteção ao meio ambiente. A Instrução Normativa do IBAMA 4/2011 estabelece procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada – PRAD ou área alterada, e define área degradada como “área impossibilitada de retornar por uma trajetória natural, a um ecossistema que se assemelhe a um estado conhecido antes, ou para outro estado que poderia ser esperado”; e área alterada como “área que após o impacto ainda mantém meios de regeneração biótica, ou seja, possui capacidade de regeneração natural” (IBAMA, 2011).

A Instrução Normativa ICMBIO 11/2014 estabelece procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de PRAD, definindo o termo “recuperação” como a “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada,

que pode ser diferente de sua condição original”. Já o termo “restauração” é definido como a “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada o mais próximo possível da sua condição original” (ICMBIO, 2014). No âmbito deste projeto, as ações são consideradas dentro do contexto de “recuperação”.

A Instrução Normativa MAPA 17/2017 versa sobre “regulamentar a produção, a comercialização e a utilização de sementes e mudas de espécies florestais ou de interesse ambiental ou medicinal, nativas e exóticas, visando garantir sua procedência, identidade e qualidade”. Por tanto, deve ser observada para execução das diferentes etapas do projeto.

As ações que tangem o monitoramento dos projetos de restauração podem ser delimitadas pela Instrução Normativa GABIN/ICMBIO 03/2017, que institui o Programa Nacional de Monitoramento da Biodiversidade. O programa foi criado visando subsidiar a avaliação da efetividade de conservação do sistema de unidades de conservação frente às mudanças climáticas e ao uso e manejo das UCs, bem como às estratégias de conservação das espécies ameaçadas de extinção em todo o território nacional.

- Escopo do projeto compensatório

As atividades necessárias à recuperação dos manguezais são aqui organizadas em quatro etapas básicas, conforme preconizado por literatura especializada (SER, 2004; ALVES-COSTA et al., 2008; BRANCALION et al., 2015; IBAMA, 2020):

o Planejamento: elaboração de projeto executivo para áreas específicas, incluindo o diagnóstico dos meios biótico, físico e socioeconômico;

- Implementação: execução das técnicas de recuperação elencadas no planejamento, incluindo estratégias de correções imediatas em eventuais falhas no desenvolvimento do projeto;
- Manutenção: replantio das mudas que não sobreviveram, manejo adaptativo e tratos silviculturais;
- Monitoramento: acompanhamento dos resultados da execução do projeto proposto e proposição de melhorias.

PLANEJAMENTO (ELABORAÇÃO DE PROJETO EXECUTIVO)

As ações de recuperação ecológica devem ser precedidas de um planejamento orientado à realidade das regiões onde se pretende executar o projeto. A simples reprodução de técnicas utilizadas em outros ambientes ou localidades pode levar ao insucesso das ações pretendidas (FERNANDES, 2012). De maneira a antecipar incongruências na aplicação dos projetos, devem ser considerados três aspectos basilares aos processos de restauração: (a) investigação dos fatores que originaram a degradação da área que se pretende restaurar; (b) investigação dos fatores que limitam ou impedem a regeneração natural na área; (c) prospecção de aspectos ecológicos relevantes ao manejo proposto (MENGHINI et al., 2018). Assim, o diagnóstico das condições ambientais e socioeconômicas é a atividade que irá nortear as etapas subsequentes do projeto de recuperação.

Diagnóstico das áreas de recuperação

Para essa etapa, recomenda-se a formação de uma equipe técnica multidisciplinar, que será responsável pela obtenção e análise de dados primários e secundários que visem subsidiar a elaboração do projeto executivo. As ações a serem realizadas incluem trabalhos em escritório e vistorias em campo para a coleta de dados. Especificamente, dados autoecológicos, hidrológicos e socioambientais devem ser contemplados nesta avaliação (LEWIS, 2005).

Sempre que disponíveis, deve-se incluir no diagnóstico, a análise de áreas de manguezais próximas ao local a ser restaurado, em bom estado de conservação. Estas informações se prestam como linha de base, apoiando na definição das melhores estratégias de recuperação e definindo o ecossistema de referência para o projeto, ou seja, o ambiente que inicialmente servirá de modelo para o planejamento da recuperação e posteriormente para o monitoramento (SER, 2004). Estas áreas também podem atuar como fontes de propágulos ou de mudas na realização do plantio, assim como potencialmente atuam no provimento de propágulos naturais à área alvo do manejo.

Para tanto o diagnóstico deverá trazer informações sobre o histórico e fatores de degradação, além de dados e informações sobre os meios físico, biótico e socioeconômico, conforme detalhamento abaixo:

- **Histórico e fatores de degradação:** Conhecer o estado atual e o histórico de degradação da área a ser manejada é fundamental, uma vez que é importante avaliar a intensidade dos danos e o tempo que esteve sujeita ao distúrbio. É nesta análise que se determina se a(s) fonte(s) geradora(s) de impacto(s) ainda atua(m), permitindo definir se é necessário cessar ou minimizar seus efeitos sobre o ambiente. Estudos anteriormente realizados no local ou próximos da área a ser restaurada podem fornecer subsídios valiosos na definição dos melhores métodos a serem adotados (MENEZES, 1999). Ao compreender de forma detalhada as fontes de danos e seus efeitos, o planejamento de um projeto de restauração pode atuar diretamente no controle destes fenômenos para maximizar a chance de sucesso de estabelecimento do manguezal (LEWIS, 2009). Alguns dos fatores de degradação comumente observados em projetos de recuperação em manguezais são: deposição de resíduos sólidos e lançamento efluentes residenciais ou industriais; circulação de pessoas e animais domésticos; irregularidades topográficas no solo impedindo a regularidade hídrica na área, etc. Ações concretas para anulação ou diminuição dos fatores de degradação devem ser indicados no momento do planejamento, prevendo, se necessário, articulação com atores locais para esse fim.
- **Meio Físico:** A avaliação do meio físico envolve a caracterização do clima, do solo, da geomorfologia e de aspectos relacionados à hidrologia e recursos hídricos. O ciclo hidrológico é um dos aspectos fundamentais que podem influenciar o sucesso do estabelecimento de um manguezal. A avaliação da qualidade da água e do solo, nas suas composições química, física e biológica, permite indicar potencialidades ou restrições quanto aos processos de recuperação. A partir deste conjunto de informações, também é possível definir o conjunto de espécies utilizadas na restauração, principalmente se o plantio direto for adotado (vide item “Definição e zonação das espécies”).
- **Meio Biótico:** Nesta etapa de avaliação é importante determinar se ocorre a chegada de propágulos e, conseqüentemente, se há regeneração natural; quais as espécies envolvidas no

processo e o quantitativo de propágulos que atinge o ambiente. Essas informações refletem a resiliência daquele ambiente, indicando a necessidade e/ou intensidade das ações corretivas e também serão importantes para decisão da melhor técnica e delineamento da restauração, assim como são importantes subsídios para a aplicação das etapas de manutenção e monitoramento. Ainda, é nesta etapa que se levantam dados sobre a ocorrência de espécies oportunistas e/ou exóticas que podem acessar o ambiente a ser restaurado, assim como de potenciais táxons envolvidos na predação ou fontes de doenças às plantas de mangue.

Recomenda-se a execução de levantamento florístico e/ou fitossociológico nas áreas foco de recuperação e também nas intermediações, visando o estabelecimento do ecossistema de referência. A partir desses dados será possível definir quais as melhores espécies se adaptam ao plantio, qual a zonação de cada espécie em relação a topografia local, quais as espécies de maior frequência na regeneração, entre outras associações teóricas e práticas.

- **Meio Socioeconômico:** Muitos manguezais inserem-se em um contexto social que, usualmente, tem profunda ligação cultural e econômica com os recursos disponíveis nesses ecossistemas. Por isso, o sucesso das ações de restauração requer alinhamentos com todas as partes interessadas, especialmente das comunidades que usufruem daquele ambiente. Esta etapa do diagnóstico permite inserir demandas destas comunidades ao longo de todas as demais etapas da restauração. Para fins deste projeto, não são consideradas ações específicas para contexto socioeconômico, tendo por prerrogativa que tais atividades e alinhamentos serão articulados a outros projetos específicos.

Escolha dos métodos de recuperação

A restauração de manguezais pode ser levada a efeito por meio de diversas técnicas, usualmente usadas em conjunto a depender do tamanho da área de restauração, assim como das informações obtidas no diagnóstico (adaptado de TNC, 2013):

- a) **Isolamento:** ações de controle do acesso humano e de animais domésticos ou de criação em áreas onde há ausência de fatores limitantes ambientais e biológicos à regeneração natural, ou seja, onde o ecossistema apresenta alto potencial de recuperação natural;
- b) **Condução de regeneração:** é utilizada quando há recrutamento natural de novos indivíduos capazes de promover a restauração da cobertura vegetal. Utilizam-se técnicas para acelerar a recuperação, como ações de manejo da dinâmica hidrológica, que tornam o ambiente mais propício à colonização pelo mangue;
- c) **Adensamento:** plantio de mudas em espaços não ocupados pela regeneração natural, recomendado em locais que alternam boa presença de regeneração natural com locais onde há baixa densidade de espécies regenerativas. Pode ser utilizado também em bordas de fragmentos. Nestas situações, efetua-se o plantio nas áreas abertas, induzindo a estruturação das áreas conforme seu entorno;
- d) **Enriquecimento:** utiliza-se quando a vegetação se encontra com diversidade florística menor do que as áreas de entorno, efetuando-se o plantio de espécies faltantes, mas presentes em manguezais da região;

- e) Plantio total: usualmente recomendado em áreas onde o recrutamento natural de plântulas é insuficiente ou mesmo ausente, assim como em áreas sem cobertura vegetal, mas ainda sujeitas a hidrodinâmica favorável. Outra vantagem do plantio direto, por demandar esforço mais intenso de recursos humanos, é sua aplicação no engajamento das partes interessadas, especialmente de comunidades locais e instituições envolvidas.

Dentre os métodos apresentadas, foi selecionada a técnica de plantio total por apresentar aplicação nos cenários de maior degradação, sendo a realidade mais provável ao se deparar com recuperação de áreas degradadas em áreas de mangue. As demais técnicas elencadas são utilizadas em ambientes que possuem uma capacidade de regeneração natural, sendo adotadas medidas para acelerar e potencializar o processo. De fato, apenas o diagnóstico das áreas será capaz de elencar a melhor técnica, de modo que cada área objeto de recuperação receberá métodos próprios. O plantio total é a técnica que promove a cobertura de 100% da área de restauração por intervenção humana, podendo por isso, ser precificada de forma assertiva.

Definição e zonação das espécies

A escolha das espécies envolvidas na restauração deve sempre respeitar o conjunto de táxons que ocorre naturalmente na região alvo, ou seja, tomando-se o cuidado para não realizar a introdução de espécies alóctones. Também devem ser evitados plantios mono-específicos (LEWIS, 2005), uma vez que ainda há poucas evidências sobre os benefícios ecossistêmicos deste tipo de plantio (FERREIRA; LACERDA, 2016).

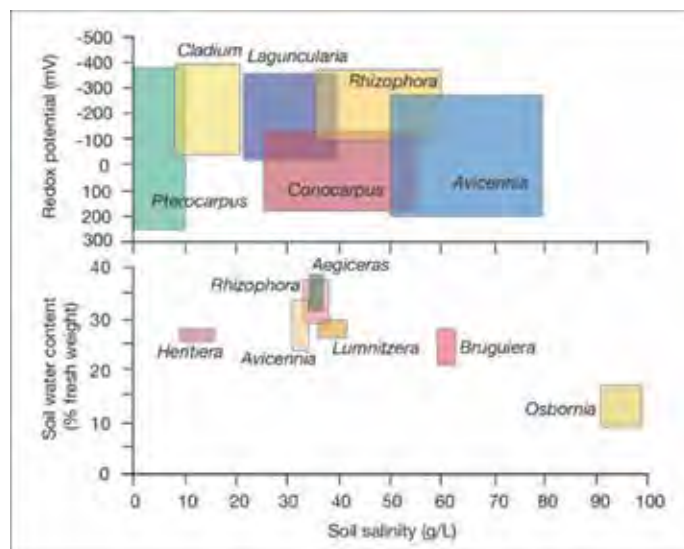
O ecossistema manguezal pode apresentar um *continuum* de feições: lavado, mangue (bosque de mangue) e apicum (salgado ou planície hipersalina). Como lavado, considera-se a feição exposta à maior frequência de inundação estuarina ou costeira, apresentando substrato lamoso ou areno-lamoso exposto somente por ocasião das baixas de marés, desprovido de cobertura vegetal vascularizada. A feição mangue apresenta cobertura vegetal típica, constituída por espécies arbóreas que lhe conferem fisionomia peculiar; uma faixa de lama escura fica exposta nas baixas de marés, quando se podem observar as raízes típicas, do tipo escora ou pneumatóforos. A feição apicum é uma planície hipersalina de superfície areno-lamosa, atingida pelas águas estuarinas ou marinhas somente por ocasião das altas de marés; pode estar envolvida pela feição mangue, ou limitando-se a esta em sua porção mais interna (TURRA; DENADAI, 2015; SCHAEFFER-NOVELLI, 2018).

Tolerâncias ecológicas das diferentes espécies (e.g. Figura 74) devem ser consideradas para auxiliar no zoneamento nas áreas de plantios. As espécies típicas dos manguezais brasileiros (mangue-vermelho – *Rhizophora mangle*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa*; mangue-branco ou tinteira – *Laguncularia racemosa*; e mangue-preto ou siriba – *Avicennia schaueriana* e *Avicennia germinans*) apresentam distintas preferências ambientais considerando o local de ocorrência (p.ex., diferentes graus de salinidade, dinâmica das marés, granulometria do solo, etc...).

A faixa de transição entre o manguezal e a terra firme (com solos menos lodosos) pode apresentar maior diversidade de espécies vegetais, sendo locais raramente atingidos pela ação das marés, incluindo táxons como a embira-do-mangue (*Talipariti pernambucense*), o avencão (*Acrostichum aureum*) e o mangue-de-botão (*Conocarpus erectus*). Nos apicuns, quando apresentam vegetação, são

ocupados por algumas espécies de porte herbáceo dos gêneros *Salicornia* (Amaranthaceae), *Sesuvium* (Aizoaceae), *Eleocharis* (Cyperaceae) e *Sporobolus* (Poaceae) (SCHAEFFER-NOVELLI, 2018).

Figura 74 – Distribuição de gêneros dominantes em função da salinidade do solo (g/L) e potencial redox (mV) à profundidade de 25 cm em Guadalupe, mar do Caribe (acima) e distribuição de gêneros em função da salinidade do solo (g/L) e presença de água no solo (% do peso) mensurados durante 1,5 anos em Proserpine, Austrália (abaixo).



Fonte: Stubbs e Saenger (2002).

De maneira prática, para execução desta etapa, recomenda-se a observação dos padrões de zonação das espécies nas diferentes feições dos manguezais próximos a área de implementação do projeto (ecossistema de referência). Se as características ambientais forem similares em ambas as áreas (recuperação e ecossistema de referência), é possível que a escolha das espécies baseada nos padrões de ocorrência por feição seja suficiente e efetiva.

Origem das mudas/propágulos

O êxito na recuperação ambiental depende das condições fitossanitárias das mudas usadas no processo de plantio, sendo tanto maior quanto melhor for sua qualidade. Na recuperação de manguezais, é comum, e mesmo indicado, a utilização de propágulos de áreas próximas para compor a regeneração de áreas degradadas (MENEZES, 1999). A disponibilidade de mudas de mangue em escala comercial é incipiente no país e, em muitos projetos, pode ser necessário iniciar a produção em viveiros.

As atividades envolvidas na utilização de propágulos naturais seguem a seguinte dinâmica (ICRI, 2018):

- Coleta de propágulos: coletam-se especificamente das espécies a serem usadas na restauração, obtidas *in loco* em locais preferencialmente próximos à área sob manejo, observando a IN MAPA 17/2017 que regulamenta a coleta, a produção e a utilização de sementes e mudas em território nacional. Todos os propágulos coletados (frutos germinados ou não) devem ser maduros, podendo ser diretamente plantados no berçário ou armazenados temporariamente.
- Armazenamento: o armazenamento consiste em guardar os propágulos em sacos de serapilheira (tecido grosseiro de estopa ou juta) ou caixas plásticas perfuradas e submersas no

mar, sujeitas à dinâmica das marés. Neste caso, os propágulos não devem ser mantidos por mais de duas semanas, uma vez que a viabilidade de germinação pode ficar comprometida

- c) Construção de um berçário: o berçário consiste em uma área de estuário que permita a instalação de caixas com substrato para manutenção temporária de propágulos, com o objetivo de controlar o desenvolvimento das mudas e aumentar sua probabilidade de sobrevivência depois de plantadas. O berçário deve ser instalado próximo à área de restauração e apresentar fácil acesso, assim como topografia plana e sujeita à variação das marés. Em média, admite-se que a densidade de cultivo nos berçários é de 100 plantas por m². A estrutura em si é feita em madeira e consiste em racks afixados na lama, com uma estrutura aérea que permita instalar estruturas de sombreamento, mas permitindo a passagem de água da chuva. Cada estrutura dessas é também munida de um quebra-mar, recomendada para diminuir a ação das ondas sobre a parte frontal dos berçários, que consiste em uma tábua de madeira afixada ao fundo. Os propágulos, para serem colocados no berçário, são alocados em sacos biodegradáveis com substrato (composto em partes iguais por lodo e areia), priorizando-se colocá-los nos racks na maré baixa para minimizar perdas do substrato. Propágulos que apresentam sinais de doença ou parasitas devem ser descartados para evitar a contaminação das demais plântulas no berçário.

IMPLEMENTAÇÃO

Trabalhos relevantes que tratam da recuperação de manguezais (LEWIS, 2005; IFTEKHAR, 2008; LEWIS; BROWN, 2014) são enfáticos em afirmar a importância da retirada dos fatores de degradação que impedem a regeneração natural dos ecossistemas de manguezais. Menghini et al. (2018) indicam claramente que o plantio de mudas deve ser feito apenas quando a retirada dos fatores de degradação e a retomada do regime hidrológico não forem suficientes para que a regeneração possa ocorrer de forma espontânea, com propágulos e mudas se desenvolvendo de forma saudável e natural.

Menghini et al. (2018) apresentam dois casos ilustrativos. O primeiro na Flórida/EUA, onde se observou a regeneração natural após a reabertura dos canais de água que haviam sido interrompidos pela construção de uma estrada. O segundo caso, em Florianópolis/SC, onde se observou o crescimento da regeneração natural das espécies após a remoção das edificações e do renivelamento do terreno que possibilitou o retorno da dinâmica hidrológica. Nesses dois casos, é importante destacar que havia áreas adjacentes recobertas com manguezal e que serviram de origem para os propágulos que colonizaram as áreas degradadas. Rovai (2012) observa que a regeneração natural pode resultar em manguezais mais similares a bosques maduros do que plantios de restauração mal executados.

Para a elaboração dos custos apresentados no item 4.5.9 valor monetário do dano, considera-se que a retirada dos fatores de degradação, que podem ser de diversas origens e intensidades, foi superada, do contrário, não haveria formas de precificá-la. Foi possível considerar apenas custos para reconformação do terreno, que é uma das possíveis formas de restabelecer o fluxo hidrológico natural.

PREPARO DA ÁREA

Retirada e/ou mitigação dos fatores de degradação

Como já exposto anteriormente, esta é a primeira e talvez a mais importante etapa no processo de recuperação de manguezais degradados. Para isso, poderão ser necessárias intervenções nas áreas destinadas a recuperação, e eventualmente em áreas próximas, pois a origem dos fatores de degradação muitas vezes é externa. Essa etapa envolve atividades como:

- a) demolição, retirada de entulho, resíduos;
- b) remoção de barragens ou diques que estejam impedindo a chegada do fluxo de água de origem continental ou marinha;
- c) nivelamento do solo para permitir a retomada da dinâmica hidrológica;
- d) construção de estruturas para contenção de efluentes industriais;
- e) retirada de animais de criação, entre outros.

Para elaboração do orçamento, foi possível incluir apenas custos para o item (c), que é possível realizar com uso de maquinário pesado para área delimitada de 1 hectare. Para os demais itens, não foi possível estimar um dimensionamento de atividades ou custos. Por esse motivo, é imprescindível que a etapa de diagnóstico seja cuidadosa ao esclarecer quais os fatores de degradação que agem sobre as áreas escolhidas para a restauração, indicando, inclusive, se a retirada dos fatores de degradação é possível. Caso não seja possível, a área poderá ser substituída e não fazer parte do programa de recuperação. Algumas técnicas utilizadas para reparar o fluxo hidrológico nos manguezais, utilizadas em diversas regiões do mundo, podem ser consultadas em Lewis e Brown (2014).

Isolamento da área

As áreas destinadas ao programa de recuperação deverão ser identificadas com placas informativas e ter seus vértices delimitados em campo com uso de estacas ou canos PVC. Nos manguezais, em grande parte o acesso pode ser feito com uso de embarcações, não havendo maneiras efetivas de impedir a circulação das pessoas. A instalação de cercas num ambiente hidrodinâmico e com solo instável pode ser pouco efetiva, além de incidir em elevados custos e ficar descontextualizada na paisagem dos manguezais. Assim, as cercas só deverão ser utilizadas nos casos que comprovadamente houver criação extensiva de animais como suínos, ovinos, bovinos, bubalinos, entre outros, nas proximidades das áreas de restauração e houver risco de contato desses animais com os plantios.

A maneira mais eficiente de proteger as áreas de recuperação em manguezais é o envolvimento da comunidade nas ações de recuperação. Se for possível o engajamento da comunidade, ela mesma tratará de cuidar para que os membros da comunidade atuem na proteção do local.

Controle de espécies alóctones

Na ocorrência de espécies que não pertencem ao ecossistema, deve-se fazer a retirada com utilização de ferramentas manuais, como foice ou enxada. Essa vegetação resultante pode ser depositada no local e servir de cobertura do solo. No entanto, os indivíduos que estiverem em frutificação na

época da limpeza devem ser retirados da área para evitar reinfestação. As espécies exóticas devem ser retiradas do local, em qualquer hipótese, para evitar a reinfestação por propagação vegetativa.

O tamanho da área e a intensidade de infestação do local irão determinar a limpeza total ou apenas o coroamento no entorno da cova de cada indivíduo.

Controle de pragas

Embora a diversidade de espécies arbóreas seja considerada baixa, o ecossistema manguezal abriga uma fauna terrestre bastante diversificada, incluindo numerosas espécies de Formicidae (DELABIE et al., 2006), sendo considerados animais dominantes dos copados arbóreos. Devido à estrutura peculiar dos manguezais, com solo inundado ou encharcado de água, a mimercofauna associada a esses ambientes é exclusivamente arborícola, nidificando em galhos ocos, formigueiros externos ou vivem junto a epífitas. A pressão de herbivoria que poderia existir sobre as plântulas provavelmente partiria de comunidades de formigas instaladas nas bordas dos manguezais, em ambientes de terra firme.

Além disso, Tsuji e Fernandes (2008) relatam o ataque de caranguejos e lagartas em espécies de mangue plantadas na região de Bragança/PA, de forma mais intensa na espécie de *Rhizophora*.

Dessa forma, o controle de pragas, se houver necessidade, deverá ser feito na etapa de manutenção, após o plantio das mudas, caso haja indícios de herbivoria.

Plantio

Deve ser realizado preferencialmente na estação chuvosa, quando são registrados os menores valores médios de salinidade no solo e na água e também quando o aporte de nutrientes carregados do continente pelas chuvas é maior (FERNANDES, 2012; TSUJI; FERNANDES, 2008). O plantio envolve materiais simples, como cortadeiras, coveadeiras, pás e carrinhos-de-mão. Além disso, é fundamental acompanhar cautelosamente as equipes de campo para que o plantio respeite as zonações das espécies definidas em etapas anteriores.

As covas devem ser feitas de modo aleatório, respeitando um espaçamento mínimo de 1,2 m entre elas. Recomenda-se não instalar grades orientadoras em campo devido à maleabilidade do lodo, portanto, estruturas-guia como cordas para orientar linhas retas podem alterar a dinâmica do fluxo da água no substrato. Sugere-se, ainda, não usar espaçamentos homogêneos entre covas, assim como não plantar somente uma plântula por cova, preferindo o plantio em grupos hetero-específicos contendo 5 propágulos (TOLEDO et al., 2001). As covas devem ter uma vez e meia a profundidade das raízes da plântula, que varia entre as espécies (ICRI, 2018).

Considerando o espaçamento mínimo de 1,2 m entre covas (83 x 83 covas sobre uma área de 99,6 x 99,6 m) e a utilização de 5 mudas por cova, estima-se o plantio de 34.445 mudas em 6.889 covas, distribuídas ao longo de 1 ha de área de restauração.

O arranjo em grupos (mais de uma plântula por cova) vem sendo recentemente mais recomendado pela literatura, sendo uma técnica que tem demonstrado resultados melhores quanto à sobrevivência e taxas de crescimento de manguezais restaurados (CORBIN; HOLL, 2012), fenômeno associado

a interações de facilitação entre os indivíduos mais próximos (SILLIMAN et al., 2015). Também no Brasil há estudos que indicam o uso desta técnica em situações em que o manguezal não demonstra potencial para regeneração natural (PRANCHAI et al., 2018).

Destaca-se que os manguezais apresentam solo bastante eutrofizados, com altos teores da matéria orgânica provenientes das marés, rios, redes de drenagem e lençol freático, apresentando suprimento adequado de nutrientes (GOMES et al., 2017; FIRME, 2003). Desta forma, pode-se considerar que a qualidade nutricional dos solos nos manguezais é adequada ao desenvolvimento do sistema radicular das espécies vegetais, não sendo necessárias ações de fertilização. Medições sobre a fertilidade do solo de manguezais servem estritamente para estudos acadêmicos (LEWIS & BROWN, 2014).

MANUTENÇÃO

Visando garantir o sucesso da etapa de implementação e efetiva recuperação ambiental das áreas manejadas, é fundamental o acompanhamento rotineiro das ações implantadas e seus resultados. As ações de manutenção são de crucial importância e devem ser realizadas pelo período indicado de 2 anos ou até o total sombreamento da área pelo copado dos indivíduos plantados (caso esta característica se estabeleça antes), impedindo assim o crescimento de espécies herbáceas daninhas, além de propiciar ambiente apropriado para a instalação de propágulos provenientes da regeneração natural. Basicamente, a manutenção consiste no coroamento das mudas, roçada ou capina (mecânica) se necessário, controle de formigas cortadeiras quando observado herbivoria e replantio de mudas (à taxa de mortalidade estipulada de 20%). A fase de manutenção deve ocorrer pelo período de 2 anos após a implementação. O calendário de manutenções acontecerá da seguinte forma:

- 1ª manutenção: 30 dias após o plantio;
- 2ª manutenção: 90 dias após o plantio;
- 3ª manutenção: 180 dias após o plantio;
- 4ª manutenção: 360 dias após o plantio;
- 5ª manutenção: 510 dias após o plantio;
- 6ª manutenção: 720 dias após o plantio.

Coroamento

O coroamento das mudas é o processo de limpeza periódica no entorno dos indivíduos ou agrupamentos de indivíduos plantados e também dos espécimes regenerantes naturais que possam vir a colonizar os ambientes com o decorrer do avanço do processo de recuperação. Essa ação tem seu foco principal sobre espécies de gramíneas agressivas que, por seu excessivo crescimento, podem recobrir os indivíduos jovens de mangue e restringir seu desenvolvimento inicial. A técnica a ser aplicada é a de remoção mecânica pontual, com capina circular da superfície do solo no entorno imediato dos indivíduos (raio aproximado de 25 cm a partir do coleto). A ação deve ser continuada até que o espécime em questão atinja altura suficiente para não ser abafado pelas gramíneas competidoras (>1 m de altura).

Controle de espécies alóctones

Ação idêntica à realizada na etapa de preparo da área. Caso haja dominância no solo de espécies não relacionadas ao ecossistema manguezal recomenda-se a roçada mecânica da totalidade da área. Os restos vegetais, desde que não estejam com sementes e desde que não se trate de espécie exótica, podem ser espalhados sobre o solo, criando barreira sobre a incidência direta do sol, preservando a umidade enquanto os espécimes plantados ou regenerantes ainda não fornecem suficiente recobrimento foliar.

Nessa etapa torna-se extremamente importante a observação da ocorrência de espécimes nativos regenerantes, evitando sua supressão durante a roçada. Essa advertência também se faz sobre os indivíduos arbóreos plantados.

Controle de pragas

Como mencionado no item de mesmo nome, localizado no item Preparo da área, formigas cortadeiras podem não ser consideradas elementos nocivos aos projetos de restauração em manguezais, pois habitam exclusivamente terrenos sem inundações. Entretanto, formigas cortadeiras do gênero *Atta* podem apresentar área de forrageio de até 500 m de comprimento (ENDRINGER, 2011), sendo então plenamente possível a chegada destes herbívoros em áreas de plantio em momentos de baixa de marés. Neste caso, caso haja indícios de herbivoria por parte de formigas, recomenda-se a instalação de iscas no entorno das áreas manejadas, em ambientes que não sofrem inundações e onde seria possível a sobrevivência de formigas cortadeiras (gêneros *Atta* e *Acromyrmex*). As iscas devem ser aplicadas distantes até 40 cm da entrada dos formigueiros ou conforme indicação do fabricante. O controle deve ser executado após efetiva verificação de herbivoria prejudicial sobre as plântulas e continuado até o estabelecimento da vegetação, momento onde o impacto não será prejudicial.

No caso de herbivoria causada por lagartas (*Lepidoptera*), de modo a prejudicar o desenvolvimento dos plantios, deve-se primeiramente identificar qual (ais) é (são) a(s) espécie(s) causadora(s) deste mal, devendo-se procurar técnicas de controle naturais e específicas a cada espécie. Se o problema for ocasionado por caranguejos (*Decapoda*), recomenda-se simplesmente realizar o replantio das mudas que não sobreviveram. Caranguejos são fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas de manguezais, reciclam matéria orgânica, aeram o solo (FERNANDES, 2012), portanto, são importantes para recuperação de ambientes degradados.

Replanteio de mudas

É de consenso na literatura acadêmica sobre restauração ecológica uma taxa de 10% de mortalidade de mudas após o plantio (RODRIGUES et al., 2009). Deste modo, seguindo a periodicidade indicada no caput do item “manutenção”, caso ocorra morte de indivíduos, estes deverão ser repostos por meio de replantio. O replantio consiste na reposição das mudas mortas, utilizando as mesmas técnicas já descritas na fase de plantio.

De maneira a garantir a existência de mudas para as ações de replantio, indica-se o salvaguardo de uma porcentagem de 15% superior ao número total de mudas concernentes ao projeto executivo produzido para a área, número equivalente a 5.150 mudas.

MONITORAMENTO

O monitoramento tem como propósito o registro e apresentação dos resultados ecológicos e/ou socioambientais obtidos durante o processo de recuperação ecológica, apontando erros e acertos das técnicas adotadas e definindo possíveis ações corretivas e complementares nas áreas manejadas (IBAMA, 2020). É importante ressaltar que um projeto de restauração ecológica pode tanto seguir por uma trajetória positiva, avançando em relação ao estado inicial de adequabilidade ambiental, bem como encontrar caminhos alternativos estáveis, onde pode permanecer estagnado ou até entrar em processo de retrocesso, voltando ao estado de degradação anterior ao da intervenção (PACTO, 2013). Desse modo, o resultado do monitoramento fornece direções e recomendações de possíveis ações práticas de manejo adaptativo para ajustar essas trajetórias.

Monitoramentos ecológicos baseiam-se na verificação e avaliação de indicadores biológicos mensuráveis, previamente selecionados e referenciados pela literatura acadêmica. Os indicadores no contexto desse projeto são classificados em critérios de estrutura, composição da vegetação e também critérios operacionais. Tais critérios serão verificados em campo e avaliados, na tentativa de averiguar se as metas de restauração estão sendo atingidas.

Os princípios teóricos e metodológicos orientadores das ações apresentadas aqui seguem, com adaptações, os pressupostos adotados no Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (PACTO, 2013) e no Protocolo para o Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros, da Rede de Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros REBENTOS (TURRA; DENADAI, 2015).

De acordo com a fase ecológica na qual as áreas em restauração são enquadradas, distintas avaliações serão adotadas:

- Fase I

Fase focada no sucesso do estabelecimento dos indivíduos plantados e na estruturação do dossel florestal. Ocorre em momentos iniciais após o plantio, onde a cobertura do copado arbóreo (projeção da cobertura proporcionada pelas árvores em crescimento) é inferior a 70%. Para tais áreas, objetiva-se a determinação da porcentagem da cobertura arbórea; a observação do incremento em indivíduos e riqueza de espécies arbóreas nativas e a observação de fatores de degradação, incluindo a ocorrência de espécies exóticas.

- Fase II

Fase voltada para a avaliação da trajetória ecológica da área restaurada. Ocorre em plantios com cobertura florestal já estabelecida, com cobertura de copa arbórea superior a 70%. O objetivo principal nesta etapa é a avaliação da dinâmica e trajetória da sucessão florestal baseada em parâmetros de riqueza e densidade de espécies nativas e exóticas invasoras, além do estabelecimento ou incremento de relações inter-específicas nas áreas manejadas.

Prevê-se que a execução do monitoramento ocorra pelo período de 5 anos (MENGHINI et al. 2018), com periodicidade semestral a partir de 180 dias após o plantio, de modo a contemplar as atividades das fases I e II do protocolo. As ações a serem desenvolvidas são apresentadas a seguir:

Planejamento amostral

Considerando a diversidade edáfica dos locais de recuperação ecológica, bem como as interações dos indivíduos plantados com as inundações periódicas que ocorrem no ecossistema estuarino, recomenda-se a seleção de, ao menos, duas áreas amostrais dentro dos limites de implementação do projeto: (1) a zona interna ou bosque de mangue, ou seja, o local mais próximo a um curso de água ou zona de marés e; (2) o ambiente de transição do bosque com as outras feições típicas de manguezais, tais como os apicuns, vegetação de restinga, cordões praianos, dunas, encostas ou outras feições florestais da Mata Atlântica. Para as duas feições escolhidas serão instaladas parcelas de monitoramento, objetivando a coleta de dados dos espécimes vegetais.

Alocação de parcelas

Por se tratar de um monitoramento de médio a longo prazo, recomenda-se a instalação de parcelas permanentes. Cada parcela terá tamanho fixo de 100 m², sendo de formato retangular, apresentando 25 m de comprimento por 4 m de largura, preferencialmente direcionadas no sentido do norte magnético. As parcelas devem ser demarcadas em seus quatro vértices com tubos de PVC (¾" ou 1") com cerca de 1,2 m (material resistente à água) e ter suas coordenadas geográficas levantadas, usando GPS, facilitando sua localização em amostragens subsequentes.

O número de parcelas será variável de acordo com o tamanho da área total do projeto. Para projetos com área menor que 0,5 hectare recomenda-se desprezar o monitoramento para fins de monitoramento; para projetos com área entre 0,5 e 1 hectare recomenda-se a instalação de 5 parcelas; para projetos com área superior a 1 hectare, recomenda-se a instalação de 5 parcelas + 1 parcela por hectare adicional, limitado ao número máximo de 50 parcelas. A distribuição das parcelas deve ser realizada de maneira aleatória pela área do projeto, entretanto, caso exista, deve-se considerar o ordenamento em diferentes feições do mangue (bosque de mangue e zonas de transição).

Indicadores biológicos

De acordo com Turra e Denadai (2015) a feição que mais caracteriza o ecossistema manguezal é a da cobertura florestal, que seria o bosque de mangue. A caracterização estrutural e composicional de um bosque de mangue ou de um projeto de bosque (representado pelo plantio de recuperação) dá a ideia de seu grau de desenvolvimento, além de permitir a comparação com áreas similares.

Nesse sentido, são elencados alguns indicadores que devem ser avaliados durante o processo de monitoramento:

- Fase I:

Indicador 1 – cobertura da copa: percentual de cobertura do solo pela projeção da copa das árvores não exóticas;

Indicador 2 – incremento ou mortalidade de indivíduos: estimativa periódica de indivíduos arbóreos mortos;

Indicador 3 – composição das espécies arbóreas: composição de espécies vegetais na área em recuperação;

Indicador 4 – composição de espécies arbóreas invasoras: quantidade de indivíduos de espécies arbóreas invasoras;

Indicador 5 – ataque de formigas cortadeiras e outros herbívoros: ocorrência de danos por formigas cortadeiras e outros herbívoros nos indivíduos arbóreos nativos;

Indicador 6 – presença de gado e outros animais domésticos e isolamento da área: avaliação de presença de gado e outros animais domésticos da área de restauração e cercamento, quando for o caso.

- Fase II:

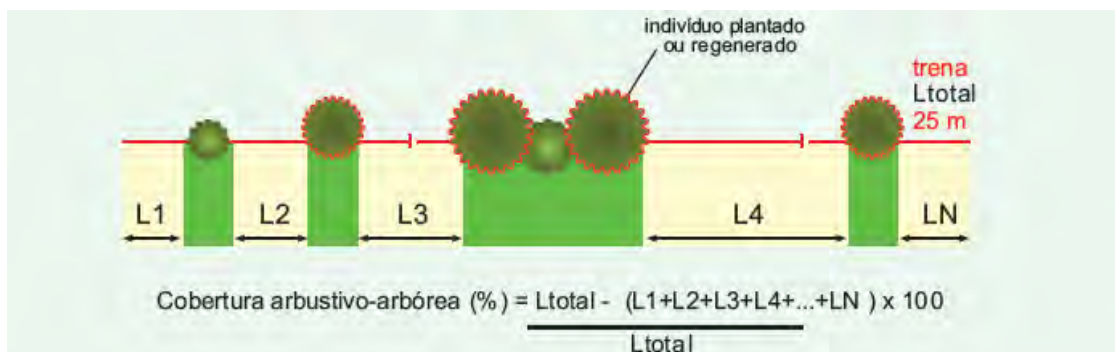
Indicador 7 – parâmetros estruturais das espécies arbóreas: crescimento dos indivíduos em diâmetro, densidade e área basal.

Indicador 8 – incremento das relações ecológicas: estabelecimento de novos hábitos de vida na área de recuperação e interações entre flora e fauna.

Coleta de dados de indicadores biológicos

Fase I: Dentro das parcelas, a cobertura florestal será estimada tendo como base a soma de trechos não cobertos por copado de espécies arbóreas não invasoras (Indicador 1 – cobertura da copa; Figura 75), em relação ao comprimento total de trena esticada no meio da parcela, em seu maior sentido (25 m). Deverá ser relacionada a espécie ou espécies de maior projeção de copa sobre a trena, visando a avaliação das melhores espécies recobridoras. Provavelmente o projeto já contará com a lista de espécies plantadas na área, porém, a cada nova etapa de monitoramento é necessário realizar o censo total das espécies arbóreas, no intuito de verificar se há mortalidade ou incremento de indivíduos quando comparado a etapas predecessoras (indicador 2 – incremento ou mortalidade de indivíduos) e também o incremento da riqueza específica da área (indicador 3 – composição de espécies arbóreas).

Figura 75 – Esquema de estimativa da cobertura de copas de espécies arbóreas para Fase I em parcelas retangulares



Fonte: Pacto (2013).

Ainda na Fase I, deverão ser contabilizados e identificados todos os indivíduos de espécies arbóreas invasoras com altura ≥ 50 cm ocorrentes dentro de cada parcela (indicador 4 – composição de espécies arbóreas invasoras). Deverão ser consideradas espécies arbóreas invasoras em uma dada região aquelas que constarem em listas oficiais do Estado de origem do projeto ou do Estado mais próximo. Altas densidades de espécies invasoras implicam em ações corretivas de controle das mesmas. Para os indicadores 5 (ataque de formigas cortadeiras e outros herbívoros) e 6 (presença de gado e outros animais domésticos e isolamento da área) devem ser realizados levantamentos visuais; devendo ser tomadas ações corretivas no sentido do controle de herbivoria e/ou renovação do cercamento da área, quando for o caso.

Fase II: Nesta fase, serão registrados todos os indivíduos plantados ou regenerantes com altura mínima de 0,5 m (Indicador 7 – parâmetros estruturais das espécies arbóreas), indicando apenas se o indivíduo se encontra em uma das duas classes de tamanho estabelecidas, sendo: (1) altura (H) $\geq 0,5$ m e CAP < 15 cm ou (2) CAP ≥ 15 cm, não havendo a necessidade de se tomar a medida exata da altura de cada indivíduo amostrado. Caso seja clara a distinção entre os indivíduos plantados ou regenerantes (são indicativos de que um indivíduo é regenerante 1- tamanho claramente distinto, tanto para mais quanto para menos, em comparação ao dos que foram reconhecidamente plantados, 2 – o fato de pertencer a uma espécie que não consta na lista das espécies plantadas), cada indivíduo será anotado numa dessas duas categorias.

Paralelamente, para os indivíduos com CAP ≥ 15 cm, serão medidos os valores de circunferência do caule, com o uso de fita métrica. Se a 1,3 m de altura a árvore apresentar anormalidades no seu tronco, mede-se o diâmetro que a árvore teria caso não houvesse anormalidade. Como no manguezal a presença de rizóforos, bifurcações, etc. são bastante comuns, deve-se adotar os seguintes procedimentos:

- Se os troncos se bifurcam à altura do peito, mede-se o diâmetro abaixo da bifurcação;
- Se os troncos se bifurcam abaixo da altura do peito, consideram-se dois troncos e registram-se duas medidas de diâmetro;
- Quando a árvore é formada por troncos muito próximos, ramificados acima ou abaixo da superfície do solo, mede-se o diâmetro de cada um deles;
- Quando houver deformidades nos troncos, à altura do peito, mede-se o diâmetro acima ou abaixo das imperfeições;
- No caso do gênero *Rhizophora*, o diâmetro deve ser medido acima da saída do último rizóforo.

Todos os indivíduos inseridos no critério de inclusão acima descrito deverão ser identificados ou ao menos categorizados em morfoespécies. Será necessária a marcação de todos os indivíduos com plaquetas numeradas sequencialmente, visando sua remediação em avaliações subsequentes. Os indivíduos pertencentes a espécies invasoras deverão ser identificados e contabilizados da mesma forma descrita para a Fase I.

Ainda na Fase II, deverão ser anotados aspectos positivos gerais do projeto de recuperação (Indicador 8 – incremento das relações ecológicas), tal como presença de espécies nativas de outras formas de vida (epífitas, lianas, arbustos, herbáceas etc.) em regeneração, presença de árvores nativas

em estágio reprodutivo, bom desenvolvimento das plantas, sinais de fauna nativa utilizando a área (avistamentos, pegadas, fezes) etc.

Os dados coletados deverão ser anotados em planilhas de campo previamente elaboradas, contendo esquema para verificação de todos os indicadores.

Análise de dados

Para a análise dos dados coletados, tanto na Fase I quanto na Fase II, as espécies não identificadas em campo, cujas amostras botânicas foram coletadas, deverão ser identificadas em consultas a herbários regionais e/ou com uso de literatura especializada.

Na Fase I, deverá ser calculada a cobertura florestal média, em percentual (%), de cada parcela de amostragem, bem como contabilizado o número de indivíduos e espécies plantadas e ingressantes, além do número total de indivíduos arbóreos invasores.

Na Fase II, a medida de CAP de cada ramo será utilizada para a obtenção dos parâmetros estruturais elencados abaixo. Todos esses itens serão separados e analisados por grupos de espécies, sendo (1) regionais e (2) exóticas.

- a) áreas basais individuais, totalizando a área basal da parcela ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$);
- b) número de indivíduos, obtendo-se a densidade absoluta e relativa de indivíduos ($\text{ind} \cdot \text{ha}^{-1}$);
- c) número de indivíduos, obtendo-se a densidade absoluta e relativa de indivíduos ($\text{ind} \cdot \text{ha}^{-1}$) com altura (H) $\geq 0,5$ m e CAP < 15 cm;
- d) número de indivíduos, obtendo-se a densidade absoluta e relativa de indivíduos ($\text{ind} \cdot \text{ha}^{-1}$) com CAP ≥ 15 cm;

Indicação de ações corretivas

A avaliação dos valores médios dos parâmetros para o conjunto de parcelas estabelecidas no monitoramento irá direcionar as ações de correção da área.

Para a Fase I, a depender dos resultados alcançados podem ser tomadas medidas corretivas como o replantio de indivíduos (considerando a taxa de mortalidade de até 15%), fertilização de cobertura, controle de formigas cortadeiras, isolamento da área, dentre outros. O objetivo inicial ao se estabelecer um projeto de recuperação ecológica é o de estruturação florestal (dado pela meta de crescimento do copado florestal até o sombreamento de 70% da área), desta forma se fazem necessárias ações no sentido de se alcançar esse objetivo.

Para a Fase II, os resultados estruturais e de composição de cada parcela e no conjunto de parcelas por projeto, devem ser comparados com dados estruturais e de composição de outros manguezais da região (ecossistema de referência), no sentido de entender se o projeto de restauração se encaminha por uma trajetória satisfatória ou se há necessidade de intervenções, tais como adensamento ou enriquecimento de espécies (práticas comuns em projetos de recuperação ecológica).

CRONOGRAMA

O cronograma para execução do projeto apresentado está exposto na Tabela 64, Tabela 65, Tabela 66. As etapas de planejamento e implementação estimadas, podem ser realizadas em mais ou menos tempo, a depender de cada local, visto que cada área tem suas próprias dificuldades e possibilidades. Já o cronograma das etapas de manutenção e monitoramento atendem a qualquer situação.

A etapa de manutenção está apresentada em dias após a execução do plantio, por exemplo, a 1ª manutenção deve ocorrer em 30 dias após o plantio, enquanto a 5ª manutenção deve ocorrer em 510 dias após o plantio. A frequência do monitoramento é semestral, ou seja, são dois eventos por ano.

Tabela 64 – Cronograma de execução da etapa de planejamento e implementação do projeto compensatório.

ETAPA	ATIVIDADES	ANO 1 (bimestres)			
		1	2	3	4
PLANEJAMENTO	Diagnóstico	■			
	Elaboração do projeto executivo		■		
	Aquisição das mudas			■	
IMPLEMENTAÇÃO	Preparo da área			■	
	Plantio				■

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 65 – Cronograma de execução da etapa de manutenção do projeto compensatório.

ETAPA	ATIVIDADES	ANO 2 (dias)				ANO3 (dias)	
		30	90	180	360	510	720
MANUTENÇÃO	1ª manutenção	■					
	2ª manutenção		■				
	3ª manutenção			■			
	4ª manutenção				■		
	5ª manutenção					■	
	6ª manutenção						■

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 66 – Cronograma de execução da etapa de monitoramento do projeto compensatório.

ETAPA	ATIVIDADES	ANO				
		2	3	4	5	6
MONITORAMENTO	1ª monitoramento	■				
	2ª monitoramento	■				
	3ª monitoramento		■			
	4ª monitoramento		■			
	5ª monitoramento			■		
	6ª monitoramento			■		
	7ª monitoramento				■	
	8ª monitoramento				■	
	9ª monitoramento					■
	10ª monitoramento					■

Fonte: Lactec, 2021

4.5.9 VALOR MONETÁRIO DO DANO

Após o detalhamento do escopo do Programa de Recuperação Ecológica de Manguezais Degradados, apresenta-se nesse item os custos financeiros necessários para a execução do mesmo, bem como a atribuição do valor econômico do dano causado à área marinha, devido ao rompimento da barragem de Fundão.

Os valores utilizados para a construção deste orçamento tem como origem o documento “FM-GPR-001 Rev.00, de maio de 2019” (PG 27 – Programa de Recuperação de Nascentes da Bacia do Rio Doce) da Fundação RENOVA. Isto porque, como o projeto compensatório se trata de uma recuperação florestal, os custos levantados para o PG 27 também podem ser utilizados e aplicados ao escopo ora apresentado. Nas atividades a seguir descreve-se item a item, o que é apresentado na Tabela 67.

PLANEJAMENTO:

- Diagnóstico e elaboração de projeto individual por área: Utilizados três valores do custo Renova (valores para hectare): “PIP Projeto Individual da Propriedade” para elaboração do projeto + “Pesquisa e Desenvolvimento” para diagnóstico das áreas de restauração e ecossistemas de referência + “Mobilização e engajamento” para garantir a participação popular na tomada de decisões;
- Origem das mudas/propágulos : Utilizado o valor de aquisição das mudas conforme custo Renova, considerando acréscimo de 15% para replantio.

IMPLEMENTAÇÃO:

- Restauração hidrológica e topográfica: Utilizado valor de maquinário para 1 hectare. Se refere a retirada/mitigação dos fatores de degradação, que podem ser muitos e diversos, como explicado no projeto, por isso, neste momento, não há formas de precificá-lo em completo.

- Isolamento: Em manguezais a utilização de cercas é menos frequente, como já exposto, por isso, foi considerado 20% do custo Renova para esse item, entendendo que apenas uma parte das áreas precisará de cercamento;
- Coroamento seletivo: Custo Renova para 1 hectare.
- Roçada seletiva: Custo Renova para 1 hectare..
- Plantio: Custo Renova por cova.
- Coveamento: Custo Renova por cova, considerando covas de 40 x 40 cm (largura x profundidade).

MANUTENÇÃO:

- Coroamento seletivo: Custo Renova, considerando o coroamento de 50% das covas, multiplicado por 6 eventos de manutenção.
- Adubação de cobertura: Conforme indicação do monitoramento, pode ser necessária adubação de cobertura. Por ser menos necessária que em plantios em ambientes terrestres, se considera 20% do custo Renova por cova.
- Roçada seletiva: Custo Renova, multiplicado por 2 eventos.
- Controle de pragas: Custo Renova, multiplicado por 2 eventos.
- Replantio com reabertura de cova: Custo Renova, considerando 15% de replantio.

MONITORAMENTO:

- Monitoramento ecológico: Custo Renova, multiplicado por 10 campanhas.

GERENCIAMENTO:

- Gerenciamento técnico do projeto: Ação não elencada no escopo do projeto aqui apresentado, no entanto, considera-se de alta relevância para efetividade do programa. Como consta na planilha de referência, justifica-se a inclusão desse item, conforme custo Renova.

Tabela 67 – Orçamento para execução de projeto de restauração ecológica para manguezais degradados considerando 1 hectare. Preços de maio/2019.

ETAPA	QUANTIDADE	UNIDADE	VALOR	VALOR HECTARE
PLANEJAMENTO/PROJETO EXECUTIVO				
Diagnóstico	1	área	R\$1.708,00	R\$1.708,00
Mobilização e engajamento	1	área	R\$2.615,38	R\$2.615,38
Elaboração de Projeto Individual por Área	1	área	R\$1.600,00	R\$1.600,00
Obtenção de mudas	34.445	mudas	R\$2,40	R\$82.668,00
Acréscimo de 15% no número total de mudas para replantio	5.166,75	mudas	R\$2,40	R\$12.400,20
IMPLEMENTAÇÃO				
Restauração hidrológica e topográfica (maquinário)	15,84	horas	R\$505,65	R\$8.009,50
Isolamento (20% do custo Renova)	0,2	hectare	R\$4.027,00	R\$805,40
Coroamento seletivo das covas (50% do número total de covas)	3.444,5	covas	R\$1,53	R\$5.270,09
Roçada seletiva da área	1	hectare	R\$945,29	R\$945,29
Plantio	6.889	covas	R\$2,12	R\$14.604,68
Coveamento 40 cm x 40 cm (largura x profundidade)	6.889	covas	R\$1,26	R\$8.680,14
MANUTENÇÃO				
Coroamento seletivo das covas (50 % do número total de covas) x 6 manutenções (2 anos)	20.667	covas	R\$0,88	R\$18.186,96
Adubação de cobertura (1 adubação por cova ano 1 ou 2), em 20% das covas	1.377,8	covas	R\$0,93	R\$1.281,35
Roçada seletiva da área (1 roçada por ano, total de dois anos)	2	hectare	R\$870,37	R\$1.740,74
Controle de pragas (1 controle por ano, total de dois anos)	2	hectare	R\$175,65	R\$351,30
Replanteio com reabertura de cova (taxa de 15% sobre o número total de mudas)	1033	covas	R\$2,64	R\$2.727,12
MONITORAMENTO				
Monitoramento ecológico (campanha bi-anual) x 5 anos	10	campanhas	R\$1.865,00	R\$18.650,00
GERENCIAMENTO				
Gerenciamento técnico do projeto	1	área	R\$4.080,80	R\$4.080,80
Custo total/ha.			R\$186.324,95	

Fonte: FUNDAÇÃO RENOVA PG 27, adaptado por Lactec, 2021.

O orçamento utilizado evidencia que para executar a recuperação de manguezal em 1 hectare o valor é de R\$ 186.324,95 a preços de maio de 2019. A fim de valorar o dano causado à área marinha, os próximos passos foram a correção monetária do orçamento de maio/2019 para março/2021, aplicação do fator de desconto e multiplicação pela área total obtendo o valor final do dano.

O primeiro passo foi distribuir em um fluxo de caixa o custo total por hectare do projeto, conforme a execução das atividades estabelecidas no cronograma apresentado anteriormente. Na sequência, a correção monetária foi feita por meio da aplicação do índice nacional de preços ao consumidor amplo (IPCA), acumulado entre maio/2019 a março/2021, sendo este de 8,98%. Após a aplicação da variação

do IPCA ao fluxo de caixa obteve-se o fluxo de caixa atualizado conforme resultado apresentado na coluna *Fluxo de caixa R\$/hectare (preços mar/2021) não descontado*. Por fim, aplicou-se o fator de desconto (8% ao ano) resultado no *Fluxo de caixa R\$/hectare (preços março/2021) descontado (VP 2021)*, trazendo todos os valores a valor presente de 2021. O somatório desta última coluna foi de R\$ 181.568,53, sendo este o custo unitário por hectare do projeto a preços de março/2021, descontado a valor presente de 2021 e utilizado para precificação do dano. Assim, ao multiplicar o custo unitário descontado pela quantidade de hectares a serem compensados, tem-se que o valor do dano causado à área marinha em decorrência do rompimento da barragem de Fundão foi de R\$ 3.542.893.196,41 (Tabela 69).

Tabela 68 – Fluxo de Caixa da execução de projeto de restauração ecológica para manguezais degradados, valores descontados e atualizados

Ano	Fluxo de caixa R\$/hectare (preços mai/2019)	Fluxo de caixa R\$/hectare (preços mar/2021) não descontado	Fator de desconto	Fluxo de caixa R\$/hectare (preços mar/2021) descontado (VP 2021)
2022	R\$ 143.387,47	R\$ 156.263,6659	0,9259	R\$ 144.688,5795
2023	R\$ 15.873,74	R\$ 17.299,1986	0,8573	R\$ 14.831,2745
2024	R\$ 15.873,74	R\$ 17.299,1986	0,7938	R\$ 13.732,6616
2025	R\$ 3.730,00	R\$ 4.064,9540	0,7350	R\$ 2.987,8625
2026	R\$ 3.730,00	R\$ 4.064,9540	0,6805	R\$ 2.766,5394
2027	R\$ 3.730,00	R\$ 4.064,9540	0,6301	R\$ 2.561,6105
TOTAL	R\$ 186.324,95	R\$ 203.056,9251		R\$ 181.568,5281

Fonte: Lactec, 2021

Tabela 69 – Resultado final da valoração dos danos ambientais causados à área marinha

Custo R\$/hectare (preços mar/2021) descontado (VP 2021)	R\$ 181.568,5281
Quantidade de hectares a ser compensado	19.512,71
Valor total dos danos causados à área marinha	R\$ 3.542.893.196,41

Fonte: Lactec, 2021

4.6 AVES ESCAVADORAS

4.6.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DOS DANOS AMBIENTAIS CAUSADOS ÀS AVES ESCAVADORAS

O diagnóstico de danos à fauna silvestre identificou um total de sete danos causados a esses grupos decorrentes do desastre do rompimento da barragem de Fundão. Esses danos não foram identificados em todos os grupos faunísticos avaliados, ou seja, os grupos apresentam diferentes danos sofridos e que foram medidos por meio de variados indicadores a fim de, quando possível, identificar e quantificar cada dano. Os danos identificados no diagnóstico foram: alterações nas populações faunísticas; alterações nas assembleias faunísticas; piora nas condições físicas da fauna; perda de conectividade na paisagem; perda de qualidade dos habitats; comprometimento à saúde da fauna silvestre; aumento na bioacumulação.

Esses danos afetaram a fauna silvestre, e serviços ecossistêmicos por ela prestados, de diferentes maneiras, especialmente no ambiente florestal, mas também em outros tipos de vegetação nativa na região: vegetação secundária inicial, campos rupestres e várzeas. No entanto, o escopo do diagnóstico debruçou-se apenas sobre os danos à biodiversidade faunística florestal, especificamente na vegetação classificada como “Mata Nativa”. Nesse sentido, em virtude dessa limitação metodológica, a aplicação do método de valoração deve ser entendida como restrita à fauna que depende do ambiente florestal na região, representando – assim – apenas de modo parcial a totalidade dos ecossistemas danificados pelo desastre.

Cabe ressaltar que a fauna terrestre possui íntima relação ecológica com a vegetação, sendo que a regeneração natural desta formação trará melhorias também à fauna. Uma vez que o método MEH/MER busca evitar a valoração de recursos ou serviços que sejam sobrepostos, torna-se necessário desenvolver uma abordagem específica para valoração da fauna, independente da sinergia e custos estimados para valoração da vegetação. Este complemento se faz necessário devido à equipe técnica compreender que os danos causados à fauna vão além dos danos causados diretamente ao habitat florestal, pois muitos animais morreram soterrados – aqueles de pouca mobilidade, como certos répteis, anfíbios e alguns mamíferos – e houve prejuízos à qualidade ambiental além dos limites da área suprimida, relacionados a danos na paisagem e conectividade.

Para tal, a equipe se dedicou à aplicação do método de valoração à fauna silvestre de maneira desassociada da vegetação, tendo selecionado uma espécie indicadora (*Trogon surrucura*) que não tivesse seu retorno à área danificada diretamente relacionado ao período da regeneração florestal, isto é, enquanto a floresta está crescendo. Até que a mesma atinja um determinado tamanho esta espécie não ocorre no local, pois necessita de indivíduos arbóreos com largura de tronco específica que passe a fornecer cavidades para que a espécie possa nidificar. É por causa desse tempo, entre o início da regeneração florestal até que ela alcance o tamanho necessário, no qual a espécie não ocorre, que compreende-se que esta ave apresenta certa “independência” da regeneração florestal, sendo ela um bom indicador para representar parte dos danos ocorridos à fauna silvestre. Adiciona-se que a espécie selecionada faz parte dos grupos de aves denominadas aves escavadoras, sendo esta espécie um representante para a valoração. Afirma-se que o valor capturado pelo método traz o valor do dano causado apenas às aves escavadoras da região, sendo este grupo uma parcela da fauna silvestre. Logo, o valor do dano aqui mensurado trata-se da valoração do recurso ambiental aves escavadoras, não incluindo outros grupos faunísticos como répteis, anfíbios e mamíferos ou outras aves.

Desse modo, considerando a seleção de uma espécie representante, dentre os sete danos identificados, selecionou-se o dano de alteração nas populações faunísticas como o dano a ser valorado.

4.6.2 DEFINIÇÃO DA ESPÉCIE CHAVE REPRESENTANTE DOS DANOS AS AVES ESCAVADORAS

O primeiro passo para desenvolver uma métrica para valoração da fauna silvestre foi a definição de um indicador apropriado. Neste caso, identificou-se uma espécie chave que não tivesse seu retorno à área danificada condicionado meramente à regeneração da cobertura florestal, conforme já explicado anteriormente.

Desse modo, selecionou-se uma espécie de ave florestal para aplicação do método MEH/MER, o surucuá-variado (*Trogon surrucura*; Figura 76). Trata-se de uma espécie comum em toda sua área de distribuição, um endemismo da Floresta Atlântica, e que tem ocorrência conhecida ao longo da bacia do rio Doce. Conta, ainda, com abundantes dados de ocorrência e ecologia na literatura, com registros em campo obtidos durante o diagnóstico, permitindo inferir que se trata de um elemento da fauna típico da região. Nestes aspectos, é uma espécie que conta com informações suficientes para aplicação do método.

Do ponto de vista ecológico, esta ave utiliza cavidades naturais em troncos para se reproduzir, sendo associado a florestas mais maduras, ou seja, que se encontram em estágios mais avançados de crescimento, capazes de proporcionar este recurso (cavidades naturais) para a reprodução da espécie. É esta característica que permite uma desconexão com o tempo de recuperação natural da floresta, dado que o início da restauração florestal não fornece este recurso e, assim, a probabilidade desta espécie estabelecer uma população reprodutiva na região será menor – inexistem indivíduos arbóreos elegíveis para confecção de ninhos. O retorno da espécie ocorre em estágios mais avançados de crescimento da floresta.

Outros hábitos da espécie também a tornam estratégica para o funcionamento dos ecossistemas florestais onde habita, a exemplo de seu papel na dispersão de sementes (é um frugívoro de médio porte), atuando como arquiteto ecológico (escavador das cavidades nas árvores, criando micro habitats para outros organismos) e no controle de populações de insetos (além de alimentar-se de frutas, é também insetívoro).

Figura 76 – Surucuá-variado (*Trogon surrucura*), espécie de ave florestal selecionada como indicadora da fauna silvestre na abordagem de valoração dos danos.



Fonte: Lactec, fotografia obtida na Unidade Amostral 1 (município de Mariana – MG), sítio amostral Controle, em abril de 2019.

4.6.3 SELEÇÃO DA MÉTRICA E CONSTRUÇÃO DA LINHA BASE

Considerando a escolha de uma espécie chave e o dano a ser valorado, alterações nas populações faunísticas, a métrica selecionada para o cálculo da valoração foi o número de indivíduos (população) que potencialmente podem ocupar a região do Compartimento 1, ou a capacidade de suporte daquela região.

Ressalta-se que no Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais entregue em janeiro/2020 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020a), a métrica definida para o componente “fauna” foi a assembleia de aves florestais, especificamente rotatividade temporal (similaridade) e riqueza. No entanto, estes indicadores não atendiam plenamente ao requisito de ‘independência da cobertura florestal’, uma vez que estas métricas ecológicas congregam um conjunto grande de espécies, e presumivelmente têm sua qualidade aprimorada em direta proporção à recuperação da cobertura florestal.

Assim, o problema desta abordagem, por computar todas as espécies florestais em conjunto, dificulta a definição de uma ação de recuperação única – e independente da recuperação da vegetação – para um grupo tão diverso de táxons. Assim, a métrica não permite sua desagregação das ações de restauração florestal, tendo em vista que a solução para o retorno da métrica aos valores pré-desastre é justamente a regeneração do habitat.

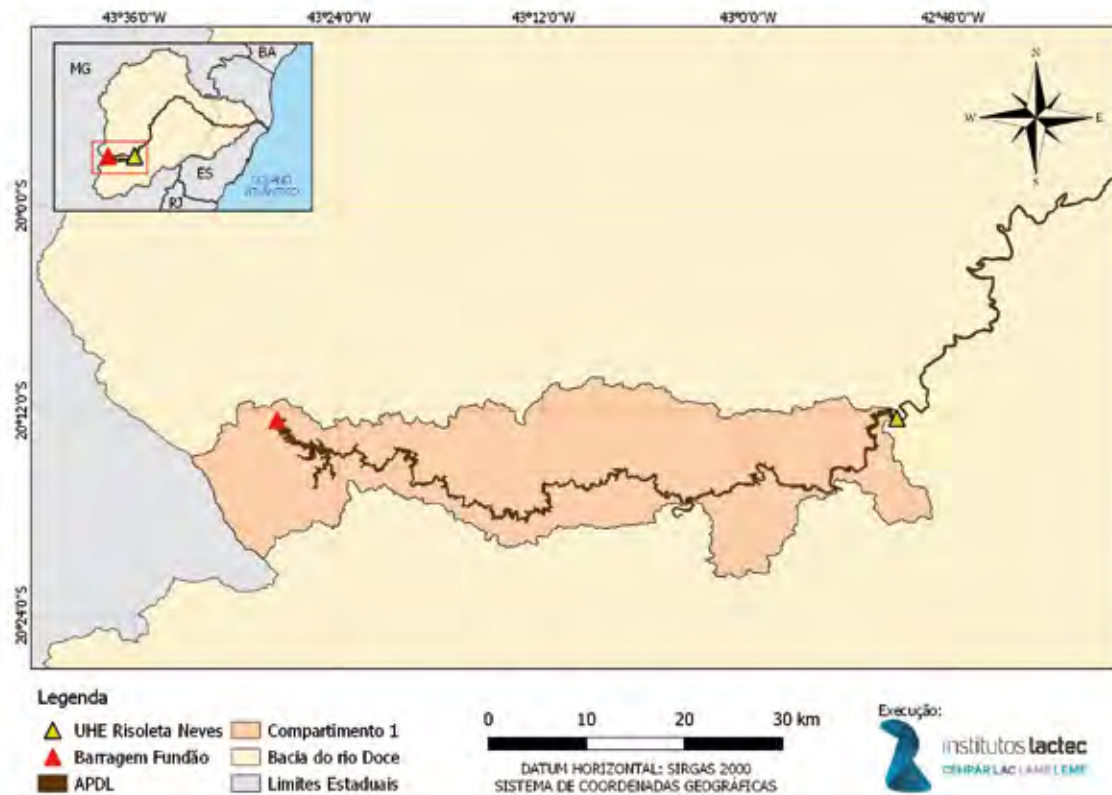
Por isso, optou-se por modificar o curso da valoração da fauna silvestre, direcionando-a para um grupo (aves escavadoras), por meio da seleção de uma espécie chave de ave florestal que atende aos requisitos necessários para a aplicação do método de valoração, ao mesmo tempo em que não se relaciona unicamente à restauração da vegetação, evitando-se assim a sobreposição de elementos no processo de valoração. Este indicador passa a ser interpretado como representante dos danos sofridos pelas aves escavadoras além daqueles originados pela perda da cobertura florestal.

Vale mencionar que este esforço de valoração ainda não contempla integralmente, em termos de valores, todos os danos sofridos pela fauna, nem mesmo todos os grupos faunísticos que a compõe. Não obstante, por incluir na valoração alguma parcela dos prejuízos ecológicos sofridos por esse vasto grupo, torna-se uma abordagem mais realista ao explicitar este elemento no método, mesmo considerando que o procedimento levado a efeito esteja muito aquém de representar todos os danos diagnosticados.

A partir da definição da métrica, número de indivíduos da espécie, a próxima atividade foi mensurar esta população antes do dano, ou seja, a linha base.

A área delimitada para esta análise compreende o Compartimento 1 do presente diagnóstico, mas conforme IBAMA (2016) e no âmbito da governança do CIF, corresponde à “Área de Abrangência Ambiental 1”, descrita como as “áreas abrangidas pela deposição de rejeitos nas calhas e margens dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, considerando os respectivos trechos de seus formadores e tributários.” É neste recorte geográfico que devem ser consideradas as interpretações quantitativas aqui apresentadas, ou seja, o limite espacial para estimar a linha base, sendo a APDL interna a este espaço, representando 869 ha de ambientes afetados pelo rejeito (Figura 77).

Figura 77 – Delimitação do Compartimento 1 da Bacia do Rio Doce (linha preta), dividida em três subcompartimentos para fins de avaliação dos danos.



Fonte: Lactec, 2021.

Para estimar a extensão de hábitat disponível para a espécie indicadora foram utilizados dados da modelagem de nicho de *Leptopogon amarucephalus* (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), táxon ecológicamente similar a *Trogon surrucura* (Parker III et al., 1996; Sick, 1997) e cujos padrões de co-ocorrência verificados nos dados do diagnóstico embasam esta seleção (Apêndice J). Este segundo aspecto refere-se à congruência de ocupação verificada em campo, ou seja, ambientes em que uma espécie ocorre, a outra apresenta alta probabilidade de ocorrer em conjunto. Assim, o primeiro pressuposto deste ensaio é assumir que os modelos construídos para *L. amaurocephalus* podem ser utilizados para *T. surrucura* sem prejuízos às interpretações ecológicas. Cabe lembrar que os modelos de nicho são construídos a partir das informações geográficas de ocorrência das espécies (PETERSON et al., 2011).

Por meio destes modelos, identificaram-se danos às áreas florestais fora da APDL devido a perdas de conectividade e qualidade dos habitats na paisagem (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Este cenário é mais realista do que se considerado apenas a área florestal da APDL, especialmente devido à elevada mobilidade da fauna e sua íntima relação com a conectividade da paisagem.

Os parâmetros necessários para conferir medidas quantitativas a esse modelo se baseiam, fundamentalmente, em uma equação para estimar a taxa de crescimento populacional em função da capacidade de suporte do ambiente; ou seja, ela representa o tamanho máximo teórico de determinada população, ou seja, o número total de indivíduos que aquele habitat consegue suportar a partir dos recursos disponíveis.

Para este ensaio selecionou-se a equação logística (ou equação de Verhulst), uma das fórmulas mais simples para descrever a taxa de crescimento de uma população natural submetida a recursos finitos (MAGURRAN, 2004). Ela é expressa pela equação:

$$rN((K-N)/K)$$

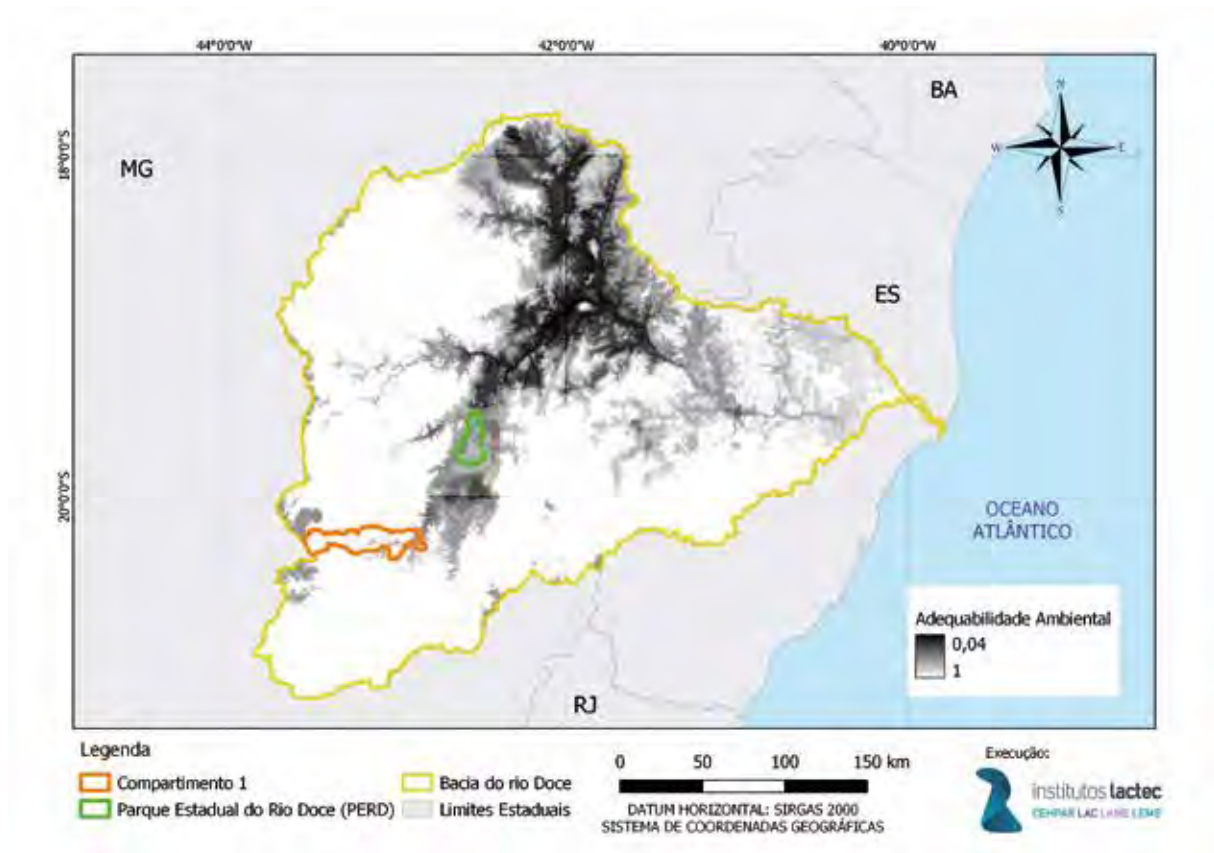
onde N é o tamanho populacional (número de indivíduos), K é a capacidade de suporte daquela população e r a sua taxa de crescimento. É um modelo ecológico extremamente simplificado e muito limitado, mas é útil para análises generalistas, como aqui proposta. Para determinar K neste modelo, relaciona-se a área de hábitat adequado para a espécie, à densidade populacional, o número de indivíduos por unidade de área.

Cabe destacar neste momento que o cálculo da estimativa de K (população) para a linha base, segue exatamente o mesmo processo para o cálculo da estima dos demais cenários, isto é, o K pós desastre que apresenta a perda inicial, o K ao longo do tempo mediante a recuperação natural e o K quando possui uma interferência humana que auxilia nessa recuperação. Esses outros cenários serão melhor explicados adiante no item 4.6.4. No momento, a metodologia de cálculo que está sendo apresentada é destinada para o cálculo do K da linha base.

A única estimativa de densidade populacional de *Trogon surrucura* obtida na literatura é a de Zaiden et al. (2015), calculada com base em estudos no Parque Estadual Mata dos Godoy, em Londrina, Paraná. A importação desse dado para a bacia do rio Doce pode ser considerada razoável para outra área protegida, no caso o Parque Estadual do Rio Doce (PERD), distante cerca de 1000 km daquela Unidade de Conservação. Os dois parques são cobertos pela mesma fisionomia vegetal, a floresta estacional semidecidual, e a distribuição geográfica da espécie indicadora abrange ambas. Assume-se, assim, que a qualidade ambiental entre as UCs é similar e, por consequência, a densidade populacional de *Trogon surrucura* no PERD é a mesma obtida por Zaiden et al. (2015), de 0,342 pares por hectare.

Em seguida, utilizou-se os mesmos modelos nicho de *Leptopogon amaurocephalus* construídos para definir a extensão geográfica de ocorrência da espécie e extrair valores médios de adequabilidade ambiental em dois recortes geográficos: PERD e Compartimento 1. Destaca-se que foram excluídos valores extremos (0 e 1) destes modelos, pois são valores não informativos do modelo e poderiam enviesar a média assim obtida. Desta abordagem, obtiveram-se diferentes valores de adequabilidade ambiental para a espécie no PERD (0,3651) e no Compartimento 1 (0,1003) e, ponderando-se a estimativa de densidade populacional para ajustar-se à adequabilidade no Compartimento 1, obteve-se densidade de 0,241 pares por hectare. É esta a densidade populacional de linha-base utilizada para a espécie nos modelos, de modo a ajustar os valores da literatura para a realidade da região, que conta com paisagens dominadas por florestas secundárias e perturbadas por diferentes fatores antrópicos.

Figura 78 – Distribuição da adequabilidade ambiental da espécie *Leptopogon amaurocephalus* na bacia do rio Doce. Em destaque os limites do compartimento 1 (cor laranja) e do Parque Estadual do Rio Doce (cor verde)



Fonte: Lactec, 2021.

Com relação à taxa de crescimento populacional, inexistem estimativas específicas para *Trogon surrucura*, recorrendo-se a valores mais genéricos disponíveis na literatura. Um recente estudo compilou informações de taxas de crescimento anual de populações de aves florestais no Neotrópico, cujo valor aproximado para 21 espécies contempladas pelos pesquisadores é de 0,6 (SEKERCIOGLU et al., 2019). Sabe-se que a taxa de crescimento populacional é intrinsecamente relacionada à qualidade reprodutiva dos indivíduos, que por sua vez pode ser prejudicada pela ação de contaminantes hormonais, alguns dos quais encontrados no Compartimento 1 nas diversas matrizes estudadas pelo diagnóstico (água, solo) e também identificados por ensaios de bioacumulação na fauna local (BRASIL (MPF)/LACTEC 2020d). Não obstante, na ausência de informações robustas acerca do efeito quantitativo de contaminantes sobre taxas de crescimento populacional, utilizou-se o valor inalterado para este modelo.

A capacidade de suporte para espécie, nessa paisagem e com base nos modelos supracitados, é calculada pela área total de habitat adequado, assim, a população (K) do *Trogon surrucura* estimada para o cenário (T0) pré desastre, isto é, para a linha base é de 30.327 indivíduos.

4.6.4 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO NATURAL

Antes do detalhamento da construção da curva de recuperação natural, cabe elencar os cenários construídos para o processo de valoração, a fim de facilitar o entendimento dos resultados apresentados, conforme segue:

T0: Cenário da linha base, valor constante, representa o quantitativo da população da espécie antes do desastre;

T1: Cenário da perda inicial ocorrida devido a ocorrência do desastre, valor constante, que representa a queda, ou seja, a diferença entre a linha base e a situação da população da espécie logo após o rompimento da barragem;

T2a: Cenário que une a recuperação natural do surucú inserida no contexto das ações de restauração florestal realizada pela RENOVA logo após o desastre;

T2b: Cenário que une a recuperação externa para aceleração do retorno do surucú para a região (instalação de caixas ninho), inserida no contexto das ações de restauração florestal realizada pela RENOVA logo após o desastre.

O resultado do cenário T0 (linha base) foi apresentado no item anterior (4.6.3), já o resultado do cenário T1 que representa a perda inicial causada pelo desastre e o T2a que representa a construção da curva de recuperação natural, serão apresentados neste item. Apesar do cenário T2a se tratar de um cenário no qual teoricamente nenhuma ação humana é considerada, mensurando-se apenas o tempo que a natureza leva para se recompor, no caso da recuperação natural do surucú, o cenário T2a considera as ações de recuperação externa, restauração florestal, realizadas pela RENOVA logo após o desastre. Essas ações se referem aquelas acordadas no âmbito da CTFLOP, quando a Renova se comprometeu a revegetar um quantitativo de áreas. Como uma das exigências do método de valoração é considerar as melhorias já realizadas pelo responsável, e ainda tendo em conta que a realidade da região já incorporou ganhos na adequabilidade ambiental, o correto é que o cenário natural traduza esses benefícios gerados pela restauração promovida.

Dessa forma, utilizando-se o mesmo processo de cálculo mencionado, alterando-se apenas as informações sobre adequabilidade ambiental, o que permite verificar as mudanças sobre a capacidade de suporte e as variações do K, passasse a construção da curva de recuperação natural do surucú. Os pressupostos assumidos como verdadeiros adotados para esta construção estão listados abaixo:

- Esta espécie *Trogon surrucura* não habitará no local atingido pelo desastre enquanto não houver a disponibilidade de cavidades para nidificação;
- Assume-se como verdadeiro os padrões de co-ocorrência entre as espécies *Leptopogon ama-rucephalus* e a *Trogon surrucura*, ou seja, ambientes em que uma espécie ocorre, a outra apresenta alta probabilidade de ocorrer em conjunto, o que permite assumir que a modelagem de nicho utilizada para a primeira pode ser aplicada para a segunda, sem prejuízos às interpretações ecológicas;
- Assume-se que a qualidade ambiental Parque Estadual Mata dos Godoy, em Londrina, Paraná é similar ao Parque Estadual do Rio Doce (PERD), pois os dois parques são cobertos pela mesma fisionomia vegetacional, a floresta estacional semidecidual, e a distribuição geográfica da

espécie indicadora abrange ambas, permitindo assim deduzir que a densidade populacional de *Trogon surrucura* no PERD é a mesma obtida na Mata dos Godoy (ZAIDEN *et al.*, 2015), de 0,342 pares por hectare.

- Admite-se que as taxas de crescimento anual de populações de aves florestais no Neotrópico de 0,6 se aplicam também ao *Trogon surrucura*;
- Adotasse a ausência de bioacumulação como fator redutor das taxas de crescimento anual de populações de aves florestais;
- Todos os remanescentes florestais irão regenerar até seu máximo potencial: ou seja, no modelo utilizado assume que todo e qualquer “matinho” tem um “buffer” de regeneração natural potencial, e que esse “potencial” se torna real, então todos os remanescentes aumentam de tamanho. Sabe-se que tal pressuposto é bastante otimista, pois fragmentos em áreas produtivas dificilmente irão se regenerar já que se trata de uma área explorada economicamente, no entanto fazer a diferenciação é inviável devido à falta de dados, por isso de maneira conservadora assumisse esta premissa;
- Com base no mapa que delimita as áreas de restauração florestal a ser realizada pela Fundação Renova, este modelo assume que toda essa área se tornará floresta madura;
- O cenário T2a considera a regeneração natural da floresta e a restauração florestal conduzida pela RENOVA como fatores ocorrendo ao mesmo tempo, assumindo potencial máximo para ambas as áreas conforme já explicitado.

Em síntese, o modelo – para simplificar a complexidade do mundo real – assume vários pressupostos otimistas que dificilmente ocorrem, mas auxiliam na aplicação do método de valoração.

Assim, a variação na capacidade de suporte ao longo dos anos foi definida assumindo-se que a região se encontrava estável conforme o cenário T0 (pré-desastre); em seguida, em decorrência do desastre (aqui delimitado como “ano 0”) esta capacidade de suporte foi imediatamente rebaixada até o patamar do cenário T1 (perda inicial). Desse modo, tem-se que no cenário T1, que representa a situação logo após o desastre, a população (K) da espécie reduziu-se para 29.853 indivíduos, uma redução de 474 indivíduos.

Após obter o valor da perda inicial, o modelo foi utilizado para verificar esta variação na capacidade de suporte ao longo do tempo considerando agora o seu retorno a linha base, sem intervenção humana direcionada ao surucuá, mas incluindo a restauração florestal, ou seja, pelo modelo foi estimada a curva de regeneração natural, cenário T2a. De posse dessas informações, foi possível construir a equação logística para *Trogon surrucura* no Compartimento 1.

A Figura 79 exhibe o comportamento da curva de recuperação natural estimada pelo modelo, em comparação com a linha base.

Do mesmo modo como feito para o cenário T1, assume-se que a capacidade de suporte da região se encontrava estável no cenário T0; em seguida, ela é rebaixada até o patamar do cenário T1, e a curva de recuperação natural mostra que ela se mantém estável nesse patamar por um período de aproximadamente 12 anos, lapso temporal estimado para que a paisagem atinja nível de maturidade florestal similar ao da linha-base, após as ações de restauração da RENOVA. Este pressuposto – que a

capacidade de suporte de *Trogon surrucura* não varia antes da restauração florestal – baseia-se nos requerimentos ecológicos da espécie, especificamente a necessidade de escavar ocos em árvores para nidificar, isto é, para reproduzir.

Especificamente, este limite temporal de 12 anos, está correlacionado ao tempo que a restauração florestal leva para alcançar a linha base definido no processo de valoração do habitat vegetação. Relembrando, ao considerar a área basal e o índice riqueza bem como diversos estudos científicos, no habitat vegetação, assumiu-se que o tempo para regeneração florestal seria de 10 anos a partir do início do plantio. Considerando que o primeiro ano de restauração florestal se refere ao planejamento e diagnóstico, e que o segundo ano é o ano de início do plantio das mudas, o ano de alcance da linha base estimado será o 11º ano, e que no ano seguinte (12º) o surucú poderia gradativamente retornar a região.

Dando continuidade ao cenário modelado para valoração, a recuperação dos contingentes populacionais em direção à capacidade de suporte após a recuperação florestal se iniciaria somente após os 12 anos da restauração florestal no Compartimento 1, e na APDL em particular. Vale reforçar que, na inexistência de informações sobre como a conectividade da paisagem vai sendo aprimorada ao longo dos 12 anos de regeneração natural ou restauração florestal da APDL, assume-se que a capacidade de suporte da região é regida unicamente pelo recurso limitante à reprodução, cavidades em árvores; assim, a ocupação desses ambientes mantém-se sujeita à capacidade de suporte do cenário T1. Vale salientar que dados presentes na literatura apontam que além de ser um recurso limitante à reprodução, cavidades arbóreas são também indicativos de disponibilidade de outros recursos necessários para o desenvolvimento e estabilidade da avifauna: além das próprias cavidades por vezes possuírem artrópodes na madeira e/ou tecidos lenhosos mortos, muitos outros recursos principalmente alimentares só estão presentes em florestas que apresentam idade o suficiente para possuir árvores largas (NADKARNI e LONGINO, 1990; SILLET, 1994; NADKARNI e MATELSON, 1989; DÍAZ, 2005). A partir desse ponto, aplica-se o modelo de crescimento populacional logístico simples para atingir o cenário de recuperação natural aqui considerado (T2a), que mostra que a partir do 12º ano a população de surucú aumenta na região ultrapassando a linha base e se estabelecendo em um patamar mais elevado do que havia antes do desastre. Esse incremento adicional obtido é devido ao efeito da regeneração florestal natural associada com a restauração florestal da RENVOVA, que juntas promovem um aumento de adequabilidade ambiental maior do que havia antes. Esta melhoria adicional oportuniza um ambiente com maior qualidade ambiental e permite que um maior crescimento e ocupação da espécie na região.

Vale destacar que os valores de capacidade de suporte dos cenários usados neste exercício são baseados nos resultados dos modelos de adequabilidade ambiental elaborados em etapa anterior do diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Por sua vez, a extensão de hábitat disponível no Compartimento 1 é baseado em dados de cobertura florestal e conectividade dos remanescentes na paisagem. O cenário pós-desastre que considera a regeneração natural de áreas com alto potencial, associada a restauração florestal resulta em uma estimativa de hábitat disponível maior do que aquela computada para o momento pré-desastre (cenário T0, Tabela 70). A Tabela 70 traz os resultados relacionados aos cenários T0, T1 e T2a considerados, mostrando a área de habitat disponível, a densidade populacional da espécie e a capacidade de suporte de indivíduos por hectare.

Tabela 70 – Resultados dos cenários estimados pela modelagem de nicho para a valoração dos danos causados as aves escavadoras

Cenário	Área de hábitat disponível (ha)	Densidade populacional (pares/ha)	Capacidade de suporte (indivíduos/ha)
T0 – linha-base	63.014,94		30.327
T1 – após o desastre	62.029,71	0,241	29.853
T2a – regeneração natural + ações da Renova	63.540,63		30.580

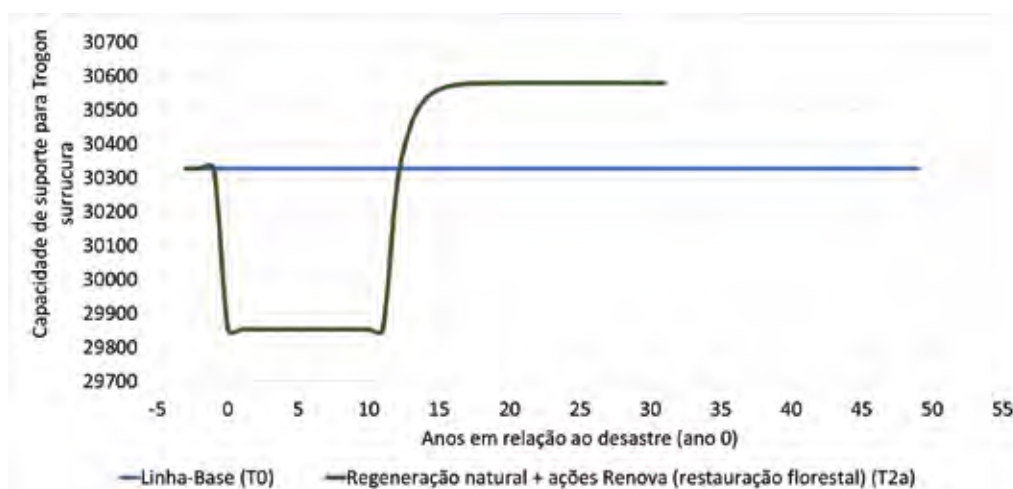
Fonte: Lactec, 2021.

Assim, os valores obtidos e apresentados na Tabela 71 foram calculados por meio da modelagem de nicho ecológica e pela equação de Verhulst exposta no item anterior (4.6.3), mas a fim de relembrar e esclarecer o processo, relembra-se de maneira simplificada como o processo foi realizado.

O valor inicial considerado no cálculo foi 29.853,26 de pássaros da espécie surucuá, este número representa a população desta ave na área analisada após o desastre. Este valor precisa retornar a sua linha base, que é 30.327,42 desses indivíduos. Porém, considerando o cenário de recuperação natural (T2a) durante os primeiros 12 anos em que a vegetação está em processo de regeneração e restauração, não há nenhum grau de recuperação para a espécie de ave selecionada, por isso a linha verde do gráfico da Figura 79 permanece constante até o ano 12. Quando passa esse período, teoricamente a disponibilidade de cavidades para a construção de ninhos para essa ave passa a ser um recurso disponível, o que permite o repovoamento dessa na área e inicia-se uma recuperação da população no local.

Após 1 ano do início do repovoamento a população atinge a linha base (13º ano), porém devido a combinação da regeneração natural e a restauração florestal gerarem um aumento da capacidade de suporte, a população se estabiliza no ano 20 em 30.580,42 acima da linha base. O modelo mostra que considerando o cenário T2a, a condição do habitat florestal é, em teoria melhor, do que a condição anterior ao dano, e por isso consegue ter um capacidade de suporte superior a linha base, gerando ganhos ambientais adicionais.

Figura 79 – Curva de recuperação natural estimada pelo modelo estatístico, cenários T0 e T2a



Fonte: Lactec, 2021.

A Tabela 71 traz os valores utilizados para o cálculo da perda no cenário de recuperação natural, além de mostrar em detalhes as informações expostas no gráfico da Figura 79. A coluna *Perda Cenário*

T2a foi calculada por meio da diferença entre a coluna *Linha-Base (T0) N° de indivíduos* e a população de surucua existente exposta na coluna *Cenário (T2a) N° de indivíduos*. Para obter a perda do cenário natural, aplicou-se o fator de desconto social (8% ao ano), obtendo-se a coluna *Perda Cenário T2a descontada*. Os números negativos a partir do ano 2028 se referem aos ganhos adicionais acima da linha base, que contribuem para a redução da perda descontada natural, que é obtida pelo somatório da última coluna.

Tabela 71 – Valores utilizados para o cenário T2a estimados pelas modelagens para a valoração dos danos causados as aves escavadoras

Ano	Linha-Base (T0) N° de indivíduos	Cenário (T2a) N° de indivíduos	Perda Cenário T2a	Perda Cenário T2a descontada
2015	30327,42297	29853,2578	474,17	474,17
2016	30327,42297	29853,2578	474,17	439,04
2017	30327,42297	29853,2578	474,17	406,52
2018	30327,42297	29853,2578	474,17	376,41
2019	30327,42297	29853,2578	474,17	348,53
2020	30327,42297	29853,2578	474,17	322,71
2021	30327,42297	29853,2578	474,17	298,80
2022	30327,42297	29853,2578	474,17	276,67
2023	30327,42297	29853,2578	474,17	256,18
2024	30327,42297	29853,2578	474,17	237,20
2025	30327,42297	29853,2578	474,17	219,63
2026	30327,42297	30279,1827	474,17	203,36
2027	30327,42297	30458,1468	48,24	19,16
2028	30327,42297	30531,2195	-130,72	-48,07
2029	30327,42297	30560,6945	-203,80	-69,38
2030	30327,42297	30572,5244	-233,27	-73,54
2031	30327,42297	30577,2627	-245,10	-71,54
2032	30327,42297	30579,1591	-249,84	-67,52
2033	30327,42297	30579,9178	-251,74	-63,00
2034	30327,42297	30580,2213	-252,49	-58,51
2035	30327,42297	30580,3427	-252,80	-54,24
2036	30327,42297	30580,3913	-252,92	-50,24
2037	30327,42297	30580,4107	-252,97	-46,53
2038	30327,42297	30580,4185	-252,99	-43,09
2039	30327,42297	30580,4216	-253,00	-39,90
2040	30327,42297	30580,4228	-253,00	-36,94
2041	30327,42297	30580,4233	-253,00	-34,21
2042	30327,42297	30580,4235	-253,00	-31,67
2043	30327,42297	30580,4236	-253,00	-29,33
2044	30327,42297	30580,4236	-253,00	-27,15
2045	30327,42297	30580,4236	-253,00	-314,28
Total				2.719,23

Fonte: Lactec, 2021.

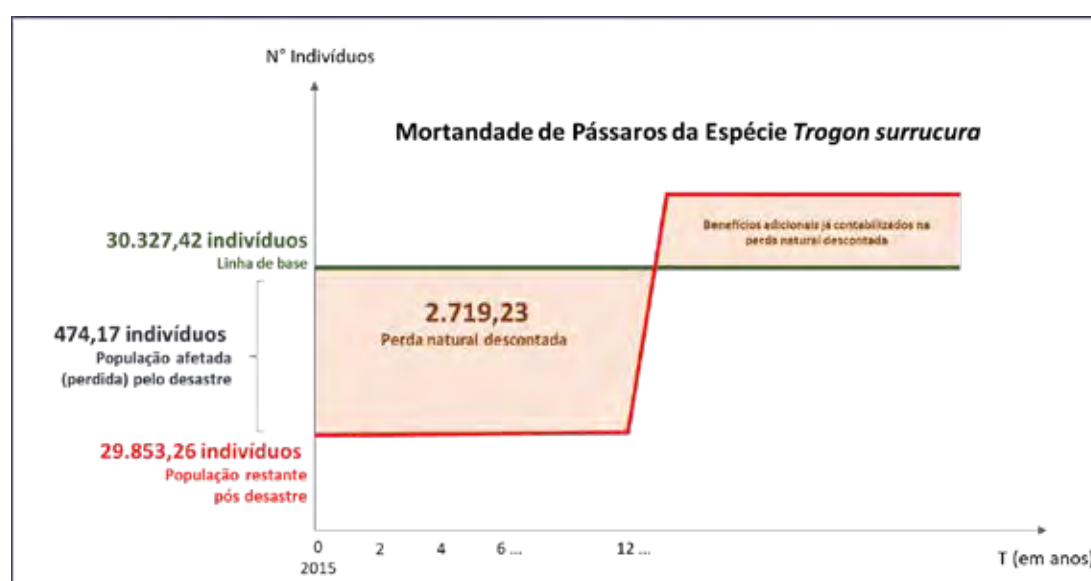
No último ano da série estimada (2045) adiciona-se a perpetuidade na perda ambiental (valor negativo) obtido, que na verdade se traduz como um ganho ambiental. A adição da perpetuidade ocorre pois os benefícios gerados são perpétuos diante do pressuposto de que os ganhos na capacidade de suporte não se alterarão. Posto isso, a perda descontada natural é exibida na Tabela 72 e a Figura 80.

Tabela 72 – Valores estimados pela valoração para o cálculo da perda descontada natural, considerando a recuperação natural (T2a)

Estimativas da Valoração	Valores (unidade)
Linha Base (número de pássaros antes do desastre)	30.327,43
Número de pássaros após o desastre	29.853,26
Quantidade de indivíduos perdidos com desastre (perda inicial)	474,17
Perda descontada natural (quantidade de pássaros devido considerando o tempo de recuperação natural)	2.719,23

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 80 – Perda natural descontada na perpetuidade do número de indivíduos perdidos da espécie *Trogon surrucura*, cenários T0 e T2a



Fonte: Lactec, 2021.

No entanto, esse valor de perda natural descontada não é o valor final de perda a ser devida a sociedade em razão do desastre do rompimento da barragem de Fundão. A perda que é utilizada pelo método para a valoração é a perda interina, que é a diferença entre a perda natural descontada e a perda descontada da recuperação externa, sendo este o valor que será monetizado obtendo-se o valor do dano ambiental causado ao surucua. Para tanto, o próximo item traz o cenário elaborado para a recuperação externa.

4.6.5 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE RECUPERAÇÃO EXTERNA E CÁLCULO DA PERDA INTERINA

Após a construção da curva de recuperação natural, o próximo passo foi a construção da curva de recuperação externa, representada pelo cenário T2b que une a recuperação externa para aceleração

do retorno do surucuá para a região (instalação de caixas ninho), inserida no contexto das ações de restauração florestal realizada pela RENOVA logo após o desastre.

A recuperação externa visa promover ações que auxiliem a natureza a retornar a linha base mais rapidamente, ao invés de contar apenas com a ação dos fatores químicos, físicos, biológicos naturais. A ação definida para a recuperação do *Trogon surrucura* – independente da restauração florestal – foi o manejo de fauna por meio da instalação de caixas-ninho, cuja eficácia é documentada na literatura e pode aumentar as taxas de crescimento populacional entre 0,1 (LIBOIS et al., 2012) e 1,0 (BERTHIER et al., 2012). Os pressupostos assumidos para a construção desse cenário são os mesmos adotados para o cenário T2a.

Para fins desta estimativa, assumiu-se o crescimento populacional na mesma taxa de crescimento populacional já assumida para a recuperação natural ($R = 0,6$), isto porque a presença de caixas ninho contribui com a antecipação da presença da espécie na região. Cabe ressaltar que esta ação recomendada é teórica e para fins de valoração econômica dos danos causados a essa ave. Não se trata de uma recomendação expressa, a mesma pode não vir a ser realizada. A sua seleção se dá apenas devido as questões metodológicas para que se possa aplicar o método de valoração. No entanto, apesar de ser uma proposta teórica, a mesma utiliza dados e informações oriundas da área do desastre, o que o torna um projeto aplicável.

A instalação de caixas ninho ocorre por meio da execução das seguintes atividades principais: monitoramento da situação pré manejo; instalação de caixas ninho e monitoramento das caixas-ninho e manutenção das estruturas, cujos detalhamentos estão expressos no item 4.6.8. Adiante-se, no entanto, que o início da execução das ações foi fixado em 2022, ressaltando-se que as ações de restauração florestal iniciaram desde 2016, conforme já considerado no habitat vegetação. Desse modo, assumiu-se que a realização desta ação de recuperação externa eleva a capacidade de suporte da espécie por fornecer o recurso limitante à espécie, cavidades para nidificação, ao mesmo tempo em que a restauração florestal é levada a efeito na APDL.

Para os cálculos destes cenários utiliza-se o mesmo modelo logístico simples, cujo incremento no crescimento populacional devido à ação ocorre a partir do 8º ano, sendo uma antecipação da presença da espécie na região afetada, ou seja, a implantação das caixas ninhos antecipa a presença da espécie, antecipando também os benefícios ambientais, porém o incremento populacional anual (taxa de crescimento) permanece o mesmo já estimado na recuperação natural. Em outras palavras, considerando que o projeto inicia em 2022, que corresponde ao 7º ano da estimativa, sendo o ano do monitoramento inicial, no 8º ano ocorre as instalações das primeiras caixa ninho, gerando ganhos ambientais com a antecipação da presença da espécie na região em 4 anos, já que no cenário natural esta presença ocorreria apenas no 12º ano. Assim, neste caso, a estimativa indica que esta população de surucuá pode atingir o nível de linha-base no contexto de recuperação externa no 9º ano (Figura 81).

Após obter a curva de recuperação externa, o passo seguinte é o cálculo da perda interina. A lógica do cálculo foi a mesma já explicitada no cenário natural, alterando-se apenas os valores que alimentam o modelo e acrescentando a presença das caixas ninhos como provedoras do recurso cavidade para a espécie.

O valor inicial considerado no cálculo foi 29.853,26 de pássaros da espécie surucuá, sendo a população da espécie após o desastre. Considerando o cenário de recuperação externa (T2b) durante os primeiros 7 anos em que a vegetação está em processo de regeneração e restauração, não há nenhum grau de recuperação para a espécie de ave selecionada. Nesse 7º ano, por meio da instalação das caixas ninho, a disponibilidade de cavidades para a construção de ninhos passa a ser um recurso disponível, o que permite a antecipação do repovoamento dessa na área e inicia-se uma recuperação da população no local.

Após 1 ano do início do repovoamento a população atinge a linha base (9º ano), porém devido a combinação da regeneração natural, a restauração florestal e a instalação das caixas ninho, há um aumento da capacidade de suporte, e a população se estabiliza acima da linha base em 30.580,42 no ano 16. O cenário T2b, oferece uma condição do habitat florestal, em teoria melhor, do que a condição anterior ao dano, associada a presença de caixas ninho que antecipam o fornecimento do recurso cavidades resultando, não apenas em um capacidade de suporte superior a linha base, mas também antecipando essa condição em 4 anos, gerando ganhos ambientais adicionais de forma mais rápida para a sociedade (Figura 81).

Figura 81 – Curva de recuperação externa estimada pelo modelo estatístico, cenários T0 e T2b



Fonte: Lactec, 2021.

A Tabela 73 traz os valores utilizados para o cálculo da perda interina no cenário de recuperação externa. A coluna *Perda Interina Cenário T2b* foi calculada por meio da diferença entre a coluna *Linha-Base (T0) N° de indivíduos* e a população de surucuá existente exposta na coluna *Cenário (T2b) N° de indivíduos*. Para obter a perda interina descontada, aplicou-se o fator de desconto social (8% ao ano), obtendo-se a coluna *Perda Interina Cenário T2b descontada*, os números negativos a partir do ano 2024 se referem aos ganhos adicionais acima da linha base, que contribuem para a redução da perda interina descontada, obtida pelo somatório da última coluna.

Tabela 73 – Valores utilizados para o cenário T2b estimados pelas modelagens para a valoração dos danos causados as aves escavadoras

Anos	Linha-Base (T0) N° de indivíduos	Cenário (T2b) N° de indivíduos	Perda Interina Cenário T2b	Perda Interina Cenário T2b descontada
2015	30327,42297	29853,2578	474,17	474,17
2016	30327,42297	29853,2578	474,17	439,04
2017	30327,42297	29853,2578	474,17	406,52
2018	30327,42297	29853,2578	474,17	376,41
2019	30327,42297	29853,2578	474,17	348,53
2020	30327,42297	29853,2578	474,17	322,71
2021	30327,42297	29853,2578	474,17	298,80
2022	30327,42297	29853,2578	474,17	276,67
2023	30327,42297	30279,1827	48,24	26,06
2024	30327,42297	30458,1468	-130,72	-65,39
2025	30327,42297	30531,2195	-203,80	-94,40
2026	30327,42297	30560,6945	-233,27	-100,05
2027	30327,42297	30572,5244	-245,10	-97,33
2028	30327,42297	30577,2627	-249,84	-91,87
2029	30327,42297	30579,1591	-251,74	-85,71
2030	30327,42297	30579,9178	-252,49	-79,60
2031	30327,42297	30580,2213	-252,80	-73,79
2032	30327,42297	30580,3427	-252,92	-68,36
2033	30327,42297	30580,3913	-252,97	-63,31
2034	30327,42297	30580,4107	-252,99	-58,62
2035	30327,42297	30580,4185	-253,00	-54,28
2036	30327,42297	30580,4216	-253,00	-50,26
2037	30327,42297	30580,4228	-253,00	-46,54
2038	30327,42297	30580,4233	-253,00	-43,09
2039	30327,42297	30580,4235	-253,00	-39,90
2040	30327,42297	30580,4236	-253,00	-36,94
2041	30327,42297	30580,4236	-253,00	-34,21
2042	30327,42297	30580,4236	-253,00	-31,67
2043	30327,42297	30580,4236	-253,00	-29,33
2044	30327,42297	30580,4236	-253,00	-27,15
2045	30327,42297	30580,4236	-253,00	-314,28
TOTAL				1.382,85

Fonte: Lactec, 2021.

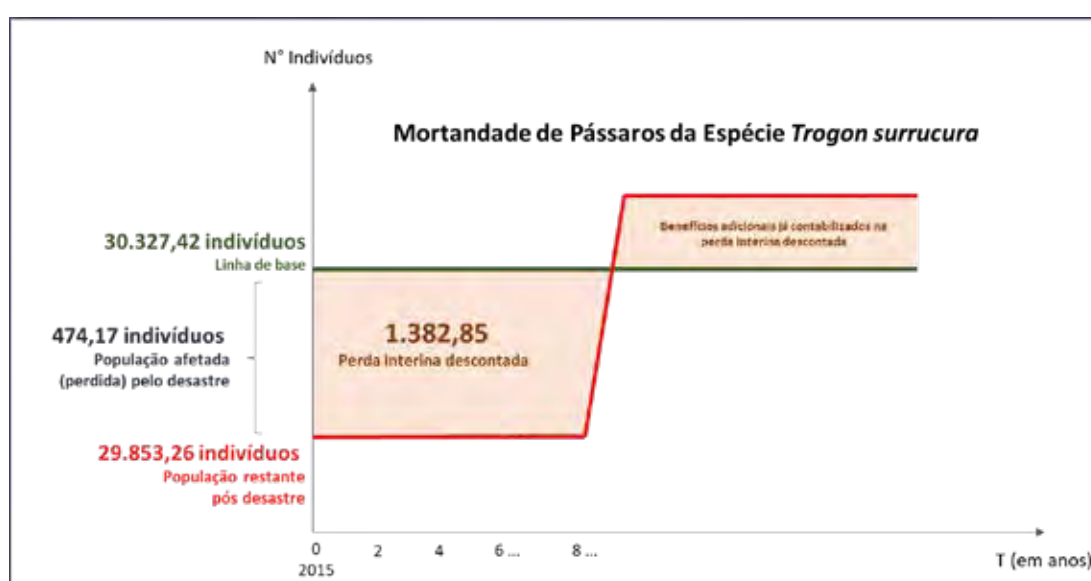
No último ano da série estimada (2045) adiciona-se a perpetuidade na perda ambiental (valor negativo) obtido, que na verdade se traduz como um ganho ambiental. A adição da perpetuidade ocorre pois, os benefícios gerados são perpétuos, diante do pressuposto de que os ganhos na capacidade de suporte não se alterarão. Posto isso, a perda interina descontada é 1.382,85 exibida na Tabela 74 e Figura 82.

Tabela 74 – Valores Estimados pela Valoração para o Cálculo da Perda Descontada Natural, Considerando Apenas a Recuperação Externa (T2b)

Estimativas da Valoração	Valores (unidade)
Linha Base (número de pássaros antes do desastre)	30.327,42
Número de pássaros após o desastre	29.853,26
Quantidade de indivíduos perdidos com desastre (perda inicial)	474,17
Perda interina descontada recuperação externa, considerando a recuperação e restauração florestal da vegetação ocorrendo conjuntamente	1.382,85

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 82 – Perda interina descontada na perpetuidade do número de indivíduos perdidos da espécie *Trogon surrucura*, cenários T0 e T2b



Fonte: Lactec, 2021.

Esse valor de perda interina descontada é o valor final de perda devida à sociedade em razão do rompimento da barragem de Fundão, pois trata-se da perda inevitável, ou seja, mesmo com ações de aceleração do processo natural, a sociedade ainda permanece por um tempo sem o recurso, resultando em um quantitativo que deverá ser compensado, ou seja, a perda interina apresentada. Para tanto, o próximo item traz o cenário elaborado para a compensação.

4.6.6 CONSTRUÇÃO DA CURVA DE COMPENSAÇÃO

Importante iniciar este item ressaltando que não foi possível construir uma curva de compensação que estimasse o incremento populacional do surucua aplicado a uma área selecionada para compensação, devido a ausência de dados. Para tal construção, seria necessário informações e dados que alimentassem o modelo de nicho ecológico oferecendo a situação inicial (linha-base) da capacidade de suporte do local selecionado para a realização das ações. Além dessa informação, seria necessário obter a linha base da população de surucuas já existentes nessa mesma área. Após a obtenção dessas informações iniciais, seria necessário simular a execução da mesma ação utilizada para recuperação

externa, isto é, o manejo de fauna por meio da instalação de caixas ninho, para então verificar o efeito que tal ação incidiria na capacidade de suporte local e o aumento resultante na população de surucuá. Para levar a cabo tais etapas, não há informações disponíveis na literatura. No caso dos cenários de recuperação natural e externa, que tem como área alvo a região afetada pelo desastre, os resultados obtidos foram possíveis pois houve coletas em campo que permitiram a construção de tais modelos.

Diante dessas questões, optou-se por estimar o valor monetário da quantidade de pássaros a ser compensada, por meio da multiplicação desse quantitativo pelo custo unitário de recuperação externa de cada pássaro. O pressuposto utilizado para tal definição foi que os ganhos populacionais da espécie obtidos na recuperação externa, seriam os mesmos a serem obtidos em qualquer outro espaço geográfico que fosse submetido ao mesmo projeto de manejo de fauna (instalação de caixas ninho), sendo esta decisão uma postura conservadora. O detalhamento de como esse processo foi realizado está descrito no item 4.6.9.

4.6.7 TAXA DE EQUIVALÊNCIA DA RECUPERAÇÃO EXTERNA E DA COMPENSAÇÃO

A taxa de equivalência reflete a qualidade ambiental obtida após a execução da ação de recuperação e da ação compensatória, de maneira a determinar se essas ações são equivalentes em termos qualitativos à qualidade ambiental existente antes do desastre.

A ação de recuperação externa selecionada, isto é, o manejo de fauna via instalação de caixas ninho, contribui para a antecipação dos ganhos ambientais obtidos, devido ao aumento da capacidade de suporte proporcionado pela recuperação natural e restauração florestal da vegetação. Logo, é o aumento da capacidade de suporte o responsável pelo ganho adicional de pássaros para além da linha base, e não o projeto de instalação de caixas ninho em si. Desse modo, ao estabelecer uma taxa de equivalência da ação de recuperação externa definida, esta taxa é conservadoramente igual a 1.

Por outro lado, ao considerar que o resultado final da recuperação resulta em um ganho adicional advindo das ações ambientais realizadas em outro habitat, compreende-se que a taxa de equivalência é maior que 1, visto que o resultado obtido é superior ao da linha base. Desse modo, estabelece-se uma taxa de equivalência de 1,14.

A inclusão dessa equivalência ambiental superior a linha base foi realizada matematicamente ao considerar os valores adicionais obtidos acima da linha base na curva de recuperação estimada, conforme exposto na Tabela 75. A Tabela permite verificar que se o somatório da perda interina fosse considerado apenas até o ano 2024 quando há o retorno à linha base, o valor devido à sociedade seria de 2.968,91 surucuás perdidos descontados. Porém, sabendo-se que a recuperação traz benefícios adicionais e que estes são perpétuos, a estimativa da recuperação externa foi feita até o ano 2045 no qual foi acrescida a perpetuidade, resultando em uma perda interina descontada menor de 1.382,85 surucuás perdidos. Desse modo, afirma-se que o processo de valoração dos danos ambientais causados ao surucurá estão considerando os benefícios ambientais obtidos em outros habitats que influenciam nos ganhos ambientais da espécie.

Tabela 75 – Comparação entre o somatório da perda interina que inclui os ganhos ambientais adicionais e o somatório que não inclui tais ganhos, considerando os valores de perda do cenário T2b.

Ano	Perda Interina (n° de indivíduos) Não Descontada	Perda Interina (n° de indivíduos) Descontada
2015	474,165	474,17
2016	474,165	439,04
2017	474,165	406,52
2018	474,165	376,41
2019	474,165	348,53
2020	474,165	322,71
2021	474,165	298,80
2022	474,165	276,67
2023	48,240	26,06
2024	-130,724	-65,39
Total da Perda Interina sem ganhos adicionais	3.830,30	2.968,91
2025	-203,797	-94,40
2026	-233,272	-100,05
2027	-245,101	-97,33
2028	-249,840	-91,87
2029	-251,736	-85,71
2030	-252,495	-79,60
2031	-252,798	-73,79
2032	-252,920	-68,36
2033	-252,968	-63,31
2034	-252,988	-58,62
2035	-252,996	-54,28
2036	-252,999	-50,26
2037	-253,000	-46,54
2038	-253,000	-43,09
2039	-253,001	-39,90
2040	-253,001	-36,94
2041	-253,001	-34,21
2042	-253,001	-31,67
2043	-253,001	-29,33
2044	-253,001	-27,15
2045	-253,001	-314,28
Total da Perda Interina com ganhos adicionais	2.719,23	1.382,85

Fonte: Lactec, 2021.

4.6.8 DETALHAMENTO DAS AÇÕES PARA RECUPERAÇÃO EXTERNA E AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA OS DANOS CAUSADOS ÀS AVES ESCAVADORAS

A ação de recuperação externa e compensatória definida foi a mesma, manejo de fauna, por meio da implantação de caixas ninho, que compreende atividades de escritório e em campo, com periodicidade variável, especificamente para a avifauna. As ações de manejo têm o objetivo de realizar o enriquecimento ambiental para a espécie-alvo de ave, *Trogon surrucura*, por meio da instalação, manutenção e monitoramento da efetividade de caixas-ninho.

Na etapa de recuperação externa o local alvo para execução dos surucuás insere-se nos municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, na região nominada Compartimento 1. Mais especificamente, consiste nas áreas de drenagem dos corpos d'água atingidos pelo desastre do rompimento da barragem de Fundão, cujo limite ocidental coincide com o barramento da UHE Risoleta Neves. As ações de manejo e monitoramento deverão ser realizadas ao longo de toda essa extensão, cabendo à equipe selecionar as propriedades específicas onde serão desenvolvidas as atividades de campo mediante obtenção de anuência dos respectivos proprietários.

No caso da compensação, os locais não são previamente definidos, deixando-os a escolha da equipe técnica que irá executar as ações, recomendando-se que a prioridade seja para áreas inseridas na Bacia Hidrográfica do Rio Doce garantindo que os benefícios ambientais gerados sejam o mais próximo possível da área impactada.

A primeira prerrogativa necessária ao início dos trabalhos aqui definidos refere-se à obtenção das autorizações necessárias para a condução das atividades em campo, que incluem anuência dos proprietários, autorizações ambientais relevantes (p.ex. autorização de captura, marcação e transporte de animais silvestres, autorização para anilhamento de aves silvestres, autorizações para realização de pesquisas em Unidades de Conservação estaduais em Minas Gerais, entre outras).

O trabalho é separado em três vertentes de ações:

1. Monitoramento populacional da espécie-alvo;
2. Instalação de caixas-ninho;
3. Monitoramento da ocupação e manutenção das caixas-ninho.

O monitoramento tem o objetivo de avaliar a densidade da espécie-alvo (*Trogon surrucura*) na região, o qual deve ser conduzido utilizando-se métodos de amostragem em campo, sugerindo-se o uso de pontos de escuta com distância limitada para detecções, de modo a permitir inferir valores de detectabilidade e densidade com maior precisão. Este monitoramento deve contemplar toda a área de interesse mencionada, de modo a permitir aferições de densidade em diferentes localidades, tanto onde será realizada a instalação de caixas-ninho, como em áreas que não receberão este tratamento. A localização precisa de cada caixa-ninho, dos pontos de monitoramento, e demais informações geoespaciais deverão ser registradas e organizadas para fins de apresentação e registro em relatório. O esforço de amostragem por este método deverá ser trimestral, com campanhas de duração de 15 dias, sendo realizado e aprimorado ao longo de 15 anos. Os 12 primeiros meses (4 campanhas) serão realizados anteriormente ao início da etapa seguinte – de instalação de caixas-ninho – para gerar dados que servirão de parâmetro comparativo da situação anterior às ações de manejo. Este período anterior

à efetiva ação de manejo justifica-se no sentido de levantar informações populacionais de linha base, que se prestam a verificar ao longo do monitoramento a eficácia da recuperação.

A segunda etapa do estudo refere-se à instalação de caixas-ninho, que serão realizadas a partir do ano 2. Devem ser instaladas 240 caixas-ninho, valor esse obtido a partir da estimativa de capacidade de suporte perdida entre os cenários pré-desastre a pós-desastre. Esta etapa será realizada em três fases de instalação, alocando-se 80 caixas-ninho no ano 2, 80 caixas-ninho no ano 4 e 80 caixas-ninho no ano 6. As caixas-ninho serão instaladas em 8 situações experimentais em cada fase, portanto 10 caixas-ninho em cada tratamento, alterando-se as seguintes variáveis para: orientação da entrada da caixa-ninho (orientada a norte ou a sul), o tamanho da caixa-ninho (caixa grande, com 100 cm de profundidade, ou pequena, com 50 cm de profundidade) e a densidade de caixas-ninhos em cada área experimental (caixas agregadas, instaladas em grupos de caixas distantes por 30 m entre si e 250 m de distância de outros grupos ou tratamentos; ou caixas isoladas, com caixas instaladas individualmente a 100 m de distância entre si). O tamanho da abertura, material e modelo das caixas devem ser padronizados, sempre adequados à espécie-alvo. Em cada um dos 8 tratamentos deve-se aleatorizar a altura de instalação das 10 caixas-ninho, instalando-as entre 5 m e 8 m do solo.

A terceira etapa do serviço refere-se ao monitoramento das caixas-ninho e manutenção das estruturas, assim como da obtenção de dados reprodutivos da espécie. A partir do ano 2, quando as primeiras 80 caixas-ninho são instaladas, todas devem ser vistoriadas mensalmente, em campanhas de até 20 dias, ao longo de 6 meses em cada ano. Estas vistorias devem contemplar o período reprodutivo da espécie na região (outubro a março). Deverá ser feita a manutenção ou substituição de caixas-ninho danificadas, retiradas ou de outra forma inutilizadas durante o período, assim como retirada de pragas ou insetos que impeçam o uso da caixa-ninho para reprodução da avifauna.

Adicionalmente, deverá ser realizado o monitoramento das atividades reprodutivas de caixas-ninho ocupadas, cujas aves ocupantes e seus filhotes devem ser anilhados e ser monitoradas com maior frequência de modo a levantar estimativas sobre datas de postura de ovos, número de ovos, sucesso de eclosão dos ovos, sucesso de crescimento e dispersão dos filhotes, e dados biológicos sobre cuidado parental. Estes dados devem ser analisados para permitir interpretações acerca do sucesso das medidas de manejo.

A equipe mínima a compor as ações é: três biólogos especialistas em avifauna e três auxiliares de campo, de modo a formar três equipes independentes para realização das atividades de campo.

As ações serão acompanhadas de produtos, relatórios, cujo objetivo será relatar os resultados e o andamento das ações, sendo relatórios para o monitoramento, para as campanhas de acompanhamento e para os campos de instalação de caixas-ninho. Ao fim da última campanha, deverá ser apresentada uma síntese extensiva dos procedimentos e resultados do projeto, considerando as três etapas de ação, tratando aspectos relacionados à natureza da ação em si, que possam ser aproveitados para projetos futuros com ênfase similar. Mais especificamente, o relatório final deve apresentar indicadores claros e interpretáveis acerca dos efeitos da ação sobre a espécie-alvo, incluindo projeções futuras das populações após interrupção das atividades de manutenção das caixas-ninho.

O prazo total de execução das atividades é de 5.475 dias, incluindo todas as atividades envolvidas nas etapas anterior à instalação, às três fases de instalação de caixas-ninho e à etapa de monitoramento da ação. Desse modo, considera-se a realização de 60 campanhas de monitoramento da espécie-alvo; 3 campanhas para instalação das caixas-ninho; e 72 campanhas para acompanhamento das caixas-ninho. O cronograma de execução das atividades do projeto aqui apresentado está exposto na Tabela 76.

Tabela 76 – Cronograma de execução do projeto de manejo de fauna, como forma de recuperação e compensação dos danos causados as aves florestais

Atividades	Ano														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Monitoramento da situação pré manejo	■														
Instalação de caixas ninho		■		■		■									
Monitoramento das caixas-ninho e manutenção das estruturas		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fonte: Lactec, 2021.

4.6.9 VALOR MONETÁRIO DO DANO

Considerando o escopo do projeto de manejo de fauna apresentado no item anterior (4.6.8), neste item apresenta-se o orçamento referente ao escopo estabelecido, ou seja, o investimento financeiro necessário para a execução das atividades, sendo este o valor que irá monetizar os danos sofridos pelas aves escavadoras. O orçamento simplificado apresentado na Tabela 77, foi elaborado considerando os preços de março de 2021.

Tabela 77 – Orçamento simplificado do projeto de manejo de fauna, como forma de recuperação e compensação dos danos causados as aves escavadoras

Etapas	Valor
Etapa 1: MONITORAMENTO DA SITUAÇÃO PRÉ MANEJO	R\$ 6.057.153,00
Etapa 2: INSTALAÇÃO DE CAIXAS NINHO	R\$ 850.300,20
Etapa 3: IMPLANTAÇÃO DE ESTRUTURA DE PRODUÇÃO	R\$ 6.379.300,80
MATERIAIS TÉCNICOS	R\$ 134.185,68
Total	R\$ 13.420.939,68

Fonte: Lactec, 2021.

Após obter o custo total do projeto de manejo de fauna, o próximo passo foi a construção do fluxo de caixa, em acordo com a necessidade de fluxo financeiro para a execução das atividades previstas, bem como a aplicação do fator de desconto social (8% ao ano), a fim de obter o custo total do projeto de manejo de fauna descontado para valor presente de 2021, conforme valores expostas na Tabela 78.

Tabela 78 – Cronograma financeiro de execução do projeto de manejo de fauna, como forma de recuperação e compensação dos danos causados às aves escavadoras

Ano	% Fluxo de caixa	Custo anual da recuperação não descontado	Fator de desconto	Custo anual da recuperação descontado
2022	3,11%	R\$ 417.391,22	0,9259	R\$ 386.473,36
2023	9,38%	R\$ 1.258.884,14	0,8573	R\$ 1.079.290,25
2024	6,25%	R\$ 838.808,73	0,7938	R\$ 665.873,41
2025	9,38%	R\$ 1.258.884,14	0,7350	R\$ 925.317,43
2026	6,25%	R\$ 838.808,73	0,6806	R\$ 570.879,13
2027	9,38%	R\$ 1.258.884,14	0,6302	R\$ 793.310,55
2028	6,25%	R\$ 838.808,73	0,5835	R\$ 489.436,84
2029	6,25%	R\$ 838.808,73	0,5403	R\$ 453.182,26
2030	6,25%	R\$ 838.808,73	0,5002	R\$ 419.613,20
2031	6,25%	R\$ 838.808,73	0,4632	R\$ 388.530,74
2032	6,25%	R\$ 838.808,73	0,4289	R\$ 359.750,69
2033	6,25%	R\$ 838.808,73	0,3971	R\$ 333.102,49
2034	6,25%	R\$ 838.808,73	0,3677	R\$ 308.428,23
2035	6,25%	R\$ 838.808,73	0,3405	R\$ 285.581,69
2036	6,25%	R\$ 838.808,73	0,3152	R\$ 264.427,49
Total		R\$ 13.420.939,68	-	R\$ 7.723.197,75

Fonte: Lactec, 2021.

Assim, o valor total do projeto a valor presente de 2021 totaliza R\$ 7.723.197,75. Após a obtenção deste valor, foi calculada a quantidade de indivíduos da espécie *Trogon surrucura*, que foram adicionados à natureza por meio da ação de recuperação externa, sendo este quantitativo de 373 pássaros. Desta forma, por meio da divisão entre o valor total do projeto descontado a valor presente de 2021 e a quantidade de pássaros ganhos por meio da ação de recuperação, obteve-se o valor do custo unitário descontado por indivíduo de R\$ 20.672,72. De posse do valor unitário e do valor da perda interina descontada a ser compensada, 1.382,85 indivíduos, multiplicou-se ambos os valores obtendo o custo total da compensação descontado de R\$ 28.587.253,22. Ao somar o custo total da recuperação e da compensação, obteve-se o valor total descontado do dano causado ao surucú de R\$ 36.310.450,97. Este poderia ser o valor final devido a ser pago à sociedade. Porém, a escolha do surucú como indicador permite multiplicar este valor do dano pelo número de espécies que possuem o mesmo comportamento ecológico, tendo como pressuposto que todas as aves escavadoras que nidificam em cavidades sofreram o mesmo dano e consequentemente a mesma perda mensurada, tendo os mesmos resultados por meio do manejo de fauna através de caixas ninho. Assim, o número de espécies de aves escavadoras com ocorrência na região foi de 19, cujo detalhamento da informações está logo abaixo. Desse modo, foi feita a multiplicação do valor total descontado do dano causado ao surucú pelas demais 19 espécies de aves escavadoras obtendo o valor total do dano causado às aves escavadoras de R\$ 689.898.568,38, conforme Tabela 79.

Tabela 79 – Valores para a construção do resultado final da valoração dos danos ambientais causados às aves escavadoras

Custo total da recuperação externa (não descontado)	R\$ 13.420.939,68
Custo total da recuperação externa (descontado)	R\$ 7.723.197,75
Pássaros ganho na recuperação externa com caixas ninho (descontado)	373,59
Custo unitário descontado por pássaro	R\$ 20.672,72
Quantidade de pássaro a ser compensada (descontado)	1.382,85
Custo total da compensação (descontado)	R\$ 28.587.253,22
Valor total do dano causado ao Surucua (descontado)	R\$ 36.310.450,97
<i>Quantidade de espécies iguais ao Surucua</i>	<i>19</i>
Valor total do dano causado às Aves escavadoras	R\$ 689.898.568,38

Fonte: Lactec, 2021.

Com relação ao quantitativo de 19 espécies, o mesmo foi obtido com base na análise das informações de linha de base do diagnóstico socioambiental.

A partir das informações da linha de base (BRASIL(MPF)/LACTEC, 2019c) outras 107 espécies, (listagem no Apêndice K), com ocorrência na bacia do rio Doce também nidificam em cavidades (*sensu* SICK, 1997; VAN DER HOEK; GAONA; MARTIN, 2017), das quais 15 são escavadores ‘primários’, tal como *Trogon surrucura*, ou seja, criam cavidades para seus ninhos; e outras 9 são escavadores ‘facultativas’, que usam cavidades já existentes, mas também são escavadores. As demais são aves não escavadoras, que dependem de cavidades geradas pelo apodrecimento de grandes galhos ou troncos, ou escavados por outras espécies.

Justifica-se a incorporação de um multiplicador dos custos estimados para o indicador (*Trogon surrucura*) devido à inclusão de espécies com diferentes funções ecológicas. O conjunto completo das espécies que nidificam em cavidades contempla aves aquáticas, rapineiras diurnas e noturnas, carneiras, insetívoras de diversos estratos florestais, entre outros hábitos alimentares. Similarmente, também compreende espécies com diferentes tamanhos corporais (entre 12 e 82 cm de comprimento total, mensurado da ponta do bico à ponta da cauda com o animal esticado em um plano horizontal), portanto, atuam em diversos setores das redes tróficas e contribuem de forma diferencial com a biomassa animal. No entanto, para o presente exercício, é razoável restringir-se aos táxons com exigências similares a *Trogon surrucura* quanto ao uso do ambiente florestal, e sua dependência de ambientes florestais melhor estruturados para efetivar sua reprodução. Assim, sugere-se a incorporação de 19 espécies de aves que podem ser classificados nesses critérios (Tabela 80).

Tabela 80 – Aves escavadoras primárias ou facultativas, com exigências ecológicas similares a *Trogon surrucura*, e respectivo tamanho corporal (Comprimento Total, em centímetros).

Táxon	Tipo	Tamanho
<i>Trogon viridis</i>	Escavador facultativo	25–28
<i>Trogon rufus</i>	Escavador facultativo	23–25
<i>Ramphastos dicolorus</i>	Escavador facultativo	42–48
<i>Pteroglossus bailloni</i>	Escavador facultativo	35–39
<i>Picumnus cirratus</i>	Escavador primário	10
<i>Melanerpes flavifrons</i>	Escavador primário	17
<i>Veniliornis affinis</i>	Escavador primário	15–18
<i>Veniliornis passerinus</i>	Escavador primário	14–15
<i>Piculus aurulentus</i>	Escavador primário	21–22
<i>Piculus chrysochloros</i>	Escavador primário	18–21
<i>Celeus flavescens</i>	Escavador primário	27–30
<i>Colaptes melanochloros</i>	Escavador primário	27–29
<i>Hylatomus lineatus</i>	Escavador primário	30–36
<i>Campephilus robustus</i>	Escavador primário	32–37
<i>Campephilus melanoleucos</i>	Escavador primário	33–38
<i>Brotoyeris tirica</i>	Escavador facultativo	23
<i>Brotoyeris chiriri</i>	Escavador facultativo	20–25
<i>Xenops rutilans</i>	Escavador facultativo	12
<i>Xenops minutus</i>	Escavador facultativo	11–12

Fonte: Lactec, 2021.

4.7 PATRIMÔNIO CULTURAL

Cabe relembra mais uma vez que os danos causados ao patrimônio cultural, alvo deste estudo, são decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, pertencente à Samarco, no 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 e materiais a ele agregados nos córregos Fundão e Santarém, atingindo os rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce. Este volume foi transportado pelo rio por mais de 650 km, desde a barragem de Fundão em Minas Gerais até o oceano Atlântico no estado do Espírito Santo, afetando um patrimônio cultural amplo, múltiplo e não renovável, e ocasionando danos oriundos tanto da ação do desastre quanto posteriormente das ações emergenciais/reparatórias promovidas pela Fundação Renova.

A Cultura pode ser descrita, segundo Cuche (1999), como um processo de adaptação ao meio ambiente imaginado e controlado pelo Homem, e que possui a característica de ser facilmente transmissível (CAMPOS et al., 2015).

Essas adaptações são testadas, acumuladas, transmitidas e reproduzidas através das gerações, e se expressam como um acervo de conhecimentos e experiências de um grupo, refletindo seu modo de vida, de compreensão e transformação da realidade, e formam o conjunto denominado “patrimônio cultural” (CAMPOS et al., 2015).

Desta forma, o patrimônio cultural é uma construção social, de diversos itens, práticas, modos de visão, entre outros, que um determinado grupo humano considera digno de ser legado às gerações futuras (CAMPOS et al., 2015).

A partir disso, o diagnóstico de danos causado ao Patrimônio Cultural contemplou três diferentes áreas de pesquisa: bens arqueológicos, bens materiais e bens imateriais.

Cada um dos grupos de bens analisados apresenta natureza e características diferenciadas, o que impede que a valoração econômica dos danos seja feita de forma agregada, ou seja, analisando todos os grupos de forma unificada, mesmo que a métrica seja a mesma. Por isso, foi definido que as decisões sobre as métricas e as curvas de recuperação serão construídas respeitando a divisão dos grupos de bens já realizada para o diagnóstico dos danos. Além disso, a valoração também partirá dos danos mais expressivos sofridos por cada grupo.

4.7.1 BENS ARQUEOLÓGICOS

Segundo a legislação brasileira, o patrimônio arqueológico é formado por bens de natureza arqueológica, amparados desde o Decreto-Lei nº 25/1937, que organizou a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional. No âmbito legal, a Lei 3.924, de 26/07/1961 propiciou uma mudança importante no quadro da proteção jurídica a esses bens, antes restrita aos bens tombados, ao proibir a destruição ou mutilação, para qualquer fim, da totalidade ou parte das jazidas arqueológicas, o que é considerado crime contra o patrimônio nacional. A partir da Constituição de 1988, os bens arqueológicos passaram a ser considerados como bens da União, sendo reproduzida a expressão “sítios arqueológicos e pré-históricos” do texto da Lei 3.924/61. Ainda do ponto de vista jurídico, há que ressaltar a importância da legislação ambiental com as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) das décadas de 1980 e 1990, voltadas à preservação de bens arqueológicos em áreas destinadas à instalação de empreendimentos, alvo de prováveis impactos. A legislação ambiental foi atualizada na Portaria Interministerial nº 60 de 24/03/2015 que versou sobre o licenciamento ambiental, reafirmando a responsabilidade do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) na análise dos processos, assim como na recente Portaria nº 375, de 19/09/2018, que instituiu a Política de Patrimônio Cultural Material do IPHAN.

4.7.1.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados aos Bens Arqueológicos

O diagnóstico de danos aos bens arqueológicos, amparado em premissas teórico-metodológicas, adotadas e apresentadas durante a formulação da Linha-Base (LB) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017) e no diagnóstico de danos propriamente dito (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f), envolveu tanto os bens arqueológicos cadastrados no IPHAN anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão, como também os bens identificados pela equipe de arqueologia nos compartimentos alvo de danos. Ademais, a equipe de arqueologia classificou os bens arqueológicos em sítios arqueológicos propriamente ditos (SA) e em sítios de interesse arqueológico, histórico e artístico (SIAHA), ambos compreendidos como componentes do patrimônio arqueológico.

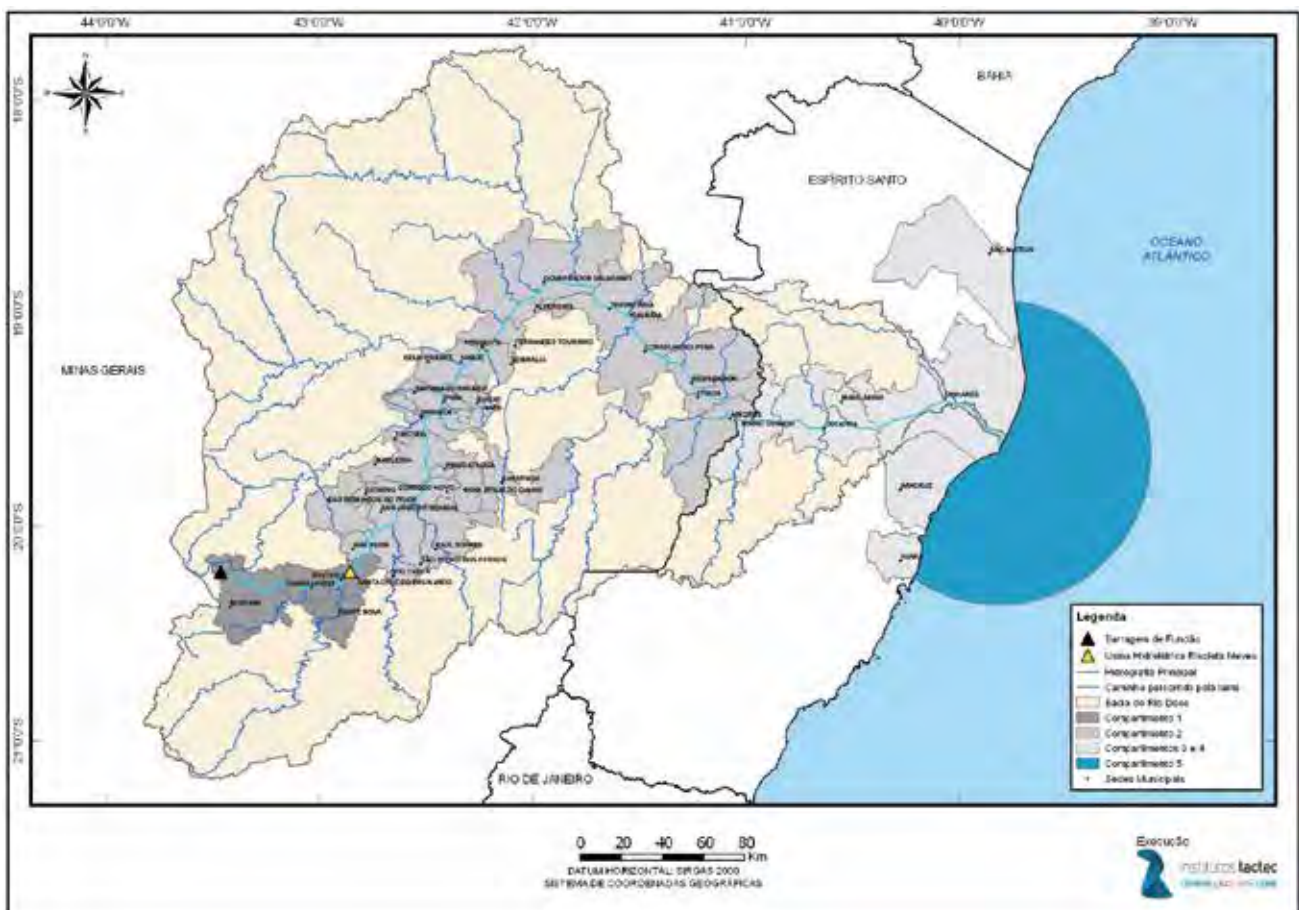
Para o estudo foram selecionadas áreas de 43 municípios que integram a bacia hidrográfica do rio Doce, atingidas de alguma forma pela torrente de 44 milhões de m³ de rejeito, desde o barramento

até a foz do rio, em solo capixaba. A pesquisa segmentou a região afetada pelo desastre, considerando diversos atributos, como os compartimentos ambientais interceptados pelo rio e a dinâmica do desastre, resultando na seguinte divisão (Figura 83):

- Compartimento 1: da Barragem de Fundão até a UHE Risoleta Neves (Candonga);
- Compartimento 2: da UHE Risoleta Neves até a divisa entre Minas Gerais e Espírito Santo;
- Compartimento 3: da divisa entre Minas Gerais e Espírito Santo até a foz do rio Doce (que engloba o Compartimento 4 que se refere aos estuários do rio Doce e do Piraquê, além da Lagoa Monsarás);
- Compartimento 5: a fachada marítima, envolvendo a costa litorânea dos municípios de Linhares, São Mateus, Aracruz e Serra até a isóbata de 20 m.

Ressalta-se que no compartimento 4 não houve patrimônio arqueológico afetado.

Figura 83 – Divisão da área de pesquisa em compartimentos. Os dados dos Compartimentos 3 e 4 estão unificados como Compartimento 3 na presente análise de danos. Cabe destacar que o Compartimento 5 foi abordado apenas pela Arqueologia Subaquática



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f.

Foram identificados quatro danos ao patrimônio arqueológico, a saber: soterramento de bem arqueológico; perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico; modificação da paisagem de implantação de bem arqueológico e aceleração da degradação de vestígios arqueológicos. Esses danos afetaram 55 bens arqueológicos, entre sítios propriamente ditos e sítios históricos de interesse arqueológico.

No entanto, para a aplicação da metodologia de valoração econômica dos danos causados aos bens arqueológicos, foram selecionados 3 danos, a saber: soterramento, perturbação e aceleração. Quanto aos bens, foram selecionados 50 bens arqueológicos, sendo retirados da lista os bens que se sobrepõem aos bens materiais, como foi o caso do sítio histórico de interesse arqueológico Bento Rodrigues e o sítio arqueológico Corvinas, que se localiza na fazenda homônima, bem como o sítio arqueológico Piranema, para o qual, não foi possível aferir informações necessárias à valoração.

Para a definição dos danos aos bens culturais, partiu-se do modelo conceitual concebido pelo Lactec para a avaliação do conjunto dos danos socioambientais como um todo, conforme expresso no Diagnóstico de Danos aos Bens Arqueológicos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f).

A classificação de danos empregada na avaliação dos bens arqueológicos compartilhou com as demais esferas do patrimônio cultural contempladas neste estudo (bens materiais e imateriais) a mesma percepção quanto às origens, causas, efeitos, temporalidades e processos relacionados aos danos. Conforme pontuado anteriormente, foram identificados quatro tipos de danos aos bens arqueológicos, dentre os quais, três foram selecionados para a valoração, apresentados a seguir:

- Dano 1 – Soterramento de bem arqueológico: caracterizado pela acumulação do rejeito mineral e elementos a ele agregados sobre bem arqueológico em cota positiva ou negativa. Tal processo resulta em restrições para a identificação do bem, inviabilizando o acesso futuro a dados e produção de novos conhecimentos a respeito do mesmo. Outrossim, esse dano decorre da adição de rejeito e demais materiais a ele agregados (rochas, solos, vegetação de porte diverso, entulho construtivo, equipamentos e utensílios domésticos, bens arqueológicos móveis carreados, dentre outros) ao bem arqueológico. Devido ao seu deslocamento e acomodação, o rejeito provocou, igualmente, a desestabilização, ruptura, colapso parcial ou total de estruturas arqueológicas remanescentes, notadamente edificações e obras de arte, independentemente de sua cronologia.
- Dano 2 – Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico: este dano remete à mudança brusca ou tênue imposta à morfologia dos solos arqueológicos e sedimentos que conformam a matriz arqueológica do bem e sua respectiva estratigrafia. Tal alteração provoca o deslocamento de evidências arqueológicas, afetando e/ou comprometendo sua identificação e interpretação, quer em cota negativa (bioindicadores, artefatos, assinaturas físico-químicas derivadas da atividade humana, como sepultamentos e outros restos orgânicos utilizados para datação), como em cota positiva (edificações, estruturas, ecofatos), inclusive, blocos testemunho alvo de proteção legal. Ainda que processos de formação do registro (naturais e antrópicos) atuem de forma constante nos bens arqueológicos, o desastre consiste em uma variável nova e significativa, que afeta de forma não esperada esses bens. Em determinadas situações, a inversão e/ou subtração de camadas à matriz arqueológica decorre da

proximidade do bem de cursos d'água atingidos pelo desastre. Ainda que o contato com o rejeito e seus agregados tenha alterado a matriz arqueológica em termos da sua morfologia, nem sempre isso significa a deposição do solo/rejeito/mistura no bem arqueológico. Dessa forma, o que está sendo analisado no dano perturbação das camadas sedimentares do bem arqueológico é a alteração da morfologia da matriz arqueológica e não a deposição de rejeito e seus agregados (considerada no dano 1). Essa alteração se dá devido à implantação do bem e sua suscetibilidade aos efeitos de extravasamento e contato com a água, mesmo que temporariamente, atingindo igualmente artefatos em superfície ou contidos em perfis expostos por erosão. Em outros casos, o dano de perturbação de camadas deveu-se a execução de obras devotadas à contenção da lama, recuperação de áreas degradadas e solos, visando a retomada de atividades agrícolas e/ou pela pecuária.

- Dano 4 – Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos: a premissa adotada na definição deste dano é a de que o rejeito/solo/mistura, em contato com os vestígios e estruturas arqueológicas, tanto solidificado nas planícies de inundação e nas encostas, quanto diluído na água dos reservatórios, rios e mar, atua como um catalisador da deterioração do estado de conservação das evidências. Esse dano foi especialmente relevante no diagnóstico de danos aos bens subaquáticos, submetidos à deposição de lama ou ação da pluma de rejeitos. As evidências arqueológicas abandonadas e/ou descartadas (móveis ou imóveis) por diversos grupos humanos ao longo do tempo, de acordo com sua deposição, apresentam determinadas características de conservação in situ (restos orgânicos e/ou ósseos, cerâmicas, líticos, ou a formação de biofilme, no caso de sítios de naufrágios, por exemplo). Ao entrar em contato com o rejeito/solo/mistura, tanto em sua forma mais concentrada, no caso do Compartimento 1, quanto em sua forma mais diluída, no caso dos demais compartimentos, as evidências arqueológicas têm seu estado de conservação alterado, pois são submetidas a condições adversas ao seu ambiente original de deposição.

A escolha dos três danos supramencionados para a valoração de danos ao patrimônio arqueológico deu-se pelos fatores explicitados a seguir.

Os danos aos bens arqueológicos foram caracterizados de acordo com suas origens, causas, efeitos, temporalidades e processos, assim, ainda que diferentes danos ocorram em um mesmo compartimento, os diferentes compartimentos conheceram danos com maior ou menor manifestação. Assim, o soterramento atingiu de forma mais incisiva o Compartimento 1, posto que é nesse segmento que o rejeito minerário e seus agregados afetou os territórios de forma mais significativa; o dano de perturbação das camadas, por sua vez, foi especialmente observado nos Compartimentos 2 e 3, com a passagem do solo/rejeito/mistura, bem como deslocamento de evidências pelo rio Doce. Por fim, o dano de aceleração de degradação das evidências, ainda que possa ocorrer em todos os segmentos, é mais pronunciado em vestígios parcialmente ou totalmente submersos que permanecem em contato com o rejeito em sua forma mais concentrada ou diluída, situação evidenciada de forma mais concreta no patrimônio arqueológico subaquático, localizado no Compartimento 5.

A valoração atentou ao fato de que os danos ao patrimônio arqueológico ocorreram em todos os compartimentos. Assim, evitou-se o olhar restritivo adotado nas ações devotadas ao patrimônio

arqueológico, frequentemente circunscritas ao referido epicentro do desastre (compartimento 1). Dessa forma, buscou-se selecionar danos que possibilitassem a valoração de bens em todos os compartimentos, por isso, a seleção dos três danos indicados, que possibilita esse olhar mais amplo.

Ademais, o dano modificação da paisagem de implantação de bem arqueológico não foi selecionado para a valoração pois está sempre relacionado a outro dano, sendo compreendido como um vetor de análise que possibilita a compreensão dos danos e seus efeitos no entorno dos bens.

Por fim, foram selecionados danos que possibilitassem que a valoração abarcasse todos os compartimentos, com acurácia e robustez, e permitissem ser medidos pela mesma métrica, sendo cada bem arqueológico valorado pelo dano mais relevante, evitando sobreposição.

4.7.1.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base

Considerando que a métrica é a variável que melhor representa o dano e permite a mensuração de perdas e ganhos ao longo do tempo, isto é, no presente e no futuro, bem como fazer uma paridade em termos de equivalência entre eles, escolheu-se como métrica para medir os danos aos bens arqueológicos o metro quadrado (m^2).

O m^2 coloca-se como métrica mais adequada no processo de valoração desse recurso, devido a sua precisão e ao fato de que tal métrica poderá ser utilizada nos três danos selecionados para a valoração.

Dessa forma, para o cálculo da linha de base, utilizou-se o m^2 de área total do bem arqueológico antes do desastre. Para o cálculo das perdas de cada um desses bens, utilizou-se a área em m^2 afetada, que em alguns casos correspondia a 100% da área total e em outros não. Por exemplo, houve bens que foram totalmente danificados, sendo assim, a área de linha de base e a área de perda era a mesma. Em outros casos, houve bens que foram parcialmente danificados, isto é, houve uma parte do bem que não sofreu o dano. Para esses casos, a linha de base representa a área total original e a perda representa a área efetivamente afetada, que geralmente era menor que a linha de base. Ambos os valores, tanto de linha de base quando a área afetada (perdida) seguem o que já foi computado para o diagnóstico de danos.

Outrossim, a lista completa de bens arqueológicos alvo de danos, composta por 34 sítios arqueológicos e 16 sítios históricos de interesse arqueológico, foram selecionados para a valoração de danos.

Conforme já explicitado, o diagnóstico de danos mostrou que o desastre afetou 55 bens arqueológicos nos diferentes compartimentos, dentre os quais 5 bens não foram selecionados para a esta etapa de valoração. Deste modo, estão sendo considerados para fins de valoração 50 bens arqueológicos. Os bens excluídos da valoração foram: os bens Bento Rodrigues e Corvinas, pois os mesmos estão sendo valorados de forma mais satisfatória no campo dos bens materiais; o sítio histórico de interesse arqueológico Ponte Getúlio Vargas, o sítio arqueológico Piranema e o sítio arqueológico Polidores e Armadilhas do rio Preto, sendo estes três últimos excluídos do processo de valoração devido a questões técnico-científicas como a insuficiência de elementos contextuais *in situ*, discrepância de informações na literatura que permitam com mais propriedade escalonar o seu valor de fato, dentre outros que impediriam a aplicação do método a contento.

- *Detalhamento Medição da Linha de Base e Área Perdida Inicial*

A compreensão da dimensão espacial de cada bem arqueológico, é comum tanto na pesquisa arqueológica acadêmica, quanto na pesquisa associada ao licenciamento ambiental, uma vez que qualquer estudo arqueológico demanda a compreensão do contexto arqueológico. Para tanto, são realizadas prospecções de superfície (varreduras) e de subsuperfície, por meio da realização de sondagens. A construção de mapas e croquis com a indicação dos resultados aferidos e, mais recentemente, o uso de sistemas de informação geográfica são centrais no trabalho da arqueologia.

A obtenção da área total do sítio nem sempre é algo facilmente disponível, por isso, para a aplicação do método de valoração que demanda o conhecimento da área total de cada bem, foram utilizados métodos para estimar essas áreas e obter a linha base, conforme exposto no Diagnóstico de Danos aos Bens Arqueológicos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f).

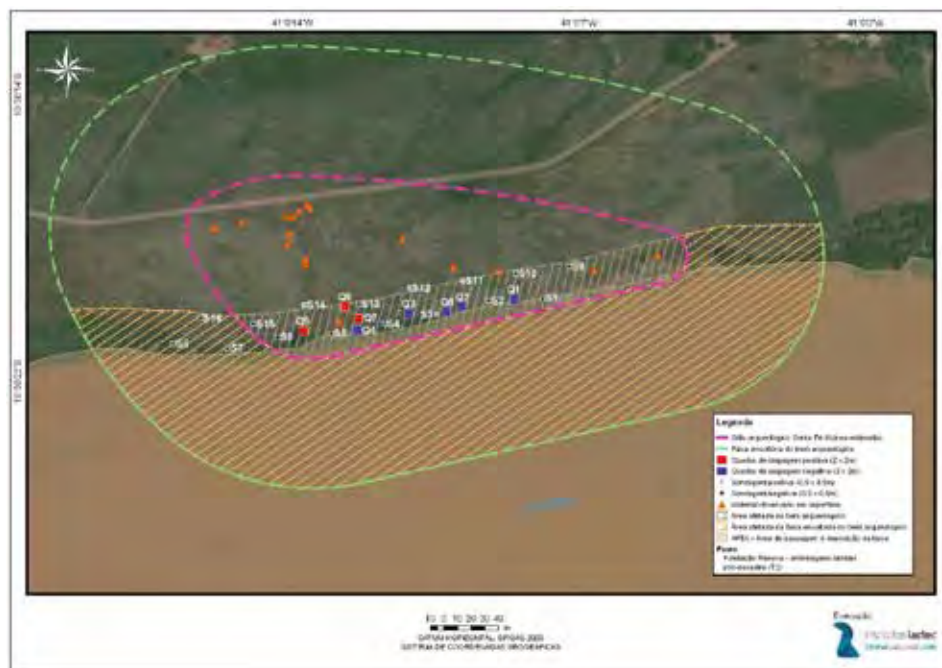
Nas Figura 84, Figura 85 e Figura 86 são apresentados três exemplos da cartografia gerada para cada bem arqueológico danificado, um para cada dano, com a indicação de sua área total e sua área afetada.

Figura 84 – Atividade desenvolvida e estruturas mapeadas no sítio arqueológico Arraial sobre ortoimagem orbital pós-desastre (T2). Em rosa, a área estimada do bem (área total). A área afetada pelo dano soterramento é indicada pela APDL.



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f.

Figura 85 – Atividades desenvolvidas e distribuição das evidências identificadas no sítio arqueológico Santa Fé II sobre ortoimagem orbital pós-desastre (T2). Em rosa, a área estimada do bem (área total). A área afetada pela perturbação das camadas é indicada no desenho pela área hachurada com linhas em cinza.



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f.

Figura 86 – Localização do sítio arqueológico Naufrágio Degredo 1 em relação à pluma. Em rosa, a área estimada do bem (área total). A área afetada pela aceleração da degradação de vestígios arqueológicos corresponde à porção do bem que fica em contato com pluma e em relação à deposição do fator de contaminação.



Fonte: BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f.

Dentre os bens arqueológicos selecionados para valoração, quatro sítios arqueológicos não puderam ter suas dimensões aferidas pela equipe de arqueologia (Candonga; Lapa da Candonga; Mina Santo Antônio e Fazenda Fábrica Nova), uma vez que foram completamente atingidos com a passagem da lama. Dessa forma, sua área total teve que ser estimada a partir de analogia com áreas de bens semelhantes do ponto de vista cronológico, morfológico e funcional conhecidos para a região envoltória. Neste processo, as seguintes fontes foram consultadas:

- 1) Site do IPHAN MG²⁰
- 2) Portal SICG (Sistema Integrado de Conhecimento e Gestão)²¹
- 3) Banco de dados online do CNSA²²
- 4) Resultados do diagnóstico de bens arqueológicos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f)
- 5) Referências bibliográficas, quando disponíveis, incluso relatórios desenvolvidos para avaliação de danos a cargo da Fundação Renova, notadamente o Diagnóstico dos Sítios Arqueológicos, Históricos e Paisagísticos Fazenda Gualaxo, Fazenda Natividade, Fazenda do Padre Fraga, Fazenda Ouro Fino, Caminho de São José e Encontro dos Rios do Carmo e Piranga (LUME, 2016), e cartografia esquemática constante do Relatório Final do Programa de Ações de Salvaguarda do Patrimônio Arqueológico Impactado Diretamente pelo Rompimento da Barragem de Fundão, feito para a Fundação Renova (LUME, 2020).
- 6) No caso dos sítios históricos foram ainda consultadas fontes históricas relacionadas à atividade de mineração colonial.

No caso dos sítios Candonga e Lapa da Candonga, que são sítios arqueológicos líticos pré-coloniais, hoje submersos e amplamente atingidos pelo rejeito, as informações são exíguas, bem como o reduzido número de bens relacionados a esses contextos nos municípios diretamente atingidos e entorno dos mesmos. Assim, observou-se que dentre os nove sítios pré-coloniais identificados na região, contava-se apenas com as dimensões de seis bens na documentação coligida, variando entre 77m² e 2 mil m². A média ponderada forneceu a medida de 615 m². Nota-se significativa discrepância entre áreas obtidas na bibliografia concernente e aquelas estimadas no âmbito do diagnóstico de danos (embora para outros compartimentos), devendo-se tal discrepância, sobretudo, às perspectivas teórico-metodológicas e métodos adotados há algumas décadas para o estudo de sítios líticos a céu aberto, quando era dada ênfase, via de regra, ao exame localizado de áreas de maior concentração de artefatos/atividades de lascamento. Assim, optou-se sob a perspectiva da precaução, pela aplicação à Tabela de valoração a maior área obtida na literatura nos dois sítios mencionados, acrescida de área envoltória, atingindo-se o valor de 2,5 mil m².

Já, no caso dos sítios arqueológicos do período histórico (Mina Santo Antônio e Fazenda Fábrica Nova), foram comparadas informações acerca de 32 sítios arqueológicos históricos análogos conhecidos na região. De posse dessas metragens e de áreas obtidas para contextos similares no âmbito do diagnóstico de danos, seja para unidades domésticas (sedes de fazenda), seja áreas de mineração (minas subterrâneas e a céu aberto, faisqueiras, aluvião, etc), buscou-se avaliar a cartografia esquemática oferecida para os sítios atingidos, acomodando polígonos aos vazios resultantes da área alvo da passagem de rejeito, obtendo-se as seguintes medidas estimativas aplicadas à Tabela de valoração: 20 mil m² para Mina Santo Antônio e 10 mil m² para a Fazenda Fábrica Nova.

Por fim, cabe apontar que quatro bens arqueológicos valorados tiveram subtraídos de suas áreas totais as áreas referentes a bens materiais que se localizam na mesma área, conforme Tabela 81.

20 Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/mg/pagina/detalhes/1319>

21 Disponível em: <https://sicg.iphan.gov.br/sicg/pesquisarBem>

22 Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/sgpa/cnsa_resultado.php

Tabela 81 – Bens arqueológicos que tiveram suas áreas ajustadas com a subtração das áreas de sobreposição com bens materiais

Bem Arqueológico (BA)	Bem Material (BM)	Área afetada anterior do BA (m ²)	Área afetada BA (m ²) (após subtração de m ² da sobreposição com BM)
Paracatu de Baixo	Igreja de Santo Antônio	210.663,00	209.602,20
Gesteira Velha	Igreja Nossa Senhora da Conceição de Gesteira	35.668,00	34.655,65
Fazenda Bueno	Caminho de São José	7.071,00	6.100,20
Quintais da sede de Barra Longa	Hotel Xavier	100.545,00	99.911,42

Fonte: Lactec 2021.

Após a mensuração da linha base e da perda decorrente do desastre, ambas em metros quadrados, a equipe técnica buscou o auxílio de pesos para ponderar essas medidas e assim distinguir as diferentes áreas consideradas na valoração.

4.7.1.3 Taxa de Equivalência: Construção dos Pesos de Relevância Científica e Relevância Patrimonial

A taxa de equivalência, também referida como peso na valoração do bens patrimoniais, reflete em termos qualitativos a equiparação entre as perdas e os ganhos ambientais. No caso dos bens arqueológicos a taxa de equivalência cumpriu dois propósitos: ponderação de perdas e ponderação de ganhos. Inicialmente foi estabelecida uma taxa para cada bem, pois por serem bens distintos não foi possível estabelecer uma taxa única para todos. Além da taxa de equivalência para cada bem, a mesma foi aplicada no momento da mensuração da perda interina como um peso adicional que pondera os aspectos específicos de cada bem arqueológico. Posteriormente esse mesmo peso também foi aplicado aos bens selecionados como compensação, ponderando os ganhos. Essa taxa foi construída para refletir a importância científica e patrimonial de cada bem, desta forma este item visa explicar o processo para definição de tais ponderações.

Tendo em vista que o quadro do patrimônio arqueológico alvo de danos decorrentes do desastre, e que compõem a presente valoração, é formado por bens arqueológicos bastante diversos no que concerne a sua tipologia, cronologia e significância, foi necessário estabelecer pesos que traduzissem essas diferenças para os bens arqueológicos a serem valorados.

Desse modo, foi construído o fator de significância científica e patrimonial. A significância científica partiu-se do estabelecimento de critérios de significância (equivalente ao conceito de relevância presente na Resolução CONAMA 01/1986), conceituação que forneceu o substrato para a definição de metodologias e procedimentos de avaliação preditiva de recursos arqueológicos em voga, dado o caráter finito e não renovável que apresentam, cujas primeiras reflexões remontam à década de 1970 nos EUA, a partir de parâmetros originalmente delineados pela *Cultural Resource Management* - CRM e arqueologia conservacionista anglo-americana, com amplo reflexo na literatura arqueológica desde então, bem como no estabelecimento de marcos regulatórios, legislação e gestão (LIPE, 1974; LIPE & LINDSAY, 1974; DIXON, 1977; GLASSOW, 1977; SCHIFFER & GUMERMAN, 1977; MORATTO & KELLY, 1978; WILDESEN, 1980; FOWLER, 1982;; KING, 1998). Ao seu tempo, entende-se ainda, que o

estabelecimento de critérios de significância articulados a outros princípios e ferramentas de planejamento pode contribuir na reflexão e tomada de decisão rumo à gestão integrada de tais recursos, bem como na consolidação das medidas reparatórias e compensatórias requeridas face aos efeitos advindos do desastre (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f).

Em linhas gerais, dentre as categorias de significância reiteradamente utilizadas para valoração, tem-se, fundamentalmente, a de significância científica - que remete ao potencial do recurso para o estabelecimento de generalizações confiáveis a respeito do passado e sociedades pretéritas, suas diferenças e similitudes e a de significância histórica.

Conforme evidencia Caldarelli, a significância científica está diretamente relacionada ao:

“potencial do(s) recurso(s) para estabelecer generalizações confiáveis sobre sociedades passadas e fornecer explicações sobre as diferenças e similaridades entre elas. Assim, a significância científica depende do grau de representatividade dos recursos arqueológicos da área de estudo para uso em estudos comparativos. O valor desses dados pode estar relacionado ao contexto regional da área de estudo ou a problemas antropológicos gerais” (1997: 9).

À sua vez, Brochier (2004) propõe que a Significância Científica remete ao:

“potencial informativo de um recurso cultural e seu entorno, para a proteção, pesquisa e aspectos de interpretação arqueológica, como a compreensão das relações entre comportamento humano, cultura material e cognição, no estudo das culturas e seus ambientes pretéritos e, no avanço das ciências sociais e naturais, etc” (2004:45).

No que tange à significância histórica, esta remete ao potencial que os recursos arqueológicos apresentam para a identificação e reconstrução de padrões culturais e modos de vida, ou eventos/aspectos particulares e específicos da história (JULIANI, 1996).

O avanço das reflexões e da práxis arqueológica contribuiu igualmente para a remodelagem, adaptação e proposição de novas categorias operativas como a de significância étnica (relacionada ao valor religioso, mitológico, social, entre outros, de significativa importância para a história e integridade de grupos étnicos); ou, ainda, a significância pública, centrada na dimensão de uso dos recursos culturais seja para a educação, turismo e, sobretudo, valorização do patrimônio arqueológico, enquanto elementos de identidade multicultural e afirmação dos valores e laços comunitários (OLIVEIRA, 2005; FERNANDES, 2007).

No caso em questão, optou-se pela adoção de duas categorias apontadas pela bibliografia consistida para a atribuição de pesos aos bens, seja a significância científica, tal qual enunciado acima, e significância patrimonial, conforme proposto por Brochier (2004), em estudo devotado ao planejamento e manejo de recursos arqueológicos em unidades de conservação no estado do Paraná. Da mesma forma, foram considerados, ainda, referências tomadas a planos de manejo desenvolvidos para Unidades de Conservação (UCs) em solo paulista, como no caso do Parque Estadual da Serra do Mar – PESM (INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2008). Cabe evidenciar que para fins operativos, Brochier agregou na categoria significância patrimonial aspectos e valores históricos, étnicos e públicos do registro arqueológico, de modo a ressaltar o papel que um bem pode assumir na equação de futuro de uma determinada região, dentro de uma perspectiva sustentável, em consonância com reflexões posteriores quanto ao papel central que recursos culturais devem assumir em

situações pós-desastre (UNESCO/ICCROM/UCOMOS/IUCN, 2015). Desse modo, assume-se a definição do autor a respeito da significância patrimonial que corresponde:

“ao potencial histórico, étnico e público dos recursos culturais, considerando sua capacidade de valorização e incorporação ao sistema social circundante, a promoção de identidades locais (laços de pertencimento) e apropriação consciente de bens patrimoniais, além de permitir desenvolvimentos socioeconômicos sustentáveis” (2004 45).

A Tabela 82 sumariza os atributos relativos aos critérios de significância arqueológica adotados.

Tabela 82 – Síntese dos atributos considerados na definição da significância

Significância	Científica	Patrimonial
	CAPACIDADE DE INFORMAÇÃO	RELEVÂNCIA SOCIAL
	Potencial informativo	Atributos históricos, étnicos e públicos
	Proteção, pesquisa e interpretação	Promoção de identidades locais
ATRIBUTOS	Produção de conhecimento	Localização e entorno ambiental
	Recorrência/excepcionalidade do recurso arqueológico.	Acessibilidade, visibilidade do bem
	Variabilidade/ diversidade intrínseca e regional, perceptibilidade do registro	

Fonte: Lactec, 2021.

Assim, foi atribuída inicialmente uma pontuação para a significância científica respeitando a escala de 1 a 3, sendo 1 baixa significância; 2 média significância e 3 alta significância.

O mesmo foi feito com a significância patrimonial, cuja escala foi de 1 a 3, porém subdividida em intervalo de 0,5, sendo 1 muito baixa significância; 1,5 baixa significância, 2 média significância, 2,5 alta e 3 significância muito alta. Ambas as pontuações foram decorrentes da observância consorciada de atributos elencados para cada uma das categorias selecionadas.

Após a construção das escalas para cada significância, foi construído o fator de significância científica e patrimonial. Cada bem arqueológico foi classificado mediante sua importância científica e patrimonial e, a partir dessa classificação, a junção dos dois pesos se deu por meio da soma de ambas as significâncias e uma reclassificação dos valores, assim, o fator de significância científica e patrimonial obedece às seguintes escalas:

- Valor da soma entre 1 e 2 o fator de significância equivale a 1;
- Valor da soma entre 3 e 4 o fator de significância equivale a 1,5;
- Valor da soma entre 5 e 6 o fator de significância equivale a 2;

Portanto, a equipe técnica optou por utilizar esse fator por ser um peso claro e preciso, amplamente amparado pela legislação de proteção ao patrimônio e pela discussão acadêmica²³.

Cabe ressaltar que a opção em assumir apenas as áreas afetadas sem ponderação, se configura como um cenário subestimado, por não considerar que no conjunto de bens danificados existem sítios com distintos valores científicos e para a sociedade, em um amplo senso.

²³ Ver, por exemplo: BASTOS; SOUZA; GALLO, 2005; CALDARELLI, 1997; DIXON, 1977; GLASSOW, 1977; MORATTO, 1978; RESOLUÇÃO CONAMA, 01/1986; SCHIFFER; HOUSE, 1977.

Desse modo, após o cálculo de estimativas para estabelecer a área total de cada bem, para assim obter a linha base, foi realizado o cálculo de estimativa da quantidade de área afetada pelo desastre também para cada bem, e por fim, o estabelecimento de pesos e a classificação desses bens. Foi então, a partir disso, que se passou para a etapa de cálculo da perda interina dos bens arqueológicos.

4.7.1.4 Construção da Curva de Recuperação Natural e Cálculo da Perda Interina

Importante salientar duas características próprias dos bens arqueológicos: primeiro, os danos ao patrimônio arqueológico são sempre irreversíveis; segundo e decorrente do primeiro, não existe recuperação natural de um bem arqueológico. Essas características se devem ao fato de os bens arqueológicos serem recursos não renováveis, ou seja, uma vez atingido, um bem arqueológico não pode retornar ao seu estado anterior – ou linha de base, para utilizar um termo próprio da avaliação de danos.

Dessa forma, os m² afetados de um bem arqueológico que conheceram alteração, perturbação ou mutilação – foram perdidos para sempre, o que também assinala o fato de que, no quadro do patrimônio arqueológico, não haverá recuperação, apenas compensação.

Assim, o quantitativo de áreas perdidas no momento de desastre foi utilizado no método de valorização como um valor constante no tempo, dentro de um contexto de perda infinita. Logo, a curva de recuperação natural aqui mencionada, é, na verdade uma reta constante de perda infinita no tempo.

A Tabela 83, cuja versão completa está no Apêndice L, mostra os bens selecionados para valorização, sua área total, área afetada absoluta e em percentual, o fator de significância científica e patrimonial, bem como sua aplicação como peso, fornecendo o valor final ponderado, identificado pela coluna destacada que mostra a área afetada em m² multiplicado pelo fator de significância científica e patrimonial.

Após essa etapa, para o cálculo da perda interina, os bens foram segregados por dano relevante valorado, formando assim, 3 grupos de área em metro quadrado ponderada pelo fator de significância científica e patrimonial. O valor total de área de cada grupo foi considerado como perda constante no tempo infinito, isto é, na perpetuidade que é calculada com a fórmula de perpetuidade utilizada na matemática financeira, conforme exposto no item de metodologia deste estudo. Assim, o valor ponderado de área em metro quadrado no infinito, em cada grupo, trazida a valor presente para o ano de 2015, considerando uma taxa de desconto social de 8% ao ano, resultou em um total de perda de bens arqueológicos descontada no tempo para a sociedade de 25.783.612,5 m² que deverão ser compensados em função do rompimento da barragem de Fundão.

A Tabela 84 e os gráficos das Figura 87 e Figura 88 auxiliam na compreensão do resultado da perda interina ponderada e descontada dos bens arqueológicos.

Tabela 83 – Bens Arqueológicos selecionados para valoração, linha de base em m², área afetada em m², e área afetada ponderada em m².

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Dano relevante valorado	Área total (LB) m²	Área afetada m²	Percentual afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial
1	Mariana	Lavra Córrego da Lavoura	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	24.688	2.474	10,02	2	4.949
1	Mariana	Mina Santo Antônio	1. Soterramento de bem arqueológico	20.000	20.000	100,00	1,5	30.000
1	Mariana	Fazenda Fábrica Nova	1. Soterramento de bem arqueológico	10.000	10.000	100,00	1,5	15.000
1	Mariana	Fazenda Ouro Fino	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	73.536	26.506	36,04	2	53.011
1	Mariana	Vestígios de Mineração da Ponte de Camargos	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	10.394	4.076	39,21	1,5	6.114
1	Mariana	PCH Bicas	1. Soterramento de bem arqueológico	56.512	56.512	100,00	1,5	84.768
1	Mariana	Arraial	1. Soterramento de bem arqueológico	48.555	27.414	56,46	2	54.828
1	Mariana	Ponte do Gama	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	1.211	1.133	93,60	1	1.133
1	Mariana	Antiga Bateria de Fornos e Carvão	1. Soterramento de bem arqueológico	999	386	38,63	1	386
1	Mariana	Ruínas do Pé de Jaca	1. Soterramento de bem arqueológico	1.753	774	44,13	1,5	1.160
1	Mariana	Paracatu de Baixo	1. Soterramento de bem arqueológico	296.640	209.602,20	70,66	2	419.204

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Dano relevante valorado	Área total (LB) m²	Área afetada m²	Percentual afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial
1	Mariana	Fazenda do Gualaxo	1. Soterramento de bem arqueológico	7.264	6.427	88,48	1,5	9.640
1	Mariana	Ruínas Carlos Leal da Maia	1. Soterramento de bem arqueológico	3.694	2.471	66,91	1	2.471
1	Barra Longa	Catas	1. Soterramento de bem arqueológico	101.260	53.554	52,89	1,5	80.331
1	Barra Longa	Gesteira Velha	1. Soterramento de bem arqueológico	63.405	34.655,65	54,66	2	69.311
1	Barra Longa	Fazenda Boa Vista da Outra Banda	1. Soterramento de bem arqueológico	34.910	12.648	36,23	2	25.295
1	Barra Longa	Gesteira 1	1. Soterramento de bem arqueológico	296	296	100,00	1	296
1	Barra Longa	Quintais da sede de Barra Longa	1. Soterramento de bem arqueológico	216.170	99.911,42	46,22	2	199.823
1	Barra Longa	Fazenda Bueno	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	15.568	6.100,20	39,18	1,5	9.150
1	Barra Longa	Apaga Fogo	1. Soterramento de bem arqueológico	11.927	9.446	79,19	1,5	14.168
1	Rio Doce	Sistema Hidráulico da Fazenda do Carmo	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	3.477	734	21,11	1,5	1.101
1	Barra Longa/ Ponte Nova	Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	5.798	3.827	66,01	1,5	5.741

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Dano relevante valorado	Área total (LB) m²	Área afetada m²	Percentual afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial
1	Santa Cruz do Escalvado	Soberbo Velho	1. Soterramento de bem arqueológico	91.140	88.965	97,61	1,5	133.447
1	Rio Doce	Marimbondo	1. Soterramento de bem arqueológico	65.886	65.886	100,00	2	131.772
1	Santa Cruz do Escalvado	Lapa da Candonga	1. Soterramento de bem arqueológico	2.500	2.500	100,00	2	5.000
1	Rio Doce	Candonga	1. Soterramento de bem arqueológico	2.500	2.500	100,00	2	5.000
2	Governador Valadares	Pontes da Estrada de Ferro Vitória-Minas em Derribadinha	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	67.932	57.932	85,28	1,5	86.898
2	Tumiritinga	Terra Prometida I	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	26.539	3.395	12,79	2	6.790
2	Conselheiro Pena	Segredo I	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	36.814	8.636	23,46	2	17.273
2	Conselheiro Pena	Porto Conselheiro Pena	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	3.033	1.777	58,59	1,5	2.666
2	Conselheiro Pena	Estela I	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	92.810	13.632	14,69	1,5	20.447
2	Conselheiro Pena	Estela II	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	10.846	3.340	30,79	2	6.680

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Dano relevante valorado	Área total (LB) m²	Área afetada m²	Percentual afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial
2	Resplendor	Rufino	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	17.358	3.549	20,44	2	7.097
2	Resplendor	Schwenck	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	25.058	3.805	15,19	2	7.611
2	Itueta	Hermes Piepper	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	436.976	204.386	46,77	2	408.771
2	Aimorés	Valdivino	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	1.645	419	25,50	1,5	629
2	Aimorés	Umbigo do Menino	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	643	242	37,67	1,5	363
2	Aimorés	Porto de Aimorés / Curtume	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	59.152	59.152	100,00	1,5	88.728
2	Aimorés	João Reis	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	5.809	1.435	24,70	2	2.870
2	Aimorés	Santa Fé II	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	35.333	10.514	29,76	2	21.027
3	Baixo Guandu	Quartel do Porto do Souza	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	6.428	1.309	20,37	2	2.619
3	Linhares	Lençol Grande	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	2.500	646	25,85	2	1.292

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Dano relevante valorado	Área total (LB) m²	Área afetada m²	Percentual afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial
3	Linhares	Fazenda Goytacaz 1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	5.536	1.328	23,99	2	2.657
3	Linhares	Maria Bonita	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	7.980	2.844	35,64	1,5	4.267
3	Linhares	Progresso	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	22.161	2.341	10,56	1,5	3.511
5	São Mateus	Vapor Miranda	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	800	800	100,00	1,5	1.200
5	Linhares	Naufrágio Degredo 1	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	1.680	1.680	100,00	2	3.360
5	Linhares	Naufrágio Degredo 2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	1.320	1.320	100,00	2	2.640
5	Linhares	Naufrágio Comboios 1	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	48	48	100,00	1,5	72
5	Linhares	Naufrágio Comboios 2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	120	120	100,00	1	120
TOTAL				2.038.601	1.133.448	56%	-	2.062.688

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 84 – Resultado do cálculo da perda interina, segregado por grupo de dano valorado e total

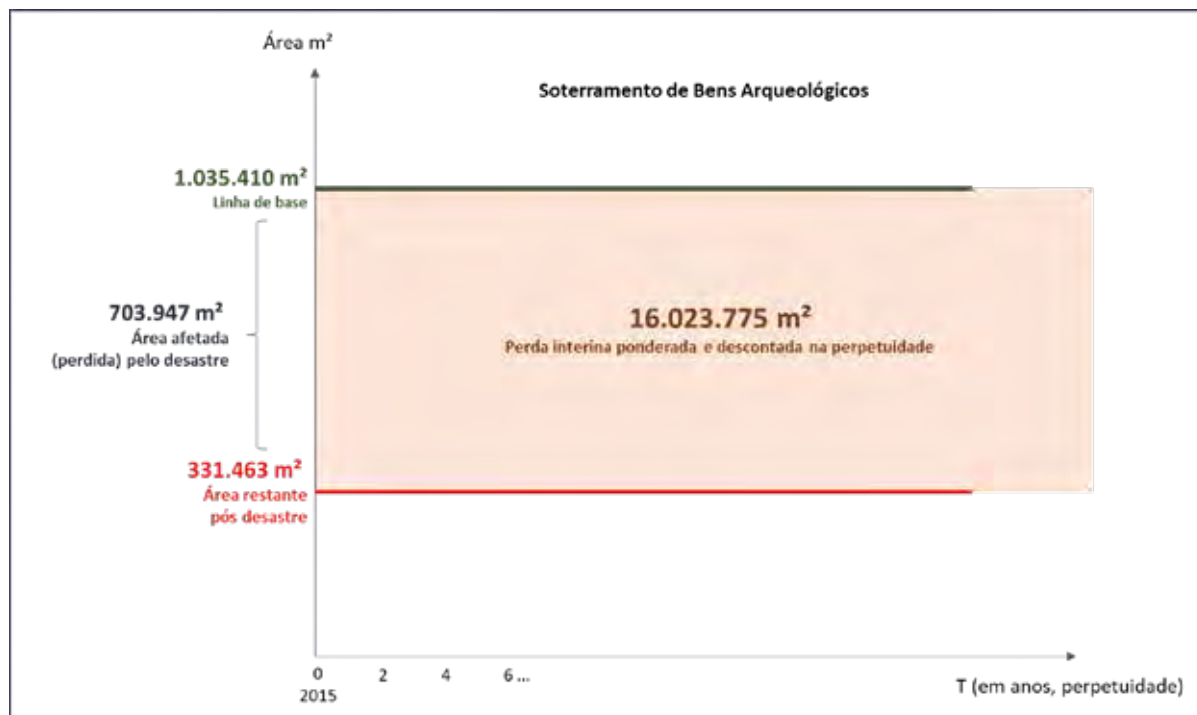
Dano	Soterramento de bem arqueológico
Quantidade de bens neste grupo	19 bens
Linha de base em m²	1.035.410,00
Área em m ² afetada e ponderada pelo fator	1.281.902,00
Perda Interina (perpetuidade)	16.023.775,00
Dano	Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico
Quantidade de bens neste grupo	24 bens
Linha de base em m²	925.494,00
Área em m ² afetada e ponderada pelo fator	680.756,00
Perda Interina (perpetuidade)	8.509.450,00
Dano	Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos
Quantidade de bens neste grupo	7 bens
Linha de base em m²	77.698,00
Área em m ² afetada e ponderada pelo fator	100.031,00
Perda Interina (perpetuidade)	1.250.387,50
TOTAL PERDA INTERINA (perpetuidade)	25.783.612,50

Fonte: Lactec, 2021.

A interpretação da Figura 87 se dá da seguinte maneira: antes do desastre havia 1.035.410 m² de bens arqueológicos, sendo que, devido ao rompimento da barragem de Fundão, 703.947 m² foram soterrados, restando apenas 331.463 m² desses bens. Considerando as especificidades de tipologia, cronologia e significância, foram atribuídos pesos a esse conjunto, assim, o valor inicial perdido de 703.947 m² após ponderação passou a ser de 1.281.902 m², o qual, por sua vez, foi considerado no tempo perpétuo e trazido a valor presente, resultando em uma perda interina descontada de 16.023.755 m².

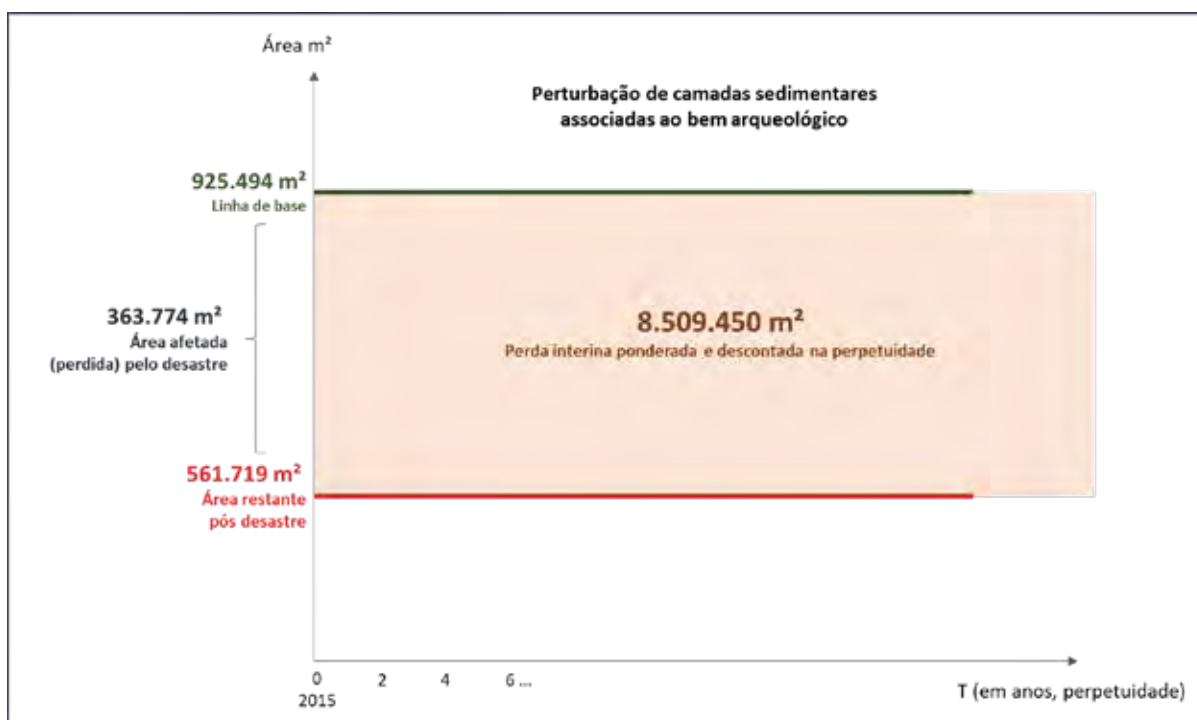
De maneira semelhante, na interpretação da Figura 88 segue-se a mesma racionalidade. Antes do desastre havia 925.494 m² de bens arqueológicos, sendo que, devido ao rompimento da barragem de Fundão, 363.774 m² tiveram suas camadas sedimentares perturbadas, restando apenas 561.719 m² desses bens. Após a atribuição dos pesos, o valor inicial perdido de 363.774 m² passou a ser de 680.756 m². Do mesmo modo, esse valor foi considerado no tempo perpétuo e trazido a valor presente resultando em uma perda interina descontada de 8.509.450 m².

Figura 87 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens arqueológicos afetados pelo dano de soterramento



Fonte: Lactec, 2021.

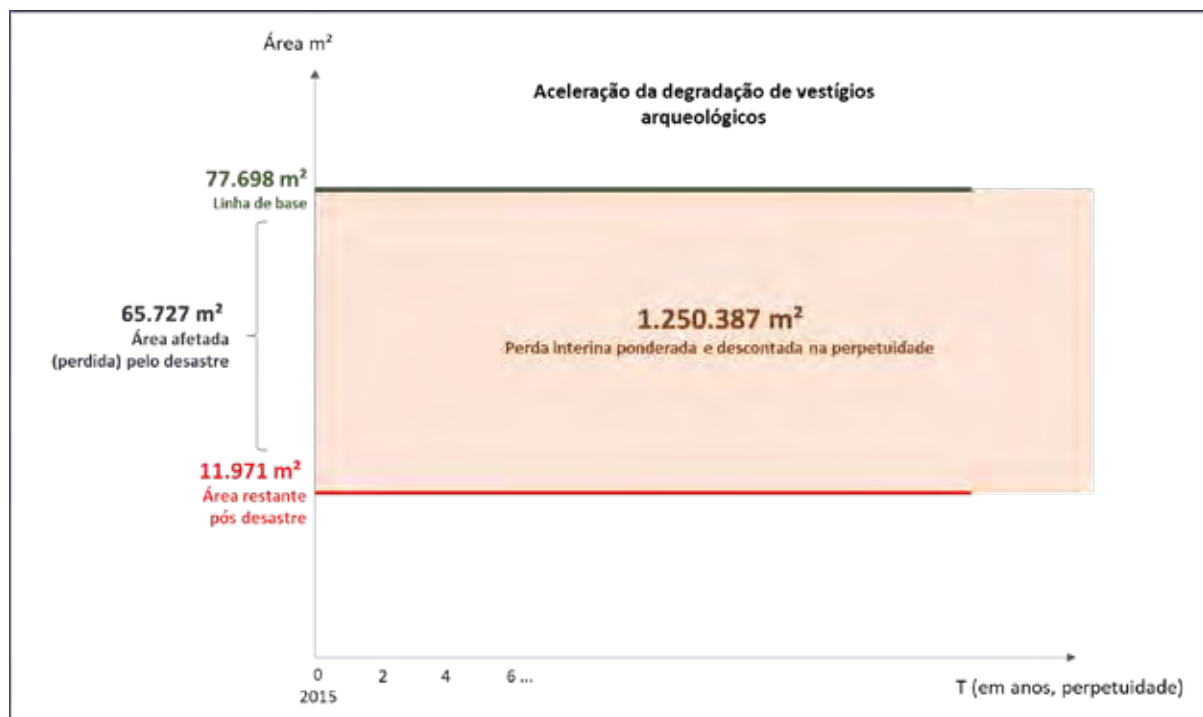
Figura 88 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens arqueológicos afetados pelo dano de perturbação



Fonte: Lactec, 2021.

Por fim, da mesma forma, segue a interpretação da Figura 89, observando-se antes do desastre haver 77.698 m² de bens arqueológicos, que, devido ao rompimento da barragem de Fundão, 67.727 m² passaram a sofrer aceleração da degradação de vestígios arqueológicos, restando apenas 11.971 m² que não estão sofrendo esse prejuízo. Após a atribuição dos pesos, o valor inicial perdido de 67.727 m² passou a ser de 100.031 m². Esse valor considerado no tempo perpétuo e trazido a valor presente resultou em uma perda interina descontada de 1.250.387 m².

Figura 89 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens arqueológicos afetados pelo dano de aceleração



Fonte: Lactec, 2021.

Ao somar todas as perdas interinas de cada grupo, tem-se então a área total de perda interina descontada de **25.783.612,50 m²**, que reflete a perda sofrida por parte da sociedade, no que se refere a riqueza e importância desses bens arqueológicos, que foram perdidos de maneira definitiva.

4.7.1.5 Construção da Curva de Recuperação Externa

Conforme anteriormente evidenciado, o patrimônio arqueológico é amparado do ponto de vista jurídico desde 1937, quando se definiu e organizou a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional, sucedendo-lhe ainda outros amparos legais nos anos de 1961, 1988, 2015 e mais recentemente em 2018, todos os quais reforçam o seu caráter inviolável e a necessidade de se tomarem as devidas providências para a sua proteção.

O aparato jurídico brasileiro devotado ao patrimônio arqueológico ressalta a natureza finita destes bens, em acordo com o Artigo 2º da Carta de Lausanne de 1990 do ICOMOS (Conselho Internacional de Monumentos e Sítios), que aponta que: *“O patrimônio arqueológico é um recurso cultural frágil e não renovável”*. Todo bem arqueológico, pela sua própria condição enquanto objeto de estudo da Arqueologia (materialidade fora do uso sistêmico pela sociedade em que foi criada), mesmo estando

sujeito à fatores interagentes que atuam nos processos de formação do registro arqueológico, não pode recuperar sua feição original quando afetado por danos naturais ou antrópicos.

Destarte, os bens arqueológicos alvo de danos ocasionados pelo rompimento da barragem de Fundão não podem ser recuperados. Importante lembrar que a curva de recuperação externa possui o conceito de recuperar o que foi danificado, trazendo o recurso mais próximo possível a sua linha de base inicial. Por isso, o quantitativo de perda calculado na etapa anterior deverá ser totalmente compensado à sociedade.

4.7.1.6 Construção da Curva de Compensação

No presente documento serão explicadas pormenorizadamente a escolha dos bens alvo de compensação, a definição das ações de compensação, os protocolos de ações gerais a serem tomadas em relação aos bens arqueológicos disponíveis e selecionados para as medidas compensatórias (variando conforme as características dos bens).

- *Escolha dos bens alvos de Compensação*

A escolha dos bens arqueológicos a serem indicados para as ações compensatórias seguiu duas etapas:

- Em um primeiro momento, foram selecionados dentre os 50 bens arqueológicos alvo de valoração, os bens que sofreram danos em menos de 75% da sua área total, ou seja, os bens cuja área restante, sem danos, representa igual ou maior que 25% da sua área total. Assim esses bens afetados, com áreas remanescentes sem danos, podem receber ações de compensação nas parcelas não afetadas pelo desastre. Mesmo que a integridade, fruição e cognoscibilidade desses bens tenha sofrido perdas, as áreas restantes podem ainda retornar serviços à sociedade. Desta forma, **32 bens arqueológicos** (15 bens no Compartimento 1, 12 bens no Compartimento 2 e 5 bens no Compartimento 3) poderão receber como compensação, ações detalhadas mais adiante. Cabe esclarecer que, ainda que as parcelas afetadas pelo desastre não sejam recuperáveis, posto que o patrimônio arqueológico é um recurso não renovável, as parcelas que não conheceram danos podem receber atividades de pesquisa, salvaguarda e comunicação. Uma vez que, para a ciência arqueológica, a compreensão do contexto arqueológico é de especial importância, julgou-se que bens que sofreram danos em mais de 75% de sua área não poderão fornecer de forma satisfatória os serviços requeridos pela valoração, por isso, foi realizada essa seleção de 32 dos 50 bens valorados, considerados aptos a receber atividades compensatórias. A lista completa destes bens está exposta na Tabela 85, cuja versão completa está exposta no Apêndice M.
- Em um segundo momento, após o cálculo da compensação dos bens a serem compensados na área do desastre, constatou-se que as áreas atendidas ainda não quitavam a área total da perda calculada, por isso foi descontado do total devido (25.783.612,5 m²) de bens arqueológicos a serem retornados à sociedade, as áreas em m² dos 32 bens arqueológicos alvo de danos e que ainda podem receber de forma adequada as ações de compensação, chegando-se a um valor de 15.156.561,24 m² descontados de bens arqueológicos.

lógicos a serem compensados em outros locais. Desse modo, selecionou-se um total de 53 bens arqueológicos a serem alvo de compensação em outros locais. No entanto, dentre esses bens, 4 são bens arqueológicos aquáticos que possuem um custo de compensação significativamente distinto dos bens arqueológicos localizados no ambiente terrestre. Por isso, esse grupo de bens selecionados para compensação são separados em dois grupos: os bens localizados em ambiente aquático (4 bens) e os bens localizados em ambiente terrestre (49 bens). A apresentação dos cálculos e valores mais adiante deixará mais claro a explicação exposta. Ressalta-se que o mesmo peso adotado, ou seja, o fator de significância científica e patrimonial utilizado para o cálculo da perda, também foi devidamente considerado nos bens a serem alvo da compensação.

Passou-se à seleção de bens arqueológicos na bacia do rio Doce, em outros locais que não foram atingidos pelo desastre, e que pudessem receber as ações compensatórias, resultando no retorno de serviços à população. Considerou-se o critério geográfico para a escolha dos bens, isto é, procurou-se bens registrados anteriormente que estivessem o mais próximo dos sítios arqueológicos alvos de danos pelo desastre da barragem de Fundão.

Tabela 85 – Bens arqueológicos afetados pelo desastre, que possuem mais de 25% de área não atingida pelos danos e que podem ser alvo das ações de compensação.

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² sobreposição com BM)	% afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial (Equivalência)	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial	Bem receberá compensação na área?	Diferença entre a área total e a área afetada (LB compensação)	Porcentagem da área que sobrou pra compensação	LB compensação ponderada pelo fator
1	Mariana	Lavra Córrego da Lavoura	Sítio	24.688	2.474	10,02	2	4.949	Sim	22.214	90	44.428
1	Mariana	Fazenda Ouro Fino	Sítio	73.536	26.506	36,04	2	53.011	Sim	47.030	64	94.061
1	Mariana	Vestígios de Mineração da Ponte de Camargos	Sítio	10.394	4.076	39,21	1,5	6.114	Sim	6.318	61	9.477
1	Mariana	Arraial	Sítio	48.555	27.414	56,46	2	54.828	Sim	21.141	44	42.282
1	Mariana	Antiga Bateria de Fornos e Carvão	SIAHA	999	386	38,63	1	386	Sim	613	61	613
1	Mariana	Ruínas do Pé de Jaca	Sítio	1.753	774	44,13	1,5	1.160	Sim	979	56	1.469
1	Mariana	Paracatu de Baixo	SIAHA	296.640	209.602,20	70,66	2	419.204	Sim	87.037	29	174.075
1	Mariana	Ruínas Carlos Leal da Maia	Sítio	3.694	2.471	66,91	1	2.471	Sim	1.222	33	1.222
1	Barra Longa	Catas	Sítio	101.260	53.554	52,89	1,5	80.331	Sim	47.706	47	71.558
1	Barra Longa	Gesteira Velha	SIAHA	63.405	34.655,65	54,66	2	69.311	Sim	28.749	45	57.498
1	Barra Longa	Fazenda Boa Vista da Outra Banda	SIAHA	34.910	12.648	36,23	2	25.295	Sim	22.262	64	44.525
1	Barra Longa	Quintais da sede de Barra Longa	SIAHA	216.170	99.911,42	46,22	2	199.823	Sim	116.258	54	232.517
1	Barra Longa	Fazenda Bueno	SIAHA	15.568	6.100,20	39,18	1,5	9.150	Sim	9.468	61	14.201
1	Rio Doce	Sistema Hidráulico da Fazenda do Carmo	SIAHA	3.477	734	21,11	1,5	1.101	Sim	2.743	79	4.114
1	Barra Longa/ Ponte Nova	Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway	Sítio	5.798	3.827	66,01	1,5	5.741	Sim	1.971	34	2.956

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	% afetado	Fator Significância Científica e Patrimonial (Equivalência)	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial	Bem receberá compensação na área?	Diferença entre a área total e a área afetada (LB compensação)	Porcentagem da área que sobrou pra compensação	LB compensação ponderada pelo fator
2	Tumiritinga	Terra Prometida I	Sítio	26.539	3.395	12,79	2	6.790	Sim	23.144	87	46.287
2	Conselheiro Pena	Segredo I	Sítio	36.814	8.636	23,46	2	17.273	Sim	28.177	77	56.355
2	Conselheiro Pena	Porto Conselheiro Pena	SIAHA	3.033	1.777	58,59	1,5	2.666	Sim	1.256	41	1.884
2	Conselheiro Pena	Estela I	Sítio	92.810	13.632	14,69	1,5	20.447	Sim	79.178	85	118.767
2	Conselheiro Pena	Estela II	Sítio	10.846	3.340	30,79	2	6.680	Sim	7.506	69	15.012
2	Resplendor	Rufino	Sítio	17.358	3.549	20,44	2	7.097	Sim	13.810	80	27.619
2	Resplendor	Schwenck	Sítio	25.058	3.805	15,19	2	7.611	Sim	21.253	85	42.505
2	Itueta	Hermes Piepper	Sítio	436.976	204.386	46,77	2	408.771	Sim	232.590	53	465.180
2	Aimorés	Valdivino	Sítio	1.645	419	25,50	1,5	629	Sim	1.226	75	1.838
2	Aimorés	Umbigo do Menino	Sítio	643	242	37,67	1,5	363	Sim	401	62	601
2	Aimorés	João Reis	Sítio	5.809	1.435	24,70	2	2.870	Sim	4.374	75	8.748
2	Aimorés	Santa Fé II	Sítio	35.333	10.514	29,76	2	21.027	Sim	24.820	70	49.639
3	Baixo Guandu	Quartel do Porto do Souza	Sítio	6.428	1.309	20,37	2	2.619	Sim	5.118	80	10.237
3	Linhares	Lençol Grande	Sítio	2.500	646	25,85	2	1.292	Sim	1.854	74	3.707
3	Linhares	Fazenda Goytacaz 1	Sítio	5.536	1.328	23,99	2	2.657	Sim	4.208	76	8.416
3	Linhares	Maria Bonita	Sítio	7.980	2.844	35,64	1,5	4.267	Sim	5.136	64	7.704
3	Linhares	Progresso	Sítio	22.161	2.341	10,56	1,5	3.511	Sim	19.820	89	29.730

Fonte: Lactec, 2021.

Isto porque, sendo tal território o diretamente atingido pelo desastre iniciado em 2015 e ainda em curso, é justificável que seja esta mesma região a receber a maior parcela das ações. Foram, então, escolhidos principalmente bens que se localizam nos municípios abarcados pela bacia do rio Doce, o que oferece, inclusive, um melhor grau de equivalência entre os bens. Foram selecionados 53 bens arqueológicos (15 no Compartimento 1, 17 no Compartimento 2, 17 no Compartimento 3 e 4 nas adjacências do Compartimento 5²⁴).

Cabe um detalhamento acerca do processo de levantamento de bens aptos a receber as ações compensatórias, que resultou nos 53 bens selecionados (49 bens ambiente terrestre, 04 bens ambiente aquático).

Para a escolha dos bens arqueológicos, retornou-se à Linha Base (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018), bem como foram empreendidas novas buscas nas bases de dados do IPHAN e em listagens de sítios mencionados na literatura arqueológica, de maneira a compor um conjunto de bens, localizados na bacia do rio Doce, que possuísem características semelhantes aos bens valorados de forma a ter a justa compensação de danos.

De centenas de sítios listados nas mais variadas fontes, consolidou-se uma listagem preliminar de 212 bens, os quais foram devidamente classificados em termos de significância patrimonial e científica, considerada como peso na valoração dos bens acometidos pelo desastre. Esses bens foram listados por compartimento, sendo que em cada compartimento foi definida uma ordem de prioridade, facilitando a seleção de bens que resultassem nos m² calculados como montante faltante a ser compensando. Essa lista está apresentada na Tabela 86, e de forma mais completa nos Apêndices N e O.

Uma vez que se tem como métrica da valoração de bens arqueológicos o m², cada bem listado como passível de receber ações compensatórias demandava a indicação de sua área em m². Contudo, alguns bens da referida listagem não possuíam suas áreas indicadas nas fontes consultadas, o que gerou uma fase de trabalho especialmente devotada a estabelecer estimativas de áreas para esses bens. Essas estimativas foram realizadas com o máximo de rigor científico, por meio da comparação das características dos bens arqueológicos análogos na região, considerando suas tipologias e formas de implantação na paisagem. Assim, o processo de estimativa da área se deu de três diferentes formas, para cada uma das três situações encontradas, e expostas detalhadamente na planilha apresentada no Apêndice N.

- 1) No caso do bem não possuir sua área total registrada nos documentos do próprio bem: Neste caso, realizou-se um processo de levantamento de informação de cada bem, desse modo utilizou-se fontes bibliográficas e documentais para a construção da estimativa de área. Para todos os bens enquadrados nesse caso, na planilha do Apêndice N são expostas as referências utilizadas;
- 2) No caso de determinado bem possuir sua área indicada nas fontes consultadas do próprio bem: Para esse caso as referências utilizadas também estão expostas na planilha;
- 3) No caso de bens cujas áreas não estavam registradas nos documentos do próprio bem e não havia informação na literatura científica ou documental: Para esses bens as áreas foram esti-

24 Conforme detalhado adiante foram selecionados bens arqueológicos categorizados como naufrágios nos municípios de Vila Velha, Guanabara, Iriiri e Anchieta, no litoral do Espírito Santo, ou seja, nas proximidades do compartimento 5.

madras com base em bens semelhantes que possuem informações sobre suas áreas. As fontes utilizadas nesse processo foram adicionadas a planilha do Apêndice N.

Como importante recurso de acesso às informações básicas, utilizou-se os levantamentos de sítios arqueológicos da bacia do rio Doce, realizados quando dos trabalhos de campo e gabinete para a construção da Linha Base e Diagnóstico dos Danos ao Patrimônio Arqueológico decorrente do rompimento da barragem de Fundão (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f).

Após a construção dessa listagem preliminar, com 212 sítios, passou-se à seleção dos bens arqueológicos prioritários para a recepção das ações compensatórias, de forma a totalizar os m² de perdas. Dessa forma, com especial atenção para a seleção de bens de forma equilibrada em todos os compartimentos atingidos, chegou-se a um total de 53 bens arqueológicos, apresentados nas Tabela 86 e Tabela 87. A Tabela 88 sintetiza os quantitativos relativos aos bens escolhidos para compensação.

Tabela 86 – Bens arqueológicos localizados em ambiente terrestre, em outros locais da Bacia do rio Doce que não foram atingidos pelo desastre, e que possuem área que pode ser alvo das ações de compensação.

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Área total do bem (m ²), área para compensação (LB)	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Área compensada ponderada pelo fator
1	1	Ponte Nova/ MG	Bom Jardim ou Carioca	Lito-cerâmico	15.000,00	2	30.000,00
1	2	Rio Doce/ MG	Pasto do Quilombo	Histórico	5.000,00	1,5	7.500,00
1	3	Mariana/ MG	Mirandinha	Registro rupestre	63,00	1,5	94,50
1	4	Mariana/ MG	Fazenda do Tesoureiro	Histórico	262.200,00	2	524.400,00
1	5	Mariana/ MG	Conjunto de Mineração do Divino	Histórico	301.600,00	2	603.200,00
1	6	Ponte Nova/ MG	Fazenda Camponesa	Histórico	147.920,00	2	295.840,00
1	7	Mariana/ MG	Alicerce de Pedra - João Carneiro	Histórico	5.000,00	1,5	7.500,00
1	8	Mariana/ MG	Canal da Fazenda do Morro	Histórico	400,00	1	400,00
1	9	Mariana/ MG	Canal de Adução Mirandinha	Histórico	100,00	1	100,00
1	10	Mariana/ MG	Canela 1	Histórico	5.000,00	1,5	7.500,00
1	11	Mariana/ MG	Conjunto Ruínas Casarões Sec XIX	Histórico	5.000,00	1	5.000,00
1	12	Mariana/ MG	Fazenda Córrego do Fraga I	Histórico	5.000,00	1,5	7.500,00
1	13	Mariana/ MG	Fazenda Córrego do Fraga II	Histórico	5.000,00	1,5	7.500,00
1	31	Mariana/ MG	Garimpo II	Histórico	900,00	1,5	1.350,00
1	33	Mariana/ MG	Jardim do Antigo Palácio Episcopal	Histórico	5000	1	5.000,00
2	1	Sem Peixe/ MG	Iris	Lito-cerâmico	47.109,00	2	94.218,00

Compartmento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Área compensada ponderada pelo fator
2	2	Alpercata/ MG	Sula	Lito-cerâmico	6.660,00	2	13.320,00
2	3	Alpercata/ MG	Paivas	Lito-cerâmico	6.014,00	2	12.028,00
2	4	Governador Valadares/ MG	Ibituruna	Lito-cerâmico	44.323,00	2	88.646,00
2	5	Itueta/ MG	Estrela do Norte	Lítico	12.500,00	1,5	18.750,00
2	6	Conselheiro Pena/ MG	Boa Vista II	Lito-cerâmico	8.964,00	2	17.928,00
2	7	Conselheiro Pena/ MG	Estela III	Lítico	3.720,00	1,5	5.580,00
2	8	Rio Casca/ MG	Córrego Preto	Lito-cerâmico	2.310,00	2	4.620,00
2	9	Sobralia/ MG	Córrego do Bugre	Lito-cerâmico	7.200,00	2	14.400,00
2	10	Alpercata/ MG	Fazenda Bela Vista	Lito-cerâmico	2.030,00	2	4.060,00
2	11	Alpercata/ MG	Juazeiro	Lito-cerâmico	2.970,00	2	5.940,00
2	12	Tumiritinga/ MG	Terra Prometida II	Lito-cerâmico	598,00	2	1.196,00
2	14	Tumiritinga/ MG	Rio 19	Lito-cerâmico	7.500,00	2	15.000,00
2	15	Galileia/ MG	Jerri	Lítico	2.400,00	2	4.800,00
2	16	São Domingos do Prata/ MG	São Domingos do Prata – 2	Histórico	550,00	1	550,00
2	17	Periquito/ MG	Base de Ponte e Estrutura Metálica de Ponte Ferroviária em Periquito	Histórico	110,00	2	220,00
2	18	Aimorés/ MG	Quartel da Ilha do Lorena	Histórico	585,00	2	1.170,00
3	1	Linhares/ ES	Lagoa Bonita 22	Sambaqui/ Acampamento litorâneo	1.100,00	1,5	1.650,00
3	2	Linhares/ ES	Lagoa Bonita 24 e 25	Sambaqui/ Acampamento litorâneo	1.100,00	1,5	1.650,00
3	3	Colatina/ ES	Barra da Liberdade	Lito-cerâmico	1.440,00	1,5	2.160,00
3	4	Colatina/ ES	Parteli	Lito-cerâmico	17.845,00	2	35.690,00
3	5	Marilândia/ ES	Marilândia	Lito-cerâmico	448,00	1,5	672,00
3	6	Linhares/ ES	Amargoso 1	Cerâmico	20.000,00	2	40.000,00

Compartmento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Área compensada ponderada pelo fator
3	7	Marilândia/ES	Feijoal	Lítico	19.300,00	1,5	28.950,00
3	8	Linhares/ES	Linhares Agroindustrial 08/LASA 8	Lítico	19.300,00	1,5	28.950,00
3	9	Linhares/ES	Linhares Agroindustrial 09/LASA 9	Lítico	19.300,00	1,5	28.950,00
3	10	Linhares/ES	Linhares Agroindustrial 01/LASA 1	Lítico	19.300,00	1,5	28.950,00
3	11	Aimorés/ MG	Ji Mirim	Cerâmico	59.500,00	2	119.000,00
3	12	Colatina/ ES	Quitungo	Histórico	22.000,00	2	44.000,00
3	13	Colatina/ ES	São João Grande	Cerâmico	59.500,00	2	119.000,00
3	14	Linhares/ ES	Lagoa Bonita 18	Sambaqui/ Acampamento litorâneo	1.100,00	1,5	1.650,00
3	15	Linhares/ ES	Linhares Agroindustrial 06/LASA 6	Cerâmico	20.000,00	2	40.000,00
3	16	Linhares/ ES	Alvarenga	Histórico	5.450,00	1,5	8.175,00
3	34	Linhares/ ES	Barro Novo 2	Cerâmico	20.000,00	2	40.000,00
TOTAL					1.225.409,00		2.374.757,50

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 87 – Bens arqueológicos localizados em ambiente aquático, em outros locais da Bacia do rio Doce que não foram atingidos pelo desastre, e que possuem área que pode ser alvo das ações de compensação.

Compartmento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Área total do bem (m²), ou seja, área para compensação	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Área ponderada pelo fator de Sig. Científica e Patrimonial
5	1	Vila Velha/ES	Santa Maria	Histórico	1050	1,5	1.575,00
5	2	Guanabara/ES	Guanabara	Histórico	1050	1	1.050,00
5	3	Iriri/ES	Paquetá	Histórico	2400	1	2.400,00
5	4	Anchieta/ES	Sítio Arqueológico Caldeira	Histórico	1050	1,5	1.575,00
TOTAL					5.550		6.600

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 88 – Quantitativo de bens arqueológicos que possuem áreas que podem ser alvo das ações de compensação.

Compartimento	Bens arqueológicos afetados (área do desastre) que possuem áreas propícias para as ações de compensação	Bens arqueológicos não afetados, inseridos na Bacia do rio Doce, (loais não atingidos pelo desastre) selecionados para as ações de compensação
1	15	15
2	12	17
3	5	17
5	0	4
Total	32	53

Fonte: Lactec, 2021.

Assim, conclui-se que, considerando os bens arqueológicos alvo de danos que possuem áreas apropriadas para as ações compensatórias (32) e os bens selecionados dentre os disponíveis para compensação na bacia do rio Doce e faixa litorânea capixaba (53), tem-se 85 bens selecionados para o desenvolvimento das ações compensatórias.

- *Equivalência dos bens arqueológicos alvo de compensação*

Antes do detalhamento dos cálculos realizados para a elaboração da curva de compensação, explana-se sobre a equivalência adotada para os bens arqueológicos.

A equivalência reflete o quanto um serviço e/ou recurso ambiental recuperado e/ou compensado é semelhante ao serviço e/ou recurso ambiental existente antes do desastre, isto é, que foi perdido devido ao evento.

Para os bens arqueológicos, a equivalência adotada entre os bens perdidos e os bens compensados é expressa pela ponderação realizada pelo fator de significância científica e patrimonial, sendo que este fator é mensurado separadamente para cada um dos bens, tanto na etapa de perda, quanto na etapa de compensação, traduzindo a importância de cada metro quadrado perdido e compensado. Assim, a equivalência adotada para este ambiente é individual para cada bem.

Diante do exposto, entende-se que a equivalência estabelecida em relação aos serviços patrimoniais perdidos com o desastre (herança, educação, informação/conhecimento, fruição, dentre outros), e aqueles a serem prestados à sociedade pela compensação, apresentam a equivalência como preconizada pela legislação. Como mencionado, a equivalência é devidamente lastreada por fator de ponderação calcado em critérios de significância científica e patrimonial, e também são aplicadas ao as áreas alvo do conjunto de ações compensatórias indicadas adiante neste documento, que inclui ações/ programas de médio e longo prazo a fim de garantir benefícios presentes e perpétuos.

O detalhamento da construção e aplicação do fator de significância científica e patrimonial já foi apresentado no item 4.7.1.3, cujo método aplicado na etapa de compensação é exatamente o mesmo. Atribui-se para cada bem o peso para significância científica e o peso da significância patrimonial, que são somados e enquadrados no fator de significância científica e patrimonial unificado, conforme escala já apresentada.

As tabelas apresentadas anteriormente mostram a coluna de *fator de significância científica e patrimonial como equivalência*. A fim de tornar mais clara a leitura e a compreensão da equivalência,

utiliza-se como exemplo o bem arqueológico Pasto do Quilombo localizado no município Rio Doce, em Minas Gerais, categorizado como histórico. Este bem possui originalmente 5.000,00 m², no entanto, devido a sua importância científica e patrimonial, cujo fator é 1,5, ao investir em ações de compensação nesta área, a área final a ser computada como compensada neste bem é 7.500,00 m², pois cada m² equivale a 1,5 refletindo a importância desse ganho patrimonial fazendo a metragem valer mais que 1.

Isto posto, todas as áreas de todos os bens selecionados para a compensação são contabilizadas, após a sua ponderação pelo fator de significância científica e patrimonial. Os gráficos das Figura 90, Figura 91 e Figura 92 mostram as áreas originais e as áreas ponderadas pelo fator para a compensação.

Figura 90 – Área para compensação nos bens afetados com áreas remanescentes aptas a receber ações de compensação, área total original e ponderada pelo fator



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 91 – Área para compensação nos bens arqueológicos em outros locais na bacia do rio Doce, ambiente terrestre, área total original e ponderada pelo fator



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 92 – Área para compensação nos bens arqueológicos em outros locais na bacia do rio Doce, ambiente aquático, área total original e ponderada pelo fator



Fonte: Lactec, 2021.

- *Cálculo para construção das curvas de compensação dos bens arqueológicos afetados, mas com áreas remanescentes que podem ser alvo de compensação*

Conforme já apontado anteriormente, as áreas para receber compensação foram subdivididas em dois grupos, os bens afetados no local do desastre e que possuem áreas remanescentes que podem receber ações, e os bens localizados em outros locais na bacia do rio Doce que não foram afetados pelo evento, sendo que nesse grupo separa-se os bens em ambiente terrestre e os bens em ambiente aquático. A construção da curva de compensação foi feita separadamente por grupo, e por isso são apresentadas aqui respeitando essa segmentação.

Importante antecipar algumas informações relevantes para os cálculos aqui expostos. É sabido que as ações de compensação quando executadas, não serão realizadas todas de uma única vez e em um único ano, pois tratam-se de projetos cuja duração prevista é de 5 anos para algumas ações e outras serão contínuas para gerarem benefícios perpétuos, dado que a perda é perpétua. Logo, sabendo que a perda dos bens arqueológicos ocorreu de forma imediata em 2015, mas as ações de compensação (se efetivadas) iniciariam em 2022, com previsão de término para parte das ações em 2026 (anos determinados e considerados para fins de cálculo no método de valoração), verifica-se que a sociedade aguardou 6 anos para iniciar a compensação e mais 5 para obter todos os recursos compensados, resultando em um período total de 11 anos de espera. Esse tempo precisa ser considerado na curva de compensação, ou seja, esses valores precisam ser descontados no tempo a valor presente de 2015. Além disso, a execução das ações compensatórias será feita obedecendo uma taxa média de execução do projeto de 20% ao ano, isso significa que a cada ano 20% da área a ser compensada de fato é contabilizada como benefício dado a sociedade. A Tabela 89 resume as informações aqui fornecidas.

Tabela 89 – Informações básicas para a construção da curva de compensação dos bens arqueológicos que possuem áreas que podem ser alvo das ações de compensação.

Área total a ser compensada ponderada pelo fator (m ²)	1.689.226,85
Ano de início das ações compensatórias	2022
Ano de conclusão das ações compensatórias	2026
Tempo de duração dos projetos compensatórios	5 anos
Taxa de execução anual dos projetos compensatórios	20% a.a.
Taxa de desconto social	8% a.a.

Fonte: Lactec, 2021.

O cálculo da curva de compensação para esses bens afetados respeitou a mesma segmentação feita na perda, que segrega pelo dano mais representativo. Assim, tem-se a seguinte subdivisão (Tabela 90).

Tabela 90 – Área a ser compensada dos bens arqueológicos que possuem áreas remanescentes, subdividido pelos danos mais representativos.

Área a ser compensada ponderada pelo fator nos bens que sofreram soterramento (m ²)	625.759,00
Área a ser compensada ponderada pelo fator nos bens que sofreram perturbação de camadas sedimentares (m ²)	1.060.511,00
Área a ser compensada ponderada pelo fator nos bens que sofreram (m ²) aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	2.956
Área total a ser compensada ponderada pelo fator (m ²)	1.689.226,85

Fonte: Lactec, 2021.

Cada uma dessas áreas compensadas foi contabilizada respeitando os 20% a.a. de avanço dos projetos compensatórios, logo tem-se a seguinte distribuição de ganho de área em m² no tempo (Tabela 91).

Tabela 91 – Ganho anual em área compensada dos bens arqueológicos que possuem áreas remanescentes, subdividido pelos danos mais representativos.

Grupo de dano: Soterramento		Grupo de dano: Perturbação		Grupo de dano: Aceleração	
Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ano	Área compensada no ano (m ²)
2022	125.151,8	2022	212.102,2	2022	591,2
2023	250.303,6	2023	424.204,4	2023	1182,4
2024	375.455,4	2024	636.306,6	2024	1773,6
2025	500.607,2	2025	848.408,8	2025	2364,8
2026	625.759,0	2026	1.060.511,0	2026	2956

Fonte: Lactec, 2021.

Cada uma dessas séries de ganho de área em m² no tempo, durante 5 anos, foram corrigidas a valor presente (ano 2015) por meio da taxa de desconto social (8% a.a.), e no último ano foi considerado ganho perpétuo por meio da aplicação da fórmula de perpetuidade, isto porque a perda é perpétua no tempo, logo a compensação também deverá gerar benefícios perpétuos que são realizadas por meio de ações compensatórias contínuas que se manterão em execução após 2026. A Tabela 92 mostra o resultado final da área compensada descontada na perpetuidade, por grupo de dano mais significativo.

Tabela 92 – Ganho total na perpetuidade em área compensada dos bens arqueológicos que possuem áreas remanescentes, subdividido pelos danos mais representativos.

Grupo de dano: Soterramento		
Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ganhos em área (m ²) descontado na perpetuidade
2022	125.151,8	73.024,87
2023	250.303,6	135.231,25
2024	375.455,4	187.821,18
2025	500.607,2	231.878,00
2026	625.759,0	3.354.716,36
TOTAL de área m ² (ganho) compensada na perpetuidade		3.982.671,66
Grupo de dano: Perturbação		
Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ganhos em área (m ²) descontado na perpetuidade
2022	212.102,2	123.759,60
2023	424.204,4	229.184,44
2024	636.306,6	318.311,72
2025	848.408,8	392.977,43
2026	1.060.511,0	5.685.437,38
TOTAL de área m ² (ganho) compensada na perpetuidade		6.625.910,964
Grupo de dano: Aceleração		
Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ganhos em área (m ²) descontado na perpetuidade
2022	591,2	344,96
2023	1.182,4	638,81
2024	1.773,6	887,24
2025	2.364,8	1.095,36
2026	2.956	15.847,22
TOTAL de área (ganho) compensada na perpetuidade		18.468,64
TOTAL GERAL de área m² (ganho) compensada na perpetuidade dos três grupos de dano		10.627.051,26

Fonte: Lactec, 2021.

Após a exposição dos cálculos verifica-se que no local do desastre, considerando os 32 bens que possuem áreas remanescentes aptas a receber compensação, as áreas compensadas geram um ganho na perpetuidade de 10.627.051,26 m². No entanto, a dívida total em área (m²) descontada calculada na etapa de perda é de 25.783.612,50 m². Ao deduzir o ganho já obtido na área do desastre, restam ainda 15.156.561,24 m² de área para compensar, que foram buscadas em outros locais, não atingidos pelo desastre, na bacia do rio Doce.

- *Cálculo para construção das curvas de compensação dos bens arqueológicos localizados na bacia do rio doce, em áreas não atingidas pelo desastre, em ambiente terrestre*

Conforme já foi explanado, foram selecionados 49 bens em ambiente terrestre para serem alvo das ações de compensação. Para cada um desses bens foi atribuído o peso de fator de significância científica e patrimonial, e foram ponderadas suas respectivas áreas. As informações básicas consideradas

para o cálculo são as mesmas já apontadas no item anterior, mudando apenas o quantitativo de área inicial, conforme mostra a Tabela 93.

Tabela 93 – Informações básicas para a construção da curva de compensação dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.

Área total a ser compensada ponderada pelo fator (m ²)	2.374.757,5
Ano de início das ações compensatórias	2022
Ano de conclusão das ações compensatórias	2026
Tempo de duração dos projetos compensatórios	5 anos
Taxa de execução anual dos projetos compensatórios	20% a.a.
Taxa de desconto social	8% a.a.

Fonte: Lactec, 2021.

Do mesmo modo como feito anteriormente, cada uma dessas áreas compensadas foi contabilizada respeitando os 20% a.a. de avanço dos projetos compensatórios, a Tabela 94 mostra a distribuição de ganho de área em m² no tempo.

Tabela 94 – Ganho anual em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.

Ano	Área compensada no ano (m ²)
2022	474.951,5
2023	949.903,0
2024	1.424.854,5
2025	1.899.806,0
2026	2.374.757,5

Fonte: Lactec, 2021.

Esta série de ganho de área em m² no tempo, durante 5 anos, foi corrigida a valor presente (ano 2015) por meio da taxa de desconto social (8% a.a.), e no último ano foi considerado ganho perpétuo (fórmula de perpetuidade), considerando a realização de ações compensatórias contínuas que se manterão em execução após 2026. A Tabela 95 mostra o resultado final da área compensada descontada na perpetuidade.

Tabela 95 – Ganho total na perpetuidade em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.

Grupo de dano: Soterramento		
Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ganhos em área (m ²) descontado na perpetuidade
2022	474.951,5	277.129,64
2023	949.903,0	513.203,03
2024	1.424.854,5	712.781,99
2025	1.899.806,0	879.977,77
2026	2.374.757,5	12.731.159,84
TOTAL de área m² (ganho) compensada na perpetuidade		15.114.252,27

Fonte: Lactec, 2021.

Considerando os 49 bens selecionados em outros locais da bacia do rio Doce, em ambiente terrestre, as áreas compensadas geram um ganho na perpetuidade de 15.114.252,27 m². No entanto, a dívida total em área (m²) descontada calculada na etapa de perda é de 25.783.612,50 m². Ao deduzir o ganho já obtido na área do desastre (10.627.051,26 m²) e o ganho obtido com esses bens selecionados, restam ainda 42.308,97 m² de área descontada para compensar, que foram buscadas em ambiente aquático, conforme será exposto no próximo item.

- *Cálculo para construção das curvas de compensação dos bens arqueológicos localizados na bacia do rio doce, em áreas não atingidas pelo desastre, em ambiente aquático*

Foram selecionados 04 bens em ambiente aquático para serem alvo das ações de compensação. Do mesmo modo como feito nos anteriores esses bens também tiveram suas áreas ponderadas pelo fator de significância científica e patrimonial. As informações básicas consideradas para o cálculo são as mesmas já apontadas, mudando apenas o quantitativo de área inicial, conforme mostra a Tabela 96.

Tabela 96 – Informações básicas para a construção da curva de compensação dos bens arqueológicos em ambiente aquático alvo das ações de compensação.

Área total a ser compensada ponderada pelo fator (m ²)	6.600,0
Ano de início das ações compensatórias	2022
Ano de conclusão das ações compensatório	2026
Tempo de duração dos projetos compensatórios	5 anos
Taxa de execução anual dos projetos compensatórios	20% a.a.
Taxa de desconto social	8% a.a.

Fonte: Institutos Lactec (2020).

Cada uma dessas áreas compensadas foi contabilizada respeitando os 20% a.a. de avanço dos projetos compensatórios, a Tabela 97 mostra a distribuição de ganho de área em m² no tempo.

Tabela 97 – Ganho anual em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente terrestre alvo das ações de compensação.

Ano	Área compensada no ano (m ²)
2022	1.320,0
2023	2.640,0
2024	3.960,0
2025	5.280,0
2026	6.600,0

Fonte: Lactec, 2021.

Esta série de ganho de área em m² foi corrigida a valor presente (ano 2015) por meio da taxa de desconto social (8% ao ano), e no último ano foi considerado ganho perpétuo (fórmula de perpetuidade), considerando a realização de ações compensatórias contínuas após 2026. A Tabela 98 mostra o resultado final da área compensada descontada na perpetuidade.

Tabela 98 – Ganho total na perpetuidade em área compensada dos bens arqueológicos em ambiente aquático alvo das ações de compensação.

Grupo de dano: Soterramento		
Ano	Área compensada no ano (m ²)	Ganhos em área (m ²) descontado na perpetuidade
2022	1.320,0	770,21
2023	2.640,0	1.426,31
2024	3.960,0	1.980,99
2025	5.280,0	2.445,66
2026	6.600,0	35.382,84
TOTAL de área m² (ganho) compensada na perpetuidade		42.006,00

Fonte: Lactec, 2021.

Considerando os 4 bens selecionados em outros locais da bacia do rio Doce, em ambiente aquático, as áreas compensadas geram um ganho na perpetuidade de 42.006,00 m². Assim, somando todos os ganhos obtidos nos três grupos, tem-se um valor de ganho total compensado na perpetuidade de 25.783.309,53 m² após ações de compensação serem feitas em um total de 85 bens. Considerando que a dívida total é de 25.783.612,50 m², percebe-se que ainda faltam 302,97 m² de área descontada para compensar, no entanto, ao retirar a perpetuidade desse valor, ele representa apenas 24,24 m² valor considerado não significativo e desconsiderado do cálculo para fins de arredondamento.

Nos próximos itens serão apresentadas detalhadamente a tipologia dos bens selecionados para a compensação e as ações compensatórias consideradas.

- *Tipologia de bens escolhidos*

Relembrando, considerando os bens arqueológicos alvo de danos que possuem áreas apropriadas para as ações compensatórias (32) com os bens selecionados dentre os disponíveis para compensação na bacia do rio Doce e faixa litorânea capixaba (53), tem-se 85 bens selecionados para o desenvolvimento das ações compensatórias. Esses bens foram agrupados em dois conjuntos, a fim de padronizar, por grupo, os protocolos de ações compensatórias, conforme segue:

Grupo 1: bens inseridos nos compartimentos 1, 2 e 3, caracterizados por sítios arqueológicos pré-coloniais (sambaquis, sítios com registros rupestres, líticos, lito-cerâmicos e cerâmicos), sítios arqueológicos históricos e sítios históricos de interesse arqueológico. Ainda que existam distinções entre esses bens, no que concerne as suas tipologias, cronologias e formas de implantação na paisagem, foi possível estabelecer um protocolo padrão de pesquisa a ser adotado, detalhado mais adiante. Caberá aos profissionais responsáveis pelo desenvolvimento das ações estarem atentos às características específicas de cada um dos bens a serem alvo de pesquisas, mas seguindo os processos básicos listados;

Grupo 2: bens inseridos nas proximidades do Compartimento 5, caracterizados como naufrágios do período histórico (ambiente aquático). Os bens arqueológicos que são sítios de naufrágios próximos a costa capixaba foram, conforme já mostrado, mensurados separadamente no âmbito desta valoração, sendo elaborado protocolo de ações diferente daquele proposto para os bens que se encontram em ambiente terrestre, isto porque os custos para ações compensatórias destinadas a esses bens são significativamente maiores, o que impede que eles sejam contabilizados junto com os

bens em ambiente terrestre. Importante ressaltar que os sítios de naufrágios afetados pelo desastre e identificados durante a etapa de diagnóstico e localizados na costa capixaba defronte a municípios que foram impactados pela chegada da pluma formada pelo rejeito/solo/mistura oriundos do rompimento da barragem de Fundão, tiveram 100% de sua área afetada, impossibilitando, com isso, que quaisquer tipos de ações compensatórias possam ser realizadas nesses bens. Nos levantamentos efetuados buscou-se bens com características similares, mas a falta de informações acerca da localização dos sítios de naufrágios demandou a indicação de bens arqueológicos subaquáticos nos municípios de Vila Velha, Guanabara, Iriri e Anchieta, todos localizados no litoral do Espírito Santo.

As categorias e quantitativos dos bens indicados para compensação no âmbito dos grupos estabelecidos estão detalhadas na Tabela 99.

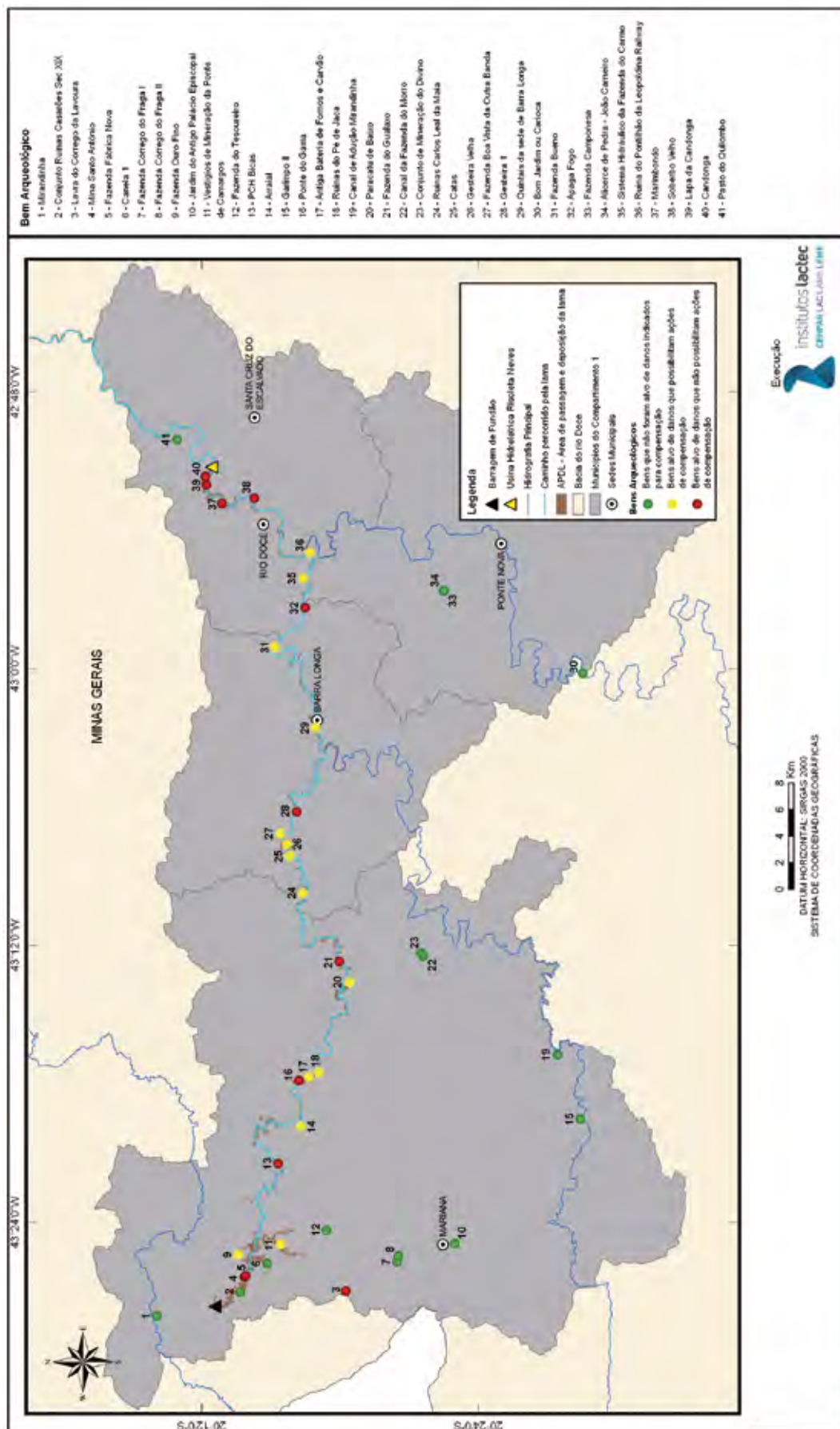
Tabela 99 – Categorias e quantitativos dos bens selecionados para compensação

Grupo/ Categoria do bem arqueológico	Bens arqueológicos afetados que possuem áreas propícias para as ações de compensação	Bens arqueológicos não afetados, inseridos na bacia do rio doce, selecionados para as ações de compensação
Grupo 1 – Sítios líticos	2	07
Grupo 1 – Sítios sambaquis	0	03
Grupo 1 – Sítios de registros rupestre	0	01
Grupo 1 – Sítios cerâmicos ou lito-cerâmicos	12	20
Grupo 1 – Sítios históricos	18	18
Grupo 2 – Sítios de naufrágio do período histórico	0	04
Total	32	53

Fonte: Lactec, 2021.

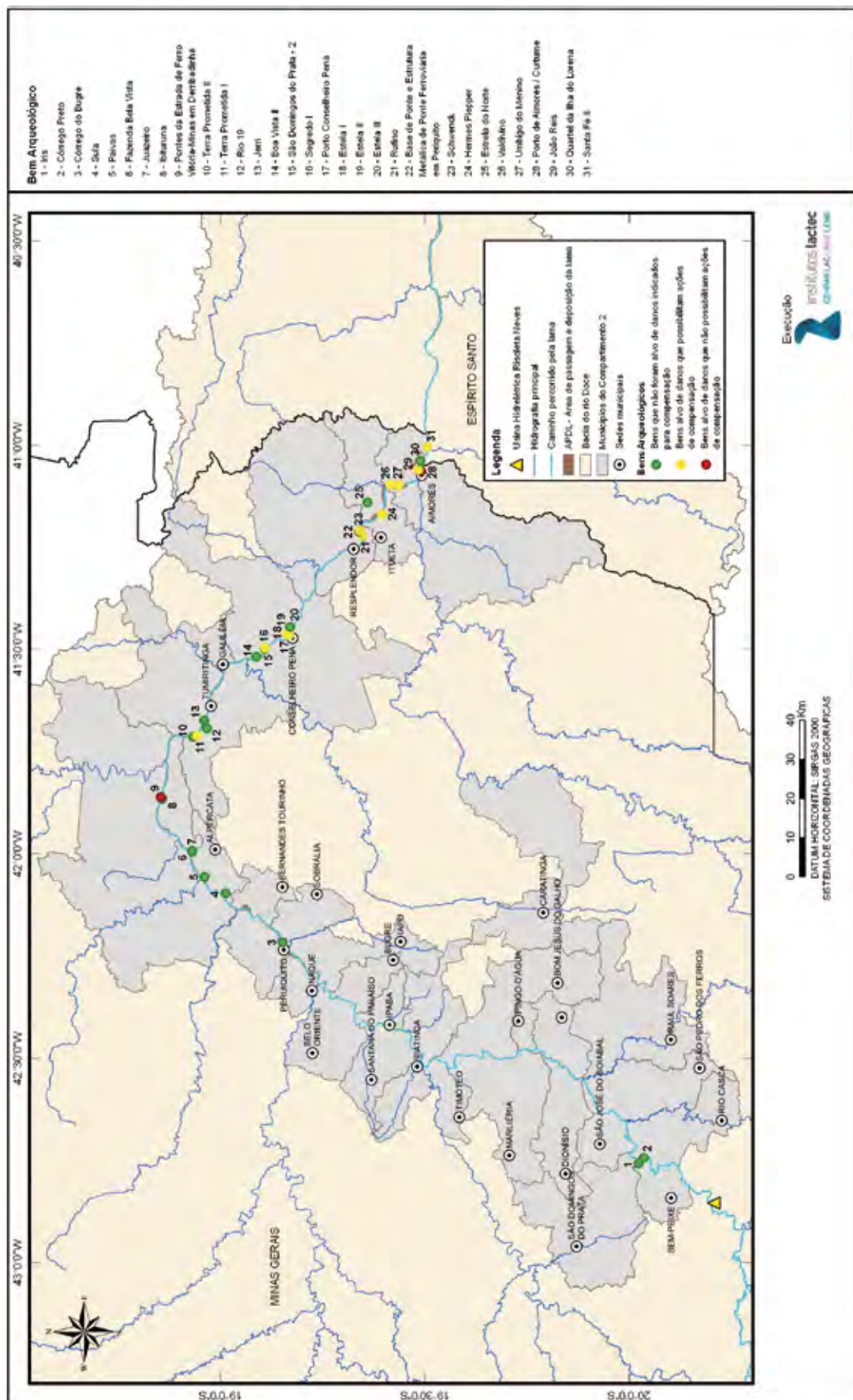
As Figura 93, Figura 94, Figura 95 e Figura 96 exibem a localização dos bens considerados na valoração, indicando-se os bens que estão sendo selecionados para as ações compensatórias.

Figura 93 – Localização dos bens afetados considerados na valoração para receber ações compensatórias em suas áreas restantes; bens afetados que não receberão ações compensatórias em suas áreas e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento I.



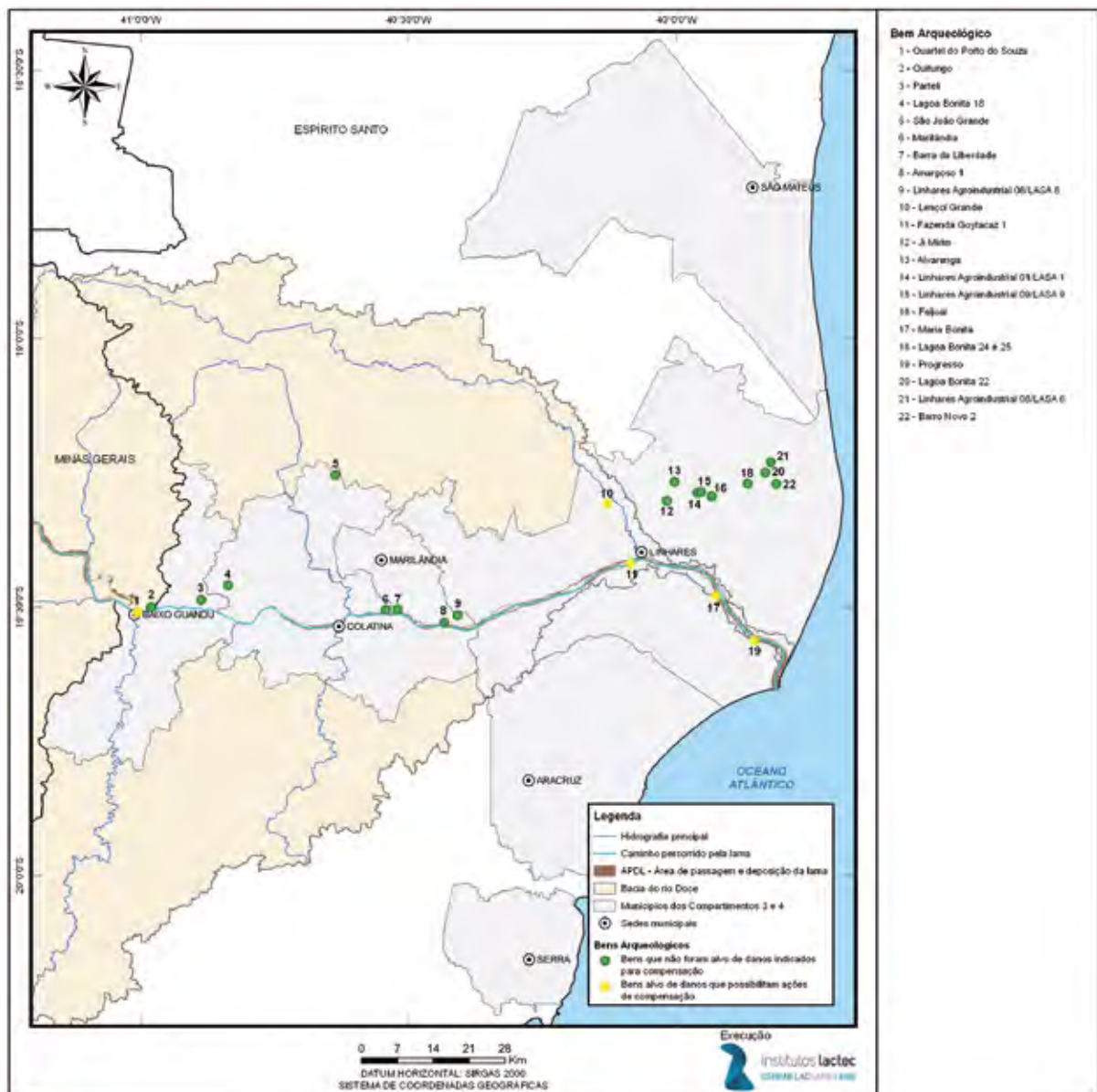
Fonte: Lactec, 2021.

Figura 94 – Localização dos bens afetados considerados na valoração para receber ações compensatórias em suas áreas restantes; bens afetados que não receberão ações compensatórias em suas áreas e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento II.



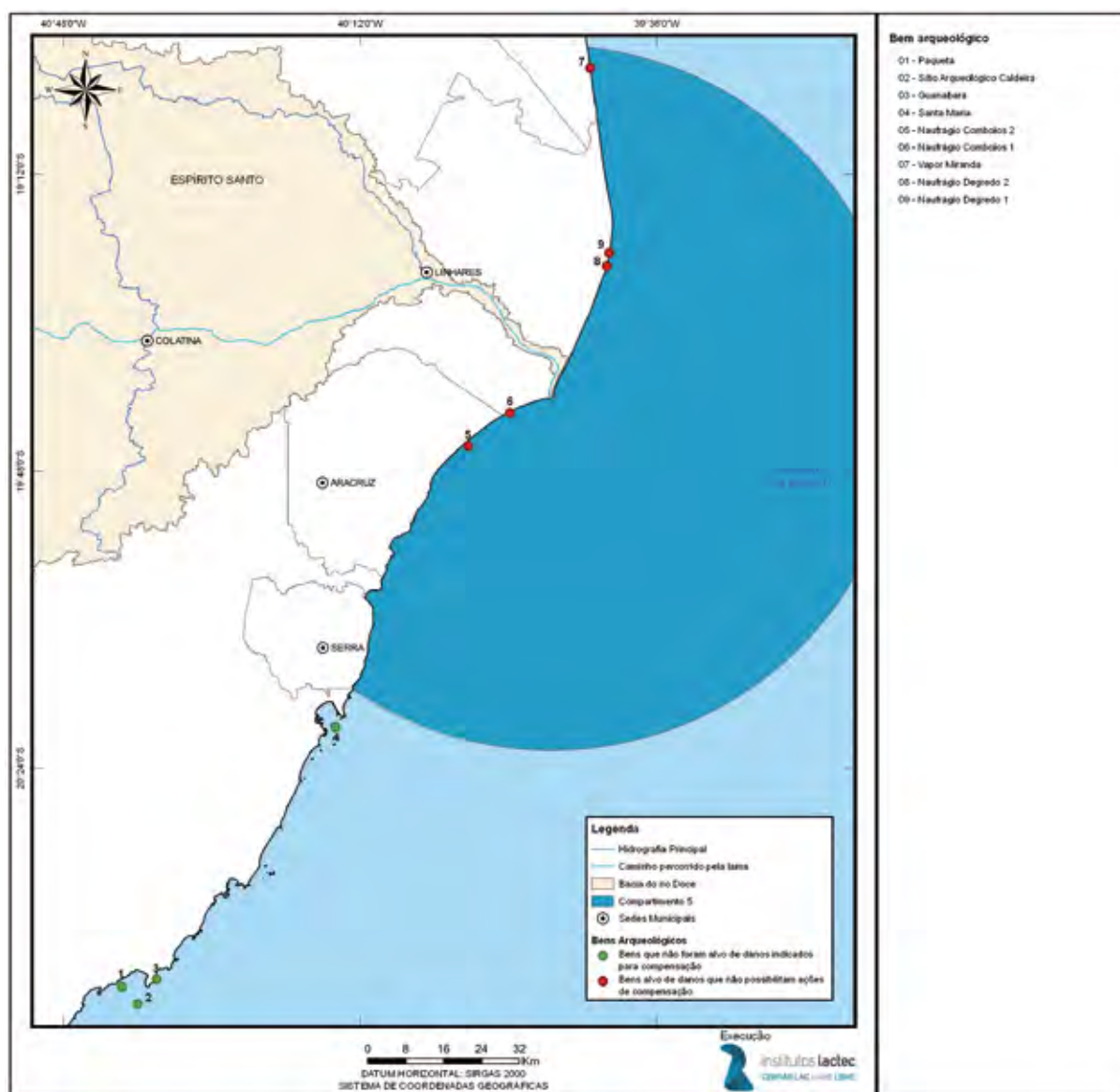
Fonte: Lactec, 2021.

Figura 95 – Localização dos bens afetados considerados na valoração para receber ações compensatórias em suas áreas restantes e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento III.



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 96 – Localização dos bens afetados considerados na valoração que não receberão ações compensatórias em suas áreas e bens não afetados indicados para receber ações compensatórias – Compartimento V.



Fonte: Lactec, 2021.

4.7.1.7 Detalhamento das Ações Compensatórias para os Danos Causados aos Bens Arqueológicos

Antes de expor as ações compensatórias selecionadas, cabe ressaltar que no processo de decisão, as ações escolhidas são aquelas que não causam outros efeitos adversos sobre os bens, ou seja, que não haja impactos negativos decorrentes da execução desses projetos. Tal condição é uma exigência metodológica básica, a fim de que não haja perdas geradas para a sociedade no processo de compensação.

A indicação das ações (protocolos) a serem adotadas nas áreas alvo de compensação foi construída distintamente para bens localizados em ambiente terrestre e ambiente aquático, devido a especificidade necessária de cada meio. Assim, os bens terrestres incluem também, no caso dos protocolos, os bens afetados no local do desastre e com áreas remanescentes aptas a receber ações. Assim a descrição dos protocolos será feita separadamente pelo ambiente considerado.

Para as ações propostas para ambos os grupos foram considerados alguns fatores básicos, como sua viabilidade técnica, isto é, serem passíveis de implementação nos locais escolhidos. Da mesma forma, foi considerada a legislação pertinente, que em sua redação atesta a condição dos bens arqueológicos como bens da União e sobre os quais se deve zelar, premissa obrigatória para ações em qualquer bem arqueológico no território brasileiro, independente do contexto (emerso, parcialmente submerso ou submerso).

As ações escolhidas, e adiante enumeradas por meio de protocolos, não fogem à realidade do que é rotineiramente realizado em uma pesquisa arqueológica, pautando-se pela premissa da preservação da matriz arqueológica, finita e não renovável por natureza. Dessa forma, prima-se por uma pesquisa que possa gerar serviços prestados pelo patrimônio arqueológico à sociedade, mas com ações interventivas de cunho amostral.

Assim, tendo em vista a necessidade da indicação de ações compensatórias em decorrência dos danos advindos do rompimento da barragem de Fundão, e respectiva valoração econômica parametrizada por meio da métrica selecionada para perdas (neste caso, m²), cabe explicitar o que se entende por pesquisa arqueológica. Nesse sentido, o valor m² de pesquisa deverá ser obtido a partir da somatória do conjunto de ações necessárias requeridas pelo processo de estudo, envolvendo atividades relevantes, não apenas para a captação de dados, mas para a adoção de medidas de proteção, preservação, socialização dos conhecimentos gerados e a musealização dos bens.

Nessa perspectiva, um aspecto que não pode ser negligenciado remete à natureza finita e não renovável dos recursos arqueológicos, já apontada anteriormente. Assim, toda e qualquer intervenção no bem arqueológico, mesmo que qualificada e orientada por problemáticas bem delineadas, provoca a modificação/alteração da matriz e contexto arqueológico, ou seja, sua destruição e, consequentemente, perda de informação em definitivo. Assim, pesquisas de campo realizadas nos moldes contemporâneos vem se pautando por uma postura ética e responsável em relação a tais recursos, envolvendo uma abordagem eminentemente conservativa, para que parte do contexto permaneça preservado para as gerações futuras num amplo senso (WILDESEN, 1980; FOWLER, 1982; KING, 1998, etc.).

As intervenções de subsuperfície, por exemplo, quando requeridas, devem ser pontuais, devidamente registradas e amparadas em rigorosa metodologia de escavação que busca preservar artefatos

e a cognoscibilidade sobre os mesmos e sobre a própria ação desenvolvida no sítio, publicizando-a na literatura especializada e nas bases de dados do IPHAN, seguindo a legislação competente. Ações contínuas, ou seja, caracterizadas por sua perpetuidade, também foram indicadas no âmbito da salvaguarda e da comunicação do patrimônio arqueológico.

Igualmente, dentre as ações escolhidas, houve o cuidado de se indicar processos que não gerem consequências negativas ao meio ambiente, patrimônio e às comunidades, ou seja, as ações compensatórias que não desencadeiem outros danos ou que potencialize os já ocorridos.

Apresentam-se, a seguir, os dois protocolos de pesquisa previstos para as ações a serem tomadas nos bens localizados no ambiente terrestre e no ambiente aquático.

- *Protocolo para ações compensatórias nos bens alvo de compensação inseridos em ambiente terrestre*

São apontados a seguir elementos a respeito do conjunto de ações e procedimentos a serem considerados nas pesquisas desenvolvidas nos bens arqueológicos localizados em ambiente terrestre, julgando-se desnecessário apresentar em detalhe métodos e técnicas há muito consagradas pela disciplina (BICHO, 2006; ORTON, 2009; PLOG, 1976; PLOG et al, 1978). Importante ressaltar que as ações a serem realizadas nos bens, sejam elas de superfície ou de subsuperfície, devem ser feitas em caráter amostral (ARAÚJO, 2001; NANCE e BALL, 1986; ORTON, 2009; PLOG, 1976).

- 1) Em linhas gerais, o primeiro passo envolve o reconhecimento da área e **delimitação do bem em superfície**, que consiste na averiguação e registro sistemático de evidências por meio de prospecções extensivas do tipo varredura (orientadas e/ou de cunho oportunístico), visando à detecção de artefatos, estruturas, bioindicadores, ecofatos e, obviamente, o conhecimento a respeito de seu arranjo espacial e a relação que mantém com a paisagem na qual o conjunto de evidências está circunscrito. Há muito recorrente na arqueologia (TARTARON, 2003, p. 23 e 24), a prospecção extensiva leva à compreensão preliminar quanto ao uso do espaço e paisagem do local (PLOG et al, 1978, p. 385);
- 2) Após a prospecção extensiva, devem ser aplicadas **ações de registro e/ou coleta de evidências em superfície**. Essas ações podem ser efetivadas por meio da coleta ponto a ponto das evidências, ou registro preciso de sua localização, com o auxílio de equipamentos de georreferenciamento, como estação total, por exemplo. Outra possibilidade é o estabelecimento de um grid regular de quadras de coleta de superfície, que devem ser aplicadas de maneira sistemática e orientada, com tamanho e distanciamento específico, ou ainda, em locais que demandam outro tipo de circunscrição, com dimensões e formas particulares, dependendo do contexto e categoria do bem. Sítios históricos que apresentam estruturas preservadas, sejam em cota positiva ou negativa, demandam georreferenciamento de detalhe e intervenções específicas, visando à obtenção de respostas particulares em relação à ocupação. Vestígios apenas mapeados e não coletados, devem ser fotografados e descritos em detalhe;
- 3) Em sinergia com as ações anteriores, que oportunizam a compreensão do espaço do bem em sua “horizontalidade”, também devem ser realizadas **intervenções sistemáticas em profundidade** (tradagens, poços-teste, sondagens - furos com pelo menos 0,30 m de diâmetro e profundidade variável), sempre que as condições do solo permitirem, visando à compreen-

são estratigráfica do bem, ou seja, em sua “verticalidade”. Essas intervenções podem, ou não, estarem associadas aos locais onde foram alocadas as quadras de coletas de superfície ou as coletas ponto a ponto. As intervenções concorrem para a obtenção de informações a respeito da cultura material produzida, utilizada e descartada no local. Da mesma forma, torna-se possível estabelecer com maior acurácia áreas ou zonas dotadas de maior potencial para investigação de detalhe. Em abordagens de subsuperfície, a verificação dos sedimentos escavados, via de regra, por níveis artificiais de 0,10 m para obter confiabilidade na coleta de dados (ARAÚJO, 2001), com o peneiramento dos sedimentos. Cabe destacar que sugere-se aos pesquisadores empregarem estratégias de amostragem probabilística (BINFORD, 1964; PLOG, 1976; READMAN, 1987) visando à obtenção de amostras para caracterização da(s) ocupação(ões) humana(s) ocorridas na área e sua distribuição espacial, horizontal e verticalmente, informações que irão contribuir na tomada de decisão quanto as etapas de investigação seguintes e decisão a respeito das ações a serem desencadeadas, visando a produção de conhecimento e preservação dos recursos em foco (FLANNERY, 1976, p. 4 a 8; READMAN, 1973);

- 4) Eventualmente podem ser abertas **áreas de escavação** com diferentes tamanhos (mínimo 1 m²) visando conhecer de forma mais detalhada o comportamento estratigráfico do bem, a morfologia das camadas e estruturas, a integridade e preservação do mesmo, além de outros dados a respeito do processo de formação do bem arqueológico. De acordo com o comportamento e características deposicionais observados, as escavações poderão envolver o rebaiamento controlado do terreno ou designs de escavação requeridos em função da geometria de estruturas que se tenciona evidenciar. Caso as escavações identifiquem camadas de ocupação mais preservadas, onde seja possível divisar a ocorrência de estruturas de combustão, devem ser coletadas amostras de carvão para a datação por C14. Isso vale para sítios pré-coloniais líticos, lito-cerâmicos e cerâmicos, sendo que, para o caso de sítios lito-cerâmicos e cerâmicos, mesmo que estruturas de combustão não sejam identificadas, é possível obter a datação de fragmentos cerâmicos por meio da termoluminescência, devendo-se proceder a coleta controlada das amostras. Todas as coletas para datação devem seguir protocolos específicos, evitando ao máximo a contaminação da amostra;
- 5) Todo o processo de pesquisa deve ser acompanhado por uma ampla e padronizada **documentação**, prevendo a utilização de fichas especificamente elaboradas para as atividades, que possibilitem uniformizar os dados coletados em campo, visando que nenhuma informação seja perdida. Todas as atividades realizadas devem contar com fartos registros fotográficos e videográficos, além de croquis e desenhos dos perfis estratigráficos. Concomitantemente, à par da documentação gerada em campo (fichas, croquis, desenhos), todas as etapas de pesquisa devem contar com o registro georreferenciado das intervenções executadas por meio do emprego de instrumentos de precisão como teodolitos, GPSs geodésicos ou estação total. Da mesma forma, deve ser gerado o levantamento topográfico da área do bem arqueológico visando à elaboração da cartografia detalhada do espaço estudado, contendo as intervenções realizadas, evidências arqueológicas identificadas e a presença de estruturas e demais marcadores na paisagem que caracterizam o bem. A cartografia gerada deve conter dados

julgados indispensáveis à compreensão do registro, como locais alvo de intervenção antrópicas, dentre outros, além de ser incrementada com informações de mapas locais e outras bases que possibilitem conhecer o meio físico em que está localizado o sítio arqueológico;

- 6) A pesquisa deve ser orientada por **medidas de conservação**, sendo altamente recomendável a presença de um profissional da área da conservação e restauro já na etapa de planejamento das ações. Este profissional poderá orientar as medidas necessárias para a correta preservação de estruturas e vestígios móveis. Os vestígios arqueológicos coletados devem ser acondicionados em embalagens por proveniência, com etiquetas contendo informações em relação à procedência e nível em que as evidências foram localizadas, categoria do material, entre outros. Todo material exumado deve contar com o devido registro em planta e fotografias exibindo detalhes das peças in situ.
- 7) Na fase pós-campo os materiais coletados passarão por **procedimentos de conservação dos bens arqueológicos móveis**. A metodologia de gerenciamento deverá partir da definição de critérios uniformes de identificação, registro e organização do material arqueológico, conforme a natureza e a peculiaridade de cada acervo, uma vez que os procedimentos de curadoria são diferenciados, levando-se em consideração as matérias-primas e o estado de conservação dos vestígios (de acordo com parâmetros definidos pela SHA, 1993; PEARCE, 1996). Esses procedimentos deverão se pautar na Instrução Normativa IPHAN nº01/2015 e Portaria IPHAN nº 196/16 (IPHAN, 2016). Além dos processos curatoriais e de análise a que os acervos estão destinados, a portaria em questão aponta para o registro de dados em uma ficha específica para cada categoria dos bens arqueológicos, classificados de acordo com sua matéria-prima. Essa ficha contém atributos utilizados nas análises, além de outros tipos de informações relacionados, por exemplo, a sua integridade, localização e dados de acondicionamento. A análise do acervo será desenvolvida de acordo com cada categoria de artefato, dentro dos padrões oferecidos pela literatura disponível (por ex: ANDREFSKY, 1994, 1998; CHMYZ, 1966, ORTON e HUGHES, 2013; RICE, 1987; RYE, 1981; SHEPARD, 1956; BRANCANTE, 1981; ZANETTINI, 2005; SOUZA, 2010);
- 8) Para que os bens indicados para as ações compensatórias possam gerar os serviços requeridos à sociedade, o **monitoramento arqueológico** dos bens deve ser contínuo, ou seja, as ações de monitoramento devem ser perpétuas para que os bens continuem a gerar ganhos para a população. Espera-se que pelo menos semestralmente os bens sejam reavaliados, o que possibilitará o acompanhamento de qualquer alteração ou interferência que o bem esteja sofrendo, visando à aplicação de medidas mitigadoras e corretivas, objetivando a preservação do bem (SEABURY, 1981; VOSS, 2008; WIBERG, 2009);
- 9) Tanto durante o processo de pesquisa de campo, e ao longo das ações de laboratório, quanto durante as ações contínuas de monitoramento, deverá ser desenvolvido um **Programa de Musealização dos Bens Arqueológicos**. Entende-se a musealização como o conjunto de ações de salvaguarda (documentação e conservação) e de comunicação (ações educativas), que estabelecidas de modo equilibrado resultam na preservação dos bens arqueológicos, compreendendo-se a preservação como o uso qualificado do patrimônio cultural (BRUNO,

1996). A musealização se faz necessária para que as informações referentes ao bem cultural e ao seu processo de conservação sejam preservadas e socializadas. Não se trata, por óbvio, na transformação dos bens arqueológicos em museus, mas de, por um lado, documentar as ações deflagradas, que poderão estar disponíveis em uma Plataforma Digital Aberta, e de outro lado promover a sinalização dos bens materiais, com a instalação de painéis, totens multimídia e outros recursos, que permitam à população conhecer a respeito daquele bem cultural.

A sinalização é uma necessidade fundamental e fartamente debatida, documentada e instrumentalizada em diretrizes, tanto do IPHAN, quanto do Ministério do Turismo, havendo, inclusive, manuais de aplicação de comunicação urbana para cidades históricas. Dessa forma, enfatiza-se a necessidade de um conjunto de medidas de proteção do bem a serem adotadas, que integrem no mínimo a aplicação de sinalização orientativa de acordo com os parâmetros fornecidos pelo IPHAN (2019), sendo recomendada, igualmente, a incorporação de placas de cunho informativo a respeito das ações e natureza dos bens em questão (ZANETTINI ARQUEOLOGIA, 2007). É relevante que as informações estabeleçam a mensagem da proteção e conservação do patrimônio arqueológico. O local de implantação da sinalização deve incidir sobre área visível do principal acesso ao bem arqueológico. Da mesma forma, indica-se a aplicação de marcos junto aos limites extremos do bem, e, quando possível e viável, seu cercamento, com o consentimento dos ocupantes e/ou proprietários da área.

- 10) Finalmente, mas não menos importante, o processo de compensação em tela, ao englobar a musealização dos bens, requer um robusto **Programa de Educação Patrimonial**, compreendida como eixo de comunicação museológica, que contemple a formação e capacitação de educadores nos diferentes níveis do ensino, coordenadas por profissionais capacitados, tanto da área do patrimônio cultural (historiadores, antropólogos, arquitetos, arqueólogos e museólogos), quanto por profissionais especialistas em educação, a produção de material didático e paradidático de apoio, o desenvolvimento de oficinas e cursos de formação técnica nas áreas afins (guias de turismo cultural, técnicos conservadores e restauradores), palestras, visitas guiadas, criação de roteiros voltados para a difusão científica e cultural.

Os processos educativos têm como base a mediação das questões locais de pertencimento (IPHAN, 2014), em que a compreensão das coisas pesquisadas é direcionada como parte da herança cultural dos moradores locais. Tais ações devem se pautar nas ações dispostas na Portaria nº 137, de 28 de abril de 2016, que busca *“instituir um conjunto de marcos referenciais para a Educação Patrimonial enquanto prática transversal aos processos de preservação e valorização do patrimônio cultural no âmbito do Iphan”* (IPHAN, 2016b). Para o caso dos bens alvo de danos desencadeados pelo desastre e que dispõe de porções aptas a pesquisa, principalmente os inseridos no Compartimento 1, deve-se considerar que tais contextos podem ser de memória sensível, demandando abordagem distinta e/ou complementar, conforme evidenciam perspectivas teóricas contemporâneas (BEZERRA, 2002; FERNANDES, 2007; CARNEIRO, 2009; FUNARI e CARVALHO, 2009; BASTOS, 2011).

- *Protocolo para ações compensatórias nos bens alvo de compensação inseridos no ambiente aquático*

Os levantamentos voltados ao diagnóstico de danos aos bens arqueológicos em decorrência do rompimento da barragem de Fundão conduziram à identificação de cinco sítios de naufrágios na costa capixaba, encontrando-se as embarcações parcial ou permanentemente em contato com a pluma de rejeitos, sujeitas, portanto, a ação de processos adversos que concorrem para aceleração de degradação dos bens (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f).

Cabe evidenciar que bens de interesse histórico, cultural e arqueológico em meio subaquático encontram amplo respaldo na legislação federal voltada à proteção do patrimônio arqueológico como um todo, bem como na Lei nº 10.166, de 27 de dezembro de 2000, estando, ainda, a pesquisa nesses sítios sujeita as normas específicas estabelecidas pela Marinha do Brasil (NORMAM 10, NORMAM 15).

Para fins de compensação, dentre dezenas de naufrágios ocorridos ao longo de pelo menos dois séculos e apontados na documentação coligida para a costa capixaba, foram selecionados bens em ambientes aquáticos, para os quais se conta com a devida localização georreferenciada.

Tomando como base o conjunto da legislação de proteção e a necessidade de indicação de medidas compensatórias frente aos danos observados, há que se atentar ao fato de que pesquisas arqueológicas em ambiente submerso apresentam especificidades, seja quanto à logística, métodos, técnicas e recursos humanos, exigindo-se, desde levantamentos geofísicos de detalhe, equipes compostas por arqueólogos credenciados em mergulho científico, conservadores, até o envolvimento de especialistas em ambientes marinhos, que permitam a compreensão mais dilatada a respeito dos fatores de degradação aos quais o patrimônio cultural subaquático se viu submetido a partir da chegada da lama ao litoral em novembro de 2015.

Nessa perspectiva, são indicados, a seguir, os procedimentos e ações para a pesquisa arqueológica nos bens alvo de compensação localizados em ambiente aquático:

- 1) O **aprofundamento dos levantamentos bibliográficos** e de dados a respeito dos bens indicados. A pesquisa irá fornecer subsídios e elementos úteis ao processo de documentação, registro, proteção e extroversão dos resultados, sendo recomendado que o acesso aos dados obtidos seja igualmente disponibilizado em plataforma aberta para acesso aos diversos públicos alvo interessados;
- 2) No que tange aos registros de detalhe dos sítios propriamente ditos, constitui o primeiro passo a realização de **levantamentos geofísicos detalhados** por meio da utilização de métodos acústicos próprios ao meio aquático, envolvendo a sonografia (sonar de varredura lateral), batimetria, perfilagem sísmica (SOUZA, 2006; BOWENS, 2009), ou mesmo outras tecnologias que possam ser agregadas a tais levantamentos;
- 3) Os métodos e técnicas requeridos para o **registro sistemático do bem** e geração da cartografia do sítio se assemelham aquelas adotadas em ambiente terrestre, envolvendo o estabelecimento de grid de controle e lançamento georreferenciado das evidências e informações relativas a sua deposição no leito marinho, estado de conservação, dentre outras (BOWENS, 2009; RAMBELLI, 1998, 2002; GREEN, 2004; FRAGA et al, 2013 e UNESCO, 2013);

- 4) Além dos **registros gráficos** requeridos em croquis e plantas, recomenda-se a realização de **registro fotogramétrico** de detalhe dos bens soçobrados, o que permitirá a geração de modelos 3D que irão subsidiar a produção de material técnico, informativo e educativo para fins de extroversão (TORRES, 2016; TORRES, et al., 2017; TORRES et al., 2018, 2019);
- 5) Caso, durante os levantamentos de detalhe, se torne imprescindível à realização de **ações de cunho interventivo** nos bens soçobrados, estas deverão pautar-se em procedimentos estabelecidos pela *Nautical Archaeology Society* (BOWENS, 2009), assim como pela bibliografia disponível (GREEN, 2004; CRONYN, 1990), cabendo registrar que a literatura mais recente aponta como o caminho mais adequado a preservação *in situ* de tais bens, devendo, portanto, ser evitada ao máximo a coleta de partes das embarcações e de artefatos a eles associados (UNESCO, 2017; GUIMARÃES, 2016);
- 6) No caso de serem promovidas coletas de evidências arqueológicas, estas deverão passar por tratamento específico e permanente em **laboratório** para assegurar sua estabilização. Artefatos coletados, de acordo com sua matéria-prima e estado de conservação, exigirão protocolos e procedimentos de curadoria e conservação consolidados, inclusive, sua manutenção em meio líquido, demandando que a instituição de guarda conte com equipamentos e infraestrutura para tal (PEARSON, 1987; BOWENS, 2009, HAMILTON, 1965, 1996, 1999, HAMILTON e SMITH, 2013). Importante ressaltar que os bens arqueológicos móveis exumados durante as pesquisas deverão ser igualmente catalogados e analisados, de acordo com as diretrizes oferecidas pela Portaria Iphan nº. 196/2016 (IPHAN, 2016a), que aponta para o registro em ficha específica cada categoria de bem, de acordo com sua matéria-prima. Essa ficha contém atributos utilizados nas análises, além de outros tipos de informações relacionadas, por exemplo, a sua integridade, localização, e dados de acondicionamento. Da mesma forma, em gabinete se dará a digitalização e sistematização do conjunto de informações obtidas durante os mergulhos.
- 7) Impõe-se a necessidade de instauração de um **programa de monitoramento** contínuo e perpétuo dos bens, visando à compreensão dos processos de degradação e comparação com os bens atingidos diretamente pelo desastre. Devem ser realizadas campanhas periódicas de mergulho para que ações de controle sejam adotadas visando a proteção e preservação, mediante o acompanhamento dos processos de deterioração aos quais o bem está exposto. Para essas ações, além da literatura internacional específica (por ex. BOWENS, 2009), sugere-se a adoção de metodologia análoga aquela adotada pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) para o monitoramento sistemático da embarcação Victory 8B, afundada propositalmente para servir de recife artificial entre as ilhas Rasas e Escalvada, em Guarapari/ES (BASTOS, et al. 2005a, 2005b, 2006a, 2006b, 2006c, 2007a, 2007b, 2007c).
- 8) Dado o conhecimento ainda restrito a respeito do patrimônio cultural subaquático no país, torna-se indispensável em compasso com a legislação, a realização de ações de extroversão dos resultados das pesquisas na forma de um **Programa de Educação Patrimonial** a ser desenvolvido no âmbito do **Programa de Musealização dos Bens Arqueológicos**, de caráter continuado e perpétuo junto às comunidades local, regional e nacional. Ressalta-se, assim,

a necessidade de permanente articulação entre a pesquisa e ações de cunho educativo, devendo as mesmas ser amparadas por recursos pedagógicos e expográficos diferenciados, de modo a ter assegurada a produção de conhecimento, preservação e sua socialização integrada junto aos diversos públicos por meio de maquetes, reconstituições eletrônicas, mostras, publicações, em compasso com a literatura especializada, recomendações internacionais e boas práticas em voga (UNESCO, 2012).

Há que se atentar para o fato de que para qualquer investigação em bens arqueológicos, é exigido a elaboração de projeto de pesquisa e sua submissão ao IPHAN – para fins de obtenção de permissão federal. No caso dos bens do Grupo 2, há ainda que se considerar, também, o envio de projeto à Marinha do Brasil.

4.7.1.8 Tempo de Início e Duração das Ações Compensatórias

As ações compensatórias anteriormente enunciadas deverão ser iniciadas quando os trâmites de análise, aprovação e autorização de pesquisa forem devidamente encaminhados. Dessa forma, prevê-se que o início das ações se dê em janeiro de 2022.

Sendo realizadas de maneira pertinente e fiel aos protocolos criados, estima-se que os benefícios a serem realizados sobre os bens alvo de compensação, no que concerne aos itens de planejamento, execução de ações de campo e de laboratório, levem cerca de 5 anos para serem totalmente realizados, compreendendo-se uma constante de 20% de implementação das ações por ano.

Para além dos processos de curta e média duração explicitados, algumas ações deverão ser contínuas a fim de promover efetivamente um benefício perpétuo à sociedade afetada, da mesma maneira que igualmente perpétuo foi o dano sobre o patrimônio cultural, danificado irreparavelmente.

Dessa forma, o monitoramento periódico dos bens arqueológicos, bem como os processos de educação patrimonial, imbricados com a musealização, guarda e conservação deste patrimônio, são considerados contínuos, para que os benefícios medidos também o sejam.

4.7.1.9 Valor Monetário do Dano

Após a construção do escopo das ações compensatórias, este item visa apresentar o esforço financeiro necessário para a execução de tais ações, bem como o valor econômico atribuído aos danos causados aos bens arqueológicos devido ao rompimento da barragem de Fundão.

O orçamento das ações descritas no item 4.7.1.7 foi elaborado por uma equipe de especialistas da área e exposto resumidamente nas Tabela 100 e Tabela 101. A planilha orçamentária foi construída buscando o dimensionamento dos custos de ações compensatórias dos bens arqueológicos prevendo as estimativas de custos (equipe técnica, insumos, logística, etc) de forma individual para cada ação ou bem cultural, de forma a facilitar a apreciação dos custos quando aplicados aos grupos de bens. Assim, considerando a necessidade de orçar as ações compensatórias em 82 bens arqueológicos, a fim de ganhar celeridade no processo optou-se por dividir os bens em 2 categorias, sendo:

- Categoria 1: sítios arqueológicos com área de compensação de 40.000 - 301.600 m²;
- Categoria 2: sítios arqueológicos com área de compensação de 0 - 40.000 m²;

Por meio dessa divisão foi selecionado um bem arqueológico de cada, feito o orçamento detalhado para cada um e o valor multiplicado pelos demais da categoria. Os valores orçados se referem aos preços praticados em março de 2021.

Além disso, visando cumprimento das exigências em relação a Portaria IPHAN 007/1988 e a Instrução Normativa IPHAN 001/2015, foi previsto os custos de divulgação científica para as pesquisas, bem como as taxas de endosso institucional, praticadas pelas Instituições de guarda autorizadas pelo IPHAN, que geralmente varia de 5 a 10% do valor total da pesquisa.

Como o impacto financeiro das ações foram pensadas individualmente, a fim de facilitar sua projeção quando vistas em conjunto, com a somatória do quantitativo dos bens arqueológicos, foi possível pensar a distribuição dessas ações em um prazo de execução de 5 anos, conforme estabelecido nas curvas de compensação. Já para as ações de Educação Patrimonial e Musealização, que ocorrerão anualmente e perpetuamente na região, a lógica de dimensionamento foi pensada de forma a abarcar um ano de execução, englobando todo o quantitativo de bens, e replicando tal valor pela perpetuidade.

Tabela 100 – Resumo do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens arqueológicos.

DESCRIÇÃO DO ITEM	VALOR UNITÁRIO
BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE (Categoria 1)	
Equipe Técnica	R\$ 221.200,00
Serviços de Terceiros	R\$ 56.400,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 116.400,00
Remuneração do Escritório	R\$ 78.800,00
Impostos Federais	R\$ 99.288,00
Imposto Municipal	R\$ 30.109,89
Endosso Institucional	R\$ 60.219,79
Sub total	R\$ 662.417,68
BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE (Categoria 2)	
Equipe Técnica	R\$ 168.300,00
Serviços de Terceiros	R\$ 55.400,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 86.700,00
Remuneração do Escritório	R\$ 62.080,00
Impostos Federais	R\$ 78.220,80
Imposto Municipal	R\$ 23.721,09
Endosso Institucional	R\$ 47.442,19
Sub total	R\$ 521.864,08
MONITORAMENTO ARQUEOLÓGICO BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE	
Equipe Técnica	R\$ 36.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 6.800,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 15.500,00
Remuneração do Escritório	R\$ 11.820,00
Impostos Federais	R\$ 14.893,20
Imposto Municipal	R\$ 4.516,48
Endosso Institucional	R\$ 9.032,97

Subtotal	R\$ 99.362,65
BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO	
Equipe Técnica	R\$ 629.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 748.400,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 265.600,00
Remuneração do Escritório	R\$ 328.760,00
Impostos Federais	R\$ 414.237,60
Imposto Municipal	R\$ 125.620,93
Endosso Institucional	R\$ 251.241,85
Subtotal	R\$ 2.763.660,38
MONITORAMENTO ARQUEOLÓGICO BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTES SUBAQUÁTICO	
Equipe Técnica	R\$ 164.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 288.400,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 60.000,00
Remuneração do Escritório	R\$ 102.640,00
Impostos Federais	R\$ 129.326,40
Imposto Municipal	R\$ 39.219,28
Endosso Institucional	R\$ 78.438,57
Subtotal	R\$ 862.824,25
EDUCAÇÃO PATRIMONIAL	
Equipe Técnica	R\$ 532.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 192.000,00
Ações Locais de Educação Patrimonial - Oficinas e Cursos de Formação Técnica	R\$ 6.550.000,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 492.000,00
Remuneração do Escritório	R\$ 1.553.360,00
Impostos Federais	R\$ 1.957.233,60
Imposto Municipal	R\$ 593.547,03
Subtotal	R\$ 11.870.940,63
MUSEALIZAÇÃO	
Equipe Técnica	R\$ 208.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 52.600,00
Museologia	R\$ 53.000,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 244.000,00
Remuneração do Escritório	R\$ 67.008,00
Impostos Federais	R\$ 129.959,78
Imposto Municipal	R\$ 39.756,20
Subtotal	R\$ 795.123,98

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 101 – Valores Totais do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens arqueológicos.

DESCRIÇÃO DO ITEM	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
AÇÕES PARA O GRUPO DE BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE		
BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE (Categoria 1*)	R\$ 642.417,68	R\$ 8.351.429,84
BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE (Categoria 2**)	R\$ 521.864,08	R\$ 33.921.165,20
MONITORAMENTO ARQUEOLÓGICO BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE	R\$ 99.362,65	R\$ 7.750.286,70
Subtotal		R\$ 50.022.881,74
AÇÕES PARA O GRUPO DE BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO		
BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTE SUBAQUÁTICO	R\$ 2.763.660,38	R\$ 11.054.641,52
MONITORAMENTO ARQUEOLÓGICO BENS ARQUEOLÓGICOS LOCALIZADOS EM AMBIENTES SUBAQUÁTICO	R\$ 862.824,25	R\$ 3.451.297,00
Subtotal		R\$ 14.505.938,52
AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA TODOS OS BENS ARQUEOLÓGICOS (TERRESTRE E SUBAQUÁTICO)		
EDUCAÇÃO PATRIMONIAL	R\$ 11.870.940,63	R\$ 11.870.940,63
MUSEALIZAÇÃO	R\$ 795.123,98	R\$ 795.123,98
Subtotal		R\$ 12.666.064,61
VALOR TOTAL DO ORÇAMENTO		R\$ 77.194.884,87
Valor total do orçamento sem as ações perpétuas		R\$ 53.327.236,56

Fonte: Lactec, 2021.

Por fim, sabe-se que o custo total para execução das ações é de R\$ 77.194.884,87. Para o processo de monetização do dano, partindo do orçamento apresentado, o primeiro passo foi a construção do fluxo de caixa. Para se obter o dispêndio financeiro anual conforme a execução do projeto, foram somadas todas as áreas em m² ganhas, conforme o tempo de execução já exposto na curva de compensação, na qual em um horizonte de 5 anos as ações direcionadas para os sítios seriam finalizadas. O quantitativo de áreas em m² que representa a perpetuidade foi contabilizada separadamente para facilitar o entendimento.

Desse modo, a coluna *Ganhos em m² não descontados* traz os ganhos anuais e separadamente os ganhos em área da perpetuidade, sendo que a perpetuidade já é considerada desde o ano 2022, pois as ações de educação ambiental e musealização são realizadas desde o início do projeto. Ao dividir o ganho em área obtido por ano pelo quantitativo do subtotal sem a perpetuidade, tem-se o *Percentual de ganho em m²*. Este percentual evidencia o quanto foi executado do projeto no ano em termos de área, por isso ele é multiplicado pelo valor do projeto sem as ações perpétuas (R\$ 53.327.236,56), resultando nos valores da coluna *Fluxo de caixa – não descontado*. Ao aplicar o fator de desconto social (8% ao ano), gerou-se a coluna *Fluxo de caixa – descontado* que traz os valores anuais investidos na execução do projeto das ações não perpétuas, todos a valor presente para o ano de 2021.

Adicionando a perpetuidade ao cálculo, o ganho da perpetuidade em área é de 13.629.577,18 m². O custo total em 1 ano para a execução dessa atividade, oriundo do orçamento, corresponde ao valor não descontado na perpetuidade de R\$ 298.345.603,88. Ao aplicar o fator de desconto social, mais a fórmula da perpetuidade a esse número, tem-se o valor de R\$ 276.245.929,51. Ao somar esse

valor com o valor total descontado das ações não perpétuas, tem-se que o valor total descontado dos danos causados aos bens arqueológicos foi de R\$ R\$ 316.650.681,46 (Tabela 102 e Tabela 103).

Tabela 102 – Valores utilizados para a monetização dos danos causados aos bens arqueológicos.

Ano	Ganhos em m ² não descontado	Percentual de ganho em m ²	Fluxo de caixa - não descontado	Fator de desconto	Fluxo de caixa - descontado
2022	810.188,30	6,67%	R\$ 3.555.149,10	0,9259	R\$ 3.291.804,73
2023	1.620.376,60	13,33%	R\$ 7.110.298,21	0,8573	R\$ 6.095.934,68
2024	2.430.564,90	20,00%	R\$ 10.665.447,31	0,7938	R\$ 8.466.575,94
2025	3.240.753,20	26,67%	R\$ 14.220.596,42	0,7350	R\$ 10.452.562,89
2026	4.050.941,50	33,33%	R\$ 17.775.745,52	0,6806	R\$ 12.097.873,72
SubTotal	12.152.824,50	100%	R\$ 53.327.236,56	-	R\$ 40.404.751,95
Ano	Ganhos em m ² não descontado perpetuidade	-	Fluxo de caixa – não descontado na perpetuidade	Fator de desconto	Fluxo de caixa – descontado na perpetuidade
2022	13.629.577,18	-	R\$ 298.345.603,88	0,9259	R\$ 276.245.929,51
TOTAL	25.782.401,68		R\$ 351.672.840,44		R\$ 316.650.681,46

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 103 – Resultado final da valoração dos danos causados aos bens arqueológicos

Valor total do projeto sem ações perpétuas (preços mar/2021) descontado (VP 2021)	R\$ 40.404.751,95
Valor total das ações perpétuas do projeto (preços mar/2021) descontado (VP 2021)	R\$ 276.245.929,51
Valor total dos danos causados aos bens arqueológicos	R\$ 316.650.681,46

Fonte: Lactec, 2021

4.7.2 BENS CULTURAIS MATERIAIS

Os bens culturais que presentemente são classificados como “materiais” (para criar distinção diante dos bens arqueológicos e imateriais) compõem a primeira tipologia de bens culturais protegida pela legislação brasileira.

Quando da criação do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (SPHAN), na gestão do ministro da educação e saúde Gustavo Capanema, durante o Estado Novo, os bens culturais passíveis de proteção legal federal que encabeçaram a criação do corpo legal (e também das políticas públicas para sua proteção e fomento) foram justamente as edificações, os conjuntos urbanos (reunindo as edificações com as demais estruturas componentes dos núcleos urbanos como ruas e avenidas, largos, praças, etc.), os bens artísticos (pinturas e esculturas), os bens associados às edificações (objetos decorativos, mobiliário móvel, equipamentos diversos) e os monumentos.

Também foram agregados a esse conjunto as coleções de livros (bibliotecas) e os arquivos (coleções documentais de várias ordens). Por fim, mais recentemente, seguindo as políticas desenhadas pela UNESCO em âmbito internacional, se somou a esse conjunto de bens materiais a categoria paisagem, completando a tipologia dos bens culturais materiais do ponto de vista legal.

Importante lembrar que nem os bens materiais prescindem de suas dimensões simbólicas, imateriais, nem os bens imateriais existem sem suportes materiais que permitam suas existências e

operações. Tal aspecto é importante para que, mais adiante, se compreenda a definição de um dos critérios empregados para a valoração dos danos aos bens culturais materiais.

4.7.2.1 Contextualização dos Danos Ambientais Causados aos Bens Materiais

Conforme indicado no relatório de Linha-Base (LB) os bens culturais materiais identificados nas áreas afetadas pelo desastre decorrente do rompimento da barragem de Fundão, pertencente a Samarco Minerações S/A, conheceram uma vasta gama de danos oriundos dos vários fatores geradores apontados no documento (ações mecânicas, interações físico-químicas, ações emergenciais) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018). Assim, os danos listados aos bens culturais materiais são: comprometimento de estruturas de bens culturais materiais, desencadeamento de processos físico-químicos que acelerem a degradação dos bens culturais materiais, modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais, alteração de partes ou setores de rotas e caminhos históricos e/ou tradicionais e interrupção ou cessão do acesso e/ou uso dos bens culturais materiais.

Dentre estes, foram as ações mecânicas e as emergenciais (empreendidas pela Samarco, suas contratadas e, posteriormente, pela Fundação Renova), que responderam pela maior parte dos danos, bem como aqueles de maior gravidade.

Embora os danos aos bens culturais materiais possam ser bastante especificados e não se tenha dúvida a respeito dos efeitos a longo prazo de determinados processos (sobretudo aqueles decorrentes das ações físico-químicas), entende-se que dentre os danos apontados na Linha-Base é o comprometimento das estruturas aquele dotado de maior significação, sendo este o dano que será valorado.

O comprometimento das estruturas das edificações possui uma larga gradação, que pode ir de trincas e rachaduras superficiais (e facilmente reversíveis) até a situação extrema de inutilização do bem edificado como tal, tratando-se a partir de determinado ponto, de ruínas do bem cultural e não mais de uma edificação (como é o caso do conjunto de casas de Bento Rodrigues e da Capela de São Bento). Nesses casos limite, segundo a teoria moderna do restauro (RUSKIN, 1849, BOITO, 2003), não cabe sequer a discussão a respeito de uma possível restauração, posto que a recomposição das estruturas incorreria numa falsificação do original ou uma edificação nova que incorporasse fragmentos da antiga.

No caso dos bens culturais materiais envolvidos neste estudo o comprometimento das estruturas teve origens distintas, desde as ações mecânicas (a passagem da onda de rejeitos) até o desenvolvimento de ações emergenciais para o atendimento aos efeitos decorrentes do desastre. Da mesma forma, bens diversos conheceram graus distintos de comprometimento de suas estruturas, entretanto, em todos os casos aqui indicados, este foi o dano que se apresentou de forma mais relevante.

O dano comprometimento das estruturas foi escolhido por este atender a dois critérios de seleção: em primeiro lugar por ser aquele que afetou de modo mais severo os bens culturais materiais identificados na Linha-Base. Em segundo lugar, conforme exposto acima, pelo fato de ser o dano que rege todas as demais implicações aos bens culturais materiais (ao menos nos bens selecionados para valoração no presente trabalho).

Também quando se avaliou a origem do comprometimento das estruturas dos bens culturais materiais (sobretudo das edificações), ele se mostra compatível com os danos coletados nas diversas etapas anteriores deste estudo, os quais apontaram a quase que exclusividade dos danos aos bens localizados no Compartimento 1 (da Barragem de Fundão até a UHE Risoleta Neves/Candonga).

Foi justamente neste compartimento que a ação mecânica decorrente do desastre (a passagem da imensa quantidade de rejeito) e também as ações emergenciais empreendidas (o tráfego intenso de maquinário pesado e de caminhões de grande tonelagem, assim como a alteração de estradas, rotas, construção de estruturas de contenção, alargamento de vias), foram mais intensas e promoveram mais comprometimento às estruturas dos bens culturais materiais.

Portanto, a indicação do comprometimento das estruturas dos bens culturais materiais como dano principal está plenamente alinhada com os danos observados e as análises empreendidas durante a construção da Linha-Base e do diagnóstico de danos.

4.7.2.2 Seleção da Métrica e Construção da Linha Base

Como métrica optou-se pela adoção da metragem quadrada dos bens culturais materiais selecionados para valoração, por se entender que é a métrica que melhor expressa a complexidade desses bens avaliados. Se tomado o exemplo da Capela de São Bento, em Bento Rodrigues (Mariana/MG), o problema se faz claro: a Capela de São Bento possuía uma edificação central composta pela nave, altar principal, altares colaterais, coro e sacristia. Entretanto, outros elementos existiam única e exclusivamente em função dessa edificação central, funcionavam em decorrência da operação da edificação central (simbólica e materialmente) como o cemitério, o adro e a residência para o pernoite dos párocos que celebravam cerimônias nela. Esses elementos (cemitério, adro, residência anexa) não só executavam suas funções de modo solidário à edificação central como não possuíam, neste caso, qualquer autonomia simbólica, material ou funcional. Em outras palavras: o cemitério da Capela de São Bento somente existia por haver o templo, assim como o adro. Essa mesma situação ocorre nas residências: seus quintais e as estruturas que comportavam (cozinhas, banheiros, hortas, paióis, pomares) atuavam de modo complementar e solidários às casas, bem como não possuíam autonomia.

Excluiu-se, contudo, as vastas áreas que compõem as fazendas, pois entende-se que – apesar dos equívocos operados na denominação dos bens culturais quando da execução dos inventários e tombamentos – busca-se proteger as “sedes” das fazendas e suas estruturas anexas e não a “fazenda” como um todo (o que implicaria em proteger e restringir o uso de pastos, áreas agricultáveis, rios, matas, currais).

Desta maneira, na metragem dos bens culturais materiais utilizada no processo de valoração de danos considerou-se a inclusão das estruturas associadas e que funcionam de modo solidário ao bem cultural material em si. Desse modo, a linha de base dos bens compreende a metragem em metro quadro da sua área total incluindo as áreas das estruturas associadas, considerando sua condição pré-desastre. A Tabela 104 mostra a linha de base dos bens materiais selecionados para valoração.

Tabela 104 – Listagem dos Bens Materiais a serem valorados e linha de base de cada bem, sendo a métrica metros quadrados

Compartimento	Município	Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²
1	Mariana	Bento Rodrigues	Capela de São Bento	3.156,50
1	Mariana	Bento Rodrigues	Estrada Real	504.684,24
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação – Rua São Bento, 107	1.328,26
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação - Bar da Sandra	6.593,47
1	Mariana	Bento Rodrigues	Igreja de Nossa Senhora das Mercês	6.195,89
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação – Rua São Bento, 177	1.669,52
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 251	2.571,67
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 322	1.013,14
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 349	4.861,46
1	Mariana	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 348, esquina com rua Olinda	928,35
1	Mariana	Bento Rodrigues	Escada de Pedra	369,76
1	Mariana	Paracatu de Baixo	Igreja de Santo Antônio	1.060,80
1	Barra Longa	Sede	Hotel Xavier	1.116,87
1	Barra Longa	Sede	Igreja Matriz de São José	1.613,51
1	Barra Longa	Divisa entre Barra Longa - MG e Rio Doce - MG	Caminho de São José	2.715.848,04
1	Barra Longa	Gesteira	Igreja Nossa Senhora da Conceição de Gesteira	1.012,35
1	Barra Longa	Distrito de Gesteira - Estrada estadual MG 326	Fazenda Corvinas	33.747,84
1	Barra Longa	Barra Longa/ Sede - Estrada estadual MG 326	Fazenda Barra Longa	6.320,01
1	Mariana	Santa Rita Durão - distrito de Mariana/ MG	Sobrado - Praça da Matriz, 01, Casarão dos Fonseca	565,43
1	Mariana	Santa Rita Durão - Distrito de Mariana/ MG	Edificação - Rua Santa Rita, 544	390,23
TOTAL				3.295.047,34

Fonte: Lactec, 2021.

4.7.2.3 Seleção dos Bens Materiais a Serem Valorados

Após a definição da métrica e cálculo da linha de base, segue-se a explanação da seleção do grupo dos 20 bens culturais materiais constantes no Relatório Linha-Base e do Diagnóstico de Danos para terem seus danos valorados. Para tanto, a equipe se pautou pelos critérios de clareza na identificação dos danos, da gravidade dos danos e da efetiva origem dos danos.

Diante do número de bens culturais materiais identificados como alvo de danos decorrentes do desastre (171 bens) na linha base, o número de bens culturais materiais em processo de valoração dos danos (20) representa 11,69% do total.

Estes bens culturais, muitos deles já indicados na origem das ações do MPF ainda em 2015, são aqueles cujos danos representam maior prejuízo para a sociedade brasileira, de modo geral, e para as comunidades locais especificamente. Esse conjunto de bens culturais materiais, composto por 18 edificações e duas estradas, representa os bens indicados no relatório Linha Base que conheceram danos mais profundos, graves e que se desdobram em prejuízos à sociedade em diversos níveis (cultural, material, estético, histórico, identitário, religioso). Também se considerou para a seleção desse conjunto de bens a clareza na identificação dos danos sofridos e suas origens (todos eles tiveram suas estruturas comprometidas em função do derramamento dos rejeitos oriundos da barragem de Fundão ou, posteriormente, pelo intenso tráfego de máquinas e caminhões em seu entorno ou alterações realizadas para viabilizar as ações de recuperação das áreas afetadas). Foi pelo cruzamento desses critérios que chegou-se ao conjunto de 20 bens culturais materiais selecionados para a valoração de danos.

A partir do grupo de bens culturais materiais que se julgou passíveis de terem seus danos valorados (20 bens, sendo 18 edificações e duas estradas ou caminhos) é clara a predominância dos bens edificados.

Como indicado anteriormente, os bens móveis afetados estavam sempre associados aos bens edificados (objetos litúrgicos das igrejas afetadas e de uso cotidiano das duas fazendas indicadas), sendo, portanto, contemplados na valoração de seus bens culturais matriz (as edificações), não justificando-se a valoração individual desses bens móveis.

Dentre os 20 bens culturais materiais selecionados para valoração tem-se:

- Cinco templos religiosos (igrejas e capelas),
- Duas sedes de fazendas,
- Um estabelecimento comercial (Hotel Xavier),
- Um bem de uso misto (Bar da Sandra),
- Nove residências (7 em Bento Rodrigues e 2 em Santa Rita Durão),
- Duas estradas/caminhos.

Deste conjunto 7 bens possuem itens culturais móveis/associados (os 5 templos religiosos e as duas sedes de fazendas), portanto devendo-se levar em consideração também os danos promovidos a esses conjuntos de objetos.

Para o cálculo das metragens de cada um dos bens, empregando o método anteriormente indicado, considerou-se:

- No caso das residências: a dimensão do lote envolvendo a edificação principal, em geral lindeira a rua, e o quintal (quando havia) com suas estruturas anexas. Foram desconsideradas calçadas (quando havia), muros e cercas divisórias.
- Templos religiosos: a área ocupada pela edificação central e as estruturas circundantes (adros, cruzeiros, cemitérios, residência dos párocos) considerando sempre como limite para a cons-

trução do polígono a face exterior dos elementos mais afastados. Portanto, no caso da Igreja de Nossa Senhora das Mercês, em Bento Rodrigues, considerou-se o limite do adro da igreja em um extremo (o adro envolve toda a parcela frontal da edificação principal) e da face do cruzeiro em outro; o limite do cemitério ao fundo. Quando essas estruturas inexistiam (como no caso da Igreja Matriz de São José, em Barra Longa/MG) considerou-se apenas a área da edificação principal.

- As sedes das fazendas: considerou-se a edificação principal (sede) e estruturas que existiam ao redor e que funcionavam de modo solidário à casa (celeiro, paiol, moinho). No caso específico da fazenda das Corvinas o limite foi determinado pela existência de uma pedreira empregada para a construção da sede da fazenda e, portanto, parte componente da história e da materialidade dela. Foram excluídas, como indicamos anteriormente, as demais estruturas componentes das fazendas.
- Estabelecimento comercial: Considerou-se no caso do Hotel Xavier sua edificação central, a faixa de terreno que se interpõem entre ela e a calçada e seu quintal.
- As estradas/caminhos: considerou-se duas situações, dada a natureza diversa dos danos sofridos pela Estrada Real e pelo Caminho de São José. No primeiro caso se trata de um dano em apenas um setor da Estrada Real, de caráter absoluto e irreversível (por não haver qualquer possibilidade ou previsão de que a sociedade possa voltar a usar esse setor, localizado na área de Bento Rodrigues). Neste caso, o cálculo foi realizado considerando as duas portarias estabelecidas pela Samarco Minerações S/A e que vedam o acesso da sociedade à um trecho da Estrada Real. Originalmente, esse trecho que cruzava Bento Rodrigues e era o eixo central do povoado, ligava os distritos de Camargos à Santa Rita Durão. Com a construção do Dique S4 (o qual submergiu parte da Estrada Real) e o estabelecimento das duas portarias (isolando definitivamente Bento Rodrigues) o trecho da Estrada Real localizado entre elas foi considerado o adequado para ser calculado. No caso do Caminho de São José, embora o uso pela sociedade não tenha sido completamente interditado, pela própria natureza do desastre e dos danos que este bem conheceu (descritos na Linha-Base), considerou-se que todo ele era passível de contabilização. Assim, considerou-se desde a porta da Igreja Matriz de São José (no centro de Barra Longa/MG) até o Santuário de Santana do Deserto (próximo a barragem da UHE Risoleta Neves), trecho compreendido e reconhecido como “Caminho de São José”. Por se tratar de um único bem, de um caminho único (diferentemente da Estrada Real, a qual possui vários desdobramentos e ramais), a necessidade de contabilizá-lo como um todo se impunha. Finalmente, no caso das duas estradas/caminhos, adotou-se o emprego de uma margem de 2 metros de largura em cada uma das extremidades, pois entende-se que são áreas que compõem os bens em questão. Sejam essas margens das estradas ocupadas por mata, por construções, estruturas próprias, o fato é que são imprescindíveis para a própria existência do bem cultural.

4.7.2.4 Taxa de Equivalência: Construção dos Pesos de Interrupção de Serviços, Acautelamento e Bens Móveis Associados

A equivalência, conforme já abordado, reflete o quanto que um serviço e/ou recurso ambiental recuperado é semelhante ao serviço e/ou recurso ambiental existente antes do desastre, em termos qualitativos.

Para os bens materiais a taxa de equivalência adotada tanto na recuperação quanto na compensação atendeu a duas funções, do mesmo modo como foi feito para os bens arqueológicos. Ela também foi utilizada como peso na valoração, ponderando tanto perdas quanto ganhos. Inicialmente foi estabelecida uma taxa para cada bem, pois por serem bens distintos não foi possível estabelecer uma taxa única para todos. As ponderações foram aplicadas tanto para mensuração da perda interina, quanto para a mensuração dos bens selecionados para recuperação e compensação ponderando os ganhos.

Desse modo, a taxa de equivalência é expressa pela ponderação realizada por três pesos. Assim sendo, entende-se que a equivalência estabelecida entre os bens materiais afetados pelo desastre, e aqueles a serem recuperados/compensados, apresentam a equivalência razoável preconizada pela legislação, devidamente lastreada por fator de ponderação calcado em critérios de Restabelecimento dos serviços, Existência de instrumento de acautelamento e Presença de bens móveis associados, utilizados como elementos multiplicadores para a recuperação/compensação.

Adiciona-se que os pesos são atribuídos separadamente para cada um dos bens recuperados/compensados, conforme suas características, traduzindo a importância de cada metro quadrado. Desta forma, a equivalência é adotada separadamente para cada bem, tendo a área de cada bem ponderado de maneira específica.

Assim, para construir uma avaliação o mais precisa possível dos efetivos prejuízos causados pelos danos conhecidos pelos bens culturais materiais, foram empregados três pesos: a interrupção ou cessão dos serviços, a existência de instrumentos de acautelamento e a existência de bens culturais materiais móveis ou associados.

Cabe, inicialmente, apresentar e explicar cada um dos três fatores multiplicadores empregados para a valoração:

- **Peso1: Interrupção ou cessão dos serviços:**

É vasta a literatura que trata a respeito da importância e das funções sociais desempenhadas pelo patrimônio cultural e, ainda mais claramente, do patrimônio cultural de natureza material. Ecléa Bosi (BOSI, 1994) esclareceu os complexos percursos envolvidos naquilo que denominou de “trabalho das memórias”. Essas memórias, sempre no plural, tratam não apenas de processos pessoais, mas, também, de processos coletivos, sociais. Tanto quanto a necessidade de um equipamento individual e singular responsável pelo trabalho/processamento das memórias (o corpo), é necessário, para muitas delas, a existência também de estruturas coletivas, sociais que insiram o indivíduo no mundo (memórias da coletividade, do espaço vivido, das relações sociais, de trabalho, afetivas). Esse trabalho/memória demanda uma sofisticada rede de suportes materiais, tanto de caráter pessoal/individual (fotografias, documentos, objetos de culto, memorabilia) quanto coletivos (a materialidade compartilhada pelos grupos). É justamente nesse campo que o patrimônio

cultural material desempenha ou presta seus serviços ao campo das memórias (individuais, mas, profundamente as coletivas). Essa constatação nos leva a um segundo serviço/função desempenhado pelo patrimônio cultural material e que está em sua gênese: a criação de identidades. Identidades múltiplas e que se sobrepõem e entrelaçam: o grupo, a família, a localidade, a etnia, a tribo, a cor, o culto/fé, e, finalmente, mas não menos importante, o próprio Estado Nacional (CHOAY, 2006, CHOAY, 2011, POULOT, 2009, ANDERSON, 2011). Portanto, a perda do patrimônio cultural se não é uma determinante para a destruição das identidades ela, sem dúvida, cria complicadores severos para a manutenção dos grupos humanos, das culturas, como está, inclusive, explícito – como direito - na Constituição Federal do Brasil (BRASIL, 1988). Mas não cessam na dimensão simbólica os serviços prestados pelo patrimônio cultural material: os bens culturais, como desdobramento das dimensões das memórias e das identidades, representam um importante suporte/ferramenta das relações sociais. Mobilizados pelas memórias individuais e coletivas, amparados nas identidades, os bens culturais materiais são articuladores de relações sociais múltiplas dentro de um único grupo/comunidade ou entre grupos e comunidades distintas (inclusive por, como elemento associado as identidades, funcionar como suporte da representação social perante o outro). Um exemplo que clareia de modo indubitável essas relações são as festas de Nossa Senhora das Mercês e São Bento, que envolviam os dois templos dedicados a esses oragos no povoado de Bento Rodrigues. As duas edificações representam parte substancial da expressão material das festas (celebrações), mas não se limitam à celebração ou à religiosidade os serviços prestados pelas edificações como articuladoras das relações sociais. É a partir da materialidade, mobilizada através de expressões imateriais, que pessoas se conhecem, que vizinhos fazem acordos, que comunidades se visitam, que as pessoas se apresentam para a comunidade e constroem suas imagens públicas, que comunidades próximas trocam favores e estabelecem laços de solidariedade, que se trocam informações, ideias, propostas de novos negócios (com valores financeiros ou não). Sem a igreja que suporta a festa, todo esse universo de possibilidades se extingue. E não se trata somente da troca de um templo por outro (passível de ser construído em outro lugar), mas das memórias e identidades ativadas pelo bem cultural. No mais, também é vastamente documentada pela bibliografia a importância da preservação dos bens culturais como vetores para o desenvolvimento humano local (VARINE, 2012, BENHAMOU, 2016). Por conta de todos esses elementos, considerou-se que o primeiro fator multiplicador a ser empregado para a construção dos cenários é o da Interrupção ou Cessão dos serviços prestados pelos bens culturais materiais.

Também foi considerado para a constituição deste peso o fato de que parte substancial dos serviços prestados pelos bens materiais às comunidades constitui, em verdade, o conjunto de bens culturais imateriais – não valorados no presente estudo conforme explicitado mais adiante (item 4.7.3). Importa indicar que os bens culturais materiais avaliados compunham a dimensão física e material mobilizada para a realização e existência de manifestações consideradas bens culturais imateriais (celebrações, formas de expressão, saberes e lugares). Destarte, a amplo estudo antropológico realizado no escopo dos bens imateriais, pautado nas narrativas etnográficas coletadas, também se coloca como substrato que sustenta a determinação deste peso (cessão de serviços) para os bens materiais, posto que muitos destes bens são suportes para os bens imateriais. Assim, ao menos os bens imateriais associados a esses bens materiais valorados estão tendo seu valor capturado pela aplicação deste peso.

A escala empregada vai de 0 a 5, sendo que:

- 0 representa que nenhum serviço prestado a sociedade foi interrompido ou cessado
- 1 até 2 representam cessões pontuais e plenamente reversíveis
- 3 representam cessões reversíveis, mas não pontuais
- 4 representam cessões quase completa e irreversíveis
- 5 representa a cessão completa e irreversível dos serviços prestados.

• **Peso 2: Existência de instrumento de acautelamento:**

O acautelamento em suas diversas modalidades e esferas (o inventário, o tombamento municipal, estadual e federal, o registro e a valoração) representa ao menos dois aspectos da dimensão legal e oficial das políticas para o patrimônio cultural. Em primeiro lugar trata-se do reconhecimento oficial e coletivo de que algo transcende a esfera privada de interesse. Não se trata de antiguidade, beleza, gosto, dimensão, valor pecuniário, mas sim do reconhecimento que algo ocupa um lugar nas memórias e identidades de uma comunidade (maior ou menor, de acordo com o grau de acautelamento), conforme indicado no fator multiplicador anterior. Mas a importância não é per se uma obrigação do Estado, nem é da sua alçada determinar ou dimensionar; contudo cabe ao Estado brasileiro (e aos demais entes federativos) proteger os bens culturais que seguirem o devido curso processual para seu reconhecimento. Aí se tem a segunda dimensão do acautelamento, que é a indicação das características que compõem um determinado bem cultural e que devem ser protegidas a fim de garantir sua compreensão (comunicação do bem às comunidades) e seus serviços (conforme visto anteriormente).

Também se entende que os graus de acautelamento seguem em uma escala que corresponde a amplitude da importância daquele bem para diferentes comunidades. Em outras palavras: o acautelamento de um bem em esfera estadual, por exemplo, reconhece, grosso modo, que os valores representados por ele transcendem a esfera local (municipal) e, portanto, mesmo que você não viva naquela comunidade específica é função do ente federativo ao qual você está ligado (estado) protegê-lo. E isso ocorre seguindo a mesma lógica da organização política do Brasil: municípios, estados e União.

No Brasil, de modo geral, existem três níveis de acautelamento: o local (procedido pelos municípios), o regional (procedido pelos estados) e o nacional (procedido pela União). Em cada uma dessas esferas o acautelamento responde a um rito formal que envolve especialistas, técnicos, a construção de dossiês e pareceres e, finalmente, a decisão de colegiados a respeito da concessão do acautelamento (tombamento para bens materiais ou registro para bens imateriais).

No Estado de Minas Gerais, a presença de um sólido sistema de identificação, registro, proteção e fomento ao patrimônio cultural, acrescenta já como uma forma de acautelamento o inventário. A diferença entre um bem cultural material inventariado e um tombado é que o primeiro não conta ainda com um parecer formal de especialistas *ad hoc* que recomendam ao conselho responsável pelo acolhimento ou não das propostas de tombamento. Neste parecer os especialistas devem indicar as características do bem, seus contextos, históricos, usos, bem como as características a serem preservadas e as áreas envoltórias que garantem sua ambiência. Como todos os bens culturais materiais indicados para terem seus danos valorados estão no Compartimento 1 (Minas Gerais) decidiu-se adotar

a política vigente no estado. Assim tem-se uma escala que vai de 0 a 5 e que representa o peso da existência de acautelamento para o bem específico, sendo:

- 0 para ausência de qualquer forma de acautelamento, havendo apenas o reconhecimento local pela comunidade da importância do bem cultural;
- 1 até 2 para bens inventariados,
- 3 para bens com tombamento municipal,
- 4 para bens com tombamento estadual e
- 5 para os que possuem acautelamento federal.

Não se adotou qualquer forma de redundância, levando-se, portanto, sempre em consideração apenas a esfera de acautelamento mais ampla. Assim, bens que possuem mais de uma esfera de acautelamento (como a Igreja de Nossa Senhora das Mercês, em Bento Rodrigues) utilizou-se apenas a mais ampla (no caso da Igreja de Nossa Senhora das Mercês o acautelamento estadual).

- **Peso 3: Existência de bens móveis e associados.**

Conforme descreveu-se anteriormente, todos os casos de bens materiais móveis que conheceram danos decorrentes do desastre promovido pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG eram associados a bens edificados. Esses bens móveis são associados à 7 edificações, sendo que – como visto – cinco são templos religiosos (igrejas e capelas) e dois são sedes de fazendas. Dado que tanto os bens edificados dependem substancialmente de seus bens móveis e associados para serem plenos, quanto os bens móveis aqui em face (por serem parte componente de edificações) perdem substancialmente sua legibilidade e se esvaziam de suas funções quando fora das edificações de origem, decidiu-se incluí-los como um fator multiplicador. Novamente se tem uma escala de 0 a 5 para o cálculo deste peso, conforme segue:

- Os graus de 0 até 2 representam a perda pontual de bens culturais ou seu deslocamento temporário do lugar de origem;
- O grau 3 a perda parcial significativa de bens culturais materiais móveis e associados;
- O grau 4 representa a perda do contexto de implantação dos bens culturais materiais móveis de modo irreparável apesar de sua manutenção física;
- O grau 5 representa a perda completa e irreversível dos bens culturais materiais móveis e associados.

Cada um dos pesos expostos abraça uma dimensão importante dos bens materiais e que não pode ser ignorada, pois representam aspectos relevantes para a sociedade. Por isso optou-se por unir os 3 pesos em uma média ponderada, considerando a importância dos fatores que eles representam, pois para além da metragem quadrada (que materializa o próprio bem cultural) os demais fatores multiplicadores seguem em ordem de importância e dos danos efetivos causados.

Em primeiro lugar a Interrupção ou cessão dos serviços (por ser aquele que mais imediata e profundamente afeta às comunidades que usam cotidianamente esses bens culturais), por isso o peso 1 representa 60% da média ponderada.

Em seguida a existência de instrumento de acautelamento, por se amparar na vasta legislação construída no Brasil desde a criação do Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional na década de 1930 e continuamente reforçada e aprimorada no decorrer das décadas posteriores. Também por ser um indicativo, a relevância dos bens culturais à sociedade brasileira em suas diversas escalas. Desse modo esse peso representa 20% da média ponderada.

E finalmente, os danos aos bens móveis e associados, por se entender enquanto um agravante, por se tratar de bens associados à essas edificações, um sem outro (edificação e bens móveis) estará definitivamente incompleto. Para este também se atribuiu peso de 20% para a média ponderada. Assim, a formula da média ponderada dos pesos pode ser escrita da seguinte forma:

$$MP = (P1 * 0,6) + (P2 * 0,2) + (P3 * 0,2)$$

Sendo:

MP = Média ponderada; P1 = Peso 1; P2 = Peso 2; P3 = Peso 3

Importante ressaltar que, no que toca à questão da importância artística dos bens, fator recorrentemente empregado para a confecção dos pareceres de tombamento dos bens edificados e móveis, entendeu-se que no presente caso pesa mais a interrupção ou cessão dos serviços prestados pelo patrimônio à sociedade, de modo amplo, e às comunidades locais, especificamente, para fins de valoração dos danos, tendo, portanto, prioridade.

4.7.2.5 Construção da Curva de Recuperação Natural

Após a definição da métrica, linha de base, da seleção dos bens a serem valorados e dos pesos a serem aplicados, o próximo passo foi construir a curva de recuperação natural. Da mesma forma como foi ressaltado nos bens arqueológicos, ressalta-se aqui sobre os bens materiais, os mesmos não possuem recuperação natural, ou seja, se nada for feito, esses bens permanecerão no estado danificado em que se encontram hoje, ou podem até mesmo piorar o seu estado com o tempo. Por isso, embora o título deste item seja recuperação natural, leia-se como uma reta (uma constante) de perda perpétua, ou seja, a quantidade de área perdida devido ao desastre permanece ano a ano constante no tempo, pois a sociedade perdeu esses recursos de maneira definitiva.

Com relação a recuperação externa, cabe adiantar aqui que os bens materiais são distinguidos nesta valoração em três grupos, a saber: sem recuperação, recuperação parcial e recuperação total. Explicações mais detalhadas sobre esta diferenciação serão dadas no item mais adiante pertinente a temática, no entanto, importa saber que os bens sem recuperação são aqueles que não poderão ser alvos de projetos de recuperação/restauração, logo não há como retornar a sociedade o que foi perdido, já os bens parcialmente recuperáveis podem, como o próprio nome afirma serem recuperados de maneira parcial, ou seja, o projeto de recuperação/restauração retorna uma parte dos recursos, e por fim, os bens recuperáveis são aqueles que podem ser alvo de recuperação/restauração e retornar a sociedade a mesma quantidade de recurso que existia na linha de base. Por isso, todos cálculos realizados na valoração dos bens materiais serão sempre subdivididos nestas três categorias.

Apesar desta separação ser feita neste item, relembra-se que no caso da recuperação natural, que é aquela que não há nenhuma intervenção humana, as perdas para os três grupos são perpétuas e por isso todos irão ser representados por retas contínuas com perdas infinitas.

As Tabela 105, Tabela 106 e Tabela 107 mostram o cálculo das perdas ponderadas de cada um dos bens materiais, que foram mensuradas por meio da multiplicação da média ponderada sobre a área afetada pelo desastre medida em metros quadrados, resultando na coluna: *Resultado da Perda Ponderada em m²*.

O valor total da perda ponderada de cada grupo de bens materiais se expressa como a perda gerada pelo desastre no ano da sua ocorrência. Após esse cálculo foi aplicado a taxa de desconto de 8% ao ano sobre cada grupo, juntamente com a aplicação da fórmula da perpetuidade, dado que se trata de uma perda definitiva. O resultado obtido, e detalhado na Tabela 108, representa a perda dos recursos dos bens materiais afetados pelo desastre no horizonte temporal perpétuo, em um contexto natural, ou seja, sem qualquer intervenção humana de recuperação/compensação.

As Figura 97, Figura 98 e Figura 99 exibem a representação gráfica do cálculo realizado e exposto na Tabela 108. A interpretação da Figura 97 traz uma informação relevante sobre perda interina. Como já apresentado na metodologia a perda interina é a diferença da perda calculada no contexto de recuperação natural com a perda calculada no contexto de recuperação humana, a diferença entre elas resulta na perda interina. No entanto, quando o bem valorado não possui recuperação externa, ou seja, não há projeto que possa ser realizado para reverter o dano sofrido, e este se configura como uma perda irrecuperável, então para esse grupo de bens não há a curva de recuperação externa, apenas a perda calculada na curva de recuperação natural. Como já foi explicado, há o grupo de bens materiais irrecuperáveis e para esse, o valor da perda calculado na recuperação natural já é a perda interina.

Para os demais grupos de bens (Figura 98 e Figura 99) que são parcialmente ou totalmente recuperáveis, foi construída a curva de recuperação externa a fim de calcular uma nova área de perda a ser deduzida da área de perda no contexto de recuperação natural, e após essa diferença obter a perda interina desses respectivos grupos. Esse processo está detalhadamente descrito no item destinado a este objetivo.

Tabela 105 – Resultado do cálculo da perda inicial dos bens materiais não recuperáveis devido ao desastre após a ponderação dos pesos

Compart.	Localidade	Bem Cultural Material Não Recuperáveis	Área total (LB)	Área afetada m²	Porcentagem afetada	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Média ponderada	Resultado da Perda Ponderada em m²
1	Bento Rodrigues	Capela de São Bento	3.156,50	3.156,50	100	5	3	5	4,6	14.519,90
1	Bento Rodrigues	Estrada Real	504.684,24	504.684,24	100	5	3	0	3,6	1.816.863,26
1	Bento Rodrigues	Edificação – Rua São Bento, 107	1.328,26	1.328,26	100	5	3	0	3,6	4.781,74
1	Bento Rodrigues	Edificação - Bar da Sandra	6.593,47	6.593,47	100	5	3	0	3,6	23.736,49
1	Bento Rodrigues	Edificação – Rua São Bento, 177	1.669,52	1.669,52	100	4	3	0	3,0	5.008,56
1	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 251	2.571,67	2.571,67	100	4	3	0	3,0	7.715,01
1	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 322	1.013,14	1.013,14	100	4	3	0	3,0	3.039,42
1	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 349	4.861,46	4.861,46	100	4	3	0	3,0	14.584,38
1	Bento Rodrigues	Edificação - Rua São Bento, 348, esquina com rua Olinda	928,35	928,35	100	4	3	0	3,0	2.785,05
1	Bento Rodrigues	Escada de Pedra	369,76	369,76	100	2	3	0	1,8	665,57
TOTAL			527.176,37	527.176,37						1.893.699,38

Nota: Peso1: Interrupção ou cessão dos serviços (60%); Peso 2: Existência de instrumento de acautelamento (20%); Peso 3: Danos aos bens móveis associados (20%)

Tabela 106 – Resultado do cálculo da perda inicial dos bens materiais parcialmente recuperáveis devido ao desastre após a ponderação dos pesos

Compart.	Localidade	Bem Cultural Material Parcialmente Recuperável	Área total (LB) m²	Área afetada m²	Porcentagem afetada	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Média ponderada	Resultado da Perda Ponderada em m²
1	Bento Rodrigues	Igreja de Nossa Senhora das Mercês	6.195,89	6.195,89	100,00	5	4	4	4,6	28.501,09
1	Paracatu de Baixo	Igreja de Santo Antônio	1.060,80	1.060,80	100,00	5	3	5	4,6	4.879,68
1	Divisa entre Barra Longa - MG e Rio Doce - MG	Caminho de São José	2.715.848,04	2.715.848,04	100,00	4	3	0	3,0	8.147.544,12
1	Gesteira	Igreja Nossa Senhora da Conceição de Gesteira	1.012,35	1.012,35	100,00	5	3	5	4,6	4.656,81
TOTAL			2.724.117,08	2.724.117,08						8.185.581,70

Nota: Peso1: Interrupção ou cessão dos serviços (60%); Peso 2: Existência de instrumento de acautelamento (20%); Peso 3: Danos aos bens móveis associados (20%)

Tabela 107 – Resultado do cálculo da perda inicial dos bens materiais recuperáveis devido ao desastre após a ponderação dos pesos

Compart.	Localidade	Bem Cultural Material Recuperável	Área total (LB) m ²	Área afetada m ²	Porcentagem afetada	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Média ponderada dos 3 pesos utilizados	Resultado da Perda Ponderada em m ²
1	Sede	Hotel Xavier	1.116,87	1.116,87	100,00	3	3	0	2,4	2.680,49
1	Sede	Igreja Matriz de São José	1.613,51	1.613,51	100,00	3	3	1	2,6	4.195,13
1	Distrito de Gesteira - Estrada estadual MG 326	Fazenda Corvinas	33.747,84	33.747,84	100,00	3	3	1	2,6	87.744,38
1	Barra Longa/ Sede - Estrada estadual MG 326	Fazenda Barra Longa	6.320,01	6.320,01	100,00	3	3	1	2,6	16.432,03
1	Santa Rita Durão - distrito de Mariana/MG	Sobrado - Praça da Matriz, 01, Casarão dos Fonseca	565,43	565,43	100,00	3	4	0	2,6	1.470,12
1	Santa Rita Durão - Distrito de Mariana/MG	Edificação - Rua Santa Rita, 544	390,23	390,23	100,00	3	4	0	2,6	1.014,60
TOTAL			43.754,89	43.754,89						113.536,74

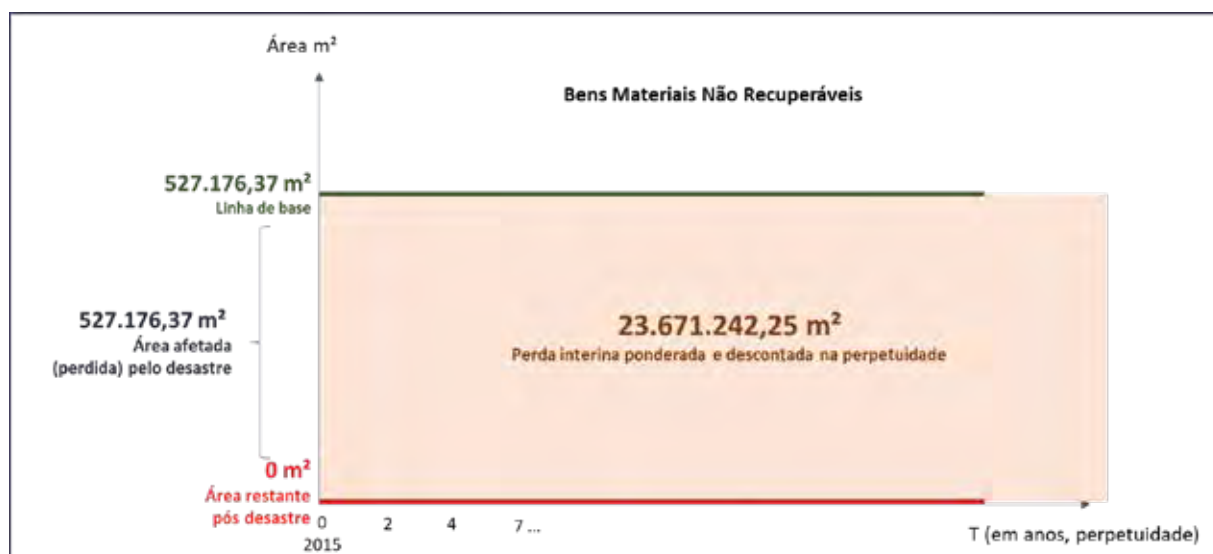
Nota: Peso1: Interrupção ou cessão dos serviços (60%); Peso 2: Existência de instrumento de acautelamento (20%); Peso 3: Danos aos bens móveis associados (20%)

Tabela 108 – Resultado do cálculo da perda, segregado por modalidade de recuperação

Modalidade de Recuperação	Não Recuperável
Quantidade de bens neste grupo	10 bens
Linha de base em m²	527.176,37
Área em m² afetada e ponderada pelos pesos	1.893.699,38
<i>Perda Interina Descontada (perpetuidade)</i>	23.671.242,25
Modalidade de Recuperação	Parcialmente Recuperável
Quantidade de bens neste grupo	4 bens
Linha de base em m²	2.724.117,08
Área em m² afetada e ponderada pelos pesos	8.185.581,70
<i>Perda Descontada Recuperação Natural (perpetuidade)</i>	102.319.771,25
Modalidade de Recuperação	Recuperável
Quantidade de bens neste grupo	6 bens
Linha de base em m²	43.753,89
Área em m² afetada e ponderada pelos pesos	113.536,74
<i>Perda Descontada Recuperação Natural (perpetuidade)</i>	1.419.209,25

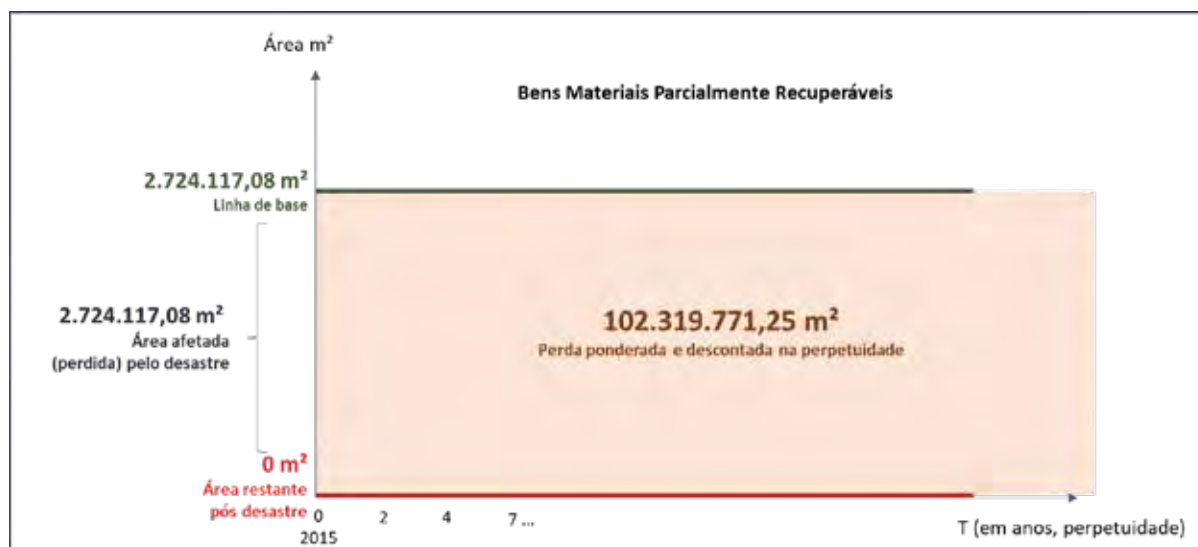
Fonte: Lactec, 2021.

Figura 97 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais não recuperáveis afetados pelo desastre



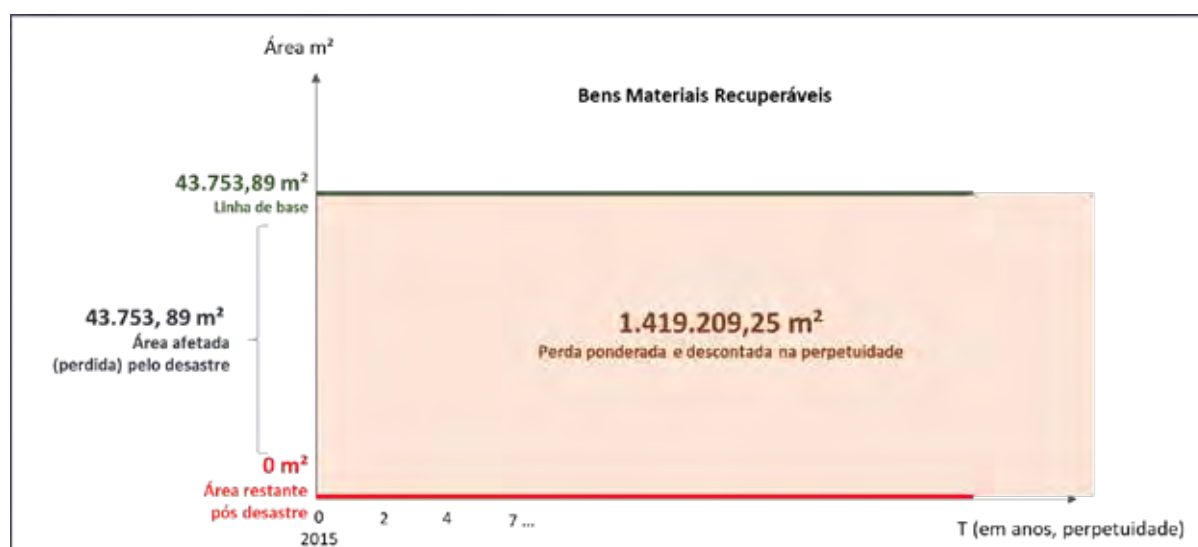
Fonte: Lactec, 2021.

Figura 98 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens parcialmente recuperáveis afetados



Fonte: Lactec, 2021.

Figura 99 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais recuperáveis afetados



Fonte: Lactec, 2021.

Postos todos os detalhamentos, resume-se que, diante de um cenário natural, sem intervenção humana, os bens materiais não recuperáveis apresentam uma perda de recurso no tempo perpétuo para a sociedade de 23.671.242,25 m^2 , sendo esta para este grupo a sua perda interina. No mesmo cenário, sem intervenção, os bens materiais parcialmente recuperáveis apresentam uma perda de recurso no tempo perpétuo para a sociedade de 102.319.771,25 m^2 e os bens recuperáveis, no mesmo contexto, apresentam uma perda de 1.419.209,25 m^2 . Ressalta-se que, diferentemente do que foi feito para os bens arqueológicos, as perdas calculadas para os grupos aqui apresentados não serão somadas, pois, cada grupo está recebendo uma tratativa de análise diferente devido aos diferentes aspectos das suas recuperações, o que impede que as áreas sejam somadas e trabalhadas em conjunto, por isso ao longo de toda a valoração dos bens materiais, os resultados são sempre apresentados segregados pelas modalidades de recuperação.

4.7.2.6 Detalhamento da Segmentação dos Bens Materiais Conforme Possibilidade de Recuperação por Meio de Ações Externas

Conforme já adiantado no item anterior, os bens materiais estão sendo valorados, subdividido pelas características de recuperação que possuem. No caso dos bens irrecuperáveis não há como reverter o dano de comprometimento das estruturas das edificações, assim sendo, a perda interina calculada anteriormente, perda interina descontada de 23.671.242,25 m², é a área que deverá ser totalmente compensada pela parte responsável, para compensação desses bens perdidos perpetuamente. Logo, para este grupo não há recuperação externa, sua perda interina já foi finalizada nos 23 milhões de m² calculados (lembrando que a perda interina é definida como a perda total, ou seja, o somatório de perdas ocorridas ano a ano, durante o tempo em que a sociedade permaneceu sem o recurso e/ou serviço. Quando há recuperação externa, tem-se a perda interina que representa a perda total líquida, perda bruta menos a recuperação gradual, ocorrida durante os anos no qual a sociedade permaneceu sem o recurso e/ou serviço).

O grupo de bens irrecuperáveis é composto por 10 bens, são eles:

- Capela de São Bento, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Trecho da Estrada Real, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Bar da Sandra, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Edificação – Rua São Bento, 107, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Edificação – Rua São Bento, 177, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Edificação - Rua São Bento, 251, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Edificação - Rua São Bento, 322, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Edificação - Rua São Bento, 349, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Edificação - Rua São Bento, 348, esquina com rua Olinda, Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- Escada de Pedra, Bento Rodrigues/Mariana/MG.

Esse conjunto de bens, cujos danos são irrecuperáveis, se concentra justamente no epicentro do desastre, no povoado de Bento Rodrigues/Mariana/MG. A irreversibilidade de seus danos se dá por duas razões: em primeiro lugar por conta do dano material aos bens culturais materiais. A ação da onda de rejeitos nesses bens culturais materiais promoveu um comprometimento de suas estruturas de ordem profunda (em alguns casos quase total) e irreversível. A segunda razão pela qual os danos são irreversíveis é a própria remoção da comunidade local, de modo igualmente total e irreversível, configurando Bento Rodrigues como uma área desprovida de quase toda vida social e cultural que ali se desenvolvia.

Já os bens recuperáveis são aqueles que podem ser plenamente e totalmente recuperados, retornando para a sociedade toda a quantidade de recurso e/ou serviço perdido antes do desastre, ou seja, retorna a linha base. Isto é, para os bens listados abaixo, o dano de comprometimento das estruturas decorrentes do desastre causado pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG, é plenamente possível de ser reparado, desde que adotadas as medidas prescritas adiante. Este grupo é formado pelos bens:

- Hotel Xavier, Barra Longa/MG.
- Igreja Matriz de São José, Barra Longa/MG
- Fazenda Barra Longa, Barra Longa/MG.
- Fazenda das Corvinas, Barra Longa/MG.
- Sobrado - Praça da Matriz, 01, Casarão dos Fonseca, Santa Rita Durão/Mariana/MG.
- Sobrado - Rua Santa Rita, 544, Santa Rita Durão/Mariana/MG.

No que se refere aos bens culturais materiais que são parcialmente recuperáveis, considera-se que, ainda que os danos à materialidade intrínseca ao bem cultural seja recuperável, ou seja, a sua estrutura arquitetônica, bens móveis, edificações anexas, adro ou átrio externo, entre outros possam sofrer reparos, os serviços - como a missa cotidiana, e outras expressões da fé católica, ou uso dos espaços para ocasiões de sociabilidade, aprendizado, troca de experiências, contemplação e rememoração e culto aos ancestrais - que aquele bem cultural prestava às comunidades, especificamente, e à sociedade, de modo amplo, jamais serão completamente restituídos. Embora, por exemplo, se possa proceder a restauração das igrejas de Paracatu de Baixo e Gesteira, empregando as melhores práticas disponíveis e seguindo todos os manuais, normativas e regulamentações, o fato de que as comunidades jamais voltarão a poder as utilizar como antes o faziam é incontornável. Na sequência listam-se os bens cujos danos são parcialmente reparáveis:

- Caminho de São José, Barra Longa/MG;
- Igreja de Nossa Senhora da Conceição, Gesteira/Barra Longa/MG;
- Igreja de Santo Antônio, Paracatu de Baixo/ Mariana/MG; e
- Igreja de Nossa Senhora das Mercês, Bento Rodrigues/Mariana/MG.

Em alguns dos bens listados, a materialidade deles conheceu danos que são apenas parcialmente reparáveis, havendo alguns impactos que, de fato, devem se manter de modo perpétuo.

No caso do caminho de São José, foram instalados grandes tanques para receber o rejeito retirado do rio e outros equipamentos empregados para a recuperação do ambiente. A via também teve trechos alargados e/ou alterados, intervenções consideradas perpétuas e que promovem danos irreversíveis ao bem. Esse bem seria recuperável em 80% de sua materialidade e em 100% dos serviços prestados pelo bem.

Quanto às Igrejas de Santo Antônio em Paracatu de Baixo e Nossa Senhora da Conceição de Gesteira, ambas foram diretamente afetadas pela onda de rejeitos, trazendo danos perpétuos à sua arquitetura, aos bens móveis de que dispunham e aos serviços que prestavam, especialmente às comunidades locais, realocadas após o desastre. Assim sendo, ainda que restauros possam ser feitos, computa-se em apenas 60% o grau de recuperação material que possa ser obtida nos vindouros anos de trabalhos a serem conduzidos sobre elas. Não obstante, seus serviços e bens associados conheceram danos irreversíveis ao se considerar que a vida social por ela estimulada foi severamente afetada, dado que as celebrações foram interrompidas, diminuídas ou cessadas. Assim, não sendo cabível falar em grau de recuperação destes antigos serviços, sendo que novas práticas, dinâmicas e significações são agora sobre elas atribuídas desde o desastre, ela é computada como 0%.

É importante destacar que foram considerados parcialmente reversíveis os danos à Igreja de Nossa Senhora das Mercês, em Bento Rodrigues/Mariana/MG, devido à situação absolutamente singular em que se encontra. Poupada da onda de rejeitos que varreu o povoado de Bento Rodrigues por estar instalada em uma cota do terreno mais alta, a igreja teve de ter todo seu conjunto de bens materiais móveis retirados para que não fossem saqueados (processo desencadeado no povoado após o rompimento e desocupação da localidade).

Nos anos seguintes decidiu-se que não seria mais permitido o retorno das famílias ao local e que todo acesso seria controlado pela mineradora responsável pelo desastre, a Samarco Mineração S/A, impedindo que a sociedade pudesse de alguma forma usar livremente a igreja para as funções que desempenhava até então (de culto, de memória, de sociabilidade, de identidade, de prazer estético). Desde então, os objetos retirados dela não puderam sequer ser emprestados à população local para que pudessem realizar suas celebrações religiosas (promovendo um dano irreversível, também, ao patrimônio imaterial). Qualquer acesso ao bem cultural – a Igreja das Mercês – depende da comunicação, anuência, agendamento e concordância de terceiros (Samarco Mineração S/A, Fundação Renova, Defesa Civil, Corpo de Bombeiros), circunstância que não existia anteriormente ao desastre e para a qual não há qualquer proposição de reversão futura. Logo, os serviços que o bem prestava foram severamente comprometidos e, no tempo avaliado no âmbito do presente projeto, irreversivelmente.

Diante disso não há outra possibilidade senão reconhecer a reversibilidade apenas parcial dos danos à Igreja de Nossa Senhora das Mercês, plenamente (100%) recuperável do ponto de vista material e arquitetônico, mas havendo que lembrar sempre que a materialidade só tem significância quando atribuída pelos processos de significação cultural, pelas sociedades. Diferentemente dos bens naturais que prestam seus serviços de modo alheio e independente às nossas vontades, os bens culturais só o fazem quando mobilizados pelas sociedades. Não havendo mais essa mobilização livre, é imperativo considerar os danos aos serviços que prestava como irreparáveis, sendo a taxa computada em 0%.

A Tabela 109 mostra, para cada bem parcialmente recuperável, uma média ponderada do grau máximo de recuperação, sendo utilizada como ponderação para a dimensão de prestação de serviço o mesmo peso adotado nas etapas anteriores, e o peso adotado para o aspecto material foi definido pela diferença do peso material em relação ao 100%, desta forma o aspecto material possui peso 40% e o de prestação de serviços (imaterial) possui peso de 60%. A fórmula para construção deste peso é:

$$MPGR = (\%RM * 0,4) + (\%RS * 0,6)$$

Onde: MPGR é a média ponderada do grau de recuperação; %RM é o percentual da recuperação material; %RS é o percentual da recuperação dos serviços.

Tabela 109 – Grau máximo ponderado de recuperação dos aspectos materiais e prestação de serviços dos bens parcialmente recuperáveis

Bens Parcialmente Recuperáveis	% de recuperação materialidade (peso 40%)	% de recuperação serviços (peso 60%)	% final ponderado
Caminho de São José, Barra Longa/MG.	80%	100%	92%
Igreja de Nossa Senhora da Conceição, Gesteira/Barra Longa/MG.	60%	0%	24%
Igreja de Santo Antônio, Paracatu de Baixo/Mariana/MG.	60%	0%	24%
Igreja de Nossa Senhora das Mercês, Bento Rodrigues/Mariana/MG.	100%	0%	40%

Fonte: Lactec, 2021.

4.7.2.7 Taxa de Recuperação Anual dos Bens Materiais

Antes de detalhar o cálculo para construção da curva de recuperação externa, aquela que é construída sobre um cenário de execução de ações para promoção da recuperação dos bens, faz-se necessário apresentar a taxa de recuperação anual dos projetos de recuperação externa.

O método de valoração aqui empregado leva em consideração o tempo que a sociedade permanece sem os recursos e/ou serviços valorados, por isso, mesmo havendo a possibilidade de recuperar total e parcialmente alguns dos bens materiais, é necessário entender o tempo que leva para essas ações serem efetivas e retornarem os recursos e serviços perdidos para a sociedade, mesmo que parcialmente. Tais taxas são consideradas nos cálculos de construção das curvas de recuperação externa.

Importante ressaltar as diferenças de entendimento aqui apresentadas entre grau de recuperação e taxa de recuperação anual. O primeiro se refere a quantidade máxima, em área, que o bem pode ser recuperado, considerando a sua totalidade. O segundo se refere a quantidade em área anualmente recuperada do bem, até atingir o seu grau máximo, que pode ser de 100% para os bens recuperáveis e menor que 100% para os bens parcialmente recuperáveis.

As taxas de recuperação dos bens culturais materiais que conheceram danos e que estão aqui em avaliação dependem, em grande medida, da complexidade do bem em questão. Desse modo, para a definição dessas taxas, optou-se por dividir o conjunto de bens em três grupos, a seguir listados:

- Bens culturais edificados com a presença de bens culturais móveis e associados.

O primeiro grupo é o mais complexo e com uma taxa mais lenta de recuperação, dado que os processos são mais intrincados, com muitos detalhes (pois incidem não somente sobre as edificações, mas também sobre o conjunto de objetos móveis). Estima-se que, com recursos disponíveis (humanos e financeiros), a taxa de recuperação deve ser ao redor de 20% ao ano. Neste grupo estão:

- A Igreja de Nossa Senhora das Mercês, em Bento Rodrigues/Mariana/MG.
- A Igreja de Nossa Senhora da Conceição, em Gesteira/Barra Longa/MG.
- A Igreja de Santo Antônio, em Paracatu de Baixo/Mariana/MG.
- A Igreja Matriz de São José, em Barra Longa/MG.

Deve-se lembrar que o primeiro bem cultural aqui listado (conforme explicitado anteriormente) – isto é, a igreja de Nossa Senhoras das Mercês, permite apenas a recuperação integral de sua

materialidade (100%), sem que seja possível assegurar o franco acesso da sociedade a ele, ou seja, o retorno dos serviços culturais.

Outros dois, a Igreja de Nossa Senhora da Conceição, em Gesteira, e a Igreja de Santo Antônio, em Paracatu de Baixo, julga-se que só possam ser recuperados parcialmente em sua estrita materialidade, ou seja, se ativer apenas a dimensão do restauro das edificações é possível o grau máximo de recuperação material em até 60%.

Entretanto, é importante destacar que a recuperação da dimensão arquitetônica dessas edificações não permite que seja considerado igualmente plena a recuperação dos serviços prestados pelo bem cultural, assim como dos objetos que os compunham (bens móveis e associados), seja possível. Assim, se por um lado o restauro dos aspectos materiais podem recuperar até 100% da igreja de Mercês, que não foi atingida pelo rejeito, e 60% das igrejas de Paracatu e Gesteira, danificadas diretamente pela onda de lama, por outro, seus serviços e bens associados conheceram danos irreversíveis, não cabendo falar em grau de recuperação, sendo assim considerados 0%. O único bem plenamente recuperável seria, então, a Igreja Matriz de São José em Barra Longa/MG (100%), seja em sua materialidade, seja em seus serviços prestados.

- Bens culturais edificados de caráter vernacular (residências e estabelecimentos comerciais).

O segundo grupo é composto por bens culturais edificados de caráter vernacular, de função residencial e/ou comercial/serviços. Essas edificações possuem caráter mais simples de modo geral, não havendo no contexto em quadro bens culturais edificados com complexas ornamentações. Por isso julga-se que a taxa de recuperação poderia, sem dúvida, ser de 40% no primeiro ano e 30% nos dois anos seguintes, permitindo a recuperação plena do bem cultural em 3 anos. Fazem parte deste grupo os seguintes bens, todos plenamente recuperáveis:

- Hotel Xavier, Barra Longa/MG.
- Casarão dos Fonseca, Santa Rita Durão/Mariana/MG.
- Sobrado, Santa Rita Durão/Mariana/MG.
- Fazenda Barra Longa, Barra Longa/MG.
- Fazenda das Corvinas, Barra Longa/MG.
- Estradas e caminhos.

A terceira situação recai sobre um único bem parcialmente recuperável, no caso o Caminho de São José. Por se tratar de uma estrada, sem construções antigas como no caso da Estrada Real, entende-se que as ações de recuperação (considerando-se que ela apresenta grau de recuperação máxima de até 80%) poderiam ser igualmente executadas numa taxa de 40% no primeiro ano e 30% nos dois anos seguintes.

Por fim, a Tabela 110 sumariza, todas as informações apresentadas, exibindo as taxas anuais de recuperação, os graus máximos de recuperação, a modalidade de recuperação, para cada bem material valorado.

Tabela 110 – Condição de recuperação, grau de recuperação material e de serviços, taxa anual de recuperação separado por bem material valorado

Bem Cultural Material	Condição de Recuperação	(%) GRM	(%) GRS	(%) TR material anual 1º ano	(%) TR material anual 2º ano	(%) TR material anual 3º ano	(%) TR material anual 4º ano	(%) TR material anual 5º ano
Capela de São Bento	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Estrada Real	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Edificação – Rua São Bento, 107	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Edificação - Bar da Sandra	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Igreja de Nossa Senhora das Mercês	Parcialmente recuperável	100	0	20	20	20	20	20
Edificação – Rua São Bento, 177	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Edificação - Rua São Bento, 251	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Edificação - Rua São Bento, 322	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Edificação - Rua São Bento, 349	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Edificação - Rua São Bento, 348, esquina com rua Olinda	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Escada de Pedra	Irrecuperável	0	0	0	0	0	0	0
Igreja de Santo Antônio	Parcialmente recuperável	60	0	20	20	20	20	20
Hotel Xavier	Recuperável	100	100	40	30	30	-	-
Igreja Matriz de São José	Recuperável	100	100	20	20	20	20	20
Caminho de São José	Parcialmente recuperável	80	100	40	30	30	-	-
Igreja Nossa Senhora da Conceição de Gesteira	Parcialmente recuperável	60	0	20	20	20	20	20
Fazenda Corvinas	Recuperável	100	100	40	30	30		
Fazenda Barra Longa	Recuperável	100	100	40	30	30	-	-
Sobrado - Praça da Matriz, 01, Casarão dos Fonseca	Recuperável	100	100	40	30	30	-	-
Sobrado - Rua Santa Rita, 544	Recuperável	100	100	40	30	30	-	-

Fonte: Lactec, 2021.

4.7.2.8 Construção da Curva de Recuperação Externa e Cálculo da Perda Interina

Relembrando, o conceito de recuperação externa é a recuperação feita pelo homem, mediante um projeto que busque reverter os danos causados e acelerar a recuperação e/ou, como é neste caso, oportunizar a recuperação do bem, seja de forma total ou parcial.

No caso dos bens materiais, conforme já ressaltado, tem-se 3 classificações de recuperação, os bens irrecuperáveis, os quais não podem receber ações de recuperação externa, os bens totalmente recuperáveis, que podem receber recuperações externas e retornar à sociedade a mesma quantidade de recursos e/ou serviços que havia antes do desastre, e por fim, os bens parcialmente recuperáveis, que podem receber ações de recuperações externas, mas não retornam a sociedade a mesma quantidade de recursos e/ou serviços que havia antes do desastre, mantendo assim um parte do bem perdida perpetuamente. Neste item apresentam-se a construção da curva de recuperação externa apenas dos bens totalmente e parcialmente recuperáveis.

- Bens totalmente recuperáveis

Os bens totalmente recuperáveis são aqueles que podem ser 100% restaurados tanto no quesito material quanto na prestação dos seus serviços culturais. As Tabela 111 e Tabela 112 mostram todas as informações utilizadas para o cálculo da área em metro quadrado dos bens afetados após a ponderação dos pesos, os graus máximos de recuperação, as taxas anuais de recuperação e os ganhos em áreas anuais obtidos por meio dessas taxas.

A área total de linha base, mostra o quantitativo de área total existente antes do dano, e a área total afetada é o quantitativo total de área afetada pelo desastre, sendo ambas as mesmas 43.753,89 m². Com a ponderação feitas pelos pesos de interrupção de serviços, existência de acautelamento e bens moveis associados, tem-se a área afetada final ponderada 113.536.74 m², sendo esta a área perdida pela sociedade.

Com a execução das ações de recuperação, em 5 anos todos os bens são plenamente restaurados, conforme a taxa de recuperação anual que cada um possui. Assim, no final do 5º ano a área recuperada é a mesma perdida pela sociedade 113.536.74 m².

Tabela 111 – Condição de recuperação, grau de recuperação material e de serviços, taxa anual de recuperação separado por bem material valorado

Bens Culturais Materiais Totalmente Recuperáveis	Área total (LB) m ²	Área afetada m ² (A)	Área afetada final PONDERADA	Grau de recuperação material do bem (%)	Grau de recuperação dos serviços prestados pelo do bem (%)	(%) TR material anual 1º ano	(%) TR material anual 2º ano	(%) TR material anual 3º ano	(%) TR material anual 4º ano	(%) TR material anual 5º ano
Igreja Matriz de São José	1.613,51	1.613,51	4.195,13	100	100	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Hotel Xavier	1.116,87	1.116,87	2.680,49	100	100	0,4	0,3	0,3	0	0
Fazenda Corvinas	33.747,84	33.747,84	87.744,38	100	100	0,4	0,3	0,3	0	0
Fazenda Barra Longa	6.320,01	6.320,01	16.432,03	100	100	0,4	0,3	0,3	0	0
Sobrado - Praça da Matriz, 01, Casarão dos Fonseca	565,43	565,43	1.470,12	100	100	0,4	0,3	0,3	0	0
Sobrado - Rua Santa Rita, 544	390,23	390,23	1.014,60	100	100	0,4	0,3	0,3	0	0
Total	43.753,89	43.753,89	113.536,74	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 112 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais totalmente recuperáveis

Bens Culturais Materiais Totalmente Recuperáveis	Área afetada final PONDERADA	Ganhos de recuperação material anual - 1º ano	Ganhos de recuperação material anual - 2º ano	Ganhos de recuperação material anual - 3º ano	Ganhos de recuperação material anual - 4º ano	Ganhos de recuperação material anual - 5º ano
Igreja Matriz de São José	4.195,13	839,03	1.678,05	2.517,08	3.356,10	4.195,13
Hotel Xavier	2.680,49	1.072,20	1.876,34	2.680,49	2.680,49	2.680,49
Fazenda Corvinas	87.744,38	35.097,75	61.421,07	87.744,38	87.744,38	87.744,38
Fazenda Barra Longa	16.432,03	6.572,81	11.502,42	16.432,03	16.432,03	16.432,03
Sobrado - Praça da Matriz, 01, Casarão dos Fonseca	1.470,12	588,05	1.029,08	1.470,12	1.470,12	1.470,12
Sobrado - Rua Santa Rita, 544	1.014,60	405,84	710,22	1.014,60	1.014,60	1.014,60
GANHO TOTAL DA RECUPERAÇÃO	113.536,74	44.575,67	78.217,18	111.858,69	112.697,71	113.536,74

Fonte: Lactec, 2021.

O objetivo da curva de recuperação externa é calcular a área da perda (perda interina) considerando a existência de um projeto de recuperação. Observe que antes, no contexto de recuperação natural, nenhum bem material possui recuperação, a perda é perpétua, sendo a área da perda interina muito maior, por ser uma reta, uma constante. Agora, diante da recuperação externa que permite reduzir esse tempo de perda, passando da perpetuidade, para um período de perda de apenas 5 anos, a área de perda (perda interina) diminui. Mas adiante serão expostos gráficos e valores comparativos que permitirão compreender melhor esta explicação.

Considerando que as ações de recuperação externa irão iniciar em 2022, e o desastre ocorreu em 2015, a Tabela 113 mostra a série de valores considerada para a valoração. O valor de perda anual é 113.536,74, logo o ganho obtido em cada ano deve ser deduzido dessa perda. A coluna *diferença* mostra a perda se reduzindo anualmente conforme os ganhos em área pela recuperação ocorrem, até chegar a 0, que é quando a recuperação atinge a mesma quantidade de recursos/serviços perdidos e termina a ocorrência de perdas para a sociedade. Os valores da coluna *diferença entre perdas e ganhos* é que representa a curva de recuperação externa, e foram esses os valores utilizados para o cálculo da perda interina dos bens materiais totalmente recuperáveis.

Tabela 113 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais totalmente recuperáveis

Ano	Ganho Total Recuperação (m ²)	Perda Anual (m ²)	Diferença Entre Perda e Ganho (m ²)
2015	0	113.536,74	113.536,74
2016	0	113.536,74	113.536,74
2017	0	113.536,74	113.536,74
2018	0	113.536,74	113.536,74
2019	0	113.536,74	113.536,74
2020	0	113.536,74	113.536,74
2021	0	113.536,74	113.536,74
2022	44.575,67	113.536,74	68.961,07
2023	78.217,18	113.536,74	35.319,56
2024	111.858,69	113.536,74	1.678,05
2025	112.697,71	113.536,74	839,03
2026	113.536,74	113.536,74	0,00

Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 100 exibe a demonstração gráfica da curva de recuperação externa representada pela linha azul claro que mostra o ganho de recuperação ao longo do tempo, bem como a curva de perda, representada pela linha azul escuro, que mostra a quantidade de área em m² de bens materiais perdida pela sociedade ao longo do tempo. Conforme os ganhos ocorrem, as perdas diminuem, até que toda perda é recuperada, e em 2026 zeram-se os ganhos e as perdas.

Figura 100 – Demonstração gráfica curva de recuperação externa dos bens materiais totalmente recuperáveis



Fonte: Lactec, 2021.

Para o cálculo da perda interina, ou seja, a área de perda diante do cenário no qual há ações de recuperação externa, foram trazidos a valor presente de 2015 (descontado) e somados, todos os valores da coluna *diferença entre perda e ganho (m²)*. Para correção dos valores foi utilizada a taxa de desconto social de 8% ao ano. Após a correção dos valores no tempo, e sua somatória, tem-se o resultado da perda interina dos bens materiais totalmente recuperáveis, cujo resultado está detalhado na Tabela 114.

Tabela 114 – Perda interina dos bens materiais totalmente recuperáveis

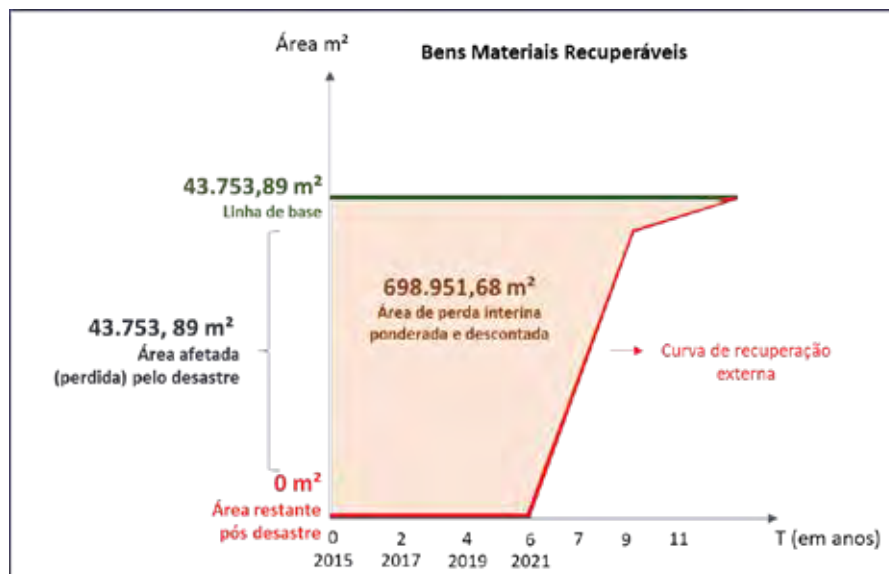
Compartimento:	1
Linha Base (bens materiais áreas em m²)	43.753,89
Quantidade de área em m² afetada (perda) ponderada	113.536,74
Perda interina em área em m² descontada	698.951,68

Fonte: Lactec, 2021.

Em suma, considerando este grupo de 6 bens passíveis de recuperação, antes, diante de um cenário de perda perpétua, isto é, sem recuperação externa ocorrendo, foi contabilizado 1.419.209,25 m² de perda em bens materiais para a sociedade. Mas se forem desenvolvidas ações que recuperem esses bens até 2026, considerando as taxas adotadas, a área de perda, nesse caso a perda interina descontada reduz para 698.951,68 m² sendo esta a perda final. Essa área de perda interina é a área que resta para compensar a sociedade, pois ela representa o tempo em que a mesma permaneceu sem os recursos/serviços valorados.

A Figura 101 exibe a representação gráfica do cálculo realizado e exposto na Tabela 114. A Figura mostra a área da perda interina que contempla apenas o espaço de tempo até que a recuperação externa seja concluída e retorne a sociedade a quantidade de área perdida.

Figura 101 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais recuperáveis afetados pelo desastre



Fonte: Lactec, 2021.

- Bens parcialmente recuperáveis

Os bens parcialmente recuperáveis são aqueles que recuperam apenas uma parte, seja esta no quesito material ou em relação aos serviços culturais prestados. A Tabela 115 mostra a grau de recuperação que cada um desses bens possui, considerando a materialidade e a prestação dos serviços. No entanto, para se ter um único percentual, se utilizou a mesma ponderação adotada na etapa do cálculo da perda, conforme já explicado, tendo sido assumido para a prestação de serviço o peso 60% e 40% para a materialidade. O resultado da quantidade de área a ser recuperada está na coluna *quantidade de área máxima recuperada*.

O valor total de área afetada em m² ponderada pelos 3 pesos utilizados é 8.185.581,70 m² a quantidade máxima recuperada é 7.509.429,79 m². A diferença entre esses dois valores é a perda perpétua, dado que os bens são apenas parcialmente recuperáveis.

A Tabela 115 também mostra as taxas anuais de recuperação de cada bem. Durante 5 anos, o projeto de recuperação retorna um quantitativo de área, limitada a área máxima recuperada, pois uma parte permanece perdida perpetuamente. Para saber a quantidade em área obtida a cada ano, foram feitos os cálculos e a Tabela 116 exibe esses valores.

Tabela 115 – Condição de recuperação, grau de recuperação material e de serviços, taxa anual de recuperação separado por bem material valorado

Bem Cultural Material Parcialmente Recuperável	Área total (LB) m²	Área afetada m² (A)	Área afetada final PONDERADA	(%) Grau de recuperação material do bem (peso 40%)	(%) Grau de recuperação dos serviços prestados pelo do bem (peso 60%)	Grau de recuperação ponderado	Quantidade de área máxima recuperada	(%) TR material anual 1º ano	(%) TR material anual 2º ano	(%) TR material anual 3º ano	(%) TR material anual 4º ano	(%) TR material anual 5º ano
Caminho de São José	2.715.848,04	2.715.848,04	8.147.544,12	80	100	92%	7.495.740,59	0,4	0,3	0,3	0	0
Igreja Nossa Senhora da Conceição de Gesteira	1.012,35	1.012,35	4.656,81	60	0	24%	1.117,63	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Igreja de Santo Antônio	1.060,80	1.060,80	4.879,68	60	0	24%	1.171,12	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Igreja de Nossa Senhora das Mercês	6.195,89	6.195,89	28.501,09	100	0	40%	11.400,44	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
TOTAL	2.724.117,08	2.724.117,08	8.185.581,70	-	-	-	7.509.429,79	-	-	-	-	-

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 116 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais parcialmente recuperáveis

Bem Cultural Material Parcialmente Recuperável	Área afetada final PONDERADA	Quantidade de área máxima recuperada	(%) TR material anual 1º ano	(%) TR material anual 2º ano	(%) TR material anual 3º ano	(%) TR material anual 4º ano	(%) TR material anual 5º ano
Caminho de São José	8.147.544,12	7.495.740,59	2.998.296,24	5.247.018,41	7.495.740,59	7.495.740,59	7.495.740,59
Igreja Nossa Senhora da Conceição de Gesteira	4.656,81	1.117,63	223,53	447,05	670,58	894,11	1.117,63
Igreja de Santo Antônio	4.879,68	1.171,12	234,22	468,45	702,67	936,90	1.171,12
Igreja de Nossa Senhora das Mercês	28.501,09	11.400,44	2.280,09	4.560,18	6.840,26	9.120,35	11.400,44
GANHO TOTAL DA RECUPERAÇÃO	8.185.581,70	7.509.429,79	3.001.034,08	5.252.494,09	7.503.954,11	7.506.691,95	7.509.429,79

Fonte: Lactec, 2021.

Ao considerar o contexto de existência de ações de recuperação externa, tem-se como objetivo mensurar a área da perda interina. Considerando-se que a recuperação iniciaria em 2022 e o desastre ocorreu em 2015, a Tabela 117 mostra a série de valores considerada para o cálculo da perda interina.

O valor de perda anual é 8.185.581,70 m², logo o ganho obtido em cada ano deve ser deduzido dessa perda, gerando redução das perdas, resultado exibido na coluna *Diferenças entre perdas e ganhos m²*. No entanto, apesar da redução da perda observada a partir de 2022, devido ao fato desses bens não serem recuperados plenamente, em 2026 permanece uma perda de 676.151,91 m² sendo este o quantitativo perpétuo de perda deste grupo.

Tabela 117 – Ganho anual da recuperação externa dos bens materiais parcialmente recuperáveis

Ano	Ganho Total Recuperação (m ²)	Perda Anual (m ²)	Diferença Entre Perda e Ganho (m ²)
2015	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2016	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2017	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2018	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2019	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2020	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2021	0	8.185.581,70	8.185.581,70
2022	3.001.034,08	8.185.581,70	5.184.547,63
2023	5.252.494,09	8.185.581,70	2.933.087,61
2024	7.503.954,11	8.185.581,70	681.627,59
2025	7.506.691,95	8.185.581,70	678.889,75
2026	7.509.429,79	8.185.581,70	676.151,91

Fonte: Lactec, 2021.

A Figura 102 exibe a demonstração gráfica da curva de recuperação externa representada pela linha azul escuro que mostra o ganho de recuperação ao longo do tempo, porém ela nunca alcança a linha azul clara que representa a linha base (a perda), que mostra a quantidade de área em m² de bens materiais perdida pela sociedade ao longo do tempo. Conforme os ganhos ocorrem, as perdas diminuem, mas ela não é plenamente, então em 2026 há uma perda residual perpétua de 676.151,91 m².

Figura 102 – Demonstração gráfica curva de recuperação externa dos bens materiais parcialmente recuperáveis



Fonte: Lactec, 2021.

Para o cálculo da perda interina foram trazidos a valor presente de 2015 (descontado) e somados, todos os valores da coluna *diferença entre perda e ganho (m²)*. Para correção dos valores foi utilizada a taxa de desconto social de 8% a.a. Após a correção dos valores no tempo, e sua somatória, bem como a consideração da perpetuidade incidida na perda residual, tem-se o resultado da perda interina dos bens materiais parcialmente recuperáveis, cujo resultado está detalhado na Tabela 118.

Tabela 118 – Perda interina dos bens materiais parcialmente recuperáveis

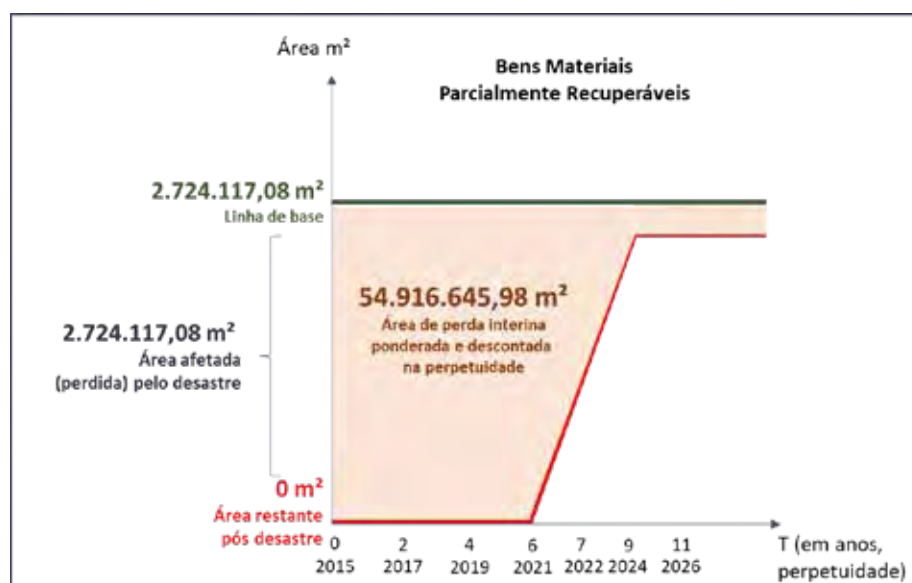
Compartimento:	1
Linha Base (bens materiais áreas em m ²)	2.724.117,08
Quantidade de área em m ² afetada (perda) ponderada	8.185.581,70
Perda interina em área em m² descontada	54.916.645,98

Fonte: Lactec, 2021.

Resumindo, considerando este grupo de 4 bens parcialmente recuperáveis, anteriormente, em um cenário de perda perpétua, sem recuperação externa ocorrendo, foi calculado 102.319.771,25 m² de perda em bens materiais para a sociedade. Mas se forem desenvolvidas ações que recuperem esses bens até 2026, considerando as taxas adotadas, a área de perda, nesse caso a perda interina descontada, reduz para 54.916.645,98 m², sendo esta a perda final. Esse quantitativo de área trata-se do que resta para compensar a sociedade, pois ela representa o tempo em que a mesma permaneceu sem os recursos/serviços valorados.

A Figura 103 exibe a representação gráfica do cálculo realizado e exposto na Tabela 118. A Figura mostra a área da perda interina que contempla o espaço de tempo até que a recuperação externa seja concluída, bem como a perda perpétua.

Figura 103 – Demonstração gráfica do resultado da perda interina dos bens materiais parcialmente recuperáveis afetados pelo desastre



Fonte: Lactec, 2021.

Sumarize-se que a perda interina total descontada dos bens materiais considerando os bens irrecuperáveis, recuperáveis e parcialmente recuperáveis, resulta em 79.286.839,92 m² que deverá ser compensada à sociedade.

4.7.2.9 Taxa de Compensação Anual dos Bens Materiais

Do mesmo modo como foi feito para os bens passíveis de recuperação total ou parcial, também foi definido para os bens alvo de compensação a taxa de compensação anual que é a mesma da taxa de recuperação anual, pois ela reflete o tempo que leva para essas ações compensatórias retornarem os recursos e serviços perdidos pela sociedade. Tais taxas são consideradas nos cálculos de construção da curva de compensação.

Ao considerar que as ações (protocolos que serão descritos mais adiante) serão realizados de maneira pertinente e fiel, é possível estimar que os benefícios gerados (em termos de área) pelas ações sobre os bens alvo de compensação, no que concerne as ações de pesquisa, planejamento, mapeamento de danos e execução de ações de campo, possuem diferentes taxas de cumprimento, variando para cada tipo de bem escolhido de 2 e 5 anos para serem totalmente realizados, compreendendo-se taxas variáveis entre 50% por ano, ou 40%, 30%, 30% ao longo de 3 anos, ou ainda uma constante de 20% de implementação das ações por ano, perfazendo 5 anos para os casos mais complexos, como as igrejas e palácio, conforme exposto na Tabela 119.

Tabela 119 – Taxa anual de compensação separado por bem material alvo das ações compensatórias

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m ²	Tx. recup. (%) - 1º ano	Tx recup. (%) - 2º ano	Tx recup. (%) - 3º ano	Tx. recup. (%) - 4º ano	Tx recup. (%) - 5º ano
Edificação pública	Sede de Mariana	Palácio do Conde de Assumar	989	20	20	20	20	20
Edificação vernacular	Camargos	Residência	398	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	377	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	556	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	242	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	567	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	580	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	379	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	2.827	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	435	50	50			
Edificação vernacular	Camargos	Residência	1.442	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Edificação térrea	628	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Escola Estadual Sinhô Machado	1.097	40	30	30		
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	269	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	460	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	291	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	849	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	859	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	2.193	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	1.019	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Casa das Rótulas	714	40	30	30		
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	692	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	292	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	822	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	131	50	50			
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	402	50	50			

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²	Tx. recup. (%) - 1º ano	Tx. recup. (%) - 2º ano	Tx. recup. (%) - 3º ano	Tx. recup. (%) - 4º ano	Tx. recup. (%) - 5º ano
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Sobrado	472	40	30	30		
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Casarão Linha Férrea	487	40	30	30		
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	1.013	50	50			
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	194	50	50			
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	355	50	50			
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Sociedade Musical São Caetano	903	50	50			
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	254	50	50			
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	341	50	50			
Estrada	Mariana	Estrada Real - Caminho dos Diamantes - trecho danificado a ser recuperado	630.000	40	30	30		
Estrada	Mariana	Estrada Real - Demais trechos do Caminho dos Diamantes não contabilizados na recuperação	1.740.000	40	30	30		
Estrada	Ouro Preto	Estrada Real - Caminho do Sabarabuçu	960.000	40	30	30		
Estrada	Ouro Preto	Estrada Real - Caminho Antigo, Ouro Preto a Glaura	168.000	40	30	30		
Estrada	Ouro Preto	Estrada Real - Caminho Antigo, Glaura a Santo Antonio do Leite	90.000	40	30	30		
Estrada	Ouro Preto	Estrada Real - Caminho Antigo, Entre Rios de Minas a Casa Grande	186.000	40	30	30		
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Lagoa Dourada a Prados	126.000	40	30	30		
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Prados a Tiradentes	108.000	40	30	30		
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Tiradentes a São João Del Rey	66.000	40	30	30		
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Cruzília a Caxambu	156.000	40	30	30		

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²	Tx. recup. (%) - 1º ano	Tx recup. (%) - 2º ano	Tx recup. (%) - 3º ano	Tx. recup. (%) - 4º ano	Tx recup. (%) - 5º ano
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Capela do Saco a Carrancas	174.000	40	30	30		
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Carrancas a Traituba	180.000	40	30	30		
Estrada		Estrada Real - Caminho Antigo, Traituba a Cruzília	222.000	40	30	30		
Igreja	Sede de Mariana	Igreja de São Francisco de Assis	2.691	20	20	20	20	20
Igreja	Sede de Mariana	Capela de Nossa Senhora Rainha dos Anjos	1332	20	20	20	20	20
Igreja	Cachoeira do Brumado	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	404	20	20	20	20	20
Igreja	Furquim	Igreja Matriz de Bom Jesus do Monte	1.194	20	20	20	20	20
Igreja	Santa Rita Durão	Igreja de Nossa Senhora do Rosário	669	20	20	20	20	20
Igreja	Monsenhor Horta	Igreja Matriz de São Caetano	2.164	20	20	20	20	20
Igreja	Brumal	Igreja Matriz de Santo Amaro	1.475	20	20	20	20	20
Igreja	São Gonçalo do Rio das Pedras	Igreja Matriz São Gonçalo do Rio das Pedras	1994	20	20	20	20	20
Igreja	Serro, Milho Verde	Capela do Rosário	425	20	20	20	20	20
Igreja	Serro, Milho Verde	Matriz de Nossa Senhora dos Prazeres	780	20	20	20	20	20
Igreja	Itaponhacanga	Capela de Nossa Senhora do Rosário	1.103	20	20	20	20	20
Igreja	Itaponhacanga	Igreja Matriz de São José	1.568	20	20	20	20	20
Igreja	Corregos	Igreja Matriz de Nossa Senhora de Aparecida	972	20	20	20	20	20
Igreja	Corregos	Capela do Nosso Senhor dos Passos	2.200	20	20	20	20	20
Igreja	Ipoema	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	1.258	20	20	20	20	20
Igreja	Padre Viegas, Mariana	Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário	2.095	20	20	20	20	20

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²	Tx. recup. (%) - 1º ano	Tx. recup. (%) - 2º ano	Tx. recup. (%) - 3º ano	Tx. recup. (%) - 4º ano	Tx. recup. (%) - 5º ano
Igreja	Bandeirantes, Mariana	Igreja de São Sebastião	1.578	20	20	20	20	20
Igreja	Cachoeira do Brumado, Mariana	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	867	20	20	20	20	20
Igreja	Cocais	Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário	1.265	20	20	20	20	20
Igreja	Camargos, Mariana	Igreja de Nossa Senhora da Conceição e Cruzeiro de pedra	2.318	20	20	20	20	20
Igreja	Cachoeira do Campo, Ouro Preto	Igreja Matriz de Nossa Senhora de Nazaré	2.505	20	20	20	20	20
Igreja	Prados	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	2.308	20	20	20	20	20
Igreja	Baependi	Igreja Matriz de Nossa Senhora do Monte Serrat	2.036	20	20	20	20	20
Total			4.864.730					

Fonte: Lactec, 2021.

4.7.2.10 Construção da Curva de Compensação

Após a definição das taxas de execução das ações compensatórias ao longo do tempo, apresenta-se neste item o processo de cálculo para a construção da curva de compensação.

Compreende-se por ações compensatórias, no âmbito desta metodologia de valoração dos danos, as ações que geram serviços ou recursos equivalentes àqueles oferecidos à sociedade pelos bens alvo de danos antes do desastre. No entanto, o quantitativo a ser compensado está atrelado ao tempo que a sociedade aguarda para obter esses serviços e recursos novamente. Mesmo que os bens afetados sejam recuperados total ou parcialmente, ainda assim, houve um tempo de espera até a conclusão desse processo. Por isso, a compensação à sociedade sempre deve ocorrer pois trata-se de um quantitativo de serviços/recursos adicionais que compensam o tempo de espera.

As ações de compensação serão realizadas em bens materiais localizados em outras áreas, que não àquelas diretamente afetadas pelo desastre, mas que são passíveis de receber alguma intervenção para melhorias e aumento da geração de serviços/recursos para a sociedade.

Além desses, as ações compensatórias também serão direcionadas para os bens afetados pelas ações emergenciais da RENOVA, a fim de reverter ou retirar danos desses bens, tanto aqueles decorrentes das ações emergenciais quanto outros danos não relacionados ao desastre ocorrido.

Aqui cabe um esclarecimento dessa decisão. Para o método, o conceito de compensação é promover ações em bens em locais que não foram atingidos pelo desastre, ou em áreas remanescentes dos bens atingidos, áreas estas também sem danos oriundos do desastre. Porém, para os bens materiais, devido à dificuldade em encontrar o quantitativo necessário de bens equivalentes que compense a perda interina, e devido também a importância desses bens que não foram atingidos diretamente pelo desastre, mas sim pelas ações emergenciais posteriores, a equipe optou por neste caso, incorporar tais bens na etapa da compensação, direcionando ações compensatórias para os mesmos, e contabilizando suas áreas como compensação. Tal decisão é conservadora, pois pelo procedimento tradicional do método, os bens afetados pelas ações emergenciais deveriam compor o cálculo da perda interina, aumentando a área devida. Porém, para o cálculo da perda interina foram considerados apenas os bens atingidos diretamente pelo rejeito. Logo, a área cobrada é menor, todavia, os bens afetados pelas ações emergenciais não são negligenciados quando integram o quantitativo de bens a receberem compensação.

Posto isso, para a compensação dos bens materiais selecionou-se bens não impactados pelo desastre, mas localizados o mais próximo possível da área impactada, mapeados no âmbito do Estado de Minas Gerais, com vista a alcançar prioritariamente a população que sofreu a perda. E também bens impactados pelas ações emergenciais.

A perda interina total calculada nas etapas anteriores corresponde a 79.286.839,92 m² que deverão ser compensados à sociedade devido ao tempo em que esta permaneceu sem os recursos/serviços promovidos pelos bens materiais. Esse valor total é obtido a partir do somatório das perdas interinas calculadas para cada subgrupo dos bens materiais conforme possibilidade de recuperação, a Tabela 120 exibe os valores.

Tabela 120 – Perda interina total dos bens materiais, por modalidade de recuperação

Modalidade de Recuperação	Perda Interina em m ²
Bens materiais irrecuperáveis	23.671.242,25
Bens materiais recuperáveis	698.951,68
Bens materiais parcialmente recuperáveis	54.916.645,98
Perda Interina Total Descontada	79.286.839,92

Fonte: Lactec, 2021.

- *Escolha dos bens alvos de compensação*

Para realizar a escolha dos bens alvo de compensação e proceder com o cálculo das metragens a serem compensadas e a identificação dos bens culturais prioritários a receberem essas compensações empregou-se os mesmos critérios mobilizados nas etapas anteriores.

Inicialmente foi realizada a discriminação das metragens a serem compensadas por tipologia de bens culturais materiais danificados e cujos danos estão sendo valorados. Essa discriminação se faz necessária devido às características dessas tipologias de bens, o que impacta na quantidade de metros a serem compensados, mas, também, no tipo de operação desenvolvida para a realização da compensação (o que impacta, sobretudo, na taxa anual de recuperação do bem cultural). O que se quer dizer é que as tipologias de bens foram consideradas, pois os bens materiais afetados também apresentam tipologias distintas. Dessa forma, para garantir a maior equivalência e equiparação possível, foi necessário selecionar bens para compensação cujas tipologias sejam as mesmas dos bens alvo de danos.

A segunda questão é a delimitação do bem cultural material. Assim como nas etapas anteriores foram consideradas as estruturas anexas aos bens edificados como estruturas que os compõem, seja por não possuírem autonomia contextual (por serem estruturas complementares aos bens principais), seja por operarem de modo complementar e solidário às edificações centrais. Assim, considerou-se para a delimitação das áreas dos bens edificados a receberem ações de compensação os seguintes elementos:

- Igrejas: adros, cruzeiros, cemitérios anexos, muros, portões, casas paroquiais (quando existem).
- Edificações vernaculares (residências e imóveis comerciais): depósitos, telheiros, cozinhas e banheiros externos, quintais, poços artesianos, hortas e afins.
- Estradas e caminhos: pontes, muros de arrimo, calçamento, drenagens, bicames, marcos religiosos (capelas de estrada e cruzeiros).

No caso das construções vernaculares optou-se por não considerar a delimitação legal dos lotes por algumas razões:

- 1) dificuldade em obter tais documentos (escrituras). É da natureza dos imóveis dessa região, sobretudo os mais antigos, que a documentação seja imprecisa, inexistente ou desatualizada. Em certos casos um único lote foi subdividido sucessivamente no decorrer dos séculos, recebendo novas construções, sem que a documentação legal acompanhasse tais movimentações.
- 2) pelo fato de que o que efetivamente interessa para fins de proteção do patrimônio cultural é o conjunto orgânico de elementos que compõem uma unidade, ou seja, não se trata

de proteger todo um lote descrito em uma documentação formal/legal, mas os elementos construtivos ou mobilizados naquela unidade/edificação. O caso das fazendas cujas estruturas sofreram danos decorrente do desastre é esclarecedor: se considerar toda sua área formal (registrada legalmente) e não apenas o conjunto de elementos que efetivamente importa para fins de proteção do bem edificado, a quantidade de área a ser compensada seria infinitamente maior, promovendo uma incorreção e uma impossibilidade de operacionalização.

3) esse foi o mesmo critério empregado em todas as etapas anteriores deste projeto, mantendo-se desta forma a unidade e coerência metodológica (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020f).

- *Tipologia dos bens alvos de compensação selecionados*

As estradas ou caminhos danificados representam a esmagadora maioria das metragens a serem compensadas, justamente por se tratar de grandes estruturas. Por outro lado, alguns dos bens culturais materiais (edificações) que sofreram danos irreparáveis possuíam apenas algumas dezenas de metros quadrados. Se todas essas metragens fossem colocadas em um mesmo agrupamento, sem qualquer segregação ou tipificação dos bens a receberem compensações, se estabeleceria novamente uma severa discrepância.

Por conta disso, segregou-se os bens culturais a serem alvo de compensação em três grupos, garantindo uma compensação equivalente pelos danos causados aos bens culturais materiais decorrente do desastre. Desta forma tem-se:

- GRUPO 1: Igrejas
- GRUPO 2: Arquitetura vernacular (casas e estabelecimentos comerciais)
- GRUPO 3: Estradas e caminhos.

1. Igrejas

Na etapa do cálculo da perda, houve três igrejas afetadas pelo desastre. Assim na etapa de compensação foram adotados os mesmos procedimentos para a contabilização, das metragens e selecionadas edificações que não apenas estivessem na mesma região (Mariana e cidades do entorno), mas também que fossem pertencentes ao mesmo estilo arquitetônico, a mesma técnica construtiva (gaiolas de madeira), ao mesmo período histórico, ao mesmo contexto cultural e que prestassem os mesmos serviços às suas respectivas comunidades de modo aproximado (sempre considerando que cada bem cultural é único e a equivalência somente existe por aproximação tipológica e contextual).

É importante destacar que foram privilegiadas as igrejas para serem alvo das ações compensatórias aquelas localizadas em distritos das cidades de Mariana e Santa Bárbara pelas seguintes razões: as igrejas que conheceram danos decorrentes do desastre promovido pelo rompimento da barragem de Fundão também se localizavam em distritos de Mariana e Barra Longa e não em suas sedes. Além disso, o universo cultural dessa região e o conjunto de seus bens culturais (sobretudo os edificados e urbanísticos) compõem uma rede interconectada e que permite não apenas a fruição, mas a interpretação e compreensão em seu conjunto. Por isso é fundamental que, mais do que os distritos sede (normalmente os que recebem já maiores atenções por conta da proximidade com o poder público e, também, pelo aproveitamento turístico) os distritos mais afastados recebam atenção com o objetivo

de garantir a preservação da rede de bens culturais materiais constituídos no decorrer da história. Por fim, considerando que o peso que mais incidiu na contabilidade dos danos aos bens materiais foi justamente o da interrupção ou cessão dos serviços à sociedade, conclui-se que os serviços semelhantes àqueles prestados pelos bens materiais danificados somente serão encontrados em bens culturais materiais (edificações) localizados em contextos semelhantes, ou seja, nos distritos circundantes às sedes municipais.

2. Arquitetura vernacular

Os bens edificados que são caracterizados como edificações de arquitetura vernacular e uso geralmente privado, como residências ou pequenos estabelecimentos comerciais, sejam casas térreas, sejam sobrados, possuindo partido arquitetônico colonial foram escolhidos prioritariamente dentre aqueles já listados quando do Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f) nos distritos do município de Mariana que não sofreram diretamente com o impacto da onda de rejeitos advindo da barragem de Fundão, mas foram impactados em ondas de afetação provindas de ações emergenciais e reparatórias da RENOVA, que promoveram impactos, sobretudo, pela trepidação, incidindo danos às edificações, notadamente aquelas erguidas em barro, em desdobramento do fluxo de veículos e maquinário pesado direcionado para atender as demandas causadas pelo desastre na bacia do rio Doce.

Assim, selecionou-se o conjunto de casario presente em três localidades principais: Camargos, Monsenhor Horta e Santa Rita Durão, todos distritos do município de Mariana-MG, todos os quais vivenciaram tais danos e ainda aguardam ações que ofereçam o devido reparo aos danos sobre a materialidade de suas edificações. Esses bens não só devem ser compreendidos enquanto os bens mais próximos das características materiais das edificações vernaculares que existiam em Bento Rodrigues e cujo grau de destruição devido ao impacto da lama oriunda do rompimento da barragem de Fundão os tornou irreversíveis, como seu contexto histórico é interligado em redes de arraiais e vilas dentro do complexo minerador do período colonial, conforme se pormenorizou no Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f).

Igualmente selecionou-se o Palácio do Conde de Assumar, na Sede de Mariana, pois apesar de edificação pública, é de grande relevo histórico e encontra-se até o presente momento fora de serviço. Apesar de sua grande dimensão frente a muitas das casas vernaculares, possui uma série de elementos que lhes avizinhas dessas construções, bem como das sedes de fazendas, as quais foram escolhidas para comporem esta valoração, tal como sua materialidade e contexto histórico.

3. Estradas e caminhos

Na etapa do cálculo da perda foi identificado que o trecho da Estrada Real localizado no setor do povoado de Bento Rodrigues conheceu danos graves e o Caminho de São José, que liga a Igreja Matriz de São José em Barra Longa ao Santuário de Santana do Deserto, próximo à barragem de Candonga, conheceu danos irreversíveis em toda sua extensão.

No caso do Caminho de São José, sendo os danos irreversíveis²⁵ em toda sua extensão, não foi possível selecionar outros trechos sem danos para serem alvo de ações compensatórias. Sendo assim,

²⁵ Danos estes vinculados a instalação de equipamentos para o atendimento ao desastre como tanques de decantação, tubulações, construção de grandes pátios de manobra para máquinas e caminhões, instalação de sinalização de segurança, além da retirada de partes componentes de suas estruturas originais ou desconfiguração drástica do caminho.

optou-se por indicar setores pertencentes à Estrada Real para receber a compensação referente a metragem calculada sobre os danos conhecidos pelas estradas.

Segundo o Instituto Estrada Real (INSTITUTO ESTRADA REAL, 2015) e também segundo a bibliografia especializada (FURTADO, 2005), costuma-se dividir a Estrada Real em quatro setores distintos, surgidos em momentos e contextos diversos. O denominado Caminho Velho ligava Ouro Preto (Vila Rica) ao porto de Paraty (RJ), em seguida estabeleceu-se o Caminho Novo, o qual transferia o porto de embarque do ouro das Minas Gerais para a cidade de São Sebastião do Rio de Janeiro (RJ). Em seguida se estabeleceram outros dois ramais, o Caminho do Sabarabuçu, que seguia em direção às minas de Sabará e, finalmente, o Caminho dos Diamantes, ligando Mariana à Diamantina. Foi justamente este quarto e último ramal da Estrada Real que conheceu danos decorrentes do desastre promovido pelo rompimento da Barragem de Fundão (Mariana/MG), em seu setor que ligava os distritos de Camargos à Santa Rita Durão.

Considerando a tipologia e, também, para a preservação do ramal conhecido como Caminho dos Diamantes, indica-se trechos pertencentes a ele para que recebam as ações de compensação, especificados na Tabela 121.

Tabela 121 – Extensões e metragens dos trechos do Caminho dos Diamantes a serem compensados

Trecho	Extensão (km)	Área (m ²)
Ouro-Preto-Mariana	10	60.000
Mariana-Camargos	14	84.000
Santa Rita Durão-Camargos	13	78.000
Catas Altas-Santa Rita Durão	16	96.000
Catas Altas-Santa Bárbara	14	84.000
Barão de Cocais-Santa Bárbara	11	66.000
São Gonçalo do Rio das Pedras-Serro	27	162.000
TOTAL	105	630.000

Fonte: Lactec, 2021.

Empregou-se para a contabilização da metragem dos trechos a receberem as ações de compensação os mesmos critérios adotados para a valoração dos danos, nas etapas anteriores. Utilizou-se as coordenadas das extremidades dos trechos e considerou-se a largura média de 6 metros para as estradas, calculando, então, a metragem quadrada. Adotou-se, também, a descrição dos trechos do Caminho dos Diamantes mapeado e descrito pelo Instituto Estrada Real por ser um trabalho consistente neste aspecto e cobrir os setores onde ainda se encontram vestígios materiais deste bem cultural que necessitam de ações de preservação.

De maneira a atingir a metragem total a ser compensada, vide os elementos multiplicadores usados, foram escolhidos outros trechos da Estrada Real para serem igualmente alvos de compensação, como segmentos do Caminho Velho e do Caminho do Sabarabuçu no âmbito do Estado de Minas Gerais.

Os bens materiais selecionados para serem alvo das ações de compensação e assim quitar a perda interina estão listados na Tabela 122.

Além da listagem dos bens a serem alvos das ações de compensação, a Tabela 122 também exhibe os pesos adotados e a média ponderada dos mesmos, que seguiu o mesmo processo utilizado na

etapa do cálculo da perda e já explanado no item 4.7.2.4. A única adaptação feita para esta etapa foi a mudança da nomenclatura, interrupção dos serviços, para reestabelecimentos dos mesmos, e danos aos bens móveis para presença de bens móveis.

Adiciona-se que no fator multiplicador “Restabelecimento dos serviços”, cujo peso representa 60% do total calculado, considerou-se que muitos dos bens a receberem ações de compensação apesar de não haverem tido os serviços por eles prestados à sociedade interrompidos, o fato de serem alvo de melhorias especificadas no protocolo de compensação (restauro, musealização, comunicação, educação patrimonial) proporcionarão um incremento tanto à proteção desses bens culturais quanto ganhos efetivos a sociedade.

Da mesma forma, entende-se que para bens privados com uso quase exclusivamente privado (residências), o ganho para a sociedade promovido pelas ações de compensação é menor do que aqueles que, independentemente de serem públicos ou privados (como igrejas e capelas), prestam serviços efetivamente públicos e com benefícios difusos. Portanto, o ganho promovido pelas ações direcionadas a esses bens (igrejas, capelas, estradas e caminhos históricos, escolas públicas, construções históricas oficiais) é maior do que o ganho promovido pelas ações nos demais bens culturais materiais indicados (residências).

Tabela 122 – Bens materiais selecionados para serem alvo de ações compensatórias, elementos multiplicadores dos bens, e valores de metragem finais ponderados

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²	Restabelecimento dos serviços (60%)	Existência de instrumento de acautelamento (20%)	Presença de bens móveis associados (20%)	Equivalência dos bens + Média ponderada dos 3 pesos utilizados	RESULTADO FINAL PONDERADO (m²)
Edificação pública	Sede de Mariana	Palácio do Conde de Assumar	989	5	5	5	6,0	5.934,00
Edificação vernacular	Camargos	Residência	398	2	1	0	2,4	955,20
Edificação vernacular	Camargos	Residência	377	2	1	0	2,4	904,80
Edificação vernacular	Camargos	Residência	556	2	1	0	2,4	1.334,40
Edificação vernacular	Camargos	Residência	242	2	1	0	2,4	580,80
Edificação vernacular	Camargos	Residência	567	2	1	0	2,4	1.360,80
Edificação vernacular	Camargos	Residência	580	2	1	0	2,4	1.392,00
Edificação vernacular	Camargos	Residência	379	2	1	0	2,4	909,60
Edificação vernacular	Camargos	Residência	2.827	2	1	0	2,4	6.784,80
Edificação vernacular	Camargos	Residência	435	2	1	0	2,4	1.044,00
Edificação vernacular	Camargos	Residência	1.442	2	1	0	2,4	3.460,80
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Edificação térrea	628	2	4	0	3,0	1.884,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Escola Estadual Sinhô Machado	1.097	2	4	0	3,0	3.291,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	269	2	4	0	3,0	807,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	460	2	4	0	3,0	1.380,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	291	2	4	0	3,0	873,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	849	2	4	0	3,0	2.547,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	859	2	4	0	3,0	2.577,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	2.193	5	4	0	4,8	10.526,40
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	1.019	5	4	0	4,8	4.891,20
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Casa das Rótulas	714	5	5	0	5,0	3.570,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	692	2	4	0	3,0	2.076,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	292	2	4	0	3,0	876,00

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²	Restabelecimento dos serviços (60%)	Existência de instrumento de acautelamento (20%)	Presença de bens móveis associados (20%)	Equivalência dos bens + Média ponderada dos 3 pesos utilizados	RESULTADO FINAL PONDERADO (m²)
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	822	2	4	0	3,0	2.466,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	131	2	4	0	3,0	393,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Residência	402	2	4	0	3,0	1.206,00
Edificação vernacular	Santa Rita Durão	Sobrado	472	2	4	0	3,0	1.416,00
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Casarão Linha Férrrea	487	5	1	0	4,2	2.045,40
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	1.013	2	1	0	2,4	2.431,20
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	194	2	1	0	2,4	465,60
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	355	2	1	0	2,4	852,00
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Sociedade Musical São Caetano	903	5	1	0	4,2	3.792,60
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	254	2	1	0	2,4	609,60
Edificação vernacular	Monsenhor Horta	Residência	341	2	1	0	2,4	818,40
Estrada	Mariana	Estrada Real - Caminho dos Diamantes - trecho danificado a ser recuperado	630.000	1,5	2	0	2,3	1.449.000,00
Estrada	Mariana	Estrada Real - Demais trechos do Caminho dos Diamantes não contabilizados na recuperação	1.740.000	1,5	3	0	2,5	4.350.000,00
Estrada	Ouro Preto, Cachoeira do Campo, São Bartolomeu, Acuruí, Rio Acima, Honório Bicalho, Raposos, Morro Vermelho, Sabará, Caeté, Cocais	Estrada Real - Caminho do Sabarabuçu	960.000	1,3	3	0	2,4	2.284.800,00

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m²	Restabelecimento dos serviços (60%)	Existência de instrumento de acautelamento (20%)	Presença de bens móveis associados (20%)	Equivalência dos bens + Média ponderada dos 3 pesos utilizados	RESULTADO FINAL PONDERADO (m²)
Estrada	Ouro Preto, Glaura	Estrada Real - Caminho Antigo, Ouro Preto a Glaura	168.000	1,3	2	0	2,2	366.240,00
Estrada	Glaura, Cachoeira do Campo, Santo Antonio do Leite	Estrada Real - Caminho Antigo, Glaura a Santo Antonio do Leite	90.000	1,3	2	0	2,2	196.200,00
Estrada	Entre Rios de Minas, Casa Grande o	Estrada Real - Caminho Antigo, Entre Rios de Minas a Casa Grande	186.000	1,3	2	0	2,2	405.480,00
Estrada	Lagoa Dourada, Prados	Estrada Real - Caminho Antigo, Lagoa Dourada a Prados	126.000	1,3	2	0	2,2	274.680,00
Estrada	Prados, Bichinho, Tiradentes	Estrada Real - Caminho Antigo, Prados a Tiradentes	108.000	1,2	2	0	2,1	228.960,00
Estrada	Tiradentes, São João Del Rey	Estrada Real - Caminho Antigo, Tiradentes a São João Del Rey	66.000	1,2	2	0	2,1	139.920,00
Estrada	Cruzília, Baependi, Caxambu	Estrada Real - Caminho Antigo, Cruzília a Caxambu	156.000	1,2	2	0	2,1	330.720,00
Estrada	Capela do Saco, Carrancas	Estrada Real - Caminho Antigo, Capela do Saco a Carrancas	174.000	1,2	2	0	2,1	368.880,00
Estrada	Carrancas, Traituba	Estrada Real - Caminho Antigo, Carrancas a Traituba	180.000	1,2	2	0	2,1	381.600,00
Estrada	Traituba, Cruzília	Estrada Real - Caminho Antigo, Traituba a Cruzília	222.000	1,2	2	0	2,1	470.640,00
Igreja	Sede de Mariana	Igreja de São Francisco de Assis	2.691	5	5	5	6,0	16.146,00

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m ²	Restabelecimento dos serviços (60%)	Existência de instrumento de acautelamento (20%)	Presença de bens móveis associados (20%)	Equivalência dos bens + Média ponderada dos 3 pesos utilizados	RESULTADO FINAL PONDERADO (m ²)
Igreja	Sede de Mariana	Capela de Nossa Senhora Rainha dos Anjos	1332	3	5	5	4,8	6.393,60
Igreja	Cachoeira do Brumado	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	404	3	5	5	4,8	1.939,20
Igreja	Furquim	Igreja Matriz de Bom Jesus do Monte	1.194	3	5	5	4,8	5.731,20
Igreja	Santa Rita Durão	Igreja de Nossa Senhora do Rosário	669	3	5	5	4,8	3.211,20
Igreja	Monsenhor Horta	Igreja Matriz de São Caetano	2.164	3	5	5	4,8	10.387,20
Igreja	Brumal	Igreja Matriz de Santo Amaro	1.475	3	5	5	4,8	7.080,00
Igreja	São Gonçalo do Rio das Pedras	Igreja Matriz São Gonçalo do Rio das Pedras	1994	3	5	5	4,8	9.571,20
Igreja	Serro, Milho Verde	Capela do Rosário	425	3	5	5	4,8	2.040,00
Igreja	Serro, Milho Verde	Matriz de Nossa Senhora dos Prazeres	780	3	5	5	4,8	3.744,00
Igreja	Itaponhacanga	Capela de Nossa Senhora do Rosário	1.103	3	5	5	4,8	5.294,40
Igreja	Itaponhacanga	Igreja Matriz de São José	1.568	3	5	5	4,8	7.526,40
Igreja	Corregos	Igreja Matriz de Nossa Senhora de Aparecida	972	3	5	5	4,8	4.665,60
Igreja	Corregos	Capela do Nosso Senhor dos Passos	2.200	3	4	5	4,6	10.120,00
Igreja	Ipoema	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	1.258	3	5	5	4,8	6.038,40

Tipologia de bem	Município ou Localidade	Bem Cultural Material	Área total (LB) m ²	Restabelecimento dos serviços (60%)	Existência de instrumento de acautelamento (20%)	Presença de bens móveis associados (20%)	Equivalência dos bens + Média ponderada dos 3 pesos utilizados	RESULTADO FINAL PONDERADO (m ²)
Igreja	Padre Viegas, Mariana	Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário	2.095	3	5	5	4,8	2.095,00
Igreja	Bandeirantes, Mariana	Igreja de São Sebastião	1.578	3	5	5	4,8	1.578,00
Igreja	Cachoeira do Brumado, Mariana	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	867	3	5	5	4,8	867,00
Igreja	Cocais	Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário	1.265	3	5	5	4,8	1.265,00
Igreja	Camargos, Mariana	Igreja de Nossa Senhora da Conceição e Cruzeiro de pedra	2.318	3	5	5	4,8	2.318,00
Igreja	Cachoeira do Campo, Ouro Preto	Igreja Matriz de Nossa Senhora de Nazaré	2.505	3	5	5	4,8	2.505,00
Igreja	Prados	Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	2.308	3	5	5	4,8	2.308,00
Igreja	Baependi	Igreja Matriz de Nossa Senhora do Monte Serrat	2.036	3	2	5	4,2	2.036,00
Total			4.864.730					11.438.436,00

Fonte: Lactec, 2021.

Após a definição da listagem de bens para receberem compensação e aplicação do peso sobre as áreas, o próximo passo foi calcular a evolução do ganho de áreas compensadas ao longo do tempo, respeitando as taxas de compensação já apresentadas.

A Tabela 123 mostra esses resultados, pois a partir da área ponderada de cada bem, calculou-se o ganho em área de cada um anualmente, conforme a taxa de recuperação material anual. Na sequência foi feito o somatório anual, de todos os bens, desses ganhos em área (m^2) (sendo essa série de somatório a curva de compensação) e aplicado sobre esse somatório a taxa de desconto social de 8% ao ano, obtendo assim a série descontada, e acrescido o benefício perpétuo por meio da aplicação da fórmula da perpetuidade no último ano.

Tabela 123 – Cálculo dos ganhos anuais da compensação em área (m²)

Bem Cultural Material	RESULTADO FINAL PONDERADO	Tx. recup. material anual (%) 1º ano	Tx. recup. material anual (%) 2º ano	Tx. recup. material anual (%) 3º ano	Tx. recup. material anual (%) 4º ano	Tx. recup. material anual (%) 5º ano	Área ponderada recuperada 1º ano	Área ponderada recuperada 2º ano	Área ponderada recuperada 3º ano	Área ponderada recuperada 4º ano	Área ponderada recuperada 5º ano
Palácio do Conde de Assumar	5.934,00	20	20	20	20	20	1.186,80	2.373,60	3.560,40	4.747,20	5.934,00
Residência	955,20	50	50				477,60	955,20	955,20	955,20	955,20
Residência	904,80	50	50				452,40	904,80	904,80	904,80	904,80
Residência	1.334,40	50	50				667,20	1.334,40	1.334,40	1.334,40	1.334,40
Residência	580,80	50	50				290,40	580,80	580,80	580,80	580,80
Residência	1.360,80	50	50				680,40	1.360,80	1.360,80	1.360,80	1.360,80
Residência	1.392,00	50	50				696,00	1.392,00	1.392,00	1.392,00	1.392,00
Residência	909,60	50	50				454,80	909,60	909,60	909,60	909,60
Residência	6.784,80	50	50				3.392,40	6.784,80	6.784,80	6.784,80	6.784,80
Residência	1.044,00	50	50				522,00	1.044,00	1.044,00	1.044,00	1.044,00
Residência	3.460,80	50	50				1.730,40	3.460,80	3.460,80	3.460,80	3.460,80
Edificação térrea	1.884,00	50	50				942,00	1.884,00	1.884,00	1.884,00	1.884,00
Escola Estadual Sinhô Machado	3.291,00	40	30	30			1.316,40	2.303,70	3.291,00	3.291,00	3.291,00
Residência	807,00	50	50				403,50	807,00	807,00	807,00	807,00
Residência	1.380,00	50	50				690,00	1.380,00	1.380,00	1.380,00	1.380,00
Residência	873,00	50	50				436,50	873,00	873,00	873,00	873,00
Residência	2.547,00	50	50				1.273,50	2.547,00	2.547,00	2.547,00	2.547,00
Residência	2.577,00	50	50				1.288,50	2.577,00	2.577,00	2.577,00	2.577,00
Residência	10.526,40	50	50				5.263,20	10.526,40	10.526,40	10.526,40	10.526,40
Residência	4.891,20	50	50				2.445,60	4.891,20	4.891,20	4.891,20	4.891,20
Casa das Rótulas	3.570,00	40	30	30			1.428,00	2.499,00	3.570,00	3.570,00	3.570,00
Residência	2.076,00	50	50				1.038,00	2.076,00	2.076,00	2.076,00	2.076,00
Residência	876,00	50	50				438,00	876,00	876,00	876,00	876,00
Residência	2.466,00	50	50				1.233,00	2.466,00	2.466,00	2.466,00	2.466,00
Residência	393,00	50	50				196,50	393,00	393,00	393,00	393,00

Bem Cultural Material	RESULTADO FINAL PONDERADO	Tx. recup. material anual (%) 1º ano	Tx. recup. material anual (%) 2º ano	Tx. recup. material anual (%) 3º ano	Tx. recup. material anual (%) 4º ano	Tx. recup. material anual (%) 5º ano	Área ponderada recuperada 1º ano	Área ponderada recuperada 2º ano	Área ponderada recuperada 3º ano	Área ponderada recuperada 4º ano	Área ponderada recuperada 5º ano
Residência	1.206,00	50	50				603,00	1.206,00	1.206,00	1.206,00	1.206,00
Sobrado	1.416,00	40	30	30			566,40	991,20	1.416,00	1.416,00	1.416,00
Casação Linha Férra	2.045,40	40	30	30			818,16	1.431,78	2.045,40	2.045,40	2.045,40
Residência	2.431,20	50	50				1.215,60	2.431,20	2.431,20	2.431,20	2.431,20
Residência	465,60	50	50				232,80	465,60	465,60	465,60	465,60
Residência	852,00	50	50				426,00	852,00	852,00	852,00	852,00
Sociedade Musical São Caetano	3.792,60	50	50				1.896,30	3.792,60	3.792,60	3.792,60	3.792,60
Residência	609,60	50	50				304,80	609,60	609,60	609,60	609,60
Residência	818,40	50	50				409,20	818,40	818,40	818,40	818,40
Estrada Real - Caminho dos Diamantes - trecho danificado a ser recuperado	1.449.000,00	40	30	30			579.600,00	1.014.300,00	1.449.000,00	1.449.000,00	1.449.000,00
Estrada Real - Demais trechos do Caminho dos Diamantes não contabilizados na recuperação	4.350.000,00	40	30	30			1.740.000,00	3.045.000,00	4.350.000,00	4.350.000,00	4.350.000,00
Estrada Real - Caminho do Sabarabuçu	2.284.800,00	40	30	30			913.920,00	1.599.360,00	2.284.800,00	2.284.800,00	2.284.800,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Ouro Preto a Glauro	366.240,00	40	30	30			146.496,00	256.368,00	366.240,00	366.240,00	366.240,00

Bem Cultural Material	RESULTADO FINAL PONDERADO	Tx. recup. material anual (%) 1º ano	Tx. recup. material anual (%) 2º ano	Tx. recup. material anual (%) 3º ano	Tx. recup. material anual (%) 4º ano	Tx. recup. material anual (%) 5º ano	Área ponderada recuperada 1º ano	Área ponderada recuperada 2º ano	Área ponderada recuperada 3º ano	Área ponderada recuperada 4º ano	Área ponderada recuperada 5º ano
Estrada Real - Caminho Antigo, Glauro a Santo Antonio do Leite	196.200,00	40	30	30			78.480,00	137.340,00	196.200,00	196.200,00	196.200,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Entre Rios de Minas a Casa Grande	405.480,00	40	30	30			162.192,00	283.836,00	405.480,00	405.480,00	405.480,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Lagoa Dourada a Prados	274.680,00	40	30	30			109.872,00	192.276,00	274.680,00	274.680,00	274.680,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Prados a Tiradentes	228.960,00	40	30	30			91.584,00	160.272,00	228.960,00	228.960,00	228.960,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Tiradentes a São João Del Rey	139.920,00	40	30	30			55.968,00	97.944,00	139.920,00	139.920,00	139.920,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Cruzília a Caxambu	330.720,00	40	30	30			132.288,00	231.504,00	330.720,00	330.720,00	330.720,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Capela do Saco a Carrancas	368.880,00	40	30	30			147.552,00	258.216,00	368.880,00	368.880,00	368.880,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Carrancas a Traituba	381.600,00	40	30	30			152.640,00	267.120,00	381.600,00	381.600,00	381.600,00
Estrada Real - Caminho Antigo, Traituba a Cruzília	470.640,00	40	30	30			188.256,00	329.448,00	470.640,00	470.640,00	470.640,00

Bem Cultural Material	RESULTADO FINAL PONDERADO	Tx. recup. material anual (%) 1º ano	Tx. recup. material anual (%) 2º ano	Tx. recup. material anual (%) 3º ano	Tx. recup. material anual (%) 4º ano	Tx. recup. material anual (%) 5º ano	Área ponderada recuperada 1º ano	Área ponderada recuperada 2º ano	Área ponderada recuperada 3º ano	Área ponderada recuperada 4º ano	Área ponderada recuperada 5º ano
Igreja de São Francisco de Assis	16.146,00	20	20	20	20	20	3.229,20	6.458,40	9.687,60	12.916,80	16.146,00
Capela de Nossa Senhora Rainha dos Anjos	6.393,60	20	20	20	20	20	1.278,72	2.557,44	3.836,16	5.114,88	6.393,60
Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	1.939,20	20	20	20	20	20	387,84	775,68	1.163,52	1.551,36	1.939,20
Igreja Matriz de Bom Jesus do Monte	5.731,20	20	20	20	20	20	1.146,24	2.292,48	3.438,72	4.584,96	5.731,20
Igreja de Nossa Senhora do Rosário	3.211,20	20	20	20	20	20	642,24	1.284,48	1.926,72	2.568,96	3.211,20
Igreja Matriz de São Caetano	10.387,20	20	20	20	20	20	2.077,44	4.154,88	6.232,32	8.309,76	10.387,20
Igreja Matriz de Santo Amaro	7.080,00	20	20	20	20	20	1.416,00	2.832,00	4.248,00	5.664,00	7.080,00
Igreja Matriz São Gonçalo do Rio das Pedras	9.571,20	20	20	20	20	20	1.914,24	3.828,48	5.742,72	7.656,96	9.571,20
Capela do Rosário	2.040,00	20	20	20	20	20	408,00	816,00	1.224,00	1.632,00	2.040,00
Matriz de Nossa Senhora dos Prazeres	3.744,00	20	20	20	20	20	748,80	1.497,60	2.246,40	2.995,20	3.744,00
Capela de Nossa Senhora do Rosário	5.294,40	20	20	20	20	20	1.058,88	2.117,76	3.176,64	4.235,52	5.294,40
Igreja Matriz de São José	7.526,40	20	20	20	20	20	1.505,28	3.010,56	4.515,84	6.021,12	7.526,40
Igreja Matriz de Nossa Senhora de Aparecida	4.665,60	20	20	20	20	20	933,12	1.866,24	2.799,36	3.732,48	4.665,60

Bem Cultural Material	RESULTADO FINAL PONDERADO	Tx. recup. material anual (%) 1º ano	Tx. recup. material anual (%) 2º ano	Tx. recup. material anual (%) 3º ano	Tx. recup. material anual (%) 4º ano	Tx. recup. material anual (%) 5º ano	Área ponderada recuperada 1º ano	Área ponderada recuperada 2º ano	Área ponderada recuperada 3º ano	Área ponderada recuperada 4º ano	Área ponderada recuperada 5º ano
Capela do Nosso Senhor dos Passos	10.120,00	20	20	20	20	20	2.024,00	4.048,00	6.072,00	8.096,00	10.120,00
Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	6.038,40	20	20	20	20	20	1.207,68	2.415,36	3.623,04	4.830,72	6.038,40
Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário	2.095,00	20	20	20	20	20	419,00	838,00	1.257,00	1.676,00	2.095,00
Igreja de São Sebastião	1.578,00	20	20	20	20	20	315,60	631,20	946,80	1.262,40	1.578,00
Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	867,00	20	20	20	20	20	173,40	346,80	520,20	693,60	867,00
Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário	1.265,00	20	20	20	20	20	253,00	506,00	759,00	1.012,00	1.265,00
Igreja de Nossa Senhora da Conceição e Cruzeiro de pedra	2.318,00	20	20	20	20	20	463,60	927,20	1.390,80	1.854,40	2.318,00
Igreja Matriz de Nossa Senhora de Nazaré	2.505,00	20	20	20	20	20	501,00	1.002,00	1.503,00	2.004,00	2.505,00
Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição	2.308,00	20	20	20	20	20	461,60	923,20	1.384,80	1.846,40	2.308,00
Igreja Matriz de Nossa Senhora do Monte Serrat	2.036,00	20	20	20	20	20	407,20	814,40	1.221,60	1.628,80	2.036,00
Total (somatório)	11.438.436						4.557.235,44	7.988.726,64	11.390.118,24	11.414.277,12	11.438.436,00

Fonte: Lactec, 2021.

A Tabela 124 exibe a série do somatório do ganho anual em m² sem a aplicação do desconto e com aplicação do desconto (descontada). O total de ambas as séries também está exposta na tabela, o que permite afirmar que, considerando a série descontada, que representa os valores compensados de fato, pois incorpora o tempo esperado, tem-se que por meio das ações compensatórias selecionadas e o tempo predito para a execução, o valor devolvido a sociedade é de 79.281.941,48 m². O gráfico da Figura 104 mostra a curva de compensação descontada.

Relembrando que a perda interina descontada, ou seja, a dívida com a sociedade, devido aos danos ocasionados aos bens materiais, é de 79.286.839,92 m². Comparando com os ganhos obtidos na compensação, verifica-se que ficam faltando 4.898,44 m² a serem compensados. Ao retirar o efeito da perpetuidade sobre este número, tem-se 391 m², valor que será desconsiderado para fins de arredondamento, haja vista que mais de 99% do valor da perda interina descontada foi compensada pelos ganhos das ações compensatórias.

Tabela 124 – Cálculo dos ganhos anuais da compensação em área (m²)

Ano	Compensação - somatório ganho anual em m ² área	Compensação - somatório ganho anual em área m ² descontado incluindo perpetuidade
2022	4.557.235,44	2.659.103,11
2023	7.988.726,64	4.316.060,43
2024	11.390.118,24	5.697.894,89
2025	11.414.277,12	5.287.018,83
2026	11.438.436,00	61.321.864,23
Total	46.788.793,44	79.281.941,48

Fonte: Lactec, 2021.

Figura 104 – Curva de compensação descontada em área (m²).



Fonte: Lactec, 2021.

4.7.2.11 Detalhamento das Ações para Recuperação Externa e Compensação para os Danos Causados aos Bens Materiais

De modo geral, pode-se estabelecer os procedimentos de recuperação e compensação sobre os Bens Culturais materiais selecionados, tanto os plenamente quanto os parcialmente recuperáveis, para a valoração através dos seguintes itens apresentados abaixo, lastreados na bibliografia técnica da área, preconizada pelo IPHAN, conforme o Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural (BRASIL, 2005).

Antes de detalhar tais ações, é necessário relembrar o conceito de compensação e recuperação. A recuperação se refere em restaurar o bem afetado eliminando deste os danos causados pelo desastre. Já a compensação se refere em realizar ações de melhorias em outros bens não afetados pelo desastre, ou ainda em realizar ações nos bens afetados, no entanto retirando outros danos que não aqueles que foram oriundos do desastre. Essa diferenciação é relevante, pois tanto para etapa de recuperação quanto para a etapa de compensação, serão utilizados os mesmos protocolos de ações, destacando apenas algumas diferenças pertinentes.

O uso das mesmas ações ocorre porque os mesmos tipos de cuidados sobre o patrimônio edificado devem ser tomados, seja no patrimônio que sofreu danos diretos pelo rompimento da barragem de Fundão ou desdobrados pelas ações emergenciais e reparatórias.

Cabe-se ressaltar aqui, que essas ações recomendadas foram utilizadas como base para a definição das taxas de recuperação anual e grau de recuperação, e são ações que não causam outros efeitos colaterais, ou seja, são ações que garantem que não haverá outros danos durante e depois da sua execução. Este é um critério basilar utilizado pelo método no momento da definição de ações de recuperação e compensação.

1) A **primeira etapa** de recuperação dos bens culturais materiais responde por uma **pesquisa criteriosa** a respeito de cada um dos bens a serem recuperados em sua totalidade, ou de modo parcial. Essa pesquisa tem como objetivo subsidiar as seguintes ações de elaboração do projeto e execução do restauro do bem cultural. As pesquisas devem conter:

- O histórico do bem cultural (sua origem e surgimento, contexto de criação, transformações no decorrer do tempo).
- O histórico do uso do bem cultural (desde sua criação até o uso atual), bem como as transformações materiais causadas pela mudança dos usos.
- As características técnicas do bem (estilo, materiais, tecnologias empregadas em sua construção).
- Materiais técnicos de apoio (plantas, croquis, fotografia, esboços, desenhos isométricos).
- Documentário iconográfico a respeito do bem (fotos e desenhos produzidos no decorrer do tempo que auxiliem na consolidação das informações a respeito das características do bem cultural, seus usos e transformações no decorrer do tempo).
- Ressalte-se que esta etapa de pesquisa prévia é sobremaneira importante para todo o processo de recuperação dos bens, dado que pelas informações históricas e compreensão das idiossincrasias materiais e estéticas de cada um dos bens, bem como pelo entendimento sobre as maneiras como os seus proprietários e comunidades locais usuárias e mantenedoras dos bens os compreendem e os utilizam, as ações a serem realizadas sobre os bens poderão ter grandes variações. Isso impacta, de modo expressivo desde os laudos de patologias até os projetos de restabelecimento de uso, restauro e/ou reparo material, impactando assim na orçamentação final de todas as etapas das medidas de recuperação.

Dependerá de cada empresa e/ou profissional a ser contratado a escolha das equipes, do tamanho e roteiros, frente à distribuição dos bens listados. Cabe recomendar que as equipes a serem

escolhidas para realizarem tal pesquisa criteriosa sejam, de preferência, multidisciplinares, para compreenderem o patrimônio e seu contexto de forma multifacetada e em sua complexidade.

2) Em paralelo é necessário se estabelecer **um laudo com todas as patologias** presentes nos bens culturais materiais, que aprofundará, no caso dos bens parcial ou totalmente recuperáveis elencados, o diagnóstico de danos da barragem de Fundão já realizado (BRASIL MPF/LACTEC, 2020f).

Elabora-se com tal laudo o *Mapeamento de danos* (BRASIL, 2005), que tem por objetivo criar uma representação gráfica do levantamento de todos os danos existentes e identificados na edificação, relacionando-os aos seus agentes e causas, sendo subdivididas as etapas para sua elaboração em quatro itens (extraído de BRASIL, 2005, p.28):

- I. **Avaliação do Estado de Conservação dos Materiais** - Deverão ser feitas considerações sobre as patologias dos materiais da edificação, localizando-as nas alvenarias, revestimentos, pisos, forros, cobertura, esquadrias e ferragens, pintura e outros detalhes.
- II. **Avaliação do Estado de Conservação do Sistema Estrutural** - Deverá ser verificado o comportamento estrutural da edificação, nos seus diversos componentes: fundação, pilares, vigas, paredes, sistema de contraventamento, vínculos, sistema de cobertura e outros.
- III. **Identificação dos Agentes Degradores** - Deverão ser identificados todos os agentes de degradação, quais sejam: agentes externos – fenômenos físicos, químicos, biológicos e humanos; agentes inerentes à edificação – decorrentes do projeto e da sua execução; e os decorrentes do uso e da manutenção.
- IV. **Caracterização dos Danos de Fundação e Danos Estruturais** - Deverão ser verificados os danos de fundação e estruturais, observando-se os esforços e cargas a que estão submetidos, identificando os problemas de estabilidade e suas causas determinantes.

3) Em seguida é necessária a construção de uma **proposta/projeto de restauração**, respeitando as pesquisas e laudos produzidos anteriormente, que deverá ser submetida aos proprietários dos bens culturais, bem como aos órgãos responsáveis pela proteção dos bens culturais. Essa submissão depende dos níveis de acautelamento e demais instrumentos de proteção aos quais os bens estão submetidos. Desta forma, um bem que só possua acautelamento municipal deverá ter o projeto de restauração submetido somente ao conselho municipal de patrimônio ou órgão equivalente.

É importante lembrar que alguns dos bens indicados neste relatório, embora não possuam tombamento em nível federal, estão dentro das áreas envoltórias de bens culturais com acautelamento federal (como os dois casarões do distrito de Santa Rita Durão). Neste caso, apesar da ausência de instrumento de acautelamento federal para os bens indicados para restauração, o projeto deverá igualmente ser submetido ao IPHAN (Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) de Minas Gerais; o mesmo ocorre na existência de acautelamentos estaduais, situação que implica no envio do projeto ao IEPHA (Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais).

São diversos os manuais publicados pelo próprio Iphan que norteiam as ações de diagnóstico a serem tomadas para cada um dos componentes materiais de bens culturais do patrimônio brasileiro, variando de acordo com suas especificidades. Por exemplo, o supracitado *Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural* do Iphan (BRASIL, 2005), oferece diretrizes gerais

para a criação de tal projeto, sendo bastante completo e prático, devendo servir de guia para todo e qualquer profissional ou empresa proceder com a execução de restauros e reparos no patrimônio, oferecendo orçamentações de acordo com os contextos locais.

Outras publicações igualmente de caráter técnico foram sendo publicadas pelo Iphan ao longo dos anos, tendo em vista o estado da arte de boas práticas realizadas internacionalmente e adaptadas ao contexto histórico e materialidade do patrimônio brasileiro. São oferecidos gratuitamente para consulta pública manuais como os seguintes²⁶, especificando sumariamente algumas das ações a serem seguidas, que permitam embasar a feitura de termos de referência e orçamentações:

- Manual para a elaboração de projetos de Intervenções em Bens Culturais Móveis e Integrados à Arquitetura (DEPAM/Iphan, 2019): deve ser realizada pesquisa histórica para cada um dos conjuntos de bens, feita fichas técnicas para cada um dos bens móveis ou integrados, seguindo-se as análises Iconográfica, Iconológica, Estética, Identificação de Materiais e Técnica Construtiva e Levantamento Físico. Realizam-se de cada peça as Representações Gráficas, com Documentação Fotográfica e Documentação Científica por Imagem, colaborando para a feitura de um Mapa de danos e análise dos estados de conservação, para se gerar uma proposta de intervenção, quando necessário nas peças, adotando-se ainda procedimentos complementares quando necessário, como a desmontagem dos bens e deslocamento dos mesmos para tratamento fora do local de guarda original. As equipes podem contar com Coordenador, Conservador/Restaurador, Técnicos, Auxiliares em conservação e restauração de Bens Móveis e Consultores em quantidades variadas, dependendo do volume de bens e das necessidades de cada projeto.
- Manual de Arqueologia Histórica em Projetos de Restauração (NAJJAR, DUARTE, 2002): o objetivo deste manual é atender exigências de orientação técnica na gestão dos projetos de restauração/conservação dos bens imóveis tombados trazendo procedimentos padrões a serem adotados quando ocorrem intervenções em edificações históricas, deixando claro o papel da Arqueologia nas atividades de preservação, elaboração dos projetos até a conclusão e a entrega da obra. Assim, se o manual anteriormente citado (BRASIL, 2005) gera um relatório do estado de conservação e de um projeto de restauro/reparo nas edificações de um ponto de vista especialmente arquitetônico, concomitantemente deve ser realizado um relatório sob o viés da arqueologia. Dessa forma, são necessárias intervenções amostrais na área das edificações, como prospecções em pisos, fundações, paredes e por ventura remoção de remanescentes esqueléticos humanos encontrados na edificação ou áreas anexas. Está implicado para tanto vasto rol de ações, desde a criação de projetos de avaliação do potencial arqueológico, a elaboração de projeto de prospecção arqueológica, a execução das mesmas, o processamento dos dados e utilização dos vestígios porventura encontrados para embasar os relatórios finais, oferecendo os encaminhamentos das obras de restauros sobre o bem edificado em processo de reparo. Todos esses relatórios e processos devem ser feitos por

²⁶ Podem ser acessados no portal do Iphan no seguinte endereço eletrônico: <http://portal.iphan.gov.br/publicacoes/lista?categoria=20&busca%3E=&pagina=1>

equipes que contem com arqueólogos gabaritados e deverão seguir os procedimentos burocráticos existentes nas Superintendências Regionais e demais instâncias.

- Manual de Intervenções em Jardins Históricos (DELPHIM, 2005): este manual apresenta as séries de ações a serem tomadas sobre esse patrimônio específico, o qual demanda especial atenção em sua manutenção rotineira. É necessário a feitura de pesquisas históricas específicas antes de qualquer intervenção, entrevistas com as comunidades locais, o estabelecimento de projetos seja de restauração, restituição ou conservação, sendo também necessário o estabelecimento de processos de Avaliação do Impacto do Uso, Programação de Uso Público, Uso por Pessoas Portadoras de Deficiência, Sinalização, conservação preventiva e Rotinas de Manutenção, sempre contando com equipes técnicas específicas que tenham experiência com os trabalhos em Jardins históricos, compreendendo os seus Usos Tradicionais e Novos Usos.
- Manual de Conservação de Cantarias (ALMEIDA, 2005): este manual tem o objetivo de oferecer orientação técnica prevista nas intervenções preliminares de conservação da pedra, elucidando sumariamente como devem ocorrer as etapas de diagnóstico, tratamentos e procedimentos relativos a essa área de atuação. Nesse documento são abordados, por exemplo, os tipos de rocha utilizados no Brasil e suas formas de utilização, a identificação das patologias e dos agentes degradadores e os métodos de tratamento. Toda e qualquer empresa que realize restauros no patrimônio edificado deve ter como base tais procedimentos técnicos, sendo imperativo contar com mão-de-obra especializada com a lide do ofício tradicional da cantaria, implicando-se também o fomento à formação de novos profissionais na área junto às comunidades locais, como sugerido nos itens adiante.
- Manual de Conservação de Telhados (FILHO, 2005), Manual Prático - Saneamento Básico Residencial (BONELLI, DELPINO, 2006) e Manual Prático - Uso da Cal (BONELLI, DELPINO, MIGOTO, 2006): Estas publicações foram desenvolvidas para que a comunidade em geral, moradora de sítios históricos ou não, tenha acesso a informações importantes que auxiliem na preservação de seu patrimônio. Assim, os dados técnicos, os exemplos e os experimentos apresentados, são de grande utilidade e permitem que a conservação dos imóveis seja mais eficiente, menos dispendiosa financeiramente, e de simples execução. As empresas que realizarem os projetos de restauração devem ter em computo tais procedimentos com lastro em pesquisas históricas, não realizando meramente ações de reforma simples, mesmo no casario de arquitetura vernacular. Nesse processo, as ações de educação patrimonial de longo prazo (a serem tratadas em tópico adiante) podem ser realizadas concomitantemente, ao passo que os proprietários locais podem ser instruídos sobre tais procedimentos, em diálogo com os seus saberes próprios e costumes tradicionais.

Todos esses relatórios oferecem de maneira clara as ações específicas a serem tomadas visando as boas práticas de pesquisa, restauro, ou reparo dos bens culturais materiais, de onde devem se embasar toda e qualquer empresa e profissional que lide com o patrimônio, respeitando as percepções e usos e costumes idiossincráticos das populações locais sobre seu patrimônio, especialmente em se tratando de contexto tão excepcional como o decorrente do desastre da Barragem de Fundão.

4) Concluída a etapa de aprovação da proposta/projeto de restauro o responsável deverá **contratar empresa especializada** com notória competência para a execução das obras. Um dos problemas recorrentes, sobretudo em casos de restauração de bens culturais edificados, é o emprego de mão de obra ou empresas sem qualificação técnica específica. Também é importante diferir restauro de reforma. Uma reforma, por mais bem executada que seja, não possui compromissos com a manutenção das características responsáveis por uma edificação (ou qualquer outra ordem de objeto material) ser considerada e reconhecida como um bem cultural.

Assim, é imperativo que se reforce que a recuperação dos bens culturais materiais – quando possível – se dá pelo desenvolvimento de operações de restauro, não de reforma.

Contratando-se empresas com experiência e profissionais de notório saber no campo do patrimônio²⁷, guiados pelas pesquisas prévias feitas sobre o histórico e especificidades da materialidade dos bens com que estão lidando, somado aos manuais específicos de boas práticas a serem adotadas para os processos de reparo material e restauro (além da atenção às intervenções no entorno, tal como abordado no item seguinte), poderão de fato, apenas cumpridas essas etapas prévias, ser elaborados os projetos executivos, nos quais se procederá com a devida quantificação de material, técnicas, ferramentas, equipe, logística e viagens a serem realizadas, oferecendo com maior precisão os tempos efetivos de início e duração dos projetos em sua completude.

5) Nos processos de restauração que incidem sobre construções – tanto edificações quanto estradas – é importante também se lembrar que, em diversas ocasiões, a estabilização dos solos, muros de arrimo, estruturas associadas, é tão importante quanto as operações a serem desencadeadas no bem cultural *per se*. Portanto, os projetos de restauração dos bens culturais dessa natureza (estradas e edificações) também devem contemplar a **necessidade ou conveniência de intervenções no entorno**, inclusive, prospecções e o acompanhamento arqueológico das intervenções de restauro, quando requerido (NAJJAR, DUARTE, 2002).

No caso específico das igrejas de Nossa Senhora das Mercês em Bento Rodrigues, de Santo Antônio em Paracatu de Baixo e Nossa Senhora da Conceição em Gesteira, dada a interrupção parcial ou completa das vias de acesso aos bens, o projeto de restauração também deverá contemplar a reconstituição das vias de acesso aos bens culturais de modo seguro, limpo e com sinalização adequada (BRASIL(MPF)/ LACTEC, 2020f).

6) Tanto durante o processo de restauração dos bens culturais materiais edificados contemplados no projeto indicado nos itens anteriores, bem como após a conclusão das intervenções físicas em prol da conservação destes bens, deverá ser desenvolvido um **Programa de Musealização dos Bens Materiais**. Entende-se a musealização como o conjunto de ações de salvaguarda (documentação e conservação) e de comunicação (ações educativas), que estabelecidas de modo equilibrado resultam na preservação dos bens culturais, compreendendo-se a preservação como o uso qualificado do patrimônio cultural (BRUNO, 1996).

27 Indica-se, por exemplo, as empresas de Antonio Sarasá (<https://estudiosarasa.com.br/>), e de Maria Luiza Dutra (<http://www.mld.arq.br/sobre/>), que possuem larga experiência no campo do patrimônio no âmbito paulista. Dentre empresas mineiras também possuem grande relevância mas que já atuaram junto à Fundação Renova, encontram-se a Hexágono Engenharia (<http://www.projeto-hexagono.com.br/>) e a Estilo Nacional arquitetura e preservação (<http://www.estilonacional.com.br/web/>).

A musealização se faz necessária para que as informações referentes ao bem cultural e ao seu processo de conservação sejam preservadas e socializadas. Não se trata, por óbvio, em transformar os bens edificados em museus, mas de por um lado, documentar as ações deflagradas, que poderão estar disponíveis em uma Plataforma Digital Aberta²⁸, e de outro lado promover a sinalização dos bens materiais, com a instalação de painéis, totens multimídia e outros recursos, que permitam à população conhecer a respeito daquele bem cultural.

A sinalização é uma necessidade fundamental e fartamente debatida, documentada e instrumentalizada em diretrizes tanto do IPHAN quanto do Ministério do Turismo, havendo, inclusive, manuais de aplicação de comunicação urbana para cidades históricas. Junto com a instalação da comunicação recomenda-se, também, que sejam instalados sistemas de segurança e monitoramento remoto, sobretudo para o caso das igrejas que possuem bens culturais móveis.

Não sendo o processo de musealização unívoco, dada a variação de formas em que pode ocorrer se desdobrando dos contextos e patrimônios locais, além da necessária correspondência com as aspirações e opiniões das populações detentoras e usuárias do patrimônio a ser musealizado, a variabilidade das ações a serem tomadas é de grande monta.

É, não obstante, fulcral como em um primeiro momento a realização de consultas pública com ampla participação das comunidades, profundas pesquisas históricas para a realização do processo de musealização e o esforço conjunto das autoridades públicas em suas diversas instâncias para o debate e conjugação do projeto que se procurará desenvolver a longo prazo, alinhando-se com a compreensão apresentada no Dossiê de Tombamento de Bento Rodrigues (ICOMOS /IEDS /PPACPS-UFMG (2019). Somente após tais etapas de negociação e com ampla participação dos atingidos se poderá estabelecer os pilares dos projetos museológicos a serem implementados, cabendo a empresas com experiência na área elaborar os projetos executivos específicos.

Finalmente, mas não menos importante, o processo de recuperação em tela, ao englobar a musealização dos bens, requer um robusto **Programa de Educação Patrimonial**, compreendida como eixo de comunicação museológica, que contemple a formação e capacitação de educadores nos diferentes níveis do ensino, coordenadas por profissionais capacitados tanto da área do patrimônio cultural (historiadores, antropólogos, arquitetos, arqueólogos e museólogos) quanto por profissionais especialistas em educação, a produção de material didático e paradidático de apoio, o desenvolvimento de oficinas e cursos de formação técnica nas áreas afins (guias de turismo cultural, técnicos conservadores e restauradores), palestras, visitas guiadas, criação de roteiros voltados para a difusão científica e cultural.

Diversas cartilhas e cadernos temáticos publicados pelo Iphan oferecem orientações e discussões sobre exemplos práticos de aplicação da Educação Patrimonial, por exemplo o *Manual de Atividades Práticas de Educação Patrimonial* (GRUNBERG, 2007), onde se apresentam atividades que podem ser desenvolvidas com crianças, jovens e adultos que frequentem ou não o ensino formal, para provocar neles uma atitude favorável para com os bens culturais, no que perpassa as etapas de pesquisa com as comunidades locais, a realização de inventários participativos sobre o patrimônio cultural local,

28 A criação de uma Plataforma digital aberta foi indicada no “Parecer técnico sobre o andamento do processo de reparação dos danos ao patrimônio histórico cultural decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, ao longo da bacia, e indicações de medidas propositivas, para que haja a efetiva reparação integral dos danos (quando for o caso)” elaborado pelos Institutos Lactec e Ramboll, 2020.

após o estabelecimento de fichas de inventário de bens e composição de equipes para a realização de entrevistas. Todo esse material permite a feitura de relatórios que embasarão as outras etapas de projetos executivos de educação patrimonial, o qual deve caminhar concomitantemente com as etapas anteriormente mencionadas de pesquisa e execução dos reparos e reformas dos bens culturais, estendendo-se em longa duração tais processos educativos, nutrindo-se das informações e benefícios gerados durante e após a conclusão dos procedimentos de restabelecimento dos bens.

Além de tudo o que foi recomendado, traz-se aqui algumas recomendações listadas no Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f)²⁹, bem como indicações concernentes ao documento elaborado pelo ICOMOS /IEDS /PPACPS-UFMG (2019), destacam-se ainda as seguintes ações a serem desenvolvidas:

a) Desenvolvimento de Programa de Gestão do Patrimônio Cultural que integre as ações aqui apontadas aos processos desencadeados no âmbito dos bens arqueológicos e imateriais;

b) Realização de capacitação aos gestores locais da cultura (por meio de cursos de curto prazo, workshops, palestras, cursos técnicos de legislação do patrimônio, zeladoria e conservação preventiva, ação em situação de risco e/ou crise e gestão de projetos, entre outros), acompanhados por profissionais independentes de modo a contribuir para o aprimoramento constante do sistema de governança e suas diversas instâncias de avaliação/decisão;

c) Produção de um plano de deslocamento do tráfego de máquinas, caminhões pesados e outros agentes promotores de trepidações para áreas seguras, fora dos perímetros urbanos dos povoados, distritos e entorno de edificações reconhecidas como bens culturais;

d) Alinhando-se tais recomendações, igualmente, à compreensão museológica enfatizada pelo Dossiê de Tombamento de Bento Rodrigues, compreende-se que as ações a serem desenvolvidas nesse bem de memória sensível, bem como nas localidades de Paracatu de Baixo e Gesteira, igualmente lugares de memória, devem ter como basilares a atuação social com ampla participação da população atingida, integrada nos processos de salvaguarda do patrimônio, bem como na sua comunicação. Tem-se assim como lastro a Nova Museologia, a qual (ICOMOS /IEDS /PPACPS-UFMG, 2019):

“(...) em contraposição à museologia tradicional reivindica museus que cumpram a sua função social, estabelecendo laços mais estreitos com as comunidades locais, obtidos por meio de uma comunicação dialógica e inclusiva. Espaços estes que abarquem novos, múltiplos e diversos patrimônios e discutam questões territoriais diversas, levantadas pela antropologia e pela “Nova História”; museus que sejam reconhecidos como agentes de mudança e promotores do desenvolvimento, ensejando a melhoria da qualidade de vida das pessoas.”

Da mesma maneira, para grupo de bens alvo de compensação, as ações de longo prazo para o Programa de Musealização dos Bens Materiais e o Programa de Educação Patrimonial, também devem ser tomados nas mesmas linhas de entendimento que o estabelecido para os bens alvos de recuperação e que foram comprometidos pelos danos. A variação se dará por seu turno, no teor de informações a serem veiculadas sobre os conjuntos patrimoniais escolhidos em cada localidade, de acordo com seu contexto histórico e geográfico.

29 Assim como no Parecer Técnico mencionado na Nota 1.

4.7.2.12 Tempo de Início e Duração das Ações de Recuperação Externa e Compensação

As ações de recuperação externa e compensatórias anteriormente enunciadas e que tem limites de execução de curto e médio prazo deverão ser iniciadas quando os trâmites de análise, aprovação e autorização de pesquisa forem devidamente encaminhados. Dessa forma, assumisse que o início dessas ações ocorra em janeiro de 2022.

Considerando as taxas de recuperação anual e a taxa de compensação anual, que refletem (ambas) o tempo de duração para conclusão das ações, estima-se que os bens levarão entre 2 e 5 anos para serem recuperados e compensados, tendo o ano de 2026 como prazo final para essas ações de recuperação e compensatórias de curto e médio prazo.

A diferenciação sobre curto e médio prazo é feita, pois há ações no protocolo de compensação que serão perpétuas. Como foi observado, nos bens materiais parcialmente recuperáveis e nos bens materiais irre recuperáveis, por não retornar a sociedade a mesma quantidade de recursos/serviços perdidos no desastre, há então perdas perpétuas no tempo, e que serão totalmente compensadas. Por isso, para garantir a efetividade das ações propostas é necessário que também haja ações compensatórias que também sejam executadas perpetuamente, gerando benefícios permanentes.

Por isso, os reparos materiais, o monitoramento periódico dos bens e os programas de musealização e de educação patrimonial deverão, ser perpétuos.

4.7.2.13 Valor Monetário do Dano

Após a construção do escopo das ações compensatórias, este item visa apresentar o esforço financeiro necessário para a execução de tais ações, bem como o valor econômico atribuído aos danos causados aos bens materiais devido ao rompimento da barragem de Fundão.

O orçamento das ações descritas no item 4.7.2.11 foi elaborado por uma equipe de especialistas da área e exposto resumidamente nas tabelas, Tabela 125 e Tabela 126. A planilha orçamentária foi construída buscando o dimensionamento dos custos de ações para recuperação e compensação dos bens materiais prevendo as estimativas de custos (equipe técnica, insumos, logística, etc) de forma individual para cada ação ou bem cultural, de forma a facilitar a apreciação dos custos quando aplicados ao quantitativo total de bens.

Como o impacto financeiro das ações foram pensadas individualmente, a fim de facilitar sua projeção quando vistas em conjunto, com a somatória do quantitativo dos bens materiais, foi possível pensar a distribuição dessas ações em um prazo de execução de 2 a 5 anos, conforme estabelecido nas curvas de recuperação e compensação. No caso das ações de Educação Patrimonial e Musealização, que ocorrerão anualmente e perpetuamente na região, a lógica de dimensionamento foi pensada de forma a abarcar um ano de execução, englobando todo o quantitativo de bens, e replicando tal valor pela perpetuidade.

Tabela 125 – Resumo do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens Materiais.

DESCRIÇÃO DO ITEM	VALOR UNITÁRIO
AÇÃO DE RECUPERAÇÃO PARCIAL DE BENS MATERIAIS	
Equipe Técnica	R\$ 945.000,00
Prospecção e diagnósticos	R\$ 2.718,00
Projeto Executivo	R\$ 2.050,00
Projetos Executivos complementares	R\$ 8.558,00
Execução da Obra	R\$ 810.000,00
Monitoramento Arqueológico (não perpétuo, é vinculado apenas a intervenção no bem)	R\$ 315.000,00
Remuneração de escritório	R\$ 416.665,20
Impostos Federais	R\$ 524.998,15
Imposto Municipal	R\$ 159.209,97
Subtotal	R\$ 3.184.199,32
AÇÃO DE RECUPERAÇÃO TOTAL DE BENS MATERIAIS	
Equipe Técnica	R\$ 1.890.000,00
Prospecção e diagnósticos	R\$ 198.204,99
Projeto Executivo	R\$ 149.492,36
Projetos executivos complementares	R\$ 624.075,89
Execução da obra	R\$ 2.160.000,00
Monitoramento Arqueológico (não perpétuo, é vinculado apenas a intervenção no bem)	R\$ 840.000,00
Remuneração de escritório	R\$ 1.172.354,65
Impostos Federais	R\$ 1.477.166,85
Imposto Municipal	R\$ 447.962,88
Subtotal	R\$ 8.959.257,62
EDUCAÇÃO PATRIMONIAL	
Equipe Técnica	R\$ 244.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 150.000,00
Ações Locais de Educação Patrimonial - Oficinas e Cursos de Formação Técnica	R\$ 2.642.000,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 258.000,00
Remuneração do Escritório	R\$ 658.960,00
Impostos Federais	R\$ 830.289,60
Imposto Municipal	R\$ 251.792,08
Subtotal	R\$ 5.035.841,68
MUSEALIZAÇÃO	
Equipe Técnica	R\$ 208.800,00
Serviços de Terceiros	R\$ 52.600,00
Museologia	R\$ 6.046.484,00
Material de Consumo e Diárias de Manutenção dos Pesquisadores	R\$ 244.000,00
Remuneração do Escritório	R\$ 786.226,08
Impostos Federais	R\$ 1.524.859,27
Imposto Municipal	R\$ 466.472,07
Subtotal	R\$ 9.329.441,42

Fonte: Lactec, 2021.

Tabela 126 – Valores Totais do Orçamento das Ações Compensatórias para os Bens Materiais.

DESCRIÇÃO DO ITEM	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
AÇÕES DE RECUPERAÇÃO PARCIAL DE BENS MATERIAIS		
BENS MATERIAIS ALVOS DE RECUPERAÇÃO PARCIAL	R\$ 3.184.199,32	R\$ 12.736.797,28
Subtotal		R\$ 12.736.797,28
AÇÕES DE RECUPERAÇÃO TOTAL DE BENS MATERIAIS		
BENS MATERIAIS ALVOS DE RECUPERAÇÃO TOTAL	R\$ 8.959.257,62	R\$ 53.755.545,72
Subtotal		R\$ 53.755.545,72
AÇÕES COMPENSATÓRIAS PARA TODOS OS BENS MATERIAIS		
EDUCAÇÃO PATRIMONIAL	R\$ 5.035.841,68	R\$ 5.035.841,68
MUSEALIZAÇÃO	R\$ 9.329.441,42	R\$ 9.329.441,42
Subtotal		R\$ 14.365.283,10
VALOR TOTAL DO ORÇAMENTO		R\$ 80.857.626,10

Fonte: Lactec, 2021.

Todo o processo de perda interina, recuperação e compensação dos bens materiais foi realizado considerando três grupos de bens, os bens totalmente recuperáveis, que representam aqueles que é possível retornar a linha base, os bens parcialmente recuperáveis, que representam aqueles cuja materializada é recuperada mas os serviços prestados não, e por último os bens para fins de compensação, que representam os bens que compensam as perdas interinas dos bens recuperáveis total ou parcial. Diante disso, a monetização dos danos será feita seguindo a mesma divisão, a fim de facilitar a exposição dos resultados, sendo o resultado final o somatório dos três grupos.

Após a construção do orçamento, sabe-se que o custo total para execução de todas as ações é de R\$ 80.857.626,10. Para o processo de monetização do dano, partindo do orçamento apresentado, o primeiro passo foi a construção do fluxo de caixa, com base no percentual anual de áreas ganhas por meio das ações de recuperação e compensação. Assim, foi obtido o dispêndio financeiro anual conforme a execução do projeto, cujo tempo de realização se deu de acordo com o exposto na curva de compensação, isto é, considerando um horizonte entre 2 e 5 anos de execução de ações não perpétuas direcionadas aos bens materiais. O quantitativo de áreas em m² que representa a perpetuidade foi contabilizada separadamente para facilitar o entendimento, sendo que a perpetuidade é aplicada apenas aos bens compensatórios.

- Recuperação total

A monetização dos danos do grupo de recuperação total seguiu os processos apontados. A coluna *Ganhos em m² não descontados* traz os ganhos em área anuais conforme a execução do projeto. Ao dividir o ganho em área obtido por ano pelo quantitativo total de áreas ganha (113.536,74 m²), tem-se o *Percentual de ganho em m²*, este percentual evidencia o quanto foi executado do projeto no ano em termos de área, por isso esse percentual é multiplicado pelo valor do projeto considerando apenas o esforço financeiro dos bens com recuperação total (R\$ 53.755.545,72), resultando nos valores da coluna *Fluxo de caixa – não descontado*. Ao aplicar o fator de desconto social (8% ao ano), gerou-se a coluna *Fluxo de caixa – descontado* que traz os valores anuais investidos na execução do projeto das ações de recuperação total, todos a valor presente para o ano de 2021. O somatório do fluxo de caixa descontado foi R\$ 46.403.906,81 sendo este o valor do dano dos bens totalmente recuperáveis (Tabela 127).

Tabela 127 – Valores utilizados para a monetização dos danos dos bens materiais que são totalmente recuperáveis.

Ano	Ganhos (m ²) da Recuperação (não descontado)	% de ganhos anual em m ²	Fluxo de caixa – recuperação total (não descontado)	Fator de desconto	Fluxo de caixa - recuperação total (descontado)
2022	44.575,67	39,3%	R\$ 21.104.970,16	0,9259	R\$ 19.541.639,04
2023	33.641,51	29,6%	R\$ 15.928.039,65	0,8573	R\$ 13.655.726,72
2024	33.641,51	29,6%	R\$ 15.928.039,65	0,7938	R\$ 12.644.191,41
2025	839,03	0,7%	R\$ 397.248,13	0,7350	R\$ 291.989,23
2026	839,03	0,7%	R\$ 397.248,13	0,6806	R\$ 270.360,40
Total	113.536,74		R\$ 53.755.545,72		R\$ 46.403.906,81

Fonte: Lactec, 2021.

- Recuperação parcial

A monetização dos danos do grupo de recuperação parcial seguiu os mesmos processos. A coluna *Ganhos em m² não descontados* traz os ganhos em área anuais conforme a execução do projeto. Ao dividir o ganho em área obtido por ano pelo quantitativo total de áreas ganha (7.509.429,79 m²), tem-se o *Percentual de ganho em m²*, que é multiplicado pelo valor do projeto considerando apenas o esforço financeiro dos bens com recuperação parcial (R\$ 12.736.797,28), resultando nos valores da coluna *Fluxo de caixa – não descontado*. Ao aplicar o fator de desconto social (8% ao ano), gerou-se a coluna *Fluxo de caixa – descontado* que traz os valores todos a valor presente para o ano de 2021. O somatório do fluxo de caixa descontado foi R\$ 11.024.961,85 sendo este o valor do dano dos bens parcialmente recuperáveis (Tabela 128).

Tabela 128 – Valores utilizados para a monetização dos danos dos bens materiais que são parcialmente recuperáveis.

Ano	Ganhos (m ²) da Recuperação (não descontado)	% de ganhos anual em m ²	Fluxo de caixa – recuperação parcial (não descontado)	Fator de desconto	Fluxo de caixa - recuperação parcial (descontado)
2022	3.001.034,08	40,0%	R\$ 5.090.075,24	0,9259	R\$ 4.713.032,63
2023	2.251.460,02	30,0%	R\$ 3.818.717,35	0,8573	R\$ 3.273.934,63
2024	2.251.460,02	30,0%	R\$ 3.818.717,35	0,7938	R\$ 3.031.420,95
2025	2.737,84	0,0%	R\$ 4.643,67	0,7350	R\$ 3.413,23
2026	2.737,84	0,0%	R\$ 4.643,67	0,6806	R\$ 3.160,40
Total	7.509.429,79		R\$ 12.736.797,28		R\$ 11.024.961,85

Fonte: Lactec, 2021.

- Compensação

Ressalta-se que os bens direcionados para compensação são bens que, juntamente com os demais grupos de recuperação, serão alvo das ações de educação patrimonial e musealização. A diferença, no entanto, é que os bens compensatórios não são alvo de restauração em suas estruturas, apenas são objeto das ações educativas, o que reduz o custo das ações programadas.

Considerando que essas ações educativas são perpétuas, o valor orçado compreende a execução dessas atividades durante um ano, e sobre tal valor anual, é aplicada a fórmula da perpetuidade, bem como o fator de desconto, obtendo assim o esforço financeiro necessário a valor presente de 2021, das ações perpétuas educativas.

A monetização dos danos dos bens compensatórios seguiu os mesmos processos. A coluna *Ganhos em m² não descontados* traz os ganhos em área anuais, que dividindo esses ganhos pelo quantitativo total de áreas ganha (46.788.793,44 m²), tem-se o *Percentual de ganho em m²*, que é multiplicado pelo valor do projeto considerando apenas o esforço financeiro da compensação (R\$ 14.365.283,10), resultando nos valores da coluna *Fluxo de caixa – não descontado*. Ao aplicar o fator de desconto social (8% ao ano), gerou-se a coluna *Fluxo de caixa – descontado* que traz os valores todos a valor presente para o ano de 2021. O somatório do fluxo de caixa descontado foi R\$ 11.140.425,48 que aplicado a perpetuidade a esse valor, tem-se o valor do dano descontado da compensação na perpetuidade de R\$ 139.255.318,50 (Tabela 129).

Tabela 129 – Valores utilizados para a monetização dos danos dos bens materiais não recuperáveis, e cuja perda é totalmente compensada.

Ano	Ganhos (m ²) da Compensação (não descontado)	% de ganhos anual em m ²	Fluxo de caixa – compensação (não descontado)	Fator de desconto	Fluxo de caixa - compensação (descontado)
2022	4.557.235,44	10%	R\$ 1.399.180,71	0,9259	R\$ 1.295.537,69
2023	7.988.726,64	17%	R\$ 2.452.730,91	0,8573	R\$ 2.102.821,42
2024	11.390.118,24	24%	R\$ 3.497.039,80	0,7938	R\$ 2.776.062,94
2025	11.414.277,12	24%	R\$ 3.504.457,16	0,7350	R\$ 2.575.880,63
2026	11.438.436,00	24%	R\$ 3.511.874,52	0,6806	R\$ 2.390.122,79
<i>Total</i>	<i>46.788.793,44</i>		<i>R\$ 14.365.283,10</i>		<i>R\$ 11.140.425,48</i>
Total adicionando a perpetuidade			R\$ 179.566.038,75		R\$ 139.255.318,50

Fonte: Lactec, 2021.

- Resultado Final

Após a monetização dos danos segmentados pelos grupos, com base no esforço financeiro para obter os ganhos gerados pelas ações de recuperação e compensação, somam-se os valores, a fim de obter o valor econômico total dos danos causados aos bens materiais, conforme exposto na Tabela 130.

Tabela 130 – Resultado final da valoração dos danos causados aos bens materiais

Valor dos danos totalmente recuperáveis (preços mar/2021) descontado (VP 2021)	R\$ 46.403.906,81
Valor dos danos parcialmente recuperáveis (preços mar/2021) descontado (VP 2021)	R\$ 11.024.961,85
Valor dos danos compensáveis (preços mar/2021) descontado (VP 2021)	R\$ 139.255.318,50
Valor total dos danos causados aos bens materiais	R\$ 196.684.187,16

Fonte: Lactec, 2021

4.7.3 BENS CULTURAIS IMATERIAIS

A Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) define como patrimônio imaterial “as práticas, representações, expressões, conhecimentos e técnicas – com os instrumentos, objetos, artefatos e lugares culturais que lhes são associados - que as comunidades, os grupos e, em alguns casos os indivíduos, reconhecem como parte integrante de seu patrimônio cultural” (UNESCO, 2003). Esta definição está de acordo com a Convenção da Unesco para a Salvaguarda do Patrimônio Cultural Imaterial, ratificada pelo Brasil em março de 2006.

Devido ao seu caráter intangível, esse item objetiva explicitar as razões da impossibilidade de valorar os danos causados ao patrimônio cultural imaterial por meio do método selecionado, o Método de Equivalência de Habitat (MEH) e Recurso (MER). Além disso, esse item evidencia os bens materiais valorados que incorporaram o componente intangível no seu processo de valoração, mostrando assim que apesar desta categoria não ter sido alvo do processo de valoração ainda assim, foi possível atribuir valor a uma parte diretamente ligada aos bens materiais valorados e a uma parte também vinculada aos bens e recursos ambientais. Assim, por meio desses grupos valorados, foi possível valorar parcialmente e indiretamente alguns bens imateriais.

4.7.3.1 Contextualização dos Danos Causados aos Bens Imateriais

O diagnóstico de danos aos bens imateriais foi pautado em referenciais teóricos oferecidos pela Antropologia, com o emprego do método etnográfico (conforme detalhado no item a seguir), sendo as percepções dos atingidos documentadas por meio de entrevistas e diálogos informais, envolvendo cerca de 480 narrativas obtidas em 60 distintas localidades situadas ao longo da bacia do rio Doce, desde Mariana até a foz do rio Doce no Espírito Santo (centros urbanos, comunidades rurais, comunidades quilombolas, vilas de pescadores). Essas localidades foram afetadas em seus modos de vida, impossibilitadas de manter, em parte ou em sua totalidade, as relações de vizinhança, rituais coletivos, celebrações, práticas e locais de convívio, visto que o desastre afetou as bases materiais e simbólicas de produção e de reprodução do patrimônio cultural imaterial, com a destruição de territórios e lugares de convivência de diversas comunidades.

O diagnóstico de danos resultou na identificação de 59 bens imateriais afetados ao longo dos compartimentos examinados, relacionados a diversos modos de vida, práticas e sociabilidades específicas, tornando evidente a ressonância do desastre na desarticulação das comunidades atingidas. Da mesma forma, as ações de reparação desencadeadas após o rompimento da barragem e as formas como vêm sendo conduzidas contribuiu para amplificar os danos a tais bens. Dentre os 59 bens identificados tem-se: 19 celebrações (festas de caráter comemorativo e extraordinárias em relação à vida cotidiana), 13 formas de expressão (manifestações e performances culturais), 24 lugares (territórios de referência para as práticas culturais) e 03 ofícios, saberes e modos de fazer (técnicas e conhecimentos tradicionais e locais), sendo esta segregação as tipologias definidas pelos instrumentos legais utilizados na categorização dos bens imateriais.

Já os danos listados relacionados aos bens imateriais são: alteração de práticas culturais, alteração da rede de relações comunitárias, sofrimento social, alteração de espaços relacionados a práticas culturais, alteração de espaços de referência de memória, alteração no acesso a matérias-primas e implementos associados necessários à produção dos bens culturais e alteração na circulação de práticas e bens culturais.

4.7.3.2 Patrimônio cultural imaterial desde uma perspectiva antropológica

O reconhecimento, pelos órgãos oficiais, de um segmento específico no interior do patrimônio cultural, denominado “imaterial” ou “intangível”, é recente. Foi o Decreto nº. 3.551 de 4 de agosto de 2000, que instituiu o Registro de Bens Culturais de Natureza Imaterial, criou o Programa Nacional do Patrimônio Imaterial (PNPI) e consolidou o Inventário Nacional de Referências Culturais (INCR). Seis décadas o separam do Decreto-Lei n. 25 que instituiu o SPHAN (depois IPHAN), em 1937, e estabeleceu as primeiras regras para identificação e proteção do patrimônio cultural brasileiro. Cabe destacar que Constituição Federal de 1988, em seus artigos 215 e 216, ampliou a noção de patrimônio cultural ao reconhecer a existência de bens culturais de natureza material e imaterial, abrindo caminho para as políticas posteriormente implantadas pelo PNPI.

Em 2004, uma política de salvaguarda mais estruturada e sistemática começou a ser implementada pelo IPHAN a partir da criação do Departamento do Patrimônio Imaterial (DPI). Em 2010 foi instituído pelo Decreto nº. 7.387, de 9 de dezembro de 2010, o Inventário Nacional da Diversidade Linguística (INDL), utilizado para reconhecimento e valorização das línguas portadoras de referência à identidade, ação e memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira.

Se num primeiro momento o campo do patrimônio cultural, os objetos de proteção eram principalmente constituídos por bens monumentais, urbanos, geralmente ligados à elite, os bens culturais de natureza imaterial “dizem respeito àquelas práticas e domínios da vida social que se manifestam em saberes, ofícios e modos de fazer; celebrações; formas de expressão cênicas, plásticas, musicais ou lúdicas; e nos lugares (como mercados, feiras e santuários que abrigam práticas culturais coletivas)”, e que foram identificados em sua maioria nos modos de vida das classe populares e em áreas rurais. Dessa forma, os bens imateriais vêm se consolidando como espaço de construção de memórias e de afirmação dos direitos culturais e, por conseguinte, dos direitos humanos.

Se para os bens de “pedra e cal” (como foram popularizados, dada a predominância de edificações) herdadas do nosso passado colonial, o instrumento de proteção foi o tombamento, para o caso do patrimônio imaterial, dadas a suas especificidades, foi preciso estabelecer medidas de outra ordem – identificação, inventário, registro e salvaguarda.

O reconhecimento do patrimônio imaterial como um recorte específico e diferenciado no interior do patrimônio cultural mais amplo, ensejou a entrada dos antropólogos nesse campo, até então ocupado predominantemente por historiadores, arquitetos, arqueólogos, geógrafos. Para a Antropologia, desde suas origens voltada ao estudo do que hoje se denomina “sociedades de pequena escala” – povos indígenas, comunidades rurais, populações ribeirinhas, quilombolas – o que subjaz e dá sentido às diferentes formas daquilo que os órgãos de patrimônio incluem no novo subconjunto (celebrações, formas de expressão, lugares, saberes) são as relações que determinam as alianças e as interdições entre as pessoas da comunidade onde ocorrem essas práticas: vínculos de parentesco e compadrio, redes de sociabilidade, de vizinhança, níveis de hierarquia e experimentações. Tais relações determinam o modo de vida da comunidade em pauta. A questão é: como identificar as particularidades desse modo de vida? É aqui que entram a Antropologia e seu método de pesquisa, a etnografia, com o principal instrumento em campo, a observação participante³⁰.

30 Malinowski, 1922; E.E. Evans Pritchard, 1940; Claude Lévi-Strauss, 1958.

Na pesquisa de campo etnográfica, por meio da observação participante, o antropólogo entra em contato com seus interlocutores, não para colher dados e posteriormente, em gabinete, interpretá-los: os sujeitos da pesquisa são considerados como parceiros de uma troca, são detentores de conhecimentos e a relação do antropólogo com eles é de especialistas com diferentes referenciais. O brincante de maracatu, o xamã indígena, a mãe-de-santo da nação nagô, por exemplo, têm os próprios referenciais para explicar os fundamentos de suas práticas e o antropólogo os escuta considerando-os especialistas nos seus temas – assim como ele é também *expert* em sua disciplina. É dessa troca que surge o conhecimento compartilhado.

A referência a esse “momento crucial”, foi retomada por uma antropóloga contemporânea, Marilyn Strathern que, em sua extensa obra *O Efeito Etnográfico e outros ensaios* (2014), dedicou um capítulo específico sobre “o momento etnográfico” (Strathern, pg. 345-507). Assim, além da etnografia propriamente dita, em campo, há o labor da sua escrita, mas não significa que primeiro descobre-se o dado e que depois é pensado e registrado em texto. O “momento etnográfico” articula ambos os lados³¹.

Logo, conclui-se que, o principal método de análise, avaliação e compilação dos bens imateriais se pauta na observação dos comportamentos, das práticas e do modo de fazer, envolvendo, assim, questões que não podem ser quantificadas. Por isso, considerando essas premissas do trabalho antropológico, identificou-se a inviabilidade da aplicação do método de valoração MER/MEH, uma vez que tal empreendimento (a valoração de bens imateriais) deve envolver uma pesquisa devotada a definir, junto aos atingidos, o melhor método de valoração a ser adotado, perspectiva que foge ao escopo do estudo ora concluído.

4.7.3.3 Justificativa da inviabilidade de aplicação do método

A natureza intangível do subconjunto de bens imateriais coloca de pronto uma dificuldade em estabelecer alguma métrica para determinar seu valor econômico ou pecuniário. Diferentemente dos demais recortes – de caráter histórico, arquitetônico, arqueológico, ambiental, artístico – que em diferentes níveis mantêm referências mais diretas com a materialidade do bem em questão, permitindo metrificá-los a partir de vários critérios, um bem intangível, por definição, escapa à definição de uma métrica pelos pesquisadores.

Mesmo quando as celebrações, por exemplo, classificadas como patrimônio intangível apresentam elementos concretos, materiais – bandeiras, instrumentos musicais, adereços, vestimentas, cardápios específicos – não é a soma desses elementos o que lhes confere unidade, consistência e a suposta materialidade para a quantificação; é todo um processo, que agrupa esses elementos e os coloca em movimento, o responsável por sua identidade estrutural. Um desastre natural ou antrópico – enchente, incêndio, etc. – pode inutilizar alguns dos elementos materiais, determinando o colapso do bem imaterial. Contudo, se esses elementos materiais podem ser repostos, a imobilização do processo como um todo, ou seja, as relações entre pessoas, espaços e suportes materiais das manifestações

31 “É significativo que a imersão em campo se repita no estudo subsequente, longe do campo. Os etnógrafos se colocam a tarefa de não só compreender o efeito de certa prática e artefatos na vida das pessoas, mas também recriar alguns desses efeitos no contexto da escrita sobre eles. É claro que a análise (a escrita) começa em campo assim como os anfitriões do (a) etnográfico (a) continuam a exercer, muito depois, uma tração sobre a direção de suas energias. Ora, a divisão entre os dois campos cria dois tipos de relação (inter-relacionados). Um deles é a consciência aguda da tração exercida por trilhas divergentes de conhecimento e o antropólogo pode considerar que uma dessas trajetórias pertence à observação e à outra, à análise: o outro é o efeito de envolver juntamente os dois campos, o que podemos chamar de momento etnográfico” (op. cit., 350, grifo nosso)

culturais é algo bem mais difícil, e até mesmo impossível em alguns casos, de ser recuperado. Dada esta questão, é possível apontar também que além da dificuldade da metrificação, há também a inviabilidade de acompanhar a variação desta métrica no tempo, pois considerando o comportamento orgânico e complexo formado por uma rede de comportamentos, torna-se complexo verificar o aumento ou a diminuição de práticas intangíveis, por meio dos números abstratos da matemática como tradutores desses processos.

Ainda que fosse privilegiada uma métrica ou variável para a valoração do componente material do bem imaterial, não seria possível reduzir os bens intangíveis exclusivamente a sua dimensão material, sem levar em conta, conforme pontuado, o processo social, cultural e simbólico que coloca esse bem em ação.

Assim, o suposto valor de uma Festa do Divino ou de um Terno de Reis, por exemplo, teria de levar em conta as atividades ao longo do ano – preparação, ensaio, novenas, refeições coletivas, reza na casa dos participantes, oferendas, promessas, coleta de contribuições, etc.

Pode-se, ainda, observar outras celebrações, como a Festa de Corpus Christi, que tradicionalmente envolve a construção de um tapete ao longo das ruas por onde passará a procissão, processo que não abrange apenas os dias de preparação por parte dos moradores: supõe uma atividade que dura o ano todo, além das reuniões para decidir o formato do tapete. Trata-se da recolha dos materiais, alguns descartados ao longo do ano, no cotidiano, como a borra de café, as cascas de ovos, serragem, retalhos, resíduos de construção como cal e areia, que, por sua coloração e consistência, irão servir de matéria-prima para a confecção dos desenhos alusivos – passagens bíblicas, anjos, santos, objetos de culto, referências a personagens da cidade, etc. Evidentemente, não é o valor monetário de cada um desses componentes materiais que determinará o valor da festa em si (MAGNANI, 2007).

Desse modo, afirma-se que é a impossibilidade de medição, de definição e acompanhamento de uma métrica no tempo que inviabiliza a aplicação do método de valoração MER/MEH.

Outro ponto importante a ser destacado diz respeito aos povos tradicionais. Os danos relacionados aos bens culturais imateriais das comunidades indígenas Krenak (MG) e Tupiniquim-Guarani (ES), cujos diagnósticos, em conformidade com os protocolos da FUNAI e grupos indígenas, foram submetidos às comunidades, também não foram alvo desta valoração, haja vista que o processo para esse contexto deve ser ainda mais específico e participativo. Logo, deixa-se claro que esse grupo de bens não teve seu valor econômico capturado por nenhuma perspectiva, nem mesmo pelo método de valoração contingente explicado a seguir.

De tudo o que foi exposto, não se busca afirmar que não seja possível medir em valores monetários os danos causados aos bens imateriais. É possível fazê-lo por meio da aplicação de outros métodos de valoração. Afirma-se apenas que, considerando o uso do MEH/MER, este não é viável para ser aplicado aos bens imateriais.

Isso não significa dizer que esses bens não foram valorados de nenhuma maneira, pelo contrário, o Instituto Lactec, além da aplicação do MER/MEH, também desenvolveu a valoração dos danos ambientais incluindo o patrimônio cultural imaterial por meio do Método de Valoração Contingente (MVC), cuja metodologia, processos e resultados estão detalhados no relatório separado, denominado de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais: Valoração Contingente, entregue pelo LACTEC em 2020 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020a).

O MVC mede o valor dos danos ambientais e do patrimônio cultural (arqueológico, material e imaterial) decorrentes do rompimento da barragem de fundão atribuído pela população brasileira. Em linhas gerais, tal valor é capturado ao perguntar para uma população amostral, o quanto que ela pagaria para evitar que um desastre como esse ocorresse novamente. Logo, o valor atribuído é global, ou seja, é um único valor dado a todos os danos apresentados, que são mostrados aos entrevistados por meio de um roteiro-questionário. Desta forma, foi informado aos entrevistados o quantitativo de todos os bens imateriais afetados pelo desastre. Assim, pode-se afirmar que esses bens foram valorados pela população brasileira, dentro de um agrupamento de danos. Destaca-se que, a menção a este agrupamento de bens imateriais não especificou os usos atrelados ao lazer, recreação, turismo e modos de fazer (ofício), pois tratam-se de aspectos que não fazem parte do escopo da valoração do Instituto Lactec. Além disso, a menção a esses usos, geralmente causavam vieses na pesquisa, pois as pessoas tendiam a atribuir maior importância a bens que possuem tais utilidades, causando distorções na valoração. Por isso, por não fazer parte do escopo e pelo desvio causado, não foram capturados tais valores em nenhum dos métodos de valoração, no MCV e nem no MEH/MER. Ademais, adiciona-se que a forma como o MVC foi realizado, seu valor não representa o valor individual do dano aos bens imateriais e também não representa a visão da população atingida, haja vista que a mesma não foi consultada diretamente no processo de valoração contingente. Logo, esse método aplicado não substitui o processo de se valorar de forma individual e específica o dano causado aos bens imateriais, ele é exposto aqui apenas para esclarecer que por meio do MVC alguma perspectiva de valor, mesmo que indireta e significativamente parcial, dos bens imateriais foi capturada.

4.7.3.4 Sobreposição de danos

No entanto, apesar da impossibilidade da aplicação direta do método MEH/MER para valoração dos bens imateriais, por outro lado foi possível valorar por alguma perspectiva, por meio dessa metodologia, alguns bens imateriais de forma indireta por meio bens materiais e bens ambientais cuja métrica utilizada se sobreponha como habitats/recursos aos bens imateriais.

Como exemplo, para melhor compreensão, cita-se os bens culturais materiais, em que os danos sofridos impediram o uso desses bens, ou seja, a prática de cultos/missas, festas e outras atividades que são classificadas como bens imateriais, dessa forma, para os bens materiais os quais houve impedimento de uso, foi possível atribuir um peso que incrementou a quantidade de área em m² cobrada em relação ao bem material. Nesses casos foi possível inserir uma valoração indireta de alguns bens imateriais que estavam associados a bens materiais valorados.

Outro exemplo está relacionado às práticas intangíveis que eram realizadas pela população em ambientes naturais. No processo de valoração dos danos ambientais foram valorados os habitats: rio Doce, ictiofauna, fauna terrestre, solos, flora (vegetação) e zona costeira. Muitas práticas culturais são realizadas em ambientes naturais tais como o rio Doce. No processo de valoração o rio Doce teve seus danos valorados pela perspectiva da água, e entende-se que a compensação a ser realizada no mesmo, por trazer melhorias a qualidade da água poderia permitir restituir, ainda que parcialmente, os usos outrora realizados no local, restituindo também as práticas culturais e de lazer, por isso, entende-se que a valoração ambiental dos habitats e recursos naturais carregam em si os bens imateriais a eles associados, oportunizando uma valoração indireta.

Assim, um aspecto importante considerado foi a necessidade, em paridade com a condução metodológica adotada, de uma análise devotada a identificar sobreposições de bens imateriais a outros bens e/ou campos valorados. Uma parcela dos bens imateriais, sobretudo, aqueles classificados como lugares atingidos pelo desastre, visto serem contemplados de alguma forma por outros campos de análise dedicados aos danos aos meios físico e biótico (água, solos, vegetação, etc) podem ser considerados como valorados parcialmente e/ou indiretamente pela perspectiva dos serviços culturais gerados (como o caso daqueles que são inseridos como peso na valoração dos bens materiais), ou pela perspectiva do habitat (como o caso daqueles bens imateriais classificados como lugares).

Posto isso, cabe especificar detalhadamente quais valores, de fato, estão sendo capturados no que se refere aos bens imateriais. No MVC conforme já explicado, os bens foram apresentados à população mediante agrupamento (quantitativo geral), cuja frase no questionário afirma que: dentre as manifestações culturais, como celebrações, procissões, festividades e ventos tradicionais, 5 não existiam mais e 55 foram parcialmente afetadas. Foi este o cenário desenhado para a captura de valor pelo MVC. Logo, salienta-se, novamente que, usos recreativos, turísticos e ofícios (modos de fazer) não foram especificados.

Em relação ao MEH/MER, os bens imateriais que representam lugares, como cachoeiras, o próprio rio Doce, entre outros, muitos estão inseridos dentro da área de abrangência da valoração dos habitats flora, água, e zona costeira, assim, o valor capturado por esse método é o valor pela perspectiva do habitat (meio ambiente), do custo para repor os aspectos ambientais perdidos. Dessa forma, este método também não captura os usos recreativos, turísticos e modos de fazer.

Assim, pelo método MVC foram valorados, no quantitativo de bens mencionados no questionário, cerca de 56 bens. Já 11 bens imateriais foram valorados pela perspectiva do habitat/recurso, envolvendo balneários, praias, cachoeiras ou mesmo monumentos paisagísticos, inclusive, o próprio bem cultural rio Doce, amplamente referenciado nas narrativas.

Pela coerência com o método adotado, considera-se que quatro lugares categorizados como bens imateriais, que apresentam relação direta com bens materiais alvo de valoração, passaram a ser entendidos como valorados. Por seu turno, sete celebrações associadas às edificações religiosas dos distritos de Mariana e uma forma de expressão foram compreendidas como parcialmente valoradas pelos bens materiais. Na perspectiva delineada, é importante ressaltar que uma igreja danificada é também um lugar antropológico de referência à memória coletiva, espaço relacionado às práticas culturais, cujo dano causa alterações de práticas culturais e na rede de relações comunitárias.

Na Tabela 131 são sintetizados os resultados quantitativos das análises de sobreposição de danos. Por sua vez, a Tabela 50 aponta a situação da valoração de cada um dos bens imateriais que foram afetados pelo desastre.

Tabela 131 – Quantitativos de bens imateriais sobrepostos com outros bens de outra natureza impactados pelo desastre, e que puderam ser valorados de forma indireta pelo MER/MEH

Bens imateriais valorados indiretamente/parcialmente pelos métodos MVC e MER/MEH	Quantidade
Total de Bens Imateriais	59
Total de Bens Valorados pelo MVC no agrupamento de bens apresentados	56
Total de Bens Não Valorados pelo MVC	03
Total de Bens Valorados apenas pela perspectiva do habitat/recurso pelo MER/MEH	11
Total de Bens Valorados indiretamente como peso nos Bens Materiais	08
Total de Bens Valorados como Bem Material	04
Total de Bens Não Valorados pelo método MER/MEH	36

Fonte: Lactec, 2021.

Como computo final, 36 bens imateriais alvo de danos não serão valorados pelo MEH/MER. A Tabela 132 exibe a listagem de todos os bens imateriais alvo de danos devido ao desastre e o status da valoração de cada um.

Tabela 132 – Listagem de todos os bens imateriais, sua categoria e status da valoração

Bem Imaterial	Categoria do bem	Incluso no grupo de danos valorado pelo MVC?	Status da valoração	
			Valorado pelo MER/MEH?	
Carnajaó	Celebrações	Sim	Não	
Carnaval	Celebrações	Sim	Não	
Conjunto de Celebrações de Degredo	Celebrações	Sim	Não	
Conjunto de celebrações de Regência	Celebrações	Sim	Não	
Conjunto de Celebrações vinculadas à Capela de Nossa Senhora da Conceição	Celebrações	Sim	Sim; valorado parcialmente em bens materiais (Gesteira)	
Conjunto de celebrações vinculadas à Capela de Santo Antônio	Celebrações	Sim	Não	
Conjunto de Festas Religiosas de Furquim	Celebrações	Sim	Não	
Festa de Nossa Senhora Aparecida de Paracatu	Celebrações	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Paracatu)	
Festa de Nossa Senhora das Mercês	Celebrações	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Bento Rodrigues)	
Festa de Nossa Senhora de Aparecida de Bento Rodrigues	Celebrações	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Bento Rodrigues)	
Festa de Nossa Senhora de Nazaré	Celebrações	Sim	Não	
Festa de Santa Cruz	Celebrações	Sim	Não	
Festa de São Bento	Celebrações	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Bento Rodrigues)	
Festa do Menino Jesus	Celebrações	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Paracatu)	
Festa Junina	Celebrações	Sim	Não	
Festa Nossa Senhora da Conceição	Celebrações	Sim	Não	
Folia de Reis de Barreto	Celebrações	Sim	Não	
Folia de Reis de Paracatu	Celebrações	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Paracatu)	
Folia de Reis Povoação	Celebrações	Sim	Não	

Bem Imaterial	Categoria do bem	Status da valoração	
		Incluso no grupo de danos valorado pelo MVC?	Valorado pelo MER/MEH?
Banda de Congo de São Benedito de Itaparica	Formas de expressão	Sim	Não
Banda de Congo de São Benedito de Vila do Riacho	Formas de expressão	Sim	Não
Banda Nossa Senhora do Carmo	Formas de expressão	Sim	Não
Capoeira/Mestres da Capoeira	Formas de expressão	Sim	Não
Cavalcada de Gesteira	Formas de expressão	Sim	Não
Cavalcada de Paracatu	Formas de expressão	Sim	Não
Cavalcada de Ponte do Gama	Formas de expressão	Sim	Não
Congada	Formas de expressão	Sim	Não
Congado de N. Sra. do Rosário de Santana do Deserto	Formas de expressão	Sim	Não
Coral de Nossa Senhora de Nazaré	Formas de expressão	Sim	Não
Coral de São Bento	Formas de expressão	Sim	Sim, valorado parcialmente em bens materiais (Bento Rodrigues)
Corporação Musical São José	Formas de expressão	Sim	Não
Ensaio da Sociedade Musical São Caetano	Formas de expressão	Sim	Não
Aldeia do Areal	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não
Balneário de Aracruz	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recorso, por estar associado à área de abrangência da zona costeira.
Balneário de Barra Seca e Urussuquara	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recorso, por estar associado à área de abrangência da zona costeira.
Balneário de Degredo	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recorso, por estar associado à área de abrangência da zona costeira.
Balneário de Pontal do Ipiranga	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recorso, por estar associado à área de abrangência da zona costeira.

Bem Imaterial	Categoria do bem	Status da valoração	
		Incluso no grupo de danos valorado pelo MVC?	Valorado pelo MER/MEH?
Balneário de Povoação	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recurso, por estar associado à área de abrangência da zona costeira.
Bar e Restaurante da Sandra	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como bem material
Bento Rodrigues	Lugares	Sim	Sim, valorado como bem material
Cachoeira de Camargos	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recurso por estar associado ao rio Gualaxo e ao rio Doce. Uso de recreação e turismo não foi valorado.
Cachoeira e Prainha da Passagem	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Sim, valorado como habitat/recurso por estar associado ao rio Gualaxo e ao rio Doce. Uso de recreação e turismo não foi valorado.
Caminho de São José	Lugares	Sim	Sim, valorado como bem material
Campo de futebol associado à Fazenda Floresta	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não valorado. Esse campo de futebol não sofreu danos diretos decorrentes do desastre. E sim, indiretos decorrentes das ações emergenciais. Logo, uma das suas perdas foi alteração de uso recreativo, valor este não capturado no método de valoração. Além disso, não faz parte da área de abrangência de valoração do habitat flora. Na flora se valora apenas vegetação nativa suprimida. O campo de futebol, se caracteriza como área antropizada.
Campo de Futebol de Gesteira	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não valorado. Esse campo, embora tenha sofrido danos diretos decorrentes do desastre, não faz parte da área de abrangência de valoração do habitat flora. Isto porque o mesmo é classificado como área antropizada, cuja perda foi alteração de uso do espaço recreativo, aspecto não valorado pelo método.
Campo de Futebol de Pedras	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não valorado. Esse campo, embora tenha sofrido danos diretos decorrentes do desastre, não faz parte da área de abrangência de valoração do habitat flora. Isto porque o mesmo é classificado como área antropizada, cuja perda foi alteração de uso do espaço recreativo, aspecto não valorado pelo método.
Complexo Lacustre de Linhares	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não foi valorado. Insuficiência de dados para aplicação do método.
Conjunto de bens associados à Usina Hidrelétrica de Candonga	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não valorado. Esses conjuntos de bens se referem a ações de recreação, lazer e turismo, aspectos não valorados no método.

Bem Imaterial	Categoria do bem	Status da valoração	
		Incluso no grupo de danos valorado pelo MVC?	Valorado pelo MER/MEH?
Conjunto Paisagístico da Pedra do Escalvado	Lugares	Sim, apenas como lugar.	Não valorado. Esse conjunto de bens foi afetado apenas pelas perspectivas: recreação, lazer e turismo, aspectos não valorados no método.
Conjunto paisagístico da Praia do Jaó	Lugares	Sim	Sim, valorado apenas pelo aspecto do habitat/recurso. Os equipamentos públicos cuja utilidade era recreação não foram valorados pelo método
Conjunto Paisagístico Encontro dos Rios do Carmo e Gualaxo do Norte	Lugares	Sim	Sim, valorado como habitat/recurso, por estar associado à área de abrangência desses rios e do rio Doce.
Garfo Clube	Lugares	Sim	Não valorado. Trata-se de uma infraestrutura pública que teve alteração de seu uso devido a efeitos indiretos do desastre. Logo, a perda foi recreação, aspecto não valorado pelo método.
Lagoa do Óleo	Lugares	Sim	Não valorado. A lagoa não foi afetada pelo desastre. Mas sofreu interferências, devido às ações emergenciais. No entanto, essas interferências foram temporárias, cessaram logo após o reestabelecimento do abastecimento de água.
Praia de Regência	Lugares	Sim	Sim, valorado como habitat/recurso, por estar associado à área de abrangência da zona costeira.
Rio Doce	Lugares	Sim	Sim, valorado como habitat/recurso
Trecho da Estrada Real	Lugares	Sim	Sim, valorado como bem material
Artesanato do Bordado (Associação Barra-Longuense de Bordadeiras e Artesãos)	Ofícios	Não	Não
Faiscagem e Pesca	Ofícios	Não	Não
Produção de Doces e Chuck	Ofícios	Não	Não

Fonte: Lactec, 2021.

5 RESULTADO FINAL DA VALORAÇÃO: APRESENTAÇÃO DOS VALORES DOS DANOS CONSOLIDADOS

Após o detalhamento da aplicação do MEH/MER para cada habitat e recurso ambiental valorado, busca-se neste item apresentar o resultado final da valoração dos danos ambientais causados à bacia do rio Doce e região costeira adjacente, devido ao rompimento da barragem de Fundão. Para tanto, apresenta-se de forma consolidada os valores para recuperação e compensação de cada habitat e recurso valorado pelo MEH/MER, bem como os valores dos limites inferior e superior da valoração contingente, corrigidos pelo índice de inflação adotado. Por fim, após a apresentação de ambos os valores, explana-se sobre o procedimento para unificação dos mesmos, obtendo assim um limite inferior e um limite superior da valoração como um todo.

5.1 VALORES CONSOLIDADOS DA VALORAÇÃO PELO MEH/MER POR HABITAT/RECURSO

A Tabela 133 e a Figura 105 apresentam os valores dos danos de cada habitat/recurso valorado, separado entre recuperação e compensação, bem como os valores finais. Dentre os 8 elementos valorados, apenas 4 apresentam possibilidades de recuperação, e mesmo para esses casos, devido ao tempo de espera para o retorno do recurso, a quantidade de habitat/recursos a ser compensada é bem maior, resultando em um valor monetário de compensação muito mais significativo quando comparado com o valor necessário para recuperar.

Isto evidencia que os efeitos do desastre foram danosos a ponto de serem pouco recuperáveis exigindo muita mais compensação do que restituição do que foi perdido. Parte desta constatação está ligada aos efeitos dos contaminantes existentes no ambiente, que estão presentes no solo, na água, na vegetação nativa e nos animais, principalmente na ictiofauna. A contaminação causa danos de médio e longo prazo, e mesmo diante de uma recuperação natural, a presença dos metais lançados ao meio ambiente com o rejeito, se consolidam como fonte de contaminação permanente, principalmente porque o metal não é um elemento metabolizável, o que facilita que o mesmo seja disponibilizado ao meio ambiente e se mantenha como fonte de contaminação. Adicionando-se que tempo de residência dos EPTs (elementos potencialmente tóxicos) no ambiente é extenso, uma vez que, disponibilizados no ambiente, contaminam, circulam, incorporam-se e acumulam-se nos diferentes compartimentos ambientais (SKEAFF; DURBEUIL; BRIGHAM, 2002; PINTILIE et al., 2007; WOOD, 2012; ALI; KHAN; ILAHI, 2019), chegando a permanecer por 107 anos, no caso de cátions abundantes, como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , enquanto elementos presentes em menores concentrações, como o Mn^{2+} , tendem a apresentar uma permanência da ordem de 1400 anos, estando a sua remoção associada à oxidação e deposição em sedimentos (SZIKSZAY, 2012; LÉCUYER, 2016). Diante desse contexto é coerente o resultado da valoração pelo MEH/MER apresentado.

Dentre os habitats e recursos valorados, a água do rio Doce e a área marinha se expressam como os elementos mais caros, isto porque a extensão do dano sofrida por eles foi superior aos demais elementos. A lama de rejeito percorreu 675 km de extensão do rio Doce alcançando o ambiente marinho e promovendo uma área de disposição de rejeitos no mar, sendo que a contribuição desse rejeito, do rio para o mar, se mantém até os dias atuais. Então, devido a expectativa da longa permanência desse

material no leito do rio e no leito marinho, principalmente pela dificuldade da sua retirada, as curvas de recuperação e compensação foram capazes de capturar tal efeito, resultando em uma quantidade de compensação bastante elevada e consequentemente custosa. Logo, os elevados valores compreendem não apenas a gravidade do ocorrido, mas também a significativa abrangência do seu impacto.

Ainda nessa análise, cabe destacar que o valor conservador mensurado para a ictiofauna. Como já discutido no item que expõe os detalhes da valoração para esse recurso, a ictiofauna está exposta a contaminação devido a presença do rejeito no leito do rio e tal exposição tem trazido problemas significativos de saúde para as diversas espécies de peixes existentes no rio Doce. Tanto que a expectativa é que por um longo período muitas espécies tenham dificuldade para se reproduzir e permanecer no local, ou ainda, que tenham sua expectativa de vida reduzida quando comparada a expectativa atingida nas condições anteriores ao desastre. Se fosse possível traduzir este quadro em curvas de recuperação, seria possível afirmar que o valor do dano à ictiofauna seria maior, porém, pela dificuldade de ter variáveis e informações adequadas que permitam tal mensuração de forma fundamentada, optou-se por elaborar uma curva de recuperação com premissas simplificadas que assume que, a população da espécie chave selecionada, atinge a linha base quando todo o rejeito no leito do rio for escoado para o mar. Este cenário mais conservador traz consigo uma menor perda interina e consequentemente um valor de dano correspondente. Logo, o valor obtido trata-se de um adicional ao que foi mensurado na água do rio Doce, sendo que, este representa o valor mínimo da ictiofauna devido à sociedade.

No caso das aves escavadoras, o valor elevado quando comparado a outros elementos é devido ao tempo de espera do crescimento da floresta, que impacta diretamente na perda interina. Como já explicado no item que trata da temática, as aves escavadoras só retornam ao habitat florestal afetado, após a restauração do mesmo, quando há oferta de cavidades que podem ser utilizadas para nidificação, por isso, a curva de recuperação, mesmo sendo construída em um cenário otimista, engloba esse tempo de espera o que resulta em uma maior perda e consequentemente em um maior valor.

Tabela 133 – Resultado Consolidado da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão pelo Método de Equivalência de Habitat/Recurso

HABITAT/RECURSO VALORADO	VALOR DA RECUPERAÇÃO EXTERNA	VALOR DA COMPENSAÇÃO (LUCRO CESSANTE AMBIENTAL ³²)	VALOR TOTAL DO DANO POR HABITAT/RECURSO
Vegetação	R\$ 40.154.299,61	R\$ 198.555.941,71	R\$ 238.710.241,32
Solos	R\$ 32.099.143,39	R\$ 216.890.730,53	R\$ 248.989.873,92
Água do rio Doce	R\$ -	R\$ 15.147.656.124,05	R\$ 15.147.656.124,05
Ictiofauna	R\$ -	R\$ 707.801.882,24	R\$ 707.801.882,24
Área Marinha	R\$ -	R\$ 3.542.893.196,41	R\$ 3.542.893.196,41
Aves Escavadoras	R\$ 146.740.757,16	R\$ 543.157.811,22	R\$ 689.898.568,38
Bens Arqueológico	R\$ -	R\$ 316.650.681,46	R\$ 316.650.681,46
Bens Materiais	R\$ 57.428.868,66	R\$ 139.255.318,50	R\$ 196.684.187,15
TOTAL	R\$ 276.423.068,82	R\$ 20.812.861.686,12	R\$ 21.089.284.754,94

Fonte: Lactec, 2021.

32 Lucro Cessante Ambiental: No direito, o lucro cessante ambiental é entendido como o valor que representa o tempo que a sociedade aguardou para obter a recuperação e/ou compensação, tal como no caso é aqui a perda interina calculada.

Figura 105 – Resultado Consolidado da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão pelo Método de Equivalência de Habitat/Recurso



Fonte: Lactec, 2021.

Posta todas essas considerações, o valor consolidado da valoração econômica dos danos causados ao meio ambiente e ao patrimônio cultural da bacia do rio Doce e região costeira adjacente, foi de 21,1 bilhões de reais descontados a valor presente (ano 2021) e a preços de março de 2021.

5.2 VALORES CONSOLIDADOS DA VALORAÇÃO PELO MÉTODO DE VALORAÇÃO CONTINGENTE

A valoração contingente (VC) capturou o valor dos danos ao meio ambiente e ao patrimônio cultural causados à bacia do rio Doce e região costeira adjacente por meio de uma consulta a população brasileira representada por uma amostra estatística. A população abordada foi a população urbana residente nas regiões metropolitanas de São Paulo, Recife, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, Curitiba, Goiânia e Belém, bem como as cidades de Ipatinga e Mariana. Nesta abordagem foi capturada a disposição a pagar (DAP) da população para evitar que um outro desastre, semelhante ao alvo desta valoração, ocorresse novamente. Esta valoração foi concluída em maio de 2020, cujos resultados e processos são descritos detalhadamente no relatório denominado de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais: Valoração Contingente, entregue pelo LACTEC em 2020.

Dado que a obtenção do valor por meio da VC foi finalizada em maio de 2020 e o valor obtido pela aplicação do MEH/MER foi em abril de 2021, identificou-se a necessidade de atualizar o valor da VC. Para tanto, adotou-se a variação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor (INPC) acumulado entre janeiro de 2020 (quando findou as pesquisas com a população) e março de 2021 obtendo uma variação no período de 1,073. Com este valor procedeu-se a correção monetária da média da DAP de janeiro de 2020, paramétrico e não paramétrico, para obter o valor corrigido da média da DAP de março de 2021, paramétrico e não paramétrico, conforme resultado mostrado na Tabela 134. Após a correção das médias das DAPs, calculou-se o valor total, paramétrico e não paramétrico, por meio da multiplicação entre as médias das DAPs de março 2021 com o total de domicílios urbanos no Brasil,

com fonte de renda, conforme dados do IBGE em 2019 (último ano disponível), sendo 55.949.131 domicílios urbanos. O resultado final atualizado (Tabela 134) traz o valor dos danos ambientais, limite inferior e limite superior conforme os modelos estatísticos utilizados, sendo (para este método) o mínimo 33,82 bi e o máximo 56,78 bi.

Ressalta-se que nesses valores da VC não está inclusa a área Marinha, pois na época do início dessa valoração, a equipe técnica não possuía dados e informações suficientes para estabelecer os danos ambientais desse habitat. Logo, o valor deste habitat foi capturado apenas pelo MEH/MER aplicado a área Marinha.

Tabela 134 – Resultado Consolidado da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão pelo Método de Valoração Contingente

ESTIMATIVA	MÉDIA DA DAP (R\$) JANEIRO DE 2020	MÉDIA DA DAP (R\$) MARÇO DE 2021	VALOR TOTAL (R\$) MARÇO DE 2021
Modelo Não-paramétrico (limite inferior)	563,38	604,51	R\$ 33.821.626.786,64
Modelo Paramétrico (limite superior)	945,78	1.014,82	R\$ 56.778.405.662,73

Fonte: Lactec, 2021.

Cabe explicitar aqui a diferença entre os modelos estatísticos, paramétrico e não paramétrico, utilizados e a interpretação dos seus respectivos valores. O questionário aplicado na VC oferecia aleatoriamente cinco valores, possibilitando assim, o conhecimento de quantos entrevistados aceitariam pagar aquele valor e a diferença de quantidade com o próximo valor acima. Por exemplo, quantos pagariam 3 reais e quantos aceitariam 12 reais. A diferença entre essas quantidades é justamente a quantidade de pessoas que pagariam entre 3 e 12 reais.

Por não ser possível oferecer para os entrevistados muitas opções de valores, pois a amostra seria muito grande, o que acarretaria um elevado custo de operação e tempo de análise, e acabaria resultando em respostas não comparáveis, a literatura sugere oferecer um número limitado de valores e, então, decidir qual a probabilidade de aceitação dos intervalos entre os valores oferecidos.

No caso do modelo não paramétrico, não há essa estimação, ou seja, não há qualquer hipótese de quantos entrevistados que aceitam pagar um determinado valor, também estariam dispostos a pagar pelos valores intermediários acima, até o próximo valor superior. Por isso, esse é um modelo de estimativa conservadora, pois atribui o valor mínimo do intervalo como a diferença entre as quantidades que pagariam entre dois valores sucessivos.

Por outro lado, no modelo paramétrico, há a estimação de uma distribuição que provê um valor de quantos entrevistados aceitariam pagar para cada valor dentro do intervalo, mas para tal, é necessário assumir uma distribuição entre dezenas de opções, onde cada uma gera um valor diferente. Assim, no modelo paramétrico, o analista é obrigado a escolher a melhor distribuição apenas usando critérios estatísticos que não representam necessariamente uma possível realidade caso os valores dentro do intervalo fossem questionados. Esta é a limitação do modelo paramétrico e a possível crítica a ser feita a ele, pois a estimativa paramétrica pode estar enviesada, enquanto a estimativa não-paramétrica indica, por outro lado, um valor mínimo irrefutável. Por isso, o valor do modelo paramétrico

é sempre maior, pois considera, por exemplo no intervalo 3-12, que os entrevistados que aceitaram pagar 3 reais poderiam ter aceitado também um valor entre 3 e 12 reais, quando a não-paramétrica assume conservadoramente somente o quantitativo de entrevistados que aceitariam pagar apenas o valor de 3 reais.

5.3 UNIFICAÇÃO DOS VALORES DOS DOIS MÉTODOS APLICADOS PARA A VALORAÇÃO

Posteriormente a apresentação dos resultados da aplicação dos dois métodos de valoração, descreve-se o processo de unificação desses valores. Os diferentes métodos foram aplicados devido as diferentes naturezas que os valores capturam. A valoração contingente captura em seu valor dois componentes principais: compensação (lucro cessante) e dano moral. Nesse método o valor de recuperação não é capturado, isto porque como parte da narrativa oferecida ao entrevistado, as ações de recuperação já foram resolvidas. Por outro lado, o MEH/MER captura em seu valor os componentes: recuperação e compensação (lucro cessante).

Lembremos que a VC busca medir as preferências dos indivíduos por um serviço ecossistêmico ou recurso natural, ou seja, como essas preferências variam quando há mudanças na provisão, qualidade ou quantidade ofertada, do recurso natural. Para tanto, tal questão é medida pela disposição a pagar (DAP) de um indivíduo por uma melhoria ou incremento no recurso natural. Esse valor inclui no seu cálculo o tempo que a sociedade esperou para ter novamente esses recursos e serviços ambientais (perdas interinas/lucro cessante). Logo este valor representa o valor que a sociedade brasileira atribui na forma de compensação pelas perdas interinas (lucro cessante) e dano moral, adicional aos gastos com recuperação. O risco moral capturado nesse método está associado ao risco de perda total.

O MEH/MER considera o meio ambiente como provedor de recursos e serviços e a reparação do dano se refere aos custos das ações de recuperação e compensação para gerar os recursos e serviços equivalentes (retornar à sociedade a mesma quantidade de recursos e/ou serviços perdidos com o desastre). Ele se aplica somente aos danos ambientais passíveis de compensação (sendo recuperáveis ou não, no local do desastre ou fora dele). O valor inclui o tempo que a sociedade esperou para ter novamente esses recursos e serviços ambientais (perdas interinas/lucro cessante). Logo, o valor medido por esse método está atrelado ao esforço financeiro (custo) a ser realizado para recuperar e/ou compensar os recursos ambientais perdidos.

Posta tais questões, as tabelas (Tabela 135 e Tabela 136) mostram como os dois valores podem ser combinados, e expõe o resultado final, o limite inferior e o limite superior, do valor econômico total dos danos causados ao meio ambiente e ao patrimônio histórico/cultural da bacia do rio Doce e região costeira adjacente, decorrente do rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 135 – Resultado Consolidado, VALOR MÍNIMO TOTAL (limite inferior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão

Valor total da valoração pelo MEH/MER	Valor mínimo do dano moral (mínimo)	VALOR MÍNIMO TOTAL da valoração dos danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico/cultural
R\$ 21.089.284.754,94	R\$ 16.551.658.296,93	R\$ 37.640.943.051,87

Fonte: Lactec, 2021.

O valor total mínimo é obtido a partir da soma dos dois valores apresentados na tabela. Nesse valor, estão inclusos os valores de recuperação e compensação medidos pelo MEH/MER e mais o dano moral mínimo extraído da VC.

Tabela 136 – Resultado Consolidado, VALOR MÁXIMO TOTAL (limite superior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão

Valor total da recuperação pelo MEH/MER	Valor total da compensação da Área Marinha pelo MEH/MER	Valor total da valoração contingente (limite superior)	Valor MÁXIMO da valoração dos danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico/cultural
R\$ 276.423.068,82	R\$ 3.542.893.196,41	R\$ 56.778.405.662,73	R\$ 60.597.721.927,96

Fonte: Lactec, 2021.

O valor total máximo é obtido a partir da soma dos três valores apresentados na Tabela 136. Nesse valor, estão inclusos os valores de recuperação de todos os habitats/recursos e a compensação da área marinha medidos pelo MEH/MER e mais o dano moral máximo extraído da VC.

O valor do dano moral foi capturado pelo VC, porém sua mensuração não foi realizada de forma separada, dado que o valor total da VC inclui a compensação (lucro cessante) e o dano moral, porém mensurados de forma integrada. Mas devido a necessidade de desagregar tais valores, optou-se por utilizar os processos expostos nas tabelas (Tabela 137 e Tabela 138), para se estimar o valor do dano moral, sendo que este é mensurado a partir da consideração do quanto que a sociedade brasileira acha que vale a compensação menos o custo estimado da compensação dos danos gerados.

Tabela 137 – Valor Mínimo do Dano Moral (limite inferior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão

A	B	C	D
Valor total da valoração contingente (limite inferior)	Valor total da compensação pelo MEH/MER	Valor total da compensação da Área Marinha pelo MEH/MER	Valor MÍNIMO do DANO MORAL da valoração dos danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico/cultural
R\$ 33.821.626.786,64	R\$ 20.812.861.686,12	R\$ 3.542.893.196,41	R\$ 16.551.658.296,93

Fonte: Lactec, 2021.

O valor mínimo do dano moral é obtido a partir da fórmula: $D = A - (B - C)$, conforme identificação das letras que representam os três valores apresentados na Tabela 137. Nesse valor, está incluso o lucro cessante. O valor máximo utiliza da mesma fórmula, porém com o limite superior da valoração contingente.

Tabela 138 – Valor Máximo do Dano Moral (limite superior), da Valoração dos Danos Causados ao Meio Ambiente e ao Patrimônio Histórico/Cultural devido ao Desastre do Rompimento da Barragem de Fundão

A	B	C	D
Valor total da valoração contingente (limite superior)	Valor total da compensação pelo MEH/MER	Valor total da compensação da Área Marinha pelo MEH/MER	Valor MÁXIMO do DANO MORAL da valoração dos danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico/cultural
R\$ 56.778.405.662,73	R\$ 20.812.861.686,12	R\$ 3.542.893.196,41	R\$ 39.508.437.173,02

Fonte: Lactec, 2021.

5.4 COMPILAÇÃO DOS DANOS VALORADOS E NÃO VALORADOS

No diagnóstico socioambiental realizado pelo Lactec foram diagnosticados no total 92 danos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b). Conforme já abordado desde o início do documento, a valoração de danos ambientais busca valorar o dano por meio da métrica que melhor representa os efeitos negativos ocorridos no ambiente analisado. Sendo assim, diante dos diversos danos ocorridos em um habitat/recurso, a fim de evitar sobreposições e valores replicados, selecionou-se, sempre que possível, o dano mais abrangente, aquele que comporta outros danos como consequência, e que possuía a métrica adequada para ser utilizada no método. Devido a essa necessidade de seleção é importante esclarecer quais são os danos diretos e indiretamente valorados pelos métodos de valoração empregados e quais os danos cujos valores não foram capturados.

Para tanto, a Tabela 139 exibe a listagem dos 92 danos identificados e classificados por meio de cores, bem como sinaliza se foram ou não inserido na valoração econômica em pelo menos um dos métodos utilizados. A classificação realizada tem como objetivo separar os danos que tem como origem as ações emergências, danos que possuem viés socioeconômico, e os danos que não foram valorados devido à falta de dados técnicos viáveis para aplicação dos métodos. Os danos oriundos das ações emergenciais totalizam 5, que devido à baixa representatividade frente aos danos oriundos do desastre, e/ou por já haver sido estabelecida uma compensação com base na legislação, optou-se por não os considerar na valoração.

Os danos com viés socioeconômico se referem aos danos cujos efeitos resultam em perda de renda, seja pela exploração direta ou indireta dos recursos ambientais. Esses danos não fazem parte do escopo da valoração dos danos socioambientais, no entanto, alguns deles foram capturados de maneira indireta pelos métodos, isto porque o retorno do habitat/recurso ambiental resultava no retorno à exploração econômica. Por isso, do total dos 20 danos com viés socioeconômicos, 10 deles (50%), foram capturados de forma indireta por ao menos um dos métodos. Por fim, houve 16 danos ambientais cuja valoração não foi possível devido à ausência de base de dados técnicas suficientes que permitissem a aplicação de algum dos métodos.

Tabela 139 – Balanço dos Danos Valorados e Não Valorados pelos Métodos de Valoração Econômica de Danos Empregados

HABITAT/ RECURSO	DANO	VC	MEH/ MER
AMBIENTE TERRESTRE E ATMOSFERA			
Superfície	Alterações de paisagem	N	S
Superfície	Danos em processos de extração de bens minerais	N	N
Superfície	Danos em feições subterrâneas	N	N
Superfície	Áreas de geração de resíduos sólidos	N	N
Superfície	Ampliação de áreas de disposição de rejeitos	N	N
Solos	Alteração da composição do solo	N	S
Solos	Aumento da densidade do solo	N	S
Solos	Aumento dos processos erosivos	N	S
Solos	Alteração da capacidade de suporte e deformabilidade do solo	N	N
Solos	Alteração da permeabilidade e fluxo de água no solo	N	N
Solos	Alteração da estabilidade de encostas	N	N
Solos	Alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo	N	S
Solos	Contaminação do solo por EPTs	N	N
Solos	Contaminação do solo por EPTs devido às ações emergenciais pós-desastre	N	N
Solos	Formação de tecnossolo	N	S
Flora	Supressão de vegetação nativa ciliar	S	S
Flora	Supressão de vegetação nativa por implantação de infraestrutura	N	N
Flora	Perda de biodiversidade de flora	S	S
Flora	Perda de recursos florestais madeireiros	N	N
Flora	Perda de recursos florestais não madeireiros	N	N
Flora	Redução na capacidade de resiliência da floresta	S	S
Flora	Fragmentação dos habitats e aumento do efeito de borda	S	S
Flora	Introdução e aumento de espécies exóticas	N	N
Fauna	Alterações nas populações faunísticas	S	S
Fauna	Alterações nas assembleias faunísticas	S	S
Fauna	Piora nas condições físicas da fauna	N	N
Fauna	Perda de conectividade na paisagem	S	S
Fauna	Perda de qualidade dos habitats	S	S
Fauna	Comprometimento à saúde da fauna silvestre	N	N
Fauna	Aumento na bioacumulação	N	N
Áreas naturais protegidas	Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas	N	N
Atmosfera	Alteração da qualidade do ar	N	N
AMBIENTE AQUÁTICO CONTINENTAL			
Morfologia	Alteração na área de drenagem dos cursos de água	N	N
Morfologia	Alteração na configuração da rede de drenagem dos cursos de água	N	N
Morfologia	Soterramento de cavas e açudes	N	N

HABITAT/ RECURSO	DANO	VC	MEH/ MER
Água	Redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água	S	S
Água	Aumento das concentrações de sólidos na água	S	S
Água	Aumento das concentrações de EPTs na água	S	S
Água	Dano ao uso da água para abastecimento público	N	N
Plâncton	Alteração da comunidade fitoplanctônica	S	S
Plâncton	Alterações nas comunidades zooplanctônicas	S	S
Flora aquática	Supressão de vegetação nativa	N	N
Flora aquática	Perda da biodiversidade de flora	N	N
Flora aquática	Perda de recursos florestais não madeireiros	N	N
Transporte	Alteração da dinâmica do transporte de sedimentos ao longo do rio Doce	S	S
Transporte	Assoreamento do canal do rio	S	S
Transporte	Assoreamento dos reservatórios hidrelétricos	N	N
Sedimentos	Alteração na composição granulométrica do sedimento	S	S
Sedimentos	Alteração da concentração de EPTs nos sedimentos	S	S
Sedimentos	Alteração na comunidade de macroinvertebrados bentônicos presentes no sedimento	S	S
Ictiofauna	Mortandade de peixes nos corpos d'água afetados	S	S
Ictiofauna	Alterações na composição e estrutura das comunidades de peixes	N	S
Ictiofauna	Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	N	S
Ictiofauna	Aumento da riqueza e abundância de peixes introduzidos (exóticos)	N	N
Ictiofauna	Redução da diversidade genética da ictiofauna	S	N
Ictiofauna	Alteração da dinâmica populacional da ictiofauna	N	S
Ictiofauna	Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	S	N
Ictiofauna	Aumento na bioacumulação	S	N
ZONA COSTEIRA E MARINHA			
Água	Redução das concentrações de oxigênio dissolvido	N	S
Água	Aumento das concentrações de sólidos na água	N	S
Água	Aumento da concentração de EPTs na água	N	S
Plâncton	Alteração da comunidade fitoplanctônica	N	S
Plâncton	Alteração da comunidade zooplanctônica	N	S
Plâncton	Alteração na densidade e aumento na concentração de EPTs no zooplâncton marinho	N	S
Transporte	Incremento na deposição de sedimentos	N	S
Sedimentos	Alteração das características granulométricas do sedimento superficial	N	S
Sedimentos	Aumento da concentração de EPTs no sedimento	N	S
Sedimentos	Alteração na estrutura das comunidades bênticas de fundos inconsolidados	N	S
Sedimentos	Alterações na condição de saúde e contaminação por EPTs em invertebrados bênticos de fundos inconsolidados	N	N

HABITAT/ RECURSO	DANO	VC	MEH/ MER
Ictiofauna	Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna	N	S
Ictiofauna	Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	N	S
Ictiofauna	Diminuição das populações de espécies de peixes costeiros de interesse comercial	N	S
Ictiofauna	Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	N	N
Ictiofauna	Aumento na bioacumulação	N	N
Quelônios e mamíferos marinhos	Degradação da qualidade de habitat de cetáceos	N	S
Áreas naturais protegidas	Danos em Unidades de Conservação e outras áreas naturais protegidas	N	N
Arqueológico	Soterramento de bem arqueológico	S	S
Arqueológico	Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	S	S
Arqueológico	Modificação da paisagem de implantação de bem arqueológico	S	N
Arqueológico	Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	S	S
Material	Comprometimento das estruturas de bens culturais materiais	S	S
Material	Desencadeamento de processos físico-químicos que acelerem a degradação dos bens culturais materiais	S	N
Material	Modificação da paisagem ou contexto de implantação de bens culturais materiais	S	N
Material	Alteração de partes ou setores de rotas e caminhos históricos e/ou tradicionais	S	S
Material	Interrupção ou cessão do acesso e/ou uso dos bens culturais materiais	S	S
Imaterial	Alteração de práticas culturais	S	N
Imaterial	Alteração da rede de relações comunitárias	S	N
Imaterial	Sofrimento social	S	N
Imaterial	Alteração de espaços relacionados às práticas culturais	S	N
Imaterial	Alteração de espaços de referência de memória	S	N
Imaterial	Alteração no acesso a matérias-primas e implementos associados necessários à produção dos bens culturais	S	N
Imaterial	Alteração na circulação de práticas e bens culturais	S	N

LEGENDA	Danos oriundos das ações emergenciais	Danos que possuem viés socioeconômico	Danos cuja mensuração não foi possível devido à falta de base de dados técnicos viáveis para aplicação do MEH/MER
QUANTIDADE	5	20	16

Fonte: Lactec, 2021.

Posta tais questões, passa-se aos quantitativos dos danos valorados e não valorados. Partindo dos 92 danos totais identificados, retira-se desse valor os danos com viés socioeconômico (20), por não serem parte do escopo, obtendo o total de 72 danos que fizeram parte do escopo de valoração. Dentre os 72 danos, 61 foram valorados, resultando em 85% de representatividade e alcance dos métodos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográfica da Introdução e das Considerações Iniciais sobre MEH/MER

- ALLEN, p. D. **“Scaling environmental restoration to offset injury using Habitat Equivalency Analysis”**; R. F. Bruins and M. T. Herberling. Baton Rouge, LA: CRC Press. 2007.
- BATEMAN, I. J. et al. **Economic Valuation with Stated Preference Techniques: a Manual**. Clarendon: Edward Elgar, Clarendon, 2002.
- BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 fev. 1998.
- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. Atualização Linha-Base – Contextualização. Curitiba: Lactec, 2019a.
- CHAPMAN, D.; LEJEUNE, K. **Review Report on Resource Equivalence Methods and Applications**. p. 38, 2007a.
- CLARKE, K. C. e HEMPHILL, J. J. The Santa Barbabra Oil Spill, A Retrospective. **Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers**, Editor Darrick Danta, University of Hawai'i Press, vol. 64, pp. 157-162, 2002
- DESVOUSGES, W. H. et al. Habitat and Resource Equivalency Analysis: A Critical Assessment. **Ecological Economics**, v. 143, p. 74–89, 2018.
- DUNFORD, R. W.; GINNB, T. C.; DESVOUSGES, W. D. The use of habitat equivalency analysis in natural resource damage assessments, . **Ecological Economics** 48:49–70, 2004.
- EUROPEAN COMMISSION. Directive 2004/35/CE of the european parliament and of the council. 2006, p. 1–1.
- FAIRHALL, D.; JORDAN, p. **Black Tide Rising: The Wreck of the Amoco Cadiz**. London: André Deutsch, 1980
- FREEMAN III, A. M. The Measurement of Environment and Resources Values. **Resources for the Future**, Second Edition, Washington, 2003.
- IPEA Estimção da taxa social de desconto para investimentos em infraestrutura no Brasil, Texto para Discussão, Brasília, agosto 2019
- MAGLIANO, M. M. **VALORAÇÃO ECONÔMICA DE DANOS AMBIENTAIS. 2019**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. Brasília, 2019.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Deepwater Horizon Oil Spill: Final Programmatic Damage Assessment and Restoration Plan and Final Programmatic Environmental Impact Statement**. February, 2016. Disponível em: <[https://www.gulfspillrestoration.noaa.gov / restoration-planning/gulf-plan](https://www.gulfspillrestoration.noaa.gov/restoration-planning/gulf-plan)>. Acesso em: maio 2021.
- NAVRUD, S. Value transfer and environmental policy. In: T. Tietenberg & H. Folmer (eds), **The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 2004/2005: a survey of current issues**. London: Edgar Elgar Publishers, 2004.
- NOAA. **Habitat Equivalency Analysis: An Overview**. Policy and Technical Paper Series, No. 95-1. Available on: <http://www.darrp.noaa.gov/library/pdf/heaoverv.pdf>, 2000.
- REMEDE. Resource Equivalency Methods for Assessing Environmental Damage in the EU, **Sixth Framework Programme, Deliverable No. 6A: Review Report on Resource, Equivalence Methods and Applications**, Stratus Consulting Inc., 2007.

STATE AND FEDERAL TRUSTEES STATE OF MONTANA; UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR (DOI). **Final Programmatic Damage Assessment and Restoration Plan and Final Programmatic Environmental Assessment for the ExxonMobil Pipeline Company July 1, 2011 Yellowstone River Oil Spill**. January, 2017.

Referências Bibliográfica do Método de Equivalência de Habitat ou Recurso (MEH/MER)

- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce . Relatório Metodológico de Valoração Econômica e Identificação de Danos Ambientais: Versão Preliminar**. Curitiba: Lactec, 2018.
- MOTTA, R. S. **Manual de Valoração Econômica dos Recursos Ambientais**. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Brasília, 1998. 218p.
- MURADIAN, R.; CORBERA, E.; PASCUAL U.; KOSOY N.; MAY, p. H. **Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services**. Ecological Economics, Amsterdam, v. 69, n. 6, p. 1202-1208, 2010.
- NOAA Habitat Equivalency Analysis: **An Overview. Policy and Technical Paper Series**, No. 95-1. Available: <http://www.darrp.noaa.gov/library/pdf/heaoverv.pdf>, 2000.
- PARRON, L. M., et. al. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. EMBRAPA, Brasília DF, 2015.
- REMEDE, Resource Equivalency Methods for Assessing Environmental Damage in the EU, **Sixth Framework Programme, Deliverable No. 6A: Review Report on Resource, Equivalence Methods and Applications**, Stratus Consulting Inc., 2007.
- SCEMAMA p. e HAROLD, L. **Using habitat equivalency analysis to assess the cost effectiveness of restoration outcomes in four institutional contexts**. Environmental Management 57(1):109-122 2016. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1007/s00267-015-0598-6>> acesso em: 13 abr 2020.

Referências Bibliográfica do Habitat Vegetação

- ALVAREZ, V. V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, [s. l.], v. 5, p. 25–32, 1999.
- ALVES-COSTA, C.P.; LÔBO, D.; LEAO, T.; BRANCALION, P.H.S.; NAVE, A.G.; GANDOLFI, S.; SANTOS, A.M.M.; RODRIGUES, R.R.; TABARELLI, M. **Implementando Reflorestamentos com Alta Diversidade na Zona da Mata Nordestina: Guia**. Recife: J. Luiz Vasconcelos, 2008.
- BRANCALION, P.H.S.; RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. **Restauração florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- BRANCALION, Pedro Henrique Santin et al. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. **Martins, SV Restauração ecológica de ecossistemas degradados**, [s. l.], v. 1, p. 262–293, 2012.
- BRASIL. Decreto nº 8.972. de 23 de janeiro de 2017. Institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Decreto/D8972.htm>. Acesso em 18 maio. 2021.
- BRASIL. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8666cons.htm>. Acesso em 18. maio. 2021.
- BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 dez. 2006.

- BRASIL. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm>. Acesso em 18. maio. 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651compilado.htm. Acesso em: 30 jun 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Cartilha para Conversão de Multas Ambientais**. Brasília: 2020.
- CAMPOS-FILHO, Eduardo M. et al. Mechanized Direct-Seeding of Native Forests in Xingu, Central Brazil. **Journal of Sustainable Forestry**, [s. l.], v. 32, n. 7, p. 702–727, 2013.
- CANTARRUTI, R. B.; ALVAREZ, V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Amostragem de solo. In: **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999. p. 13–20.
- CASTANHO, G. G. **Avaliação de dois trechos de uma Floresta Estacional Semidecidual restaurada por meio de plantio, com 18 e 20 anos, no Sudeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais – Conservação de Ecossistemas Florestais) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, p. 112, 2009.
- DESCHAMPS, J. R.; OCHOA FERREIRA, M. **Estudios sobre las comunidades postclimaxicas de Misiones. I: Los campos abandonados o “capueras”**. In: Jornadas Técnicas de Bosques Nativos Degradados. 1987. Facultad Ciencias Forestales. Eldorado, Misiones, Argentina, p. 36-61.
- DURIGAN GISELDA; GUERIN NATALIA; DA COSTA JOSÉ NICOLA MARTORANO NEVES. Ecological restoration of Xingu Basin headwaters: motivations, engagement, challenges and perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, [s. l.], v. 368, n. 1619, p. 20120165, 2013.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.
- FARAH, F. T. **Favorecimento da Regeneração de um Trecho Degradado de Floresta Estacional Semidecidual**. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Estadual de Campinas, p. 221, 2003.
- FIGUEIREDO, L. T. M. et al. Alterações Florísticas em uma Floresta Estacional Semidecidual no Município de Viçosa, MG, entre 1994 e 2008. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 43, n. 2, p. 169 - 180, abr. / jun. 2013.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **PG 26 - Programa de recuperação das áreas de preservação permanente e de recarga hídrica degradadas da bacia do rio Doce**. 2019.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **PG 27 - Programa de recuperação de nascentes da bacia do rio Doce**. 2019.
- GARCIA, C. C.; REIS, et al. **Regeneração Natural de Espécies Arbóreas em Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual Montana, no Domínio da Mata Atlântica, em Viçosa – MG**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 677-688, out.-dez., 2011
- GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba, SP: IPEF, 2000.
- GUARIGUATA, M. R.; OSTERTAG, R. Neotropical secondary Forest succession: changes in structural and functional characteristics. **Forest Ecology and Management**, v.148, p.185-206, 2001.
- HENDERSON, J. C.; HENSLEY, D. L. Efficacy of a hydrophilic gel as a transplant aid. **HortScience** (USA), [s. l.], 1986.

- HOLL, K. D.; AIDE, T. M. When and where to actively restore ecosystems? **Forest Ecology and Management**, The Ecology and Ecosystem Services of Native Trees: Implications for Reforestation and Land Restoration in Mesoamerica. [s. l.], v. 261, n. 10, The Ecology and Ecosystem Services of Native Trees: Implications for Reforestation and Land Restoration in Mesoamerica, p. 1558–1563, 2011.
- HOLL, Karen D. Factors Limiting Tropical Rain Forest Regeneration in Abandoned Pasture: Seed Rain, Seed Germination, Microclimate, and Soil. *Biotropica*, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 229–242, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Biomas do Brasil: primeira aproximação**. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 mar. 2021
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (IBAMA). **Em dia com a natureza. Cartilha para Conversão de Multas Ambientais**. Brasília: 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Instrução Normativa IBAMA nº4, de 13 de abril de 2011**. Estabelecer procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada - PRAD ou Área Alterada, para fins de cumprimento da legislação ambiental, bem como dos Termos de Referência constantes dos Anexos I e II desta Instrução Normativa. Disponível em: <<http://www.ctpconsultoria.com.br/pdf/Instrucao-Normativa-IBAMA-04-de-13-04-2011.pdf>> Acesso em 12 Ago. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Nota técnica nº4/2020/CT-FLOR/GABIN**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-FLOR/cif-nt-ct-flor-04-2020.pdf>> Acesso em 12 Ago. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Nota técnica nº05/2019/CT-FLOR/GABIN**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-FLOR/2018/cif-nt-ct-flor-05-2019.pdf>> Acesso em 18 maio. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Parecer técnico nº13/2017 - COREC/CGBIO/DBFLO**. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-FLOR/2017/CIF-NT-13-2017-CT-FLOR-COREC-CGBIO-DBFLO.pdf>>. Acesso em 28 fev. 2021.
- INSTITUTO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Instrução Normativa ICMBIO nº11, de 11 de dezembro de 2014**. Estabelecer procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Perturbada -PRAD, para fins de cumprimento da legislação ambiental. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/parnaserradabocaina/images/stories/in_icmbio_11_2014_estabelece_procedimentos_prad.pdf>. Acesso em 25 fev. 2021.
- LAMONT, G. P.; O'CONNELL, M. A. Shelf-life of bedding plants as influenced by potting media and hydrogels. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 31, n. 1–2, p. 141–149, 1987.
- LIEBSCH, D. et al. How long does the Atlantic Rain Forest take to recover after a disturbance? Changes in species composition and ecological features during secondary succession. **Biological Conservation**, 141 (2008) 1717 – 1725.
- LONDE, V. et al. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Rainforest. **Ecological Indicators**, 110 (2020) 105928.
- LOPES, Alfredo Scheide; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. **Fertilidade do solo**, [s. l.], p. 1– citation_lastpage, 2007.
- Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera**. Diagnóstico de Danos Curitiba: Lactec, 2020b.
- MINAS GERAIS. **Resolução Conjunta SEMAD/IEF nº 2075 de 23 de maio de 2014**. Estabelece os procedimentos para regulamentação da queima controlada no âmbito do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário do Executivo. Disponível em: <<http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/servicos/2014/rc-semad-ief-no-2.075-23-05-2014-1.pdf>>. Acesso em 18 maio. 2021.

- MOREIRA, B.; CARVALHO, F. A. A comunidade arbórea de um fragmento urbano de floresta atlântica após 40 anos de sucessão secundária. **Revista Biotemas**, 26 (2), Junho de 2013.
- NAVE, A. G. et al. **Manual de restauração ecológica: Técnicos e produtores rurais no extremo sul da Bahia**. São Paulo: LERF/ESALQ/USP: Bioflora Tecnologia da Restauração, 2015. p. 23-28.
- PAIVA, H. N. et al. **Cultivo de eucalipto em pequenas propriedades rurais**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2001.
- PIETRO-SOUZA, William; SILVA, Normandes Matos Da. Plantio manual de muvuca de sementes no contexto da restauração ecológica de áreas de preservação permanente degradadas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [s. l.], v. 9, n. 3, 2015. Disponível em: <<http://revistas.abaagroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/15350>>. Acesso em: 22 fev. 2021.
- REID, J. Leighton; HOLL, Karen D. Arrival ≠ Survival. **Restoration Ecology**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 153–155, 2013.
- RIOS, C. R. **Capacidade Regenerativa da Floresta Missioneira Argentina Frente a Distúrbios Antrópicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal: Conservação da Natureza) – Universidade Federal do Paraná. Paraná, p. 173. 2010.
- 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.
- RODRIGUES, R. R.; et al. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, São Paulo, SP. 266p. 2009.
- SER - SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL E POLICY WORKING GROUP. **The SER International Primer on Ecological Restoration**. www.ser.org. 2004.
- SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL SCIENCE & POLICY WORKING GROUP (SER). **The SER International Primer on Ecological Restoration**. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International. 2004.
- SUDING, Katharine et al. Ecological dynamics and ecological restoration. In: **Foundations of restoration ecology**. The science and practice of ecological restoration series Second edition ed. Washington: Island Press, 2016. p. 552.
- SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, Tucson, v. 23, n. 3, p. 238-251, 2015.
- URZEDO, Danilo Ignacio et al. Arranjos produtivos na restauração florestal: o caso da semadura direta e da rede de sementes do Xingu. **Mudanças no código florestal brasileiro: desafios para a implementação da nova lei**, [s. l.], p. 359, 2016.
- VLACH, Thomas R. **Creeping bentgrass responses to water absorbing polymers in simulated golf greens** (on line). Wisconsin, Aug, [s. l.], 1991.

Referências Bibliográficas do Habitat Solo

- ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; BODDEY, R.M. Dinâmica do carbono em solos sob pastagens. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. **O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p. 561-570, 2008.
- BACH, E.M.; WALL, D.H. Trends in global biodiversity: soil biota and processes. In: DELLASALA, D. A.; GOLDSTEIN, M.I. **The encyclopedia of the Anthropocene**, v. 3, p. 125-130, 2018.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. **O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18, 2008.
- BENGTSOON, J.; BULLOCK, J.M.; EGOH, B.; EVERSON, C.; EVERSON, T.; O'CONNOR, T.; O'FARRELL, P.J.; SMITH, H.G.; LINDBORG, R. Grasslands – more important for ecosystem services than you might think. **Ecosphere**, 10(2): 1-20, 2019.

- BHATTACHARYA, S.S.; KIM, K.; DAS, S.; UCHIMIYA, M.; JEON, B.H.; KWON, E.; SZULEJKO, J.E. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 214-227, 2016.
- BORTOLON, E.S.O.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C.G.; LOPES, F.; GIASSON, E.; BERGAMASCHI, H. Potencial de uso do modelo Century e SIG para avaliar o impacto da agricultura sobre estoques regionais de carbono orgânico do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36(3): 831-849, 2012.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elements of the nature and properties of soils**. 3rd ed. Prentice Hall, 2010. 614 p.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 30 jun. 2020.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO I – Contextualização**. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020b.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera**. Diagnóstico de Danos Curitiba: Lactec, 2020d.
- CARMO, F.F.; KAMINO, L.H.Y.; JUNIOR, R.T.; CAMPOS, I.C.; CARMO, F.F.; SILVINO, G.; CASTRO, K.J.S.X.; MAURO, M.L.; RODRIGUES, N.U.A.; MIRANDA, M.P.S.; PINTO, C.E.F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 15(3): 145-151, 2017.
- CARVALHO, J. et al. Relações entre a distribuição das espécies de diferentes estratos e as características do solo de uma floresta aluvial no estado do Paraná, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2009.
- CAVALCANTE, M.A.B.C. **Características morfogênicas, estruturais e acúmulo de forragem em relvado de Brachiaria decumbens cv. Basilisk sob pastejo, em diferentes alturas**. 2001. Tese (Mestrado em Zootecnia) – Departamento de Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.
- CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLOŠ, J.M.; CERRI, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, 10: 815-832, 2004.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS. Manual de adubação e de calagem para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 400p.
- DICK, W.A.; GREGORICH, E.G. Developing and maintaining soil organic matter levels. In: SCHJØNNING, P.; ELMHOLT, S.; CHRISTENSEN, B.T. **Managing soil quality – Challenges in modern agriculture**. Londres: CABI Publishing, p. 103-120, 2004.
- DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KÖGEL-KNABNER, I. Comparison of carbon and nitrogen determination methods for samples of a Paleudult subjected to no-till cropping systems. **Scientia Agricola**, 64(5): 532-540, 2007.
- DITT, E.H.; MOURATO, S.; GHAZOUL, J.; KNIGHT, J. Forest conversion and provision of Ecosystem Services in the Brazilian Atlantic Forest. **Land Degradation & Development**, 21: 591-603, 2010.
- DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, 17:1658-1670, 2011.
- DRUMMOND, M.A.; BARROS, N.F.; SOUZA, A.L.; SILVA, A.F.S. Distribuição de biomassa e de nutrientes em diferentes coberturas florestais e pastagem na região do médio rio Doce-MG. **Revista Árvore**, 21(2):187-199, 1997.

- ECHIVARRIA, G.; MOREL, J. L. Technosols of mining areas. In: NASCIMENTO, C. W. A. et al. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo: Volume IX**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. p. 92-111.
- FINEGAN, B. **Pattern and process in neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession**. *Tree*, 11(3): 119-124, 1996.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **Monitoramento das intervenções prioritárias: Relatório de resultados do 1º ano de monitoramento**. [S. l.]: Fundação Renova, 2018.
- GABRIEL, F.A. **Estudo do monitoramento geoquímico e ambiental da qualidade de águas e sedimentos do baixo curso do rio Doce**, Espírito Santo, Brasil. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.
- GIRI, K.; DAS, D.J.; PRADHAN, B.; MISHRA, G.; BURAGOHAIN, P.; HAZARIKA, S. Tree diversity, above ground biomass and carbon stock in eastern aluvial secondary semi evergreen forest of Assam. **Archive of Life Science and Environment**, 2(2):105-111, 2018.
- GUEDES, I.M.R. **Geoambientes, estoques de carbono e termodegradação da matéria orgânica de solos da área de proteção ambiental estadual Cachoeira das Andorinhas**, Ouro Preto, Minas Gerais. 2008. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **Metrópole**, p. 185-199, 2008.
- GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A.O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **Metrópole**, p. 19-26, 2008.
- GUGGENBERGER, G. Organic matter structure and characterization. In: LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**, 2. Ed., p. 1203-1209, 2006.
- HIRSCH, A. **Avaliação da fragmentação do habitat e seleção de áreas prioritárias para a conservação dos primatas na bacia do rio Doce**, Minas Gerais, através da aplicação de um Sistema de Informações Geográficas. 2003. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Departamento de Zoologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- HUESO-GONZÁLEZ, P.; MUÑOZ-ROJAS, M.; MARTÍNEZ-MURILLO, J.F. The role of organic amendments in drylands restoration. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, 5:1-6, 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Nota técnica nº4/2020/CT-FLOR/GABIN**. Disponível em: < <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-FLOR/cif-nt-ct-flor-04-2020.pdf>> Acesso em 12 Ago. 2020.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Mapa das estações**. Disponível em: < <https://mapas.inmet.gov.br/>> Acesso em: 20 Mai 2020.
- LEAL, M.A.A.; DE-POLLI, H. Aplicação de modelos ao estudo da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: **Metrópole**, p. 171-182, 2008.
- LIEBSCH, D.; MARQUES, M.C.M.; GOLDENBERG, R. How long does the Atlantic Rain Forest take to recover after a disturbance? Changes in species composition and ecological features during secondary succession. **Biological Conservation**, 141: 1717-1725, 2008.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; DEMOLINARI, M.S.M.; LEITE, F.P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32(3):1053-1063, 2008.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; STAPE, J.L.; MENDONÇA, E.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. DE; NEVES, J.C.L.; PAUL, K.; SCHULTHAIS, F.; POLGLASE, P.; RAISON, J.; SOARES, E.M.B. Modeling changes in organic carbon stocks for distinct soils in southeastern Brazil after four eucalyptus rotations using the Century model. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, 35:833-847, 2011.

- LIU, X.; HERBERT, S.J.; HASHEMI, A.M.; ZHANG, X.; DING, G. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review. **Plant, Soil and Environment**, 52(12): 531-543, 2006.
- LOPES, V.S.; CARDOSO, I.M.; FERNANDES, O.R.; ROCHA, G.C.; SIMAS, F.N.B.; MOURA, W. DE M.; SANTANA, F.C.; VELOSO, G.V.; LUZ, J.M.R. The establishment of a secondary forest in a degraded pasture to improve hydraulic properties of the soil. **Soil & Tillage Research**, 198, 2020.
- MARON, P.A.; LEMANCEAU, p. Soil as a support of biodiversity and functions. *In*: BANWART, S.A.; NOELLEMEYER, E.; MILNE, E. **Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits**, p. 141-153, 2015.
- MARQUES, M.C.M.; ZWIENER, V.P.; RAMOS, F.M.; BORGIO, M.; MARQUES, R. Forest structure and species composition along a successional gradient of Lowland Atlantic Forest in Southern Brazil. **Biota Neotropica**, 14(3): 1-11, 2014.
- METZKER, T.I.F. **Dinâmica e estoques de carbono na Floresta Tropical Atlântica – Brasil**. 2012. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) – Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 50(3), 885-900, 2007.
- NOVOTNY, E.H.; MARTIN-NETO, L. **Propriedades coloidais da matéria orgânica**. *In*: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Metrópole, p. 27-43, 2008.
- OLIVEIRA, E.S.; REATTO, A.; ROIG, H.L. Estoques de carbono no solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n.1/2, p. 71-93, 2015.
- 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.
- PARTON, W.J.; SCURLOCK, J.M.O.; OJIMA, D.S.; GILMANOV, T.G.; SCHOLES, R.J.; SCHIMEL, D.S.; KIRCHNER, T.; MENAULT, J.C.; SEASTEDT, T.; GARCIA MOYA, E.; KAMNALRUT, A.; KINYAMARIO, J.L. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. **Global Biogeochemical Cycles**, 7: 785-809, 1993.
- POST, W.M. Organic Matter: Global Distribution in World Ecosystems. *In*: LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**, 2. Ed., p. 1203-1209, 2006.
- PRADO, R.B.; FIDALGO, E.C.C.; MONTEIRO, J.M.G.; SCHULER, A.E.; VEZZANI, F.M.; GARCIA, J.R.; OLIVEIRA, A.P.; VIANA, J.H.M.; PEDREIRA, B.C.C.G.; MENDES, I.C.; REATTO, A.; PARRON, L.M.; CLEMENTE, E.P.; DONAGEMMA, G.K.; TURETTA, A.P.D.; SIMÕES, M. Current overview and potential application of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1021-1038, 2016.
- 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.
- RICE, C.W. Organic matter and nutrient dynamics. *In*: LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**, 2. Ed., p. 1180-1183, 2006.
- ROCHA, J.H.T.; SANTOS, A.J.M.; DIOGO, F.A.; BACKES, C.; MELO, A.G.C DE; BORELLI, K.; GODINHO, T. DE O. Reflorestamento e recuperação de atributos químicos e físicos do solo. **Floresta e Ambiente**, 22 (3):299-306, 2015.
- ROCHA-SANTOS, L.; TALORA, D.C. Recovery of Atlantic Rainforest areas altered by distinct land-use histories in northeastern Brazil. **Tropical Conservation Science**, 5(4): 475-494, 2012.

- ROSENDO, J.S.; ROSA, R. Utilização do modelo Century na simulação do carbono sob diferentes usos da terra. **Espaço em Revistas**, 20(1): 22-37, 2018.
- ROZENDAAL, D.M.A.; BONGERS, F.; AIDE, T.M.; ALVAREZ-DÁVILA, E.; ASCARRUNZ, N.; BALVANERA, P.; BECKNELL, J.M.; BENTOS, T.V.; BRANCALION, P.H.S.; CABRAL, G.A.L.; CALVO-RODRIGUEZ, S.; CHAVE, J.; CÉSAR, R.G.; CHAZDON, R.L.; CONDIT, R.; DALLINGA, J.S.; ALMEIDA-CORTEZ, J.; JONG, B.D.; OLIVEIRA, A.; DENSLOW, J. S.; DENT, D.H.; DEWALT, S.J.; DUPUY, J.M.; DURÁN, S.M.; DUTRIEUX, L.P.; ESPÍRITO-SANTO, M.M.; FANDINO, M.C.; FERNANDES, G.W.; FINEGAN, B.; GARCÍA, H.; GONZALEZ, N.; MOSER, V.G.; HALL, J.S.; HERNÁNDEZ-STEFANONI, J.L.; HUBBELL, S.; JAKOVAC, C.C.; HERNÁNDEZ, A.J.; JUNQUEIRA, A.B.; KENNARD, D.; LARPIN, D.; LETCHER, S.G.; LICONA, J.C.; LEBRIJA-TREJOS, E.; MARÍN-SPIOTTA, E.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; MASSOCA, P.E.S.; MEAVE, J.A.; MESQUITA, R.C.G.; MORA, F.; MÜLLER, S.C.; MUÑOZ, R.; OLIVEIRA NETO, S.N.; NORDEN, N.; NUNES, Y.R.F.; OCHOA-GAONA, S.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; OSTERTAG, R.; PEÑA-CLAROS, M.; PÉREZ-GARCÍA, E.A.; PIOTTO, D.; POWERS, J.S.; AGUILAR-CANO, J.; RODRIGUEZ-BURITICA, S.; RODRÍGUEZ-VELÁZQUEZ, J.; ROMERO-ROMERO, M.A.; RUÍZ, J.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A.; ALMEIDA, A.S.; SILVER, W.L.; SCHWARTZ, N.B.; THOMAS, W.W.; TOLEDO, M.; URIARTE, M.; SAMPAIO, E.V.S.; BREUGEL, M.V.; VAN DER WAL, H.; MARTINS, S.V.; VELOSO, M.D.M.; VESTER, H.F.M.; VICENTINI, A.; VIEIRA, I.C.G.; VILLA, P.; WILLIAMSON, G.B.; ZANINI, K.J.; ZIMMERMAN, J.; POORTER, L. **Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. Science Advances**, 5:1-10, 2019.
- SANDERMAN, J.; AMUNDSON, R. Biogeochemistry of decomposition and detrital processing. In: HOLLAND, H.D.; TUREKIAN, K.K. *Treatise on Geochemistry*, p. 217-272, 2014.
- SANTOS, O.S.H.; AVELLAR, F.C.; ALVES, M.; TRINDADE, R.C.; MENEZES, M.B.; FERREIRA, M.C.; FRANÇA, G.S.; CORDEIRO, J.; SOBREIRA, F.G.; YOSHIDA, I.M.; MOURA, P.M.; BAPTISTA, M.B.; SCOTTI, M.R. Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: prospects for remediation. **Journal of Environmental Quality**, 48: 439-449, 2019.
- SCHAEFER, C. E. G. R. et al. **Paisagens de lama: os Tecossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana**. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, [s.l.], p. 18-23, 2016.
- SILVA, G.P.; FONTES, M.P.F.; COSTA, L.M.; BARROS, N.F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 36(1): 45-52, 2006.
- SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil** 241: 155-176.
- SILVA-OLAYA, A.M.; CERRI, C.E.P.; WILLIAMS, S.; CERRI, C.C.; DAVIES, C.A.; PAUSTIAN, K. Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. **Plant and Soil**, 410: 483-498, 2017.
- SILVEIRA, E.M.O.; CUNHA, L.I.F.; GALVÃO, L.S.; WITHEY, K.D.; JÚNIOR, F.W.A.; SCOLFORO, J.R.S. **Modelling aboveground biomass in forest remnants of the Brazilian Atlantic Forest using remote sensing, environmental and terrain-related data. Geocarto International**, DOI: 10.1080/10106049.2019.1594394, 2019.
- SILVER, W.L.; OSTERTAG, R.; LUGO, A.E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. **Restoration Ecology**, 8:394-407, 2000.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - SBCS. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (NEPAR-SBCS), 2019. 289 p.
- SOUZA, A.L.; BOINA, A.; SOARES, C.P.B.; VITAL B.R.; GASPAR, R.O.; LANA, J.M. Estrutura fitossociológica, estoques de volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em Floresta Estacional Semidecidual. **Revista Árvore**, 36(1): 169-179, 2012.
- STOCKMANN, U.; ADAMS, M.A.; CRAWFORD, J.W.; FIELD, D.J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B.; COURCELLES, V.R.; SINGH, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D.A.; BALDOCK, J.; BIRD, M.; BROOKES, P.C.; CHENU, C.; JASTROW, J.D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A.G.; PARTON, W.J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, known unknowns

and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 164: 80-99, 2013.

TAN, K.H. **Humic matter in soil and the environment – Principles and controversies**. Nova York: Marcel Dekker, 2003.

TEIXEIRA, H.M.; CARDOSO, I.M.; BIANCHI, F.J.J.A.; SILVA, A.C.; JAMME, D.; PEÑA-CLAROS, M. Linking vegetation and soil functions during secondary forest succession in the Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, 457-117696: 1-13, 2020.

VEZZANI, F.M.; CONCEIÇÃO, P.C.; MELO, N.A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. **O Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p. 483-494, 2008.

WEIL, R.R.; BRADY, N.C. **Elements of the nature and properties of soils**. 15th ed. Pearson, 2017. 1104 p.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; ALMEIDA, R.F.; MARTINS, C.E.; DOMINGUES, L.A.S. Simulation of the use and management effects on the soil organic matter pools of the Atlantic Forest biome, Brazil. **Bioscience Journal**, 30(5): 1278-1290, 2014.

ZHAO, Y.; LIU, Z.; WU, J. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. **Landscape Ecology**, 35: 793-814, 2020.

Referências Bibliográficas do Recurso Água do Rio Doce

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **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 ÁGUAS (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 2 dez. 2018.

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 8a Edição – **Atualizada e Ampliada**. Viçosa, Imprensa Universitária - UFV, 2006. 625 p. (631.70202 B523m 5. ed Ac.6213)

BRASIL. Agência Nacional de águas. Ministério do Meio Ambiente. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. 2018. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução do CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 mar. 2005.

_____. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 fev. 1997.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm>. Acesso em 18 maio. 2021.

_____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO I – Contextualização. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020b.

_____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO II – Ambientes Aquáticos Continentais. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020c.

- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce . Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais**. Curitiba: Lactec, 2020a.
- Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS** /Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 2014. 112 p.
- BRITES, A. p. Z. **Enquadramento dos corpos de água através de metas progressivas: probabilidade de ocorrência e custos de despoluição hídrica**. 2010. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **Plano de Trabalho – Lagoas de Linhares**. Julho/2018.
- _____. **Relatório de monitoramento das intervenções prioritárias – Resultados do 1º ano de monitoramento**. 2018.
- _____. **Relatório Mensal – Ações de melhoria dos sistemas de abastecimento de água – conforme deliberação CIF Nº 33/2016**. Nov., 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Ministério da Economia (Org.). **Brasil em Síntese**. 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 21 maio 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico – 2010: Características da população e dos domicílios. Resultados do universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2010**. Distrito. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/apps/atlas/pdf/209_213_Glossario_ATLASDEMO%202010.pdf>. Acesso em: 18/05/2019. (verbete)
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - PNAD de 2001 a 2011**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/educacao/9127-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios.html?edicao=9128&t=destaques>> Acesso em: 20 maio 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB de 2000 e de 2008**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 20 maio 2020.
- IEMA - Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Nota Técnica CAIA Nº 049-2016**. Cariacica, ES, 2016.
- _____. **Nota Técnica GTECAD/ÁGUAS INTERIORES nº 06/2018**. 2018. _____. **Nota Técnica GTECAD/GGE-COEI 018-2017**. Cariacica, ES, 2017.
- IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Acompanhamento da qualidade das águas do Rio Doce após o rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**. Relatório Técnico: 19 de outubro de 2016. 100f. Belo Horizonte, 2016.
- Jl, Z. **Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries**, p. 216, 2008.
- JORDÃO, C.P., PEREIRA, M.G., MATOS, A.T., PEREIRA, J.L. Influence of domestic and industrial waste discharges on water quality at Minas Gerais State, Brazil. J. Braz. Chem. Soc. v.16, p. 241-250, 2005.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. 2018. Disponível em <<https://www.R-project.org/>> Acesso em maio de 2018.
- _____. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria. URL <https://www.R-project.org/>. 2015
- Rigby, R. A., and D. M. Stasinopoulos. 2005. “Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape,(with Discussion).” Applied Statistics 54.3: 507–54.

- SANTOS, N. B. S. **ANÁLISE COMPARATIVA DOS CUSTOS OPERACIONAIS DE 44 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL**. 2018. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- WICKHAM, H. **Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016. <http://ggplot2.org>.
- WICKHAM, H.; ROMAIN F.; LIONEL H.; and KIRILL M. **Dplyr: A Grammar of Data Manipulation**, 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.
- WICKHAM, H. e JENNIFER B. **Readxl: Read Excel Files**. 2016. Disponível em <<https://CRAN.R-project.org/package=readxl>> Acesso em maio de 2018.
- WICKHAM, H.; and LIONEL H. **Tidyr: Easily Tidy Data with 'Spread()' and 'Gather()' Functions**, 2019. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>.

Referências Bibliográficas do Recurso Ictiofauna

- AGOSTINHO, A.A, BARBIERI, G., VERANI, J.R. Idade e crescimento do cascudo preto *Rhinelepis aspera* (Siluriformes, Loricariidae) no rio Paranapanema, bacia do rio Paraná. **Revista Unimar** 13, 259-272. 1991.
- AGOSTINHO, A.A., MATSUURA, Y., OKADA, E.K., NAKATANI, K. The catfish, *Rhinelepis aspera* (Teleostei; Loricariidae), in the Guaira region of the Paraná River: an example of population estimation from catch-effort and tagging data when emigration and immigration are high. **Fisheries Research** 23, 333-344. 1995.
- ALVES, C.B. **Peixamento**: benefícios e controvérsias de uma técnica de manejo. *Ação Ambiental* 38. 31-34. 2008.
- ANTONIUTTI, D.M., RANZANI-PAIVA, M.J.T., GODINHO, H.M., PAIVA, p. **Relação peso total/comprimento total, crescimento e idade do cascudo *Plecostomus albopunctatus* Regan, 1908, (Osteichthyes, Loricariidae) do Rio Jaguari, São Paulo, Brasil**. Boletim do Instituto de Pesca 12, 105-120, 1985.
- 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.
- BEVILACQUA, J. E. **Estudo sobre a caracterização e a estabilidade de amostras de sedimentos do rio Tietê, SP**. 1996. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Química do Instituto de Química da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 190p.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; MIERZWA, J.C.; BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI,, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305p.
- BRANDT MEIO AMBIENTE - SAMARCO. **Relatório do resgate de carcaças de peixes ao longo do rio Doce**. Mariana, MG: Brandt, 2016. 47p.
- BRASIL – MARINHA DO BRASIL. **Relatório Final de Levantamento Hidroceanográfico, Navio de pesquisa hidroceanográfico "Vital de Oliveira"**. Diretoria de Hidrografia e Navegação: "Levantamento Ambiental expedito em regência/ES" – LH 035/15. 2015. 137p.
- 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. **Tomo I: Contextualização Diagnóstico de Danos**. Curitiba, Paraná, Brasil. Maio, 2020b. 576p.
- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. **Relatório Pós-desastre – Meios Físico e Biótico: Geologia, Solos, Hidrologia e Hidrossedimentologia, Qualidade de sedimentos, Unidades de Conservação, Flora e Fauna**. Curitiba: Lactec, 2018b.

- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO I – Contextualização**. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020.
- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO II – Ambientes aquáticos continentais**. Acompanhamento de Danos. Curitiba: Lactec, 2021.
- BRAUN, N.; LIMA, R.L.; MORAES, B.; VIEIRA, V.L.P.; BALDISSEROTTO, B. Survival, growth and biochemical parameters of silver catfish, *Rhamdia quelen*, juveniles exposed to different dissolved oxygen levels. **Aquaculture Research**, 37, 1524-1531, 2006.
- 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.
- CARDONE, I.B. **Dieta e morfologia trófica de espécies do gênero *Hypostomus* Lacépède, 1803 (Ostariophysi, Loricariidae) no Alto curso do Rio Corumbataí – SP. 2006**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas - Zoologia do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2006. 85p.
- CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; JUNIOR, R. T.; CAMPOS, I. C.; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X.; MAURO, M. L.; RODRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. p. S.; PINTO, C. E. F. **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspectives in Ecology and Conservation**.
- CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C.; BAER, A. **Migratory fishes of South America**. Biology, fisheries and conservation status. Canadá: World Fisheries Trust. 2003.
- CHAPMAN, p. M.; PAINE, M. D.; ARTHUR, A. D.; TAYLOR, L. A. A triad study of sediment quality associated with a major, relatively untreated marine sewage discharge. **Marine Pollution Bulletin**, v. 32, n. 1, p. 47-67, 1996.
- CLARKE, K. R.; WARWICK, R.M. **Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation**. 2nd edition. PRIMER-E: Plymouth, 2001.
- DANGLES, O., JONSSON, M., MALMQVIST, B. The importance of detritivore species diversity for maintaining stream ecosystem functioning following the invasion of a riparian plant. **Biological Invasions** 4: 441-446, 2002.
- DIRETORIA DE PREVENÇÃO E EMERGÊNCIA AMBIENTAL (DEAMB), SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMAD) e SISTEMA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SISEMA). **Relatório Técnico no 11/2016**. Mortandade de peixes na Bacia do Rio Doce após rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues (Mariana/MG), em 05/11/2015, Ref. DO1-DOC-05112015. 2016. 71p.
- DUARTE, S. ARAÚJO, F.G., BAZZOLI, N. Reproductive plasticity of *Hypostomus affinis* (Siluriformes: Loricariidae) as a mechanism to adapt to a reservoir with poor habitat complexity. **Zoologia** 28 (5): 577-586, 2011.
- 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.
- DUARTE, S.; ARAÚJO, F.G. Fecundity of the *Hypostomus affinis* (Siluriformes, Loricariidae) in the Lajes Reservoir, Rio de Janeiro, Brazil. **Revista de Biologia Tropical** v. 50, n.1, p. 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
- ECONSERVATION - **Estudos e Projetos Ambientais. Relatório técnico RT ECV 065/16**: Monitoramento de bioacumulação (Ictiofauna, Carcinofauna e Malacofauna) por metais, na região marinha adjacente à foz do rio Doce e sob possível influência da lama de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão, abril, 2016. 972p.

- FAVARO, L. F.; CHAVES, p. T. C. Aspectos morfológicos e citoquímicos da ovogênese de *Hypostomus cf. tietensis* (Loricariidae) do Lago Igapó, Londrina, Paraná, Brasil. **Acta Biologica** 28, 125-139. 1999.
- FELIPPE, M. F.; COSTA, A.; FRANCO, R.; MATOS, R. **A Tragédia Do Rio Doce: A Lama, O Povo e a Água**. Relatório de campo e Interpretações preliminares sobre as consequências do rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão (Samarco/Vale/BHP). Geografias - Edição Especial - Vale do Rio Doce: formação geo-histórica e questões atuais, p. 63-94, 2016.
- FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D. C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR, p. M.; MILLAN, V. E. G.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A.; SOARES-FILHO, B.; **Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil**. *Natureza e Conservação*, v. 14, p. 35-45, 2016.
- FLECKER, A.S. Ecosystem Engineering by a Dominant Detritivore in a Diverse Tropical Stream. **Ecology**, 77 (6): 1845-1854, 1996.
- FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. **Metal pollution in the aquatic environment**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- FROESE, R.; PAULY, D. **FishBase**. 2019. Disponível em: <www.fishbase.org>. Acesso em fev. 2019.
- FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DO RIO GRANDE (FAURG). **Relatório técnico-científico, contrato 105/2016**. Etapa 1: Análise de contaminantes (metais); Etapa 2: Análise sobre as possibilidades de contaminação do Parque Nacional Marinho de Abrolhos e regiões relacionadas; Etapa 3: Assinatura geoquímica de elementos de comparação com a pluma de sedimentos do rio Doce; Etapa 4: Análise de biomarcadores (lipoperoxidação). 2016a. 63p.
- _____. Relatório técnico-científico, contrato 105/2016. Etapa 5: Análise comparativa sobre os resultados entre as expedições Soloncy Moura I e II e as amostras coletadas antes do evento. 2016b. 16p.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **Avaliação dos resultados de qualidade de água e sedimento do Rio Doce – Atualização de Julho de 2017**. Relatório Técnico, 2017. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/>, Acesso em 15/05/2020.
- GANDINI, C.V. **Efeitos sazonais e da mudança da vazão do rio sobre a alimentação e a estrutura trófica da comunidade de peixes do rio Grande à jusante da Usina Hidrelétrica de Itutinga, Minas Gerais**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ecologia Aplicada – Ecologia e Conservação de Recursos em Paisagens Fragmentadas e Agrossistemas da Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. 121p.
- GAYANILO, F. C.; SPARRE, P.; PAULY, D. **FAO-ICLARM stock assessment tools II: User's guide**. Food & Agriculture Org., 2005.
- GFT. **Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. 2015. Disponível em: <http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf>. Acesso em: 20 jan 2020.
- GIBBS, M., KURTH, B.N., BRIDGES, C. Age and growth of the loricariid catfish *Pterygoplichthys disjunctivus* in Volusia Blue Spring, Florida. **Aquatic Invasions** 8, 207-218. 2013.
- GLEDHILL, M.; VAN KIRK, R. Modeling effects of toxin exposure in fish on long-term population size, with an application to selenium toxicity in bluegill (*Lepomis macrochirus*). **Ecological Modeling** 222, 3587–3597. 2011.
- GOLDER ASSOCIATES BRASIL CONSULTORIA E PROJETOS LTDA. **Memorando Técnico MT-253_159-515-2282**. Concentração de metais em água, sedimentos, tecido de peixes e organismos aquáticos coletados na região marinha e estuarina da foz do rio Doce. Março, 2016.
- GOMIERO, L. M.; CARMASSI, A. L.; DE SOUZA BRAGA, F. M.I. Crescimento e mortalidade de *Brycon opalinus* (Characiformes, Characidae) no Parque Estadual da Serra do Mar, Mata Atlântica, Estado de São Paulo. **Biota Neotropica** 7, 21-26. 2007.
- GOTELLI, N. J. *A primer of ecology*. Sunderland, Mass: Sinauer Associates. 2001.

- GUERRA, M. B. B.; TEANEY, B. T.; MOUNT, B. J.; ASUNSKIS, D. J.; JORDAN, B. T.; BARKER, R. J.; SANTOS, E. E.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Post-catastrophe analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils.** Water, Air and Soil Pollution, p. 228 – 252. 2017.
- GUERREIRO, L.R.J. DIAS, J.A.D.; FORNARI, D.C.; RIBEIRO, R.P.; ZANONI, M.A. Desempenho de pós larvas de cascudo preto (*Rhinelepis aspera*), alimentadas com náuplios de artemia e ração oferecida em saches Performance of post larvae of cascudo preto (*Rhinelepis aspera*), fed with artemia nauplii and ration offered in sachets. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 781-788, 2011.
- GUILHERME, L. R. G.; MARQUES, J. J.; PIERANGELI, M. A. P.; ZULIANI, D. Q.; CAMPOS, M. L.; MARCHI, G. **Elementos traço em solos e sistemas aquáticos.** Tópicos em Ciências do Solo, v. 4, p. 345-390, 2005.
- GURGEL, J. J. S.; NEPOMUCENO, F. H. PARTE4: Povoamento e Repovoamento de Reservatórios. In: **Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO). MANUAL SOBRE MANEJO DE RESERVATORIOS PARA A PRODUÇÃO DE Freshwater Biology PEIXES.** Brasília, 1988.
- HALL, S. J.; GREENSTREET, S. p. R. Taxonomic distinctness and diversity measures: responses in marine fish communities. **Marine Ecology Progress Series**, n. 166, p. 227–229, 1998.
- HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, p. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Nature: Scientific Reports**, v. 7, n. 10706, p. 1-13, 2017.
- HEINO, J., MYKRA, H., HAMALAINEN, H., AROVIITA, J. AND MUOTKA, T. **Response of taxonomic distinctness and species diversity indices to anthropogenic impacts and natural environmental gradients in stream macroinvertebrates.**, v. 52, n. 9, p. 1846-1861, 2007.
- HORA, A. M.; DIAS, C. A.; GUEDES, G. R.; COSTA, A. S. V.; JUNIOR, M. J. F. Da exploração econômica da bacia hidrográfica do Rio Doce ao atual processo de degradação de seus recursos naturais. In.: **TERRITÓRIO, MOBILIDADE POPULACIONAL E AMBIENTE**, p. 213-234, 2012. Disponível em: <http://gilvanguedes.com/wp-content/uploads/2016/09/hora_etal_2012_livro_tmpa_cap9.pdf>. Acesso 20 set. 2017.
- HOVGARD, H.; LASSEN, H. Manual on estimation of selectivity for gillnet and longline gears in abundance surveys. **FAO Fisheries Technical Paper**. No. 397. Rome, FAO. 2000.
- HUNT, G.L., MCKINNELL, S. Interplay between top-down, bottom-up, and wasp-waist control in marine ecosystems. *Prog Oceanogr*, v. 68, n. 2-4, p. 115 – 124, 2006.
- HUTCHINSON, T.H., SOLBE, J., KLOEPPER-SAMS, P.J. Analysis of the ecetoc aquatic toxicity (EAT) database III—comparative toxicity of chemical substances to different life stages of aquatic organisms. **Chemosphere**, 36(1), 129-142. 1998.
- 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/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 11 jan. 2016.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Nota técnica no 24/2015/CEPTA/DIBIO/ICMBIO.** Consequências parciais na biodiversidade aquática da bacia do rio Doce, provocadas pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração da SAMARCO Mineradora S.A. no município de Mariana, MG. Ministério do Meio Ambiente. Pirassununga, SP, 2015. 10p.
- _____. Resumo das análises realizadas - 1a Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura. Equipe de Pesquisa Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Coral Vivo. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 15 de março. 2016a. 4p.
- _____. Nota técnica no 006/2016 conjunta – Centro TAMAR/APA Costa das Algas/REBIO de Comboios/RVS de Santa Cruz. Relato das informações apresentadas pelos pesquisadores da UFES e FURG quanto a contaminação de organismos marinhos na costa capixaba e suas implicações na proibição de pesca de camarão e demais recursos pesqueiros na região marinha próxima a Foz do rio Doce (Aracruz e Linhares/ES). Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 18 de março. 2016b. 8p.

- _____. Relatório de avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação - 1a Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura do CEPISUL/ICMBio (28 de abril de 2016). Equipe de Pesquisa Universidade Federal do Rio Grande – FURG/Coral Vivo. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF, 28 de abril. 2016c. 62p.
- _____. Nota técnica no 02/2016 conjunta – APA Costa das Algas/RVS de Santa Cruz. Relato das informações apresentadas pelos pesquisadores da EFES e FURG quanto a contaminação de organismos marinhos na costa capixaba e suas implicações na proibição de pesca de camarão e demais recursos pesqueiros no interior da APA Costa das Algas e do RVS de Santa Cruz/ES. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 29 de abril. 2016d. 29p.
- _____. Nota técnica no 012/2016 Centro TAMAR/DIBIO/ICMBio. Consolidação das informações apresentadas pelos pesquisadores da UFES e FURG a partir das campanhas amostrais realizadas na região marinha da foz do rio Doce. Ministério do Meio Ambiente. Vitória, ES, 17 de maio. 2016e. 18p.
- JAGER, H.I. Individual variation in life history characteristics can influence extinction risk. **Ecological Modelling** 144, 61–76. 2001.
- JONES, R., VAN ZALINGE, N.P. Estimates of mortality rate and population size for shrimp in Kuwait waters. *Kuwait Bull. Mar. Sci* 2, 273-288.
- JUNCÁ, F. A.; PAVAN, D.; JESUS, T.B.; ETEROVICK, p. **Girinos como bioindicadores da qualidade da água do rio Doce**. Relatório Final. Universidade estadual de Feira de Santana, junho, 2017, 33p. Disponibilizado por Greenpeace em http://www.greenpeace.org.br/hubfs/Campanhas/Agua_Para_Quem/documentos/GP_girinosbioindicadoresRioDoce.pdf. Acesso em 25 junho 2018
- KARIM, R.; SEKINE, M.; UKITA, M. Simulation of eutrophication and associated occurrence of hypoxic and anoxic condition in a coastal bay in Japan. **Marine Pollution Bulletin**, 45 (1-12): 280-5, 2002.
- KARIM, R.; SEKINE, M.; UKITA, M. Simulation of eutrophication and associated occurrence of hypoxic and anoxic condition in a coastal bay in Japan. **Marine Pollution Bulletin**, 45 (1-12): 280-5, 2002.
- KATOPODIS, C., GERVAIS, R. **Fish Swimming Performance Database and Analyses**. Canadá, Canadian Science Advisory Secretariat. 2016.
- 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*, n. 78, p. 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 desastrenafoz do Rio Doce, distritos de Regência e Povoação, Linhares (ES). Relatório de pesquisa. Vitória: GEPEDES. 2017. 114p.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento da água**. Campinas, SP: Editora Átoma, 2010.
- LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento da água**. Campinas, SP: Editora Átoma, 2010.
- LOPES, J.M., KALAPOTHAKIS, E., GODINHO, A.L., BARROCA, T., GUTIERRES, M.E., BEDORE, A.G. **Desenvolvimento de planos de manejo e sistemas de monitoramento ambiental para o programa de estocagem de peixes da CEMIG**. XXII Seminário Nacional de produção e transmissão de energia elétrica.
- LÓPEZ, C.M. **Crescimento de larvas de cascudo-preto (*Rhinelepis aspera*) Sipx & Agassiz, 1829 (*Osteichthyes*, *Siluriformes*, *Loricariidae*), submetidas a diferentes níveis alimentares**. Dissertação (Mestrado), Pós-graduação em Aquicultura, UNESP, Campus Jaboticabal, 2005.
- LUCAS, M. C., BARAS, E. **Migration of freshwater fishes**. Blackwell Science Ltd, Oxford. 420. 2001.
- MAFFEZZOLLI, G.; NUÑER, A.P.O. **Crescimento de alevinos de jundiá, *Rhamdia quelen* (Pisces, Pimelodidae), em diferentes concentrações de oxigênio dissolvido**. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, v. 28, n. 1, p. 41-45, 2006.

- MAFFEZZOLLI, G.; NUÑER, A.P.O. **Crescimento de alevinos de jundiá, *Rhamdia quelen* (Pisces, Pimelodidae), em diferentes concentrações de oxigênio dissolvido.** Acta Scientiarum Biological Sciences, v. 28, n. 1, p. 41-45, 2006.
- MAIA, F. F. **Elementos traços em sedimentos e qualidade da água de rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG.** 2017. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. 57p.
- MALBROUCK, C., KESTEMONT, p. Effects of microcystins on fish. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, 25(1), 72-86. 2006.
- MARQUES, B.S.; BELEI, F.; SAMPAIO, W.M.S. **Ictiofauna do baixo rio Manhuaçu (bacia do médio rio Doce).** Evolução e Conservação da Biodiversidade, v. 4, n.1, p. 32-41, 2013.
- MAZZONI, R., CARAMASCHI, E.P. Size structure, sex ratio and onset of sexual maturity of two species of Hypostomus. **Journal of Fish Biology** 47: 841-849, 1995.
- MAZZONI, R.; CARAMASCHI, E. p. Spawning season, ovarian development and fecundity of Hypostomus affinis (Osteichthyes, Loricariidae). **Revista Brasileira de Biologia**, v.57, n.3, p. 455-462, 1997.
- MELO, A.S. O que ganhamos 'confundindo' riqueza de espécies e equabilidade em um índice de diversidade?. **Revista Eletrônica BIOTA NEOTROP.** vol. 8, no. 3, Jul./Set. 2008. Disponível em: <http://www.biotaneotropica.org.br/v8n3/en/abstract?point-of-view+bn0010803200> 8>. Acesso em nov. 2019.
- MELO, A.S. O que ganhamos 'confundindo' riqueza de espécies e equabilidade em um índice de diversidade?. **Revista Eletrônica BIOTA NEOTROP.** vol. 8, no. 3, Jul./Set. 2008. Disponível em: <http://www.biotaneotropica.org.br/v8n3/en/abstract?point-of-view+bn0010803200> 8>. Acesso em nov. 2019.
- MILDENBERGER, T.K., TAYLOR, M.H., WOLFF, M. (2017), TropFishR: an R package for fisheries analysis with length-frequency data. **Methods in Ecology and Evolution** 8, 1520-1527.
- NETO, R. R.; SÁ, F.; CARNEIRO, M. T. W. D.; COSTA, E. S.; RODRIGUES, D. R. p. **The worst brazilian environmental disaster altered the distribution of metals in water at the Doce river estuary and marine region.** In: 18th International Conference on Heavy Metals in the Environment, 12 to 15 September 2016, Anais... Ghent, Belgium, 2016.
- NOMURA, Hitoshi. Caracteres merísticos e biologia do cascudo, Hypostomus fluviatilis (Schubart, 1964) (Osteichthyes, Loricariidae) do rio Mogi-Guaçu, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Zooogia** 5, 75-88. 1988.
- OSTRENSKY, A.; BOEGER, W. **Piscicultura: fundamentos e técnicas e manejo.** Guaíba, RS: Livraria e Editora Agropecuária LTDA, 1998.
- OTTO, S. B.; RALL, B. C., BROSE, U. Allometric degree distributions facilitate food-web stability. **Nature**, v. 450, n. 7173, p. 1226-1229, 2007.
- PACE, M.L.; COLE, J.J.; CARPENTER, S.R., KITCHELL, J.F. Trophic cascades revealed in diverse ecosystems. **Trends EcolEvol**, v. 14, n. 12, p. 483 – 488, 1999.
- 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.
- PAULY, D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. **ICES Journal of Marine Science** 39, 175-192. 1980.
- PAULY, D.; DAVID, N. ELEFAN I, a BASIC program for the objective extraction of growth parameters from length-frequency data. **Meeresforschung** 28, 205-211. 1981.
- PEREIRA, A. A.; VAN HATTUM, B.; BROUWER, A.; VAN BODEGOM, p. M.; REZENDE, C. E.; SALOMONS, W. Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon. **Journal of Soils and Sediments**, v. 8, p. 239–252, 2008.
- PEREZ, C. F. **Estudo taxonômico das espécies do gênero Hypostomus Lacépède, 1803 (Siluriformes, Loricariidae) de rios do leste do Brasil.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em

- Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de São Carlos. 2018
- PEREZ, C. F. **Estudo taxonômico das espécies do gênero *Hypostomus* Lacépède, 1803 (Siluriformes, Loricariidae) de rios do leste do Brasil**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal de São Carlos. 2018
- PIRES, J. M. M.; LENA, J. C. de; MACHADO, C. C.; PEREIRA, R. S. Potencial poluidor de resíduo sólido da Samarco Mineração: estudo de caso da Barragem de Germano. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, 27, 393, 2003.
- POEMAS - Grupo Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade. **Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG)**. Relatório Final. 2015. 103p.
- QUEIROZ, M. T. A. **Bioacumulação de metais pesados no rio Piracicaba, Minas Gerais, aplicando a análise por ativação neurotrônica instrumental**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, UNILESTE, MG, Coronel Fabriciano, 2006. 105p.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL <https://www.R-project.org/>.
- RAMOS, W. E. S. **Contaminação por mercúrio e arsênio em Ribeirões do Quadrilátero Ferrífero – MG, em área de mineração e atividades garimpeiras**. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005. 122p.
- REDE RIO DOCE MAR (RRDM). **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da área Ambiental I: Relatório semestral – seção 1, RT 03 RRDM/Abril 2019, Vitória, Espírito Santo**, 2019.
- RELATÓRIO TÉCNICO DEAMB/SEMAD/SISEMA Nº 011/2016**. Mortandade de peixes na Bacia do Rio Doce após rompimento da barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues (Mariana/MG), em 05/11/2015. 2016.
- RHODES, V. p. **Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo ouro – Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. 113p.
- ROCHA, O; ESPÍNDOLA, E. L. G.; FENERICH-VERANI, N.; RIETZLER, A. C. O problema das invasões biológicas em águas doces. In.: ROCHA, O. (ed.). **Espécies invasoras em águas doces – estudo de caso e propostas de manejo**. São Carlos: Editora Universidade Federal de São Carlos, 2005. p. 9-12. 2005.
- SALES, S. C. M. **Avaliação ecotoxicológica de impactos da contaminação por metais e arsênio em áreas de mineração e beneficiamento de ouro em Minas Gerais**. 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 158p.
- SAMARCO. Esclarecimentos sobre a água do rio Doce e do mar, bioacumulação em peixes e diálogo. 2016. 9p. Disponível em: <http://samarco.com/wp-content/uploads/2016/06/Paper_Agua_23-06.pdf>. Acesso em 29 set. 2017.
- SAMARCO. Esclarecimentos sobre a água do rio Doce e do mar, bioacumulação em peixes e diálogo. 2016. 9p. Disponível em: <http://samarco.com/wp-content/uploads/2016/06/Paper_Agua_23-06.pdf>. Acesso em 29 set. 2017.
- SANTOS, H.A., POMPEU, P.S., VICENTINI, G.S. MARTINEZ, C.B. Swimming performance of the freshwater neotropical *Pimelodus maculatus* Lacepède, 1803. **Brazilian Journal of Biology** 68, 433-439. 2008.
- SANTOS, H.A., VIANA, E.M.F, POMPEU, P.S., MARTINEZ, C.B. Optimal swim speeds by respirometer: an analysis of three neotropical species. **Neotropical Ichthyology** 10, 805-811. 2012.

- SARMIENTO, A. M.; DELVALLS, A.; NIETO, J. M.; SALAMANCA, M. J.; CARABALLO, M. A. Toxicity and potential risk assessment of a river polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). **Science of the Total Environment**, v. 409, p. 4763–4771, 2011.
- SARTORI, É.; COSTA, L. H. V.; SOUZA, D. L.; RANGEL, T. P.; ALMEIDA, D. Q. R.; REZENDE, C. E.; VERGILIO, C. S. **Comparação entre matrizes ambientais (água e sedimento) como fonte de contaminação por metais para peixes**. In: XXI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VII Encontro de Iniciação à Docência, Universidade do Vale do Paraíba, Anais..., São José dos Campos, Brasil, p. 1-6, 2017.
- SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL DE POLÍTICA URBANA E GESTÃO METROPOLITANA DO GOVERNO DE MINAS GERAIS (SEDRU). **Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. Responsável: Grupo da Força-Tarefa. Belo Horizonte, 2016. 287p.
- SEGURA, F. R.; NUNES, E. A.; PANIZ, F. P.; PAULELLI, A. C. C.; RODRIGUES, G. B.; BRAGA, G. U. L.; PEDREIRA FILHO, W. R.; BARBOSA JR, F.; CERCHIARO, G.; SILVA, F. F.; BATISTA, B. L. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813 – 825, 2016.
- SILVA, A. C.; CAVALCANTE, L. C. D.; FABRIS, J. D.; JÚNIOR, R. F.; BARRAL, U. M.; FARNEZI, M. M. M.; VIANA, A. J. S.; ARDISSON, J. D.; FERNANDEZ-OUTON, L. E.; LARA, L. R. S.; STUMPF, H. O.; BARBOSA, J. B. S.; SILVA, L. C. Características químicas, mineralógicas e físicas do material acumulado em terraços fluviais, originado do fluxo de lama proveniente do rompimento de barragem de rejeitos de mineração de ferro em Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brasil. **Revista Espinhaço**, v. 5, n. 2, p. 44-53. 2016.
- SILVA, I. F. L. **Contribuições para o diagnóstico ambiental da parte média e inferior da bacia do Rio Piracicaba, MG**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. 127p.
- SOUZA, C.T. **Biologia reprodutiva de *Hypostomus affinis* (STEINDACHNER, 1877) e *Hypostomusluetkeni* (LACÉPÈDE, 1803) no município de Itaperuna, RJ**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência Animal - Nutrição e Produção animal do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense "Darcy Ribeiro", Campos dos Goytacazes, 2010. 174p.
- SOUZA, V. L. B.; LIMA, V.; HAZIN, C. A.; FONSECA, C. K. L.; SANTOS, S. O. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 3, n. 1A, p. 01-13, 2015.
- SOUZA, W. R. **Análise de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPAs – Em sedimentos do Ribeirão do Funil na região de Ouro Preto – MG**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. 95p.
- TAVARES-DIAS, M.; ARAUJO, C.S.O.; PORTO, S.M.A., VIANA, G.M.; MONTEIRO, P.C. **Sanidade do Tambaqui *Colossoma macropomum* nas fases de larvicultura e alevinagem**. In: Tavares-Dias et al., (Eds). Documento n. 78 – Embrapa Embrapa Amapá, Macapá; Universidade Nilton Lins, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2013. 46p.
- TAVARES-DIAS, M.; ARAUJO, C.S.O.; PORTO, S.M.A., VIANA, G.M.; MONTEIRO, P.C. **Sanidade do Tambaqui *Colossoma macropomum* nas fases de larvicultura e alevinagem**. In: Tavares-Dias et al., (Eds). Documento n. 78 – Embrapa Embrapa Amapá, Macapá; Universidade Nilton Lins, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2013. 46p.
- TILMAN, D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology*, n. 77, p. 350–363, 1996.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (UFES). **Resultados parciais das análises realizadas em amostras coletadas na Plataforma Adjacente a Foz do rio Doce**: Embarque NOc Vital de Oliveira. Vitória, fevereiro, 2016a. 17p.
- _____. **Relatório Técnico Parcial das análises realizadas em amostras coletadas na Plataforma Adjacente a Foz do rio Doce**, APA Costa das Algas e Plataforma de Abrolhos: Embarque Soloncy Moura, Vitória, abril, 2016b. 24p.

- _____. Monitoramento da Influência da Pluma do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG – Novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados, Vitória, 2017. 254p.
- UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UERJ). **Estudo preliminar sobre a detecção da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre o Parque Nacional dos Abrolhos-BA, para o evento de 5-6 de Janeiro 2016**. Rio de Janeiro, RJ, 4 de maio. 2016.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI (UFVJM). **Relatório da contaminação dos peixes capturados na região do médio rio Doce, na microrregião de Governador Valadares, MG**. 2017. 10p.
- VAREJÃO, E. V. V. **Distribuição de mobilidade de arsênio e metais pesados em ribeirões do Quadrilátero Ferrífero**, Minas Gerais. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 205p.
- VARGAS, I. B.; MAINARDI, V. F.; AGUIAR, L. L.; SOUZA, D. L.; PIEDADE, A. E.; RANGEL, T. P.; ALMEIDA, D. Q. R.; MENDONÇA, p. P.; REZENDE, C. E.; DAVID, J. A. O.; VERGILIO, C. S. Potencial mutagênico e genotóxico de peixes expostos ao sedimento do rio doce após o rompimento da barragem. **Revista UNIVAP** – Universidade do Vale do Paraíba, online, Edição Especial - ISSN 2237-1753 - XX Encontro de Iniciação Científica, XVI Encontro de Pós-Graduação, X INIC Jr e VI INID da Universidade do Vale do Paraíba, v. 22, n. 40, p. 1-5, 2016.
- VAZOLLER, A.E.A.M. **Biologia da Reprodução de Peixes Teleósteos**: Teoria e Prática. Maringá: EDUEM, 1996. 169p.
- VERONEZ, A. C. S.; SALLA, R. V.; BARONI, V. D.; BARCAROLLI, I. F.; BIANCHINI, A.; MARTINEZ, C. B. R.; CHIPPARI-GOMES, A. R. Genetic and biochemical effects induced by iron ore, Fe and Mn exposure in tadpoles of the bullfrog *Lithobates catesbeianus*. **Aquatic Toxicology**, v. 174, p. 101–108, 2016.
- VIEIRA, F. Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce. **MGBIOTA**, v. 5, n. 2, p. 5-22, 2010.
- VIEIRA, F. Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce. **MG. Biota**, v. 2, p. 5-22, 2009/2010.
- VIEIRA, F. Distribuição, impactos ambientais e conservação da fauna de peixes da bacia do rio Doce. **MGBIOTA**, Belo Horizonte, 5(2):5-22, 2010.
- VIEIRA, F.; GOMES, J.P.C.; MAIA, B.P.; SILVA, L.G.M. **Peixes do Quadrilátero Ferrífero**. Guia de Identificação. Belo Horizonte, Fundação Biodiversitas. 2015.
- VON BERTALANFFY, L. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. II). **Human Biology** 10, 181-213. 1938.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 1996.
- WAGNER, R.L, MAKRAKIS, S., CASTRO-SANTOS, T., MAKRAKIS, M.C., DIAS, J.H.P, BELMONT, R.F. Passage performance of long-distance upstream migrants at a large dam on the Paraná River and the compounding effects of entry and ascent. **Neotropical Ichthyology** 10, 785-795. 2012.
- WANG, K., ZHANG, C., XU, B., XUE, Y., REN, Y. Selecting optimal bin size to account for growth variability in Electronic Length Frequency Analysis (ELEFAN). **Fisheries Research** 225, 105474. 2020.
- WARWICK, R. M.; CLARKE, K. R. Taxonomic distinctness and environmental assessment. **Journal of Applied Ecology**, n. 35, p. 532–543, 1998.
- WARWICK, R.M.; LIGHT, J. Death assemblages of molluscs on St Martin, Isles of Scilly: a surrogate for regional biodiversity? **Biodiversity and Conservation**, n. 11, p. 99–112, 2002.
- WILHELM FILHO, D., TORRES, M.A., ZANIBONI-FILHO, E., PEDROSA, R.C. Effect of different oxygen tensions on weight gain, feed conversion, and antioxidant status in piapara, *Leporinus elongatus* (Valenciennes, 1847). **Aquaculture**, 244 (1–4), 349-357, 2005.

- WILHELM FILHO, D., TORRES, M.A., ZANIBONI-FILHO, E., PEDROSA, R.C. Effect of different oxygen tensions on weight gain, feed conversion, and antioxidant status in piapara, *Leporinus elongatus* (Valenciennes, 1847). **Aquaculture**, 244 (1–4), 349–357, 2005.
- WITECK, L.; BOMBARDELLI, R.A.; SANCHES, E.A.; OLIVEIRA, J.D.S.; BAGGIO, D.M.; SOUZA, B.E. Motilidade **espermática, fertilização dos ovócitos e eclosão dos ovos de jundiá em água contaminada por cádmio**. Revista Brasileira de Zootecnia, v.40, n.3, p.477–481, 2011.
- WITECK, L.; BOMBARDELLI, R.A.; SANCHES, E.A.; OLIVEIRA, J.D.S.; BAGGIO, D.M.; SOUZA, B.E. Motilidade **espermática, fertilização dos ovócitos e eclosão dos ovos de jundiá em água contaminada por cádmio**. Revista Brasileira de Zootecnia, v.40, n.3, p.477–481, 2011.
- WRIGHT, S. Isolation by Distance. *Genetics* 28, 114–138. 1943.
- WU, R.S.S. Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses. **Marine Pollution Bulletin**, 45 (1–12), 35–45, 2002.
- WU, R.S.S. Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses. **Marine Pollution Bulletin**, 45 (1–12), 35–45, 2002.

Referências Bibliográficas do Habitat Área Marinha

- ALVES-COSTA, C.P.; LÔBO, D.; LEO, T.; BRANCALION, P.H.S.; NAVE, A.G.; GANDOLFI, S.; SANTOS, A.M.M.; RODRIGUES, R.R.; TABARELLI, M. **Implementando Reflorestamentos com Alta Diversidade na Zona da Mata Nordestina**: Guia. Recife: J. Luiz Vasconcelos, 2008.
- BANN, C. **The Economic Valuation of Mangroves: A Manual for Researchers. Economy and Environmental Program for Southeast Asia (EEPSEA)**. Singapore, 1998.
- BARBIER, E. B.; HACKER, S. D.; KENNEDY, C.; KOCH, E. W.; STIER, A. C.; SILLIMNA, B. R. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 2011, pp. 169–193
- BERGER, U.; HILDENBRANDT, H. A new approach to spatially explicit modelling of forest dynamics: spacing, ageing and neighbourhood competition of mangrove trees. **Ecological Modelling**, v. 132, n. 3, p. 287–302, 2000.
- BERNINI, E.; SANTOS, C. F. N. R.; OINTO, F. L.; CHAGAS, G. P.; REZENDE, C. E. Fitossociologia de florestas de mangue plantadas e naturais no estuário do Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil. **Biotemas**, v. 27, n. 1, p. 37–48, 2014b.
- BERNINI, E.; CHAGAS, T.; LAGE-PINTO, F.; CALEGARIO, G.; REZENDE, C. E. Phytosociology and litterfall in the mangrove estuary of the Itabapoana river, Southeast Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 9, n. 2, p. 88–102, 2014a.
- BERNINI, E.; SILVA, M. A. B.; CARMO, T. M. S.; CUZZUOL, G. R. F. Spatial and temporal variation of the nutrients in the sediment and leaves of two Brazilian mangrove species and their role in the retention of environmental heavy metals. *Braz. J. Plant Physiol.*, 22(3): 177–187, 2010.
- BERNINI, E.; REZENDE, C. E. Vegetation structure in a mangrove forest in Southeastern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v.6, n.3, p.193–209, 2011.
- BLUM, J. HERR, D. **Can restoring mangroves help achieve the Sustainable Development Goals?**. IUCN Global Forest and Climate Change Programme, 2017. Disponível em: <<https://www.iucn.org/news/forests/201703/can-restoring-mangroves-help-achieve-sustainable-developmentgoals#:~:text=Can%20restoring%20mangroves%20help%20achieve%20the%20Sustainable%20Development%20Goals%3F,-Thu%2C%2016%20Mar&text=The%20answer%20is%20yes, to%20many%20goals%20in%20between>>. Acesso em: 18 jan 2021.
- BOTKIN, D. B.; JANAK, J.F.; WALLIS, J. R. Some ecological consequences of computer model of forest growth. **Journal of Ecology**, 60, 849–872, 1972.
- BOTKIN, D. B. **Forest dynamics – an ecological model**. New York: Oxford University Press, 1993.
- BRANCALION, P.H.S.; RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. **Restauração florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce . Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais**. Curitiba: Lactec, 2020a.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO I – Contextualização. Diagnóstico de Danos**. Curitiba: Lactec, 2020b.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO IV – Zona Costeira e Marinha**. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020e.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis no 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis no 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 30 jun 2020.
- BRASIL. Lei nº 7.661 de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Seção 1. 18/05/1988. p. 8633
- BRASIL. lei Nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União – Seção 1 – 9/1/2007, Página 1 (Retificação)**.
- CALEGARIO, G.; SALOMÃO, M.; RESENDE, C.; BERNINI, E. Mangrove Forest Structure in the São João River Estuary, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research**. 313. 653-660. 2015.
- CHEN, R; TWILLEY, R. R. A gap dynamic model of mangrove forest development along gradients of soil salinity and nutrient resources. **Journal of Ecology**, v. 86, n. 1, p. 37-51, 1998.
- CLOUGH, B. F. Primary Productivity and Growth of Mangrove Forests. In: A.I. Robertson and D.M. Alongi (Eds.) *Tropical Mangrove Ecosystems*. Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union. Washington, DC. 1992.
- CORBIN, J. D.; HOLL, K. D. Applied nucleation as a forest restoration strategy. **Forest Ecology and Management**, v. 265, p. 37-46, 2012.
- DELABIE, J.H.C.; PAIM, V.R.L.M; NASCIMENTO, I.; CAMPIOLO, S.; MARIANO, C.S.F. As fomigas como indicadoras biológicas do impacto humano em manguezais da costa sudeste da Bahia. **Neotropical Entomology** 35(5):602-615 (2006).
- ENDRINGER, F. B. **Comportamento de forrageamento da formiga Atta robusta BORGMEIER 1939 (Hymenoptera: formicidae)**. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Produção Vegetal. Universidade Estadual do Norte Fluminense. 2011
- FERNANDES, R.T.V. **Recuperação de manguezais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. 92 p.
- FERREIRA, A. C.; LACERDA, L. D. Degradation and conservation of Brazilian mangroves, status and perspectives. **Ocean & Coastal Management**, v.125, p.38-46, 2016.
- FIRME, L.P. Caracterização físico-química de solos de manguezais e avaliação de sua contaminação por esgoto doméstico via traçadores fecais. **Dissertação de Mestrado**. Pós-graduação em Agronomia. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2003.
- FUNDAÇÃO RENOVA. **PG 27 - Programa de recuperação de nascentes da bacia do rio Doce**. 2019.
- GASPARINETTI, P.; JERICÓ-DAMINELLO, C.; SEEHUSEN, S. E.; VILELA, T. **Os valores dos serviços ecossistêmicos dos manguezais brasileiros, instrumentos econômicos para a sua conservação e o estudo de caso do Salgado Paraense**. Conservação Estratégica. Documento de Trabalho. CSF Brasil, 2018.
- GOMES, L. F.; ARAUJO, E. C.; COSTA, J. E. A.; BRAGA, C. F.; FERNANDES, M. E. B.. Replanteio de mudas de espécies arbóreas de mangue em florestas desmatadas na península de Ajuruteua, Bragança-Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.8, n.2, p.6-19, 2017.

- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS. **Em dia com a natureza:** Cartilha para Conversão de Multas Ambientais. Brasília: IBAMA, 2020.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS. **Instrução Normativa 4, de 13 de abril de 2011.** Estabelece procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada – PRAD ou Área Alterada, para fins de cumprimento da legislação ambiental.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 2. ed.
- ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Instrução Normativa 11, de 11 de dezembro de 2014.** Estabelece procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Perturbada – PRAD, para fins de cumprimento da legislação ambiental.
- ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Instrução Normativa 03, de 04 de setembro de 2017.** Institui o Programa Nacional de Monitoramento da Biodiversidade do Instituto Chico Mendes.
- ICRI – INTERNATIONAL CORAL REEF INITIATIVE. **Mangrove restoration:** Technical guide. Guadaloupe: Pôle-relais zones humides tropicales, 2018.
- IFTEKHAR, M. S. Functions and development of reforested mangrove areas: A review. **The International Journal of Biodiversity Science and Management**, v. 4, n. 1, p. 1-14, 2008.
- JANA, S.; DESHMUKH, S. UNDERSTANDING GENETIC DIVERSITY IN MANGROVES. In: DESHMUKH, S.; BALAJI, V. (eds) **Conservation of Mangrove Forest Genetic Resources: A Training Manual.** JTTO-CRSARD Project, M.S. Swaminathan Research Foundation, Madras, India, 1994.
- KATHIRESAN, K.; BINGHAM, B. L. Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. **ADVANCES IN MARINE BIOLOGY** VOL 40: 81-251 (2001)
- LEE, S. Y. Mangrove outwelling: a review. **Hydrobiologia** 295: 203-212, 1995.
- LEWIS, R.R. Ecological engineering for successful management and restoration of mangrove forests. **Ecological Engineering**, v.24, p.403-418, 2005.
- LEWIS, R.R. Methods and criteria for successful mangrove forest restoration. in Perillo, G.M.E, Wolanski, E., Cahoon, DR., Brinson, MM. (eds.) **Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach.** Elsevier, New York. 787 p. 2009.
- LEWIS, R.R.; BROWN, B. **Ecological mangrove rehabilitation** – a field manual for practitioners. Version 3. Mangrove Action Project Indonesia, Blue Forests, Canadian International Development Agency, and OXFAM. 275p. 2014.
- LONDE, V.; SALLES, D. M.; LEITE, M. G. P.; ANTONINI, Y. Estrutura da vegetação de mangue associada ao gradiente de inundação no litoral norte do Espírito Santo, Brasil. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 629-637, 2013.
- MAGALHÃES, H. F.; COSTA NETO, E. M.; SCHIAVETTI, A. Cosmóvisão e etnoconservação nos manguezais do município de Conde, litoral norte do estado da Bahia, Brasil. **Etnobiologia** 12 (1), 2014.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução normativa nº 17, de 26 de abril de 2017.** Regulamenta a produção, a comercialização e a utilização de sementes e mudas de espécies florestais ou de interesse ambiental ou medicinal, nativas e exóticas, visando garantir sua procedência, identidade e qualidade.
- MARTINS, p. T. A.; COUTO, E. C. G.; DELABIE, J. H. C. Fitossociologia e estrutura vegetal do Manguezal do rio Cururupe (Ilhéus, Bahia, Brasil). **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v, 11, n.2, p.163-169, 2011.
- MENEZES, G.V.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; POFFO, I.R.F.; EYSINK, G.G.J. Recuperação de manguezais: um estudo de caso na Baixada Santista de São Paulo, Brasil. **Braz J Aquat Sci Technol**, v.9, n.1, p.67-74. 2005.

- MENEZES, G. V. **Recuperação de manguezais: um estudo de caso na Baixada Santista, Estado de São Paulo, Brasil**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Biológica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- MENGHINI, R.P.; ROVAI, A.S.; ALMEIDA, R.; COELHO-JUNIOR, C.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Restauração ecológica de manguezais. In: ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Atlas dos manguezais do Brasil**. Brasília: ICMBIO, 2018. 176 p.
- MITRA, A. Sensitivity of Mangrove Ecosystem to Changing Climate. Springer India, 2013.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2010a. 176 p.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. 2018. 179 p.
- MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Panorama da Conservação dos Ecossistemas Costeiros e Marinhos no Brasil**. Brasília: MMA/SBF/GBA, 2010. 148 p.
- OLIVEIRA, F. P.; VIEIRA, N. C.; JÚNIOR, S. R. As famílias do mangue e suas práticas holísticas: um estudo no nordeste paraense, Amazônia, Brasil. *Rev. Antropol.* (Online) 9 (1): 316 - 337, 2017.
- PACTO PELA RESTAURAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA (PACTO). **Protocolo de monitoramento para programas e projetos de restauração florestal**. Disponível em <http://www.pactomataatlantica.org.br> 2013. Acesso em: 20 jan 2021.
- PETRI, D. J. C.; BERNINI, E.; SOUZA, L. S.; REZENDE, C. E. Distribuição das espécies e estrutura do manguezal do rio Benevente, Anchieta, ES. **Biota Neotropica**, v. 11, n. 3, p. 107-116, 2011.
- PRANCHAI, A.; JENKE, M.; VOGT, J.; GRUETERS, U.; YUE, L.; MEHLIG, U.; MENEZES, M. M.; WAGNER, S.; BERGER, U. Density-dependent shift from facilitation to competition in a dwarf *Avicennia germinans* forest. **Wetlands Ecology and Management**, v.26, n.2, p.139-150, 2018.
- PROJETO UÇÁ. **Guia de reflorestamento de manguezais degradados**. 2016. Disponível em < http://projetouca.org.br/wp-content/uploads/2015/01/Guia_Reflorestamento_uca.pdf >. Acesso em: 02 fev 2021.
- RESOLUÇÃO CONAMA nº 369, de 28 de março de 2006. Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente-APP. Publicada no **DOU** no 61, de 29 de março de 2006, Seção 1, páginas 150 - 151
- RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, p. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto para a restauração ecológica da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. 2. ed. São Paulo: LERF/ESALQ, 2009.
- ROVAI, A.S. Restauração de manguezais no Brasil: retrospectiva e perspectivas. **Dissertação de mestrado**. Universidade Federal de Santa Catarina. 74p. 2012.
- SANTOS, N. M.; RABELO, T. O.; LOUZEIRO, A. S.; COSTA, D. F. S.; CESTARO, L. A. Identificação dos Serviços Ecossistêmicos prestados pelo manguezal da Ilha do Maranhão – MA, Brasil. *Regne*, v. 4, n. especial, 2018.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. A diversidade do ecossistema de manguezal. In: ICMBIO. **Atlas dos manguezais do Brasil**. Brasília: ICMBIO, 2018. 176 p.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CITRÓN-MOLERO, G.; ADAIME, R. R.; CAMARGO, T. M. Variability of Mangrove Ecosystems along the Brazilian Coast. **Estuaries**, 13(2), 204. 1990.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; COELHO JUNIOR, C.; TOGNELLADE-ROSA, M. **Manguezais**: 1-48. Ática, São Paulo. 2004.
- SER – SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION INTERNATIONAL SCIENCE & POLICY WORKING GROUP. **The SER International Primer on Ecological Restoration**. Tucson: Society for Ecological Restoration International, 2004.

- SHUGART, H.H. **A theory of forest dynamics: the ecological implications of forest succession models.** Springer-Verlag, New York. 1984.
- SILLIMAN, Brian R. et al. Facilitation shifts paradigms and can amplify coastal restoration efforts. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 46, p. 14295-14300, 2015.
- SILVA, M.; BERNINI, E.; CARMO, T. Características estruturais de bosques de mangue do estuário do rio São Mateus, ES, Brasil. **Acta Botanica Brasilica** - Acta Bot. Bras. 19. 2005.
- SLOBODIAN, L. N., RODRIGUEZ CHAVES, M., NGUYEN, L. T. P., RAKOTOSON, L. N. (2018). **Legal frameworks for mangrove governance, conservation and use: Assessment summary.** IUCN, Geneva, Switzerland, and WWF Germany, Berlin, Germany. (74) pp.
- SOUZA, C. A.; DUARTE, L. F. A.; JOÃO, M. C. A.; PINHEIRO, M. A. A. Biodiversidade e conservação dos manguezais: importância bioecológica e econômica, Cap. 1: p. 16-56. In: Pinheiro, M.A.A. & Talamoni, A.C.B. (Org.). Educação Ambiental sobre Manguezais. São Vicente: UNESP, Instituto de Biociências, Câmpus do Litoral Paulista, 165 p. 2018.
- SOARES, M. L. G. Zonação e as Marés. In: SHAEFFER-NOVELLI, Y. **Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar.** São Paulo: Caribbean Ecological Research, 1995. 1.ed.
- STUBBS, B. J.; SAENGER, p. The application of forestry principles to the design, execution and evaluation of mangrove restoration projects. **Bois et forêts des tropiques**, v.273, p.5-21, 2002.
- TNC – THE NATURE CONSERVANCY. **Manual de Restauração Florestal:** Um Instrumento de Apoio à Adequação Ambiental de Propriedades Rurais do Pará. Belém: The Nature Conservancy, 2013. 128 p.
- TOGNELLA, M.M.P.; LEOPOLDO, R.V.S.; OLIVEIRA, C.P.; PASCOALINI, S.S.; DELL'ORTO E SILVA, E. Diversidade estrutural das florestas de mangue da costa Central e Norte do Espírito Santo: contribuições para o entendimento de funções ecossistêmicas. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.17 n.33; p. 178 2020.
- TOLEDO, G.; ROJAS, A.; BASHAN, Y. Monitoring of black mangrove restoration with nursery-reared seedlings on an arid coastal lagoon. **Hydrobiologia**, v.444, p.101–109, 2001.
- TSUJI, T.; FERNANDES, M. E. B. **Replantando os manguezais:** técnicas de reflorestamento. Bragança: Projeto REDEMA, 2008.
- TURRA, A.; DENADAI, M.R.; **Protocolo de monitoramento de habitats bentônicos costeiros.** São Paulo. 2015.
- UNEP (2014). **The Importance of Mangroves to People: A Call to Action.** van Bochove, J., Sullivan, E., Nakamura, T. (Eds). United Nations Environment Programme World Conservation Monitoring Centre, Cambridge. 128 pp.
- Wolanski, E.; Mazda, Y.; Ridd, p. Mangrove Hydrodynamics. In: A.I. Robertson and D.M. Alongi (Eds.) Tropical Mangrove Ecosystems. Coastal and Estuarine Studies. **American Geophysical Union.** Washington, DC. 1992.

Referências Bibliográficas do Recurso Aves Escavadoras

- BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce . Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais.** Curitiba: Lactec, 2020a.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera.** Diagnóstico de Danos Curitiba: Lactec, 2020d.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. Atualização Linha-Base – Ambientes Terrestres e Atmosfera.** Curitiba: Lactec, 2019c.

- Berthier K, Leippert F, Fumagalli L, Arlettaz R (2012) **Massive Nest-Box Supplementation Boosts Fecundity, Survival and Even Immigration without Altering Mating and Reproductive Behaviour in a Rapidly Recovered Bird Population**. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0036028>>. Acesso em: 31 ago 2020.
- DE OLIVEIRA, Viviane C.; JOLY, Carlos Alfredo. Flooding tolerance of *Calophyllum brasiliense* Camb. (Clusiaceae): morphological, physiological and growth responses. **Trees**, v. 24, n. 1, p. 185-193, 2010.
- DÍAZ, Iván A. et al. Linking forest structure and composition: avian diversity in successional forests of Chiloé Island, Chile. **Biological conservation**, v. 123, n. 1, p. 91-101, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320704004318?casa_token=ISURE8PX1IAAAAAA:-S2foa863vrmKe958FpfLIJLHyLhHdovwXGrbNCCzhMFNWLSPOIAy3S9yyV_RL8cFGEKqH_RjqG4>. Acesso em agosto de 2020.
- 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/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 11 de janeiro de 2016.
- LIBOIS, E.; GIMENEZ O.; ORO, D.; MÍNGUEZ, E.; PRADEL, R.; SANZ-AGUILAR, A. Nest boxes: A successful management tool for the conservation of an endangered seabird. **Biological Conservation**. n. 155 (2012) 39–43. Outubro, 2012. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/256669006>>. Acesso em: 31 ago 2020.
- MAGURRAN, A. E. Measuring biological diversity. 2004. Malden, Ma: Blackwell Pub. viii, 2004.
- MARQUES, M.; JOLY, C. A. Germinação e crescimento de *Calophyllum brasiliense* (Clusiaceae), uma espécie típica de florestas inundadas. **Acta Botanica Brasilica**, v. 14, n. 1, p. 113-120, 2000.
- NADKARNI, Nalini M.; MATELSON, Teri J. Bird use of epiphyte resources in neotropical trees. **The Condor**, v. 91, n. 4, p. 891-907, 1989. Disponível em: <<https://academic.oup.com/condor/article-abstract/91/4/891/5189136>>. Acesso em agosto de 2020.
- NADKARNI, Nalini M.; LONGINO, John T. Invertebrates in canopy and ground organic matter in a neotropical montane forest, Costa Rica. **Biotropica**, p. 286-289, 1990. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2388539?casa_token=-kq3z7sCuogAAAAA%3AiwVp4yaV-OB8Dv40zy1MaMOBHA41UeJlwCaNCUwbGKX4UEhe31sqGvtLTFXJcGg2kxF-QgotC6hgbBlz0j_xQvW8c3nNxR6bW-i9R7x-9TrDtSrKxyEg&seq=1#metadata_info_tab_contents>. Acesso em agosto de 2020.
- PARKER, T. A. et al. Ecological and distributional databases for neotropical birds. Wiley, 1996. In: STOTZ, Douglas F. et al. Neotropical birds: ecology and conservation. University of Chicago Press, 1996.
- PETERSON, A. T. et al. **Ecological niches and geographic distributions**. USA: Princeton University Press, 2011.
- ROSA, Sejana Artiaga et al. Growth models based on tree-ring data for the Neotropical tree species *Calophyllum brasiliense* across different Brazilian wetlands: implications for conservation and management. **Trees**, v. 31, n. 2, p. 729-742, 2017.
- SEKERCIOGLU, Ç.H., Mendenhall, C.D, Brenes, F.O. Horns, J.J., Ehrlich, P.R., Daily, G.C. 2019. **Long-term declines in bird populations in tropical agricultural countryside**. PNAS 116(20), 9903-9912, 2019.
- SICK, H. Ornitologia Brasileira. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira. 1997.
- SILLETT, T. Scott. Foraging ecology of epiphyte-searching insectivorous birds in Costa Rica. **The Condor**, v. 96, n. 4, p. 863-877, 1994. Disponível em: <<https://academic.oup.com/condor/article-abstract/96/4/863/5126093>>. Acesso em agosto de 2020.
- WITTMANN, Florian et al. **Manual of trees from Central Amazonian várzea floodplains: Taxonomy, ecology and use**. Editora INPA, 2010.
- VAN DER HOEK, Yntze; GAONA, Gabriel V.; MARTIN, Kathy. The diversity, distribution and conservation status of the tree-cavity-nesting birds of the world. **Diversity and Distributions**, v. 23, n. 10, p. 1120-1131, 2017.

ZAIDEN, T., MARQUES, F.C., MEDEIROS, H.R., ANJOS, L. Decadal persistence of frugivorous birds in tropical forest fragments of northern Paraná. **Biota Neotropica**. 15(2): e20140084, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1676-06032015008414>. Acesso em: 20 ago 2020.

Referências Bibliográficas do Recurso Bens Arqueológicos

AGROFLOR Engenharia e Assessoria em Gestão Empresarial Ltda. **Estudo de Impacto Ambiental – EIA:** Sistema de Disposição de Rejeitos Mirandinha. Mariana. Volume I. s.l., 2014.

ALCAN ALUMÍNIOS DO BRASIL LTDA. **Usina Hidrelétrica Fumaça**. s.l., 2004.

ANDREFSKY Jr., W. Raw-Material Availability and the Organization of Technology. In: **American Antiquity**, Vol. 59, No. 1. pp. 21-34. 1994.

ANDREFSKY, W. **Lithics. Macroscopic approaches to analysis**. Cambridge Manuals in Archaeology. 1998.

ANTUNES, V. C. **Levantamento de Hipóteses para a identificação e funcionalidade dos dois naufrágios do sítio Caldeira, Anchieta – Espírito Santo, Brasil**. Dissertação de Mestrado (Técnicas de Arqueologia). Instituto Politécnico de Tomar, Minas Gerais, 2018.

ARAUJO, A. G. M. **Teoria e método em arqueologia regional: um estudo de caso no Alto Paranapanema, estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Arqueologia) Museu de Arqueologia e Etnografia, Universidade de São Paulo. 2001.

ARCAIOS CONSULTORIA. **AHE Baguari Programa de Resgate Arqueológico: Relatório final**. Belo Horizonte, abr. 2014.

ARCAIOS CONSULTORIA. **Pequena Central Hidrelétrica Pipoca: Programa de prospecção arqueológica. Relatório final**. Belo Horizonte, ag. 2006a.

ARCAIOS CONSULTORIA. **Termo de Ajustamento de Conduta da UHE Candonga: Programa de prospecção arqueológica suplementar. Relatório Final**. Belo Horizonte, mai. de 2006b.

ARTEFACTO CONSULTORIA. **Diagnóstico Arqueológico nas Áreas de Abrangência da Mina Del Rey**. Ibirité, dez. 2011.

ARTEFACTO CONSULTORIA. **Laudo Arqueológico Não Interventivo, Pesquisa Geológica Mirandinha, Município de Ouro Preto**. Belo Horizonte, fev. 2014.

BAETA, A. M. *Ilha Lorena: um sítio arqueológico de repressão e controle de territórios*. In: **Combate Racismo Ambiental**, 2016. Disponível em <<https://racismoambiental.net.br/2016/03/08/rio-doce-protecao-urgente-de-memorias-e-paisagens/>>. Acesso em: 02 de out. de 2020.

BAETA, A. M.; MATTOS, I. M. de. A Serra da Onça e os índios do rio Doce: uma perspectiva etnoarqueológica e patrimonial. In: **Habitus**, v. 5, n.1, p. 39-62, jan./ jun. 2007.

BARBOSA, M. S. **Desvendando o naufrágio do vapor Bahia (1887): o olhar da arqueologia subaquática**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) - Universidade Federal de Pernambuco. CFCH. Recife, 2014.

BASTOS, A. C.; GARCIA, A. N. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 1**. 2005a.

_____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 2**. 2005b.

_____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 3**. 2006a.

_____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 4**. 2006b.

_____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 5**. 2006c.

_____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 6**. 2007a.

- _____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 7**. 2007b.
- _____. Monitoramento ambiental - Projeto Recifes Artificiais Marinhos (RAM): Victory 8B. **Relatório de Monitoramento 8**. 2007c.
- BASTOS, Rossano Lopes. **Arqueologia Pública e Gestão do Patrimônio Cultural Arqueológico Brasileiro**. XVI Congresso Mundial da UISPP/Unesco, Florianópolis, 2011.
- BASTOS, Rossano Lopes; SOUZA, Marise Campos de; GALLO, Haroldo (Org.). **Normas e Gerenciamento do Patrimônio Arqueológico**. São Paulo: 9ª SR/IPHAN, 2005.
- BEZERRA DE ALMEIDA, M. **O Australopithecus corcunda**: as crianças e a Arqueologia em um projeto de Arqueologia Pública na escola. Tese (Doutorado em Arqueologia). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- BICHO, N. **Manual de Arqueologia Pré-Histórica**. Lisboa: Edições 70, 2006.
- BINFORD, Lewis R. A consideration of archaeological research design. American. In: **Antiquity**, 29:425-441, 1964.
- BOWENS, Amanda (edit.). **Underwater Archaeology: The NAS Guide to Principles and Practice**. Nautical Archaeology Society Second Edition. NAS, 2009.
- BRANCANTE, E.F. **O Brasil e a Cerâmica Antiga**. Cia. Litográfica Ipiranga, São Paulo. 1981
- BRANDT MEIO AMBIENTE. **Relatório Diagnóstico Arqueológico Complementar prospecção Arqueológica nas Áreas de Abrangência do Empreendimento Alegria E. s.l., jul. 2009.**
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- BRASIL. Lei nº 3.924, de 26 de julho de 1961. Dispõe sobre os monumentos arqueológicos e pré-históricos. Diário Oficial da União. 27 de julho de 1961. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l3924.htm#:~:text=Art%201%C2%BA%20Os%20monumentos%20arqueol%C3%B3gicos,175%20da%20Constitui%C3%A7%C3%A3o%20Federal.>. Acesso em: 20 dez. 2020.
- BRASIL. Lei nº 10.166, de 27 de dezembro de 2000. Altera a Lei nº 7542, de 26 de setembro de 1986, que dispõe sobre a pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas ou bens afundados, submersos, encalhados e perdidos em águas sob jurisdição nacional, em terreno de marinha e seus acrescidos e em terrenos marginais, em decorrência de sinistro, alijamento ou fortuna do mar, e dá outras providências. Diário Oficial da União - Seção 1 - Eletrônico – 28 de dezembro 2000. Disponível em: < <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2000/lei-10166-27-dezembro-2000-356794-publicacaooriginal-1-pl.html>> Acesso em: 10 nov. 2020.
- BRASIL. Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937. Organiza a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional. Rio de Janeiro, 30 de novembro de 1937, 116º da Independência e 49º da República. Disponível em: < [http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Decreto no_25_de_30_de_novembro_de_1937.pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Decreto%20no%2025%20de%20novembro%20de%201937.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2020.
- BRASIL MERGULHO. Disponível em <<https://www.brasilmergulho.com/naufraios-no-espirito-santo/>>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- BRASIL. Ministério da Cultura. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Portaria nº 375 de 19 de setembro de 2018. Institui a Política de Patrimônio Cultural Material do Iphan e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília - DF, de 20 de setembro de 2018. p. 7-11.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Gabinete da Ministra. Portaria Interministerial nº 60, de 24 de março de 2015. Estabelece procedimentos administrativos que disciplinam a atuação dos órgãos e entidades da administração pública federal em processos de licenciamento ambiental de competência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - Ibama. **Diário Oficial da União**. Brasília – DF. 25 de março de 2015. p. 71.

BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). 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, 2018.

_____. 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, 2017.

_____. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO V – Patrimônio Cultural. Bens Arqueológicos**. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020f.

BROCHIER, L.L. **Diagnóstico e manejo de recursos arqueológicos em Unidades de Conservação**: uma proposta para o litoral paranaense. 2004. 165f. Dissertação Mestrado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRUNO, M. C. O. **Museologia e Comunicação**. Lisboa: Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 1996.

CALDARELLI, S. B. **Avaliação dos Impactos de Grandes Empreendimentos sobre a Base de Recursos Arqueológicos da Nação**: Conceitos e Aplicações. In: Atas do Simpósio sobre Política Nacional do Meio Ambiente e Patrimônio Cultural: Repercussões dos Dez Anos da Resolução CONAMA nº 001/86 sobre a Pesquisa e a Gestão dos Recursos Culturais no Brasil. Goiânia, Fórum Interdisciplinar para o Avanço da Arqueologia/IGPA-UCG, 1997: 57-65.

CARMO, F. F. do; KAMINO, L. H. Y. **Chapada de Canga**: Patrimônio natural e cultural de relevante interesse para a conservação. Belo Horizonte: 3i Editora, 2017.

CARNEIRO, Carla Gibertoni. **Ações educacionais no contexto da arqueologia preventiva**: uma proposta para a Amazônia. Tese (Doutorado em Arqueologia). Museu de Arqueologia e Etnologia da USP, São Paulo, 2009.

CHMYZ, I. **Terminologia arqueológica brasileira para a cerâmica**. Curitiba: CEPA/ UFPR, 1966

CONAMA – Conselho Nacional Do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, de 17 de fevereiro de 1986.

COSTA, L. M. **Problemáticas e interpretações de um sítio arqueológico denominado - Caldeira**. Tese (Doutorado). Curso de Pós-graduação em arqueologia subaquática. Instituto Politécnico de Tomar, 2016.

CRONYN, Janey M. **The Elements of Archaeological Conservation**. Contributions on marine material by W. S. Robinson. First published 1990. By Routledge. London and New York.

DELPHI PROJETOS E GESTÃO. **PCH Furquim**: Pedido de autorização para prospecção arqueológica ao IPHAN. Belo Horizonte, jul. 2006.

DIXON, Keith A. Applications of Archaeological Resources: Broadening the Basis of Significance. In: M. B. Schiffer & G. J. Gumerman (Ed.), **Conservation Archaeology**. New York, Academic Press, p. 277-292, 1977.

FERNANDES, Tatiana Costa. **Vamos criar um sentimento?! Um olhar sobre a Arqueologia Pública no Brasil**. Tese (Doutorado em Arqueologia). Museu de Arqueologia e Etnologia da USP, São Paulo, 2007.

FIGUEIREDO, A. A. DE; COSTA, L. A. M. O Sítio Arqueológico Subaquático Da “Caldeira”, Anchieta, Espírito Santo: Análise Preliminar De Dois Naufrágios. In: **Cadernos do LEPAARQ**. Vol. XIV | nº27 | 2017 | ISSN 2316 8412.

FLANNERY, Kent V. Research strategy and formative Mesoamerica. In: FLANNERY, Kent V. (Ed.). **The Early Mesoamerican Village**, New York: Academic Press, 1976, p. 1-11.

FOWLER, D. D. Cultural Resources Management. **Advances in Archaeological Method and Theory**, v. 5, p. 1-50, 1982.

- FRAGA, Tiago Miguel; SCHWARZ, George; TCHERNYCHEV, Mikhail. **Projecto Patacho Pedro Dias** - Relatório de Missão & Despesas. Faro, 01-08-2013.
- FUNARI, Pedro Paulo Abreu & CARVALHO, Aline Vieira. **As possibilidades da arqueologia pública**. 2009. Disponível em: <<http://www.historiaehistoria.com.br/materia.cfm?tb=arqueologia&id=31>>. Acesso em: 6 de out. de 2020.
- GLASSOW, Michael A. Issues in Evaluating the Significance of Archaeological Resources. In: **American Antiquity**, 42 (3): 413-420, 1977.
- GREEN, Jeremy. **Maritime Archaeology**. A Technical Handbook. Second edition. Department of Maritime Archaeology Western Australian Maritime Museum Fremantle, Western Australia. Elsevier Academic Press. 2004.
- GUIMARÃES, Ricardo Santos. Patrimônio Cultural Subaquático: a importância das práticas de preservação em campo. In: CAMPOS, G. N. e GRANATO, M. (Org.) **Anais do IV Seminário de Preservação de Patrimônio Arqueológico**, Rio de Janeiro: Museu de Astronomia e Ciências Afins, 2016, pp. 344-357.
- HAMILTON, Donny L. **Basic Methods of Conserving Underwater Archaeological Material Culture**. US Department of Defense Legacy Resource Management Program, Washington, DC. 1996.
- HAMILTON, Donny L. **Conservation of Metal Objects from Underwater Sites: A Study in Methods**. Texas Antiquities Committee Publication No. 1, Austin, Texas. 1965.
- HAMILTON, Donny L. **Methods of Conserving Archaeological Material from Underwater Sites**. Revision Number 1. January 1, 1999. Anthropology 605. Conservation of Archaeological Resources I. Nautical Archaeology Program. Department of Anthropology. Texas A&M University College Station, Texas.
- HAMILTON, Donny L.; SMITH, C. Wayne. The Archaeological Role of Conservation in Maritime Archaeology. Pp. 287-304. In: FORD, Ben, HAMILTON, Donny L.; CATSAMBIS, Alexis. (edts). In: **The Oxford Handbook of Maritime Archaeology**. Print Publication Date: Dec 2013.
- ICOMOS – Conselho de Internacional de Monumentos e Sítios. **Carta de Lausanne**: Carta para a proteção e a gestão do patrimônio arqueológico. 1990. Disponível em: <<http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Carta%20de%20Lausanne%201990.pdf/>>. Acesso em: 18 dez. 2020.
- INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – IF, Parque Estadual da Serra do Mar – **Plano de Manejo**. Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/fundacaoflorestal/planos-de-manejo/planos-de-manejo-planos-concluidos/plano-de-manejo-pe-serra-do-mar/>>. Acesso em: 02 dez 2020
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – Espírito Santo (IPHAN-ES). **Relatório Técnico** – Programa de Prospecção arqueológica na Central de Tratamento de Resíduos de São Mateus. 2012.
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – Espírito Santo (IPHAN-ES). **Relatório Técnico** - Programa de Arqueologia Preventiva de diagnóstico prospectivo na área de construção da Rodovia ES-124 - Via Norte. 2011.
- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. **Educação Patrimonial**: Histórico, conceitos e processos. Brasília: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2014.
- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. **Instrução Normativa nº 01**, de 25 de março de 2015. Estabelece procedimentos administrativos a serem observados pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional nos processos de licenciamento ambiental dos quais participe. Brasília - DF, 2015.
- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. **Modelo de Placas**. 2019. Disponível em <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/modelos_de_placas_2019.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.
- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Portaria 137, de 28 de abril de 2016, que estabelece diretrizes de Educação Patrimonial no âmbito do Iphan e das Casas de Patrimônio. 2016a. Disponível em <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Portaria_n_137_de_28_de_abril_de_2016.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

- IPHAN – Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Portaria 196, de 18 de maio de 2016, que dispõe sobre a conservação de bens arqueológicos móveis, cria o Cadastro Nacional de Instituições de Guarda e Pesquisa, o Termo de Recebimento de Coleções Arqueológicas e a Ficha de Cadastro de Bem Arqueológico Móvel. 2016b. Disponível em <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Portaria_iphan_196_de_18_de_maio_2016.pdf>. Acesso em: 30 de out. de 2020.
- JULIANI, L.J.C.O. **Gestão Arqueológica em Metrôpoles: uma Proposta para São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.
- KING, Thomas F. **Cultural Resource Laws & Practice: An Introductory Guide**. London: Altamira Press, 1998.
- LIPE, W. A. & LINDSAY, Jr. (ed). Proceedings of the 1974 Cultural Resource Management Conference, Federal Center, Denver, Colorado. **Museum of Northern Arizona**, Technical Series, nº 14, 1974.
- LIPE, W. A. A conservation model for American archaeology. **The Kiva**. Nº 39, p. 213 – 245, 1974.
- LUME Estratégia Ambiental. **Diagnóstico dos sítios Arqueológicos, Históricos e Paisagísticos. Fazenda Gualaxo, Fazenda Natividade, Fazenda do Padre Fraga, Fazenda Ouro Fino Caminho de São José e Encontro dos rios do Carmo e Piranga**. Belo Horizonte, 2016.
- LUME Estratégia Ambiental e Fundação Renova. **Programa de Ações de Salvaguarda do Patrimônio Arqueológico Impactado Diretamente pelo Rompimento da Barragem de Fundão**. Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce - MG. Relatório final. Diagnóstico. Parte 2. Belo Horizonte, jan. 2020.
- MARINHA DO BRASIL. **NORMAM-10** (Normas da autoridade marítima para pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas e bens afundados, submersos, encalhados e perdidos). s/l, 2003.
- MARINHA DO BRASIL. **NORMAM-15** (Normas da Autoridade Marítima para atividades subaquáticas). s/l, 2016.
- MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico, **Laudo Técnico Emergencial – Fazenda Velha**. S.d.
- MORATTO, Michael J. & KELLY, Roger E. - Optimizing strategies for evaluating archaeological significance. **Advances in Archaeological Method and Theory**, 1: 1- 30, 1978.
- NANCE, Jack D.; BALL, Bruce F. No surprises? The reliability and validity of test pit sampling. In: **American Antiquity**, vol. 51, n. 3, p. 457-483, jul. 1986.
- OLIVEIRA, A. T. D. de. **Um Estudo em Arqueologia Urbana: A Carta de Potencial Arqueológico do Centro Histórico de Porto Alegre**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.
- ORTON, C.; HUGHES, M. **Pottery in Archaeology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- ORTON, Clive. **Mathematics in Archaeology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- ORTON, Clive. **Sampling in Archaeology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- PARALELO 20. **Projeto Salvamento Arqueológico da Área Impactada pela Construção da Linha de Transmissão Ouro Preto II - Vitória Relatório Final Volume 2**. Belo Horizonte, 2000.
- PARALELO 20. **Relatório Final de Diagnóstico e Prospecção do DNPM 830.578/2006 Fazenda Romão - Distrito Antônio Pereira - Ouro preto/MG**. Belo Horizonte, dez. 2014.
- PEARCE, S. M. **Archaeological curatorship**. London; New York: Leicester University Press. Ano de 1996.
- PEARSON, C., ed. 1987. **Conservation of Marine Archaeological Objects**. Butterworths, London.
- PEROTA, C. **LDV 138kv Linhares - Cacimbas - Relatório Final do Programa de Prospecção Arqueológica e Educação Patrimonial**. Vitória: ESCELSA / CTA, 2011a.
- PEROTA, C. **Levantamento Geofísico Terrestre – Sísmica 3D Campo de Jacupemba**. Relatório Final do Programa de Prospecção, Monitoramento arqueológico e EP Relatório Técnico RT-CAEP-192-004. Linhares. s.l., Petrobras/ Control Ambiental, ab. 2015.

- PEROTA, C. **Linhares Agroindustrial S/A LASA**. Relatório do Programa de Arqueologia Preventiva Diagnóstico Prospectivo do Empreendimento. LASA /Bioma, s.l., 2011b.
- PEROTA, C. **Relatório Consolidado dos Programas de Prospecção Arqueológica do COMPLEXO GÁS-QUÍMICO UFN-IV**. Linhares, CTA / Petrobras, jun. 2013.
- PILÓ, H. M. D. **Arqueologia Tupiguarani**: relações entre as implantações dos sítios e cultura material no Médio Rio Doce. Dissertação (Mestrado em Arqueologia), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- PLOG, Stephen. Relative efficiencies of sampling techniques for archaeological surveys. In: FLANNERY, Kent V. (Ed.). **The Early Mesoamerican Village**. New York: Academic Press, 1976, p. 136-158.
- PLOG, Stephen; PLOG, Fred; WAIT, Walter. Decision making in modern surveys. In: **Advances in Archaeological Method and Theory**, vol. 1, p. 383-421, 1978.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE MARIANA. **Dossiê de Tombamento do Conjunto Paisagístico e Arqueológico dos Morros Santana e Santo Antônio, em Mariana/ MG**. Mariana: Secretaria de Cultura e Turismo, ab. 2008.
- RAMBELLI, G. **A arqueologia subaquática e sua aplicação à arqueologia brasileira**: o exemplo do Baixo Vale do Ribeira de Iguape. São Paulo, 1998. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, 1998.
- RAMBELLI, G. **Arqueologia até debaixo d'água**. São Paulo: Maranta, 2002.
- READMAN, Charles L. Multistage Fieldwork and Analytical Techniques. In: **American Antiquity**, vol. 38, n. 1, p. 61-79, jan. 1973.
- READMAN, Charles L. Surface collection, sampling, and research design: a retrospective. In: **American Antiquity**, vol. 52, n. 2, p. 249-265, apr. 1987.
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001, de 23 de janeiro de 1986. Considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente. Publicada no **DOU**, de 17 de fevereiro de 1986, Seção 1, páginas 2548-2549.
- RICE, p. 1987. **Pottery Analysis: A Sourcebook**. Chicago: The University of Chicago Press.
- RYE, O. S. 1981. **Pottery Technology: Principles and Reconstruction**. Washington D. C., Taxaracum.
- SCHIFFER, M. & GUMMERMAN, D. (ed.). **Conservation Archaeology**. New York: Academic Press, 1977.
- SCHIFFER, M. B. & J. H. HOUSE An Approach to Assessing Scientific Significance. In: M. B. Schiffer & G. J. Gumerman (Ed.), **Conservation Archaeology**. New York, Academic Press, p. 249-258. 1977.
- SCIENTIA. **Arqueologia Preventiva Associada ao Mineroduto Minas-Rio**. Terceira etapa: Prospecção arqueológica no traçado alternativo dos trechos 1 e 2. Belo Horizonte, out. 2010.
- SEABURY, p. M. (1981). **Archaeological Monitoring: its use and effectiveness**. Tampa, University of South Florida Press.
- SETE SOLUÇÕES E TECNOLOGIA AMBIENTAL. **Diagnóstico de Bens Culturais na Área da Otimização da Barragem de Disposição de Rejeito de Fundão**: Relatório final, diagnóstico e prospecção do patrimônio arqueológico. Belo Horizonte, nov. 2012.
- SHA - Society for Sistorical Archaeology. The Society for Historical Archaeology: Standards and Guidelines for the Curation of Archaeological Collections. In: **The Society for Historical Archaeology Newsletter** (vol. 26, no. 4): dezembro de 1993. Disponível em: <<https://sha.org/resources/curation-standards-guidelines/>>. Acesso em: 07 de dez. de 2020.
- SHEPARD, A.O. **Ceramics for the Archaeologist**. Washington Carnegie Institute of Washington. 1956.
- SOUZA, Luiz Antonio Pereira de. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. 2006. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- SOUZA, L. A. p. de; TESSLER, M. G.; YASSUDA, E. **Importância dos métodos geofísicos no estudo de áreas de descarte**. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, 45, 2010
- TARTARON, Thomas F. The Archaeological survey: Sampling strategies and field methods. In: Hesperia Supplements, vol. 32, p. 23-45, 2003.
- TEIXEIRA, J. L. da C. **Levantamento Arqueológico do Programa Sísmico 3D “BT-ES-14” “Lagoa Parda” - Linhares (ES)**. Relatório Final. s.l., ab. 2005.
- TEIXEIRA, J. L. da C. **Levantamento Arqueológico na Área de Influência Direta do Programa Sísmico 3D BT-ES-22**. Relatório. s.l., 2004.
- TORRES, Mariana Sarah Suica; SCHULER, Carlos Alberto Borba. Equalização automática da cor como recurso à fotogrametria subaquática. In: **II CONEAGRI**, 2019, Rio Largo. Equalização automática da cor como recurso à fotogrametria subaquática, 2019.
- TORRES, Mariana Sarah Suica; SCHULER, Carlos Alberto Borba. Fotogrametria subaquática e aplicabilidade no manuseio patrimonial submerso de Pernambuco. In: **VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife - PE, 8-9 de novembro de 2018.
- TORRES, Rodrigo. Projeto Observabaía – Linha de Pesquisa sobre Patrimônio Cultural Subaquático da Baía de Todos os Santos. **Relatório Parcial (Junho 2015 a abril 2016)**. Observabaía – Observatório de riscos e vulnerabilidades da Baía de Todos os Santos. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2016.
- TORRES, Rodrigo; YAMAFUNE; Kotaro; CASTRO, Filipe; FERREIRA, Samila. Mapeando em profundidade: a integração de técnicas digitais para a pesquisa arqueológica de sítios de naufrágios históricos. In: **Vestígios – Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica**. Volume 11 | Número 1 | janeiro – junho 2017.
- UNESCO. **Kit educativo Patrimônio Cultural Subaquático** – Manual de materiais didáticos para professores. Portugal, 2012. Coordenação: Fátima Claudino. Disponível em: <http://www.unesco.org/culture/underwater/pdf/Kit_Educativo_PCS_protegido.pdf> Acesso em: 30 set. de 2020.
- UNESCO. **Manual for Activities directed at Underwater Cultural Heritage** - Guidelines to the Annex of the Convention. Edited by Thijs J. Maarleveld, Ulrike Guérin and Barbara Egger, 2013.
- UNESCO. **Underwater Cultural Heritage**. Proteção de sítios, 2017. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/pt/culture/themes/underwater-cultural-heritage/about-the-heritage/protection/site-protection>>. Acesso em: 30 out. de 2020.
- UNESCO / ICCROM / ICOMOS / IUCN. **Gestão de riscos de desastres para o Patrimônio Mundial**: Manual de Referência do Patrimônio Mundial. Brasília: UNESCO, Iphan, 2015, 80p.
- VOSS, B. L. **The Archaeology of Ethnogenesis**: race and sexuality in colonial San Francisco. University Press of Florida, 2008.
- WIBERG, R. S. **Archaeological monitoring plan**: Magnolia Place Project. San Mateo, California. s.c.e.: Archaeological Consultants Holman & Associates, 2009.
- WILDESEN, L. E. Cultural Resource Management: a personal view. In: **Practicing Anthropology 2**, vol. 2, nº 10, p. 22-23, 1980.
- XAVIER, L. A. **Relatório Final de Prospeção Arqueológica LT 230 kv Mascarenhas – Linhares / ES**. Relatório Técnico CP+ RT 191/13. Eletrobras Furnas / CP+, Vitória, jul. 2013.
- ZANETTINI ARQUEOLOGIA. **Programa de Diagnóstico e Ações Emergenciais em Sítios Rupestres, municípios de Olho D'Água do Casado e Delmiro Gouveia, Alagoas**. Relatório, 2007.
- ZANETTINI, p. E. **Maloqueiros e seus palácios de barro**: o cotidiano doméstico na casa bandeirista. 2005. Tese (Doutorado em Arqueologia). Universidade de São Paulo.

Referências Bibliográficas do Recurso Bens Materiais

ALMEIDA, F. **Manual de Conservação de Cantarias**. Brasília, DF: IPHAN, 2005.

- ANDERSON, B. **Comunidades imaginadas**, São Paulo: Companhia das Letras, 2011.
- BENHAMOU, F. **Economia do patrimônio cultural**, São Paulo: SESC, 2016.
- BO, J. B. L. **Proteção do patrimônio na UNESCO, ações e significados**, Brasília: UNESCO, 2003.
- BOITO, C. **Os restauradores**; trad. Beatriz Mugayar Kühl. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- BONELLI, R.; DELPINO, R. **Manual Prático - Saneamento Básico Residencial**. Brasília, DF: IPHAN, 2006.
- BONELLI, R.; DELPINO, R.; MIGOTO, M. **Manual Prático - Uso da Cal**. Brasília, DF: IPHAN, 2006.
- BORGER, F. G.; BELLUZZO, W. "Valor econômico do patrimônio histórico cultural: estudo de caso de avaliação do programa Monumenta". **Patrimônio: Lazer & Turismo**, v. 6, n. 7, jul.-ago.-set./2009, p. 92-118.
- BOSI, E. **Memória e Sociedade: Lembrança de Velhos**. 2. ed., São Paulo: T.A. Queiroz, 1994.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 20 dez 2020.
- BRASIL. Decreto nº 3.551, de 04 de agosto de 2020. Institui o Registro de Bens Culturais de Natureza Imaterial que constituem patrimônio cultural brasileiro, cria o Programa Nacional do Patrimônio Imaterial e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 07 de agosto de 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3551.htm#:~:text=D3551&text=DECRETO%20N%C2%BA%203.551%2C%20DE%204,que%20lhe%20confere%20o%20art.> Acesso em: 02 dez 2020.
- BRASIL. Decreto nº 7.378, de 09 de dezembro de 2010. Institui o Inventário Nacional da Diversidade Linguística e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 10 de dezembro de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7387.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%207.387%2C%20DE%209,que%20lhe%20confere%20o%20art.> Acesso em: 02 dez 2020.
- BRASIL. **Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937**. Organiza a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional. Rio de Janeiro, 30 de novembro de 1937, 116ª da Independência e 49ª da República. Disponível em: < [http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Decreto no_25_de_30_de_novembro_de_1937.pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Decreto%20no%2025%20de%2030%20de%20novembro%20de%201937.pdf)>. Acesso em: 19 nov 2020.
- Brasil. Ministério da Cultura. Instituto do Programa Monumenta **Manual de elaboração de projetos de preservação do patrimônio cultural** / Elaboração José Hailon Gomide, Patrícia Reis da Silva, Sylvia Maria Nelo Braga. _ Brasília : Ministério da Cultura, Instituto do Programa Monumenta, 2005.
- 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, 2018.
- BRASIL. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL (MPF). 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.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). 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, 2018c.
- _____. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO V Patrimônio Cultural. Bens Arqueológicos**. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020f.
- BRUNO, C. Museologia: algumas ideias para a sua organização disciplinar. IN: _____. Museologia e comunicação. **Cadernos de Sociomuseologia**, n. 9, Lisboa: ULHT, 1996. p. 09-38.
- CHOAY, F. **A alegoria do patrimônio**, São Paulo: Ed. Unesp/Estação Liberdade, 2006.
- CHOAY, F. **A alegoria do patrimônio**, São Paulo: Ed. Unesp/Estação Liberdade, 2006.
- CHOAY, F. **O patrimônio em questão**. Uma antologia para o combate, Belo Horizonte: Fino Traço, 2011.

CHUVA, M.; NOGUEIRA, A. G. R. **Patrimônio cultural: políticas e perspectivas da preservação no Brasil**, São Paulo: Mauad/Fapesp, 2012.

CONVENÇÃO DO PATRIMONIO MUNDIAL DE 1972, disponível em: www.whc.unesco.org/fr/conventiontexte. Unesco, 1972.

Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel, disponível em: <http://www.unesco.org/culture/ich/index.php?pg=00006>. Unesco, 2003.

CORREIA, T. B. "Art déco e indústria: Brasil, décadas de 1930 e 1940". **An. mus. paul.**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 47-104, Dec. 2008. disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-47142008000200003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 nov 2020.

DELPHIM, C. F. **Manual de Intervenções em Jardins Históricos**. Brasília, DF: IPHAN, 2005.

DEPAM/IPhan. **Manual para a elaboração de projetos de Intervenções em Bens Culturais Móveis e integrados à Arquitetura**. Brasília, DF: IPHAN, 2019.

EVANGELISTA, E. G. S. **A UNESCO e o mundo da cultura**, Brasília: UNESCO/UFG, 2003.

FILHO, J. L. p. **Manual de Conservação de Telhados**. Brasília, DF: IPHAN, 2005.

FONSECA, M. C. L. **O patrimônio em processo. Trajetória da política federal de preservação no Brasil**, Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

FURTADO, J. F. Transitar na Estrada Real - o cotidiano dos caminhos. In: COSTA, A. G. **Os Caminhos do Ouro e a Estrada Real**. Belo Horizonte: Editora UFMG/Kapa Editorial, pp. 192-205, 2005b.

GRUNBERG, E. **Manual de Atividades Práticas de Educação Patrimonial**. Brasília, DF: IPHAN, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Nota técnica nº4/2020/CT-FLOR/GABIN**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-FLOR/cif-nt-ct-flor-04-2020.pdf>> Acesso em 12 Ago. 2020.

ICOMOS /IEDS /PPACPS-UFMG - 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, UFMG, maio de 2019.

INSTITUTO ESTRADA REAL. **A Estrada Real**. 2015. Disponível em: <<http://www.institutoestrada-real.com.br/estrada-real>>. Acessado em 14 mar 2019.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). Portaria Nº 375, de 19 de setembro de 2018.

INSTITUTO ESTADUAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS (IEPHA). **Guia de Bens Tombados**. Vol. 2. Belo Horizonte: IEPHA/MG, 2014.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL (IPHAN). Portaria Nº 375, de 19 de setembro de 2018.

LUME Estratégia Ambiental e Fundação Renova. **Programa de Ações de Salvaguarda do Patrimônio Arqueológico Impactado Diretamente pelo Rompimento da Barragem de Fundão. Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce - MG**. Relatório final. Diagnóstico. Parte 2. Belo Horizonte, jan. 2020.

NAJJAR, R. DUARTE, M. C. C. **Manual de Arqueologia Histórica em Projeto de Restauração**. Brasília: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, 2002.

POULOT, D. **Uma história do patrimônio no Ocidente**, São Paulo: Estação Liberdade, 2009.

RUSKIN, J. **The seven lamps of architecture**. Londres: Smith, Elder & Co. 1849.

RUSKIN, J. **The Stones of Venice**. 3 vols. Londres: Smith, Elder & Co., 1851-1853.

VARINE, H. **As raízes do futuro: o patrimônio a serviço do desenvolvimento local**, Porto Alegre: Medianiz, 2012.

VITAE/IPHAN. Inventário Nacional de Bens Móveis e Integrados. Boletim SPHAN/ **PRÓ-MEMÓRIA**. Memórias de Restauração. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/ans.net/tema_consulta.asp?Linha=tc_hist.gif&Cod=1335>. Acesso em 17/01/2019.

Referências Bibliográficas do Recurso Bens Imateriais

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil: promulgada em 5 de outubro de 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 20 dez 2020.

BRASIL. Decreto nº 3.551, de 04 de agosto de 2020. Institui o Registro de Bens Culturais de Natureza Imaterial que constituem patrimônio cultural brasileiro, cria o Programa Nacional do Patrimônio Imaterial e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 07 de agosto de 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3551.htm#:~:text=D3551&text=DECRETO%20N%C2%BA%203.551%2C%20DE%204,que%20lhe%20confere%20o%20art.> Acesso em: 02 dez 2020.

BRASIL. Decreto nº 7.378, de 09 de dezembro de 2010. Institui o Inventário Nacional da Diversidade Linguística e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 10 de dezembro de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7378.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%207.378%2C%20DE%209,que%20lhe%20confere%20o%20art.> Acesso em: 02 dez 2020.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937**. Organiza a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional. Rio de Janeiro, 30 de novembro de 1937, 116ª da Independência e 49ª da República. Disponível em: <[http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Decreto no_25_de_30_de_novembro_de_1937.pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/legislacao/Decreto%20no%2025%20de%2030%20de%20novembro%20de%201937.pdf)>. Acesso em: 19 nov 2020.

BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce . Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais**. Curitiba: Lactec, 2020a.

BRASIL. Ministério Público Federal (MPF). LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. **TOMO V – Patrimônio Cultural. Bens Arqueológicos**. Diagnóstico de Danos. Curitiba: Lactec, 2020f.

Convention pour la sauvegarde du patrimoine culturel immatériel, disponível em: <http://www.unesco.org/culture/ich/index.php?pg=00006>. Unesco, 2003.

E.E. EVANS PRITCHARD. **The Nuer a Description of the modes of livelihood and political institutions of a Nilotic People**, Oxford, Clarendon Press, 1940.

CLAUDE LÉVI-STRAUSS, Claude. **Anthropologie structurale**. Paris: Plon, 1958. Tradução brasileira: *Antropologia Estrutural*. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1991.

MAGNANI, José Guilherme. Santana de Parnaíba: memória e cotidiano. In: ABREU, Regina, CHAGAS, Mario de Souza; SANTOS, Myriam Sepúlveda dos (Orgs). **Museus, coleções e patrimônio: narrativas polifônicas**. Rio de Janeiro: Garamond Universitária / Minc, 2007.

MALINOWSKI, Bronislaw. **Argonautas do Pacífico Ocidental: um relato do empreendimento e da aventura dos nativos nos arquipélagos da Nova Guiné, Melanésia**. São Paulo: Ed. Abril, 1978. Primeira edição em inglês - Londres: Routledge & Kegan Paul, 1922.

STRATHERN, Marylin. **O Efeito Etnográfico e outros ensaios**. São Paulo: Cosac Naify, 2014.

UNESCO. **Convenção para a Salvaguarda do Patrimônio Cultural Imaterial, celebrada em Paris**, em 17 de outubro de 2003. Disponível em [http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/ Convencao_Salvaguarda_Patrimonio_Imaterial.pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/Convencao_Salvaguarda_Patrimonio_Imaterial.pdf). Acesso em: 20 jan 2021.

Referências Bibliográficas do Resultado Final da Valoração

- ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Hindawi Journal of Chemistry*, 1-15, 2019, Article ID 6730305, <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
- ANDREOLI, C. V.; ANDREOLI, F. N.; PICCININI, C.; SANCHES, A. L. **BIODIVERSIDADE: A importância da Preservação Ambiental para Manutenção da Riqueza e Equilíbrio dos Ecossistemas**. Coleção Agrinho. 443. Curitiba. 2014. Disponível em: < file:///E:/Valoração%20Econômica%20-%20RIO%20DOCE/Bibliografia/28_Biodiversidade. Pdf>. Acesso em dezembro, 2019.
- ARROW, K. J.; R. SOLOW; p. Portney; E. LEAMER; R. RADNER e H. SCHUMAN. **Report of the NOAA on contingent valuation**, Federal Register, 58(10), pp. 4601-4614. 1993.
- BATEMAN, I.J.; R. CARSON; B. Day; W.M. HANEMANN; N. HANLEY; T. HETT; M. JONES-LEE; G. LOOMES; S. MOURATO; E. ÖZDEMIROOLU; D.W. PEARCE; R. SUGDEN e J. SWANSON. **Economic Valuation with Stated Preference Techniques: a manual**. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, 2002.
- BENNETT, J.; M. Morrison and R. Blamey. **Testing the Validity of Responses to Contingent Valuation Questioning**. The Australian Journal of Agricultural and Resource Economics, 42:2, pp.131-148. 1998.
- BEVILACQUA, J. E. Estudo sobre a caracterização e a estabilidade de amostras de sedimentos do rio Tietê, SP. 1996. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Química do Instituto de Química da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 190p.
- BOLFARINE, H.; BUSSAB, W.O. **Elementos de amostragem. Versão preliminar**. São Paulo: Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo,
- CAMPOS, J. B.; PREVE, D. R.; ISMAEL, F.S. **Patrimônio Cultural, Direito e Meio Ambiente: Um debate sobre a globalização, cidadania e sustentabilidade**. Vol 1. Curitiba: Editora Multideia, 2015.
- COCHRAN, W.G. **Sampling techniques**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- COLLAR, N. J. et al. Threatened Birds of the Americas: The ICBP/IUCN Red Data Book. 3rd. **Edition, Part**, v. 2, 1992.
- CUCHE, D. A. **Noção de Cultura nas Ciências Sociais**. Bauru: EDUSC, 1999.
- DIAMOND, P e J.A. HAUSMAN. **Contingent Valuation: is some number better than no number? The Journal of Economic Perspectives**, 8(4) pp. 45-64. 1994.
- DIAS, M. S., MAGNUSSON, W. E. & ZUANON, J. 2010. **Effects of Reduced-Impact Logging on Fish Assemblages in Central Amazonia**. *Conservation Biology* 24(1): 278-286. 2010.
- FAN, Zhaofei et al. Distribution of cavity trees in midwestern old-growth and second-growth forests. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, n. 8, p. 1481-1494, 2003.
- 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 e Conservação*, v. 14, p. 35-45, 2016.
- FÖRSTNER, U.; WITTMANN, G. T. W. Metal pollution in the aquatic environment. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- FREEMAN, A.M. **The Measurement of Environmental and Resource Values: theory and methods**. Second edition. Washington: Resources for the Future, 2003.
- GASKEL, G.; BAUER, M. W. (Org.). **Pesquisa qualitativa com texto, imagem e som: um manual prático**. Petrópolis: Vozes, 2002.
- GREENE, W. H. *Econometric Analysis*. 7 Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2011.
- GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, J.J.; PIERANGELI, M.A.P.; ZULIANI, D.Q.; CAMPOS, M.L.; MARCHI, G. Elementos traço em solos e sistemas aquáticos. *Tópicos em Ciências do Solo*, v. 4, p. 345-390, 2005.

- GURMU, S., and TRIVEDI, p. K. Excess Zeros in Count Models for Recreational Trips. *Journal of Business & Economic Statistics*, 14(4):469-477. 1996.
- HAAB, T.C. and K.E. MCCONNELL, **Valuing Environmental and Natural Resources: the econometrics of non-market valuation**. Cheltenham: Edward Elgar. 2002.
- HECKMAN, J.J. **Sample selection bias as a specification error**. *Econometrica* 47: 153–161, 1979.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Banco de Tabelas Estatísticas. **Estimativas de População (Estimappop)**, 2018.
- Instituto de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2013. 46p.
- IPEA, **Estimação da taxa social de desconto para investimentos em infraestrutura no Brasil**, Texto para discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Ministério da Economia, Secretaria Especial de Produtividade, Emprego e Competitividade, agosto de 2019.
- JUNCA, F. A.; PAVAN, D.; JESUS, T.B.; ETEROVICK, p. Girinos como bioindicadores da qualidade da água do rio Doce. Relatório Final. Universidade estadual de Feira de Santana, junho, 2017, 33p. Disponibilizado por Greenpeace em http://www.greenpeace.org.br/hubfs/Campanhas/Agua_Para_Quem/documentos/GP_girinosbioindicadoresRioDoce.pdf. Acesso em 25 junho 2018
- KALTON, G. **Introduction to survey sampling**. 4. ed. Beverly Hills: Sage Publications, Inc., 1983.
- KISH, L. **Survey sampling**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1965
- KITZINGER, J. **Focus groups with users and providers of health care**. In: POPE, C.; MAYS, N. (Org.). *Qualitative research in health care*. 2. ed. London: BMJ Books, 2000
- KOHLER, K. E. e DODGE, R.E Visual_HEA: **Habitat Equivalency Analysis software to calculate compensatory restoration following natural resource injury** *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, 1611-1616 (2006)
- KRINSKY, I., and ROBB, A. L. **On approximating the statistical properties of elasticities**. *The Review of Economics and Statistics*, 68(4):715-719. 1986.
- KRINSKY, I., and ROBB, A. L. **Three methods for calculating the statistical properties of elasticities: A Comparison Empirical Economics**, 16(2):199-209. 1991.
- KRISTRÖM, B. **Spike Models in Contingent Valuation**. *American Journal of Agricultural Economics*, 79(3):1013-1023. 1997.
- LÉCUYER, C. Seawater Residence times of some elements of geochemical interest and the salinity of the oceans. *Bulletin de la Societe Geologique de France*. 187. p. 245-260. 2016.
- LEGENDRE, Pierre; DE CÁCERES, Miquel. **Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning**. *Ecology letters*, v. 16, n. 8, p. 951-963, 2013.
- LONGO, C. A. **Economia do Setor Público**. São Paulo: Editora Atlas, 1993.
- MAIA, F. F. Elementos traços em sedimentos e qualidade da água de rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, MG. 2017. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. 57p.
- MARTUSCELLI, Paulo. Ecology and conservation of the Red-tailed Amazon *Amazona brasiliensis* in south-eastern Brazil. **Bird Conservation International**, v. 5, n. 2-3, p. 405-420, 1995.
- MCFADDEN, D. **Contingent Valuation and Social Choice**. *American Journal of Agricultural Economics*, 76 (Novembro): 689-708, 1994.
- MENDONÇA, F. P., W. E. MAGNUSSON & J. ZUANON. 2005. **Relationships between habitat characteristics and fish assemblages in small streams of Central Amazonia**. *Copeia*, (4): 750–763. 2005.
- MENDONÇA, L. B.; LOPES, E. V.; ANJOS, L. **On the possible extinction of Bird species in the Upper Paraná River floodplain**. *Brazil. Braz. J. Biol.*, São Carlos, v. 69, n. 2, June 2009.
- MERTON, R. K.; FISKE, M.; KENDALL, p. L. **The focused interview: a manual of problems and procedures**. New York: Free Press, 1990.

- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, DC. 245 p. Island Press, 2005.
- MINAYO, M. C. S. **O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde**. 7. ed. São Paulo: Hucitec, 2000.
- MITCHELL, R.C. & CARSON, R.T. **Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method**. Washington, D.C., Resources for the Future, 1989.
- MORGAN, D. L. **Focus group as qualitative research**. London: Sage, 1997.
- PACE, M.L.; COLE, J.J.; CARPENTER, S.R. & KITCHELL, J.F. **Trophic cascades revealed in diverse ecosystems**. *Trends EcolEvol*, v. 14, n. 12, p. 483 – 488, 1999.
- PARMAR, T.K.; RAWTANI, D. & AGRAWAL, Y.K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. **Frontiers in Life Science**, v. 9, n. 2, p.110-118, 2016.
- PATTON, M. Q. **Qualitative evaluation and research methods**. 2. ed. Thousand Oaks: Sage; 1990.
- PEET, R.K. 1974. **The measurement of species diversity**. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 5:285-307.
- PINTILIE, S.; BRÂNȚĂ, L.; BEȚIANU, C.; PAVEL, L. V.; UNGUREANU, F.; GAVRILESCU, M. Modelling and simulation of heavy metals transport in water and sediments. *Environmental Engineering and Management Journal*, 6 (2): 153-161, 2007.
- PUPPIM, L. G. Avaliação de metais pesados e biomarcadores fecais no sedimento da foz do rio Doce, Linhares – ES. 2005. Monografia - Curso de graduação em Oceanografia da UFES, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2014. 48p.
- QUEIROZ, M. T. A. Bioacumulação de metais pesados no rio Piracicaba, Minas Gerais, aplicando a análise por ativação neurotrônica instrumental. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, UNILESTE, MG, Coronel Fabriciano, 2006. 105p.
- RAMOS, W. E. S. Contaminação por mercúrio e arsênio em Ribeirões do Quadrilátero Ferrífero – MG, em área de mineração e atividades garimpeiras. 2005. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2005. 122p.
- SALES, S. C. M. Avaliação ecotoxicológica de impactos da contaminação por metais e arsênio em áreas de mineração e beneficiamento de ouro em Minas Gerais. 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. 158p.
- SARMIENTO, A. M.; DELVALLS, A.; NIETO, J. M.; SALAMANCA, M. J.; CARABALLO, M. A. Toxicity and potential risk assessment of a river polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Science of the Total Environment*, v. 409, p. 4763–4771, 2011.
- SCHERER NETO, Pedro. Contribuição à biologia do papagaio-de-cara-roxa *Amazona brasiliensis* (Linnaeus, 1758)(Psittacidae, AVES). 2011.
- SKEAFF, J. M., DURBEUIL, A. A., BRIGHAM, S. I. The concept of persistence as applied to metals for aquatic hazard identification. *Environmental Toxicology and Chemistry* 21, 2581–2590, 2002.
- SOUZA, V. L. B.; LIMA, V.; HAZIN, C.A.; FONSECA, C. K. L.; SANTOS, S. O. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 3, n. 1A, p. 01-13, 2015.
- SZIKSZAY, M. **Geoquímica das águas**. 2012. Disponível em: file:///C:/Users/I01283/Downloads/45351-Texto%20do%20artigo-54095-1-10-20121002.pdf; acessado em 30.jan.2020.
- TAVARES-DIAS, M.; ARAUJO, C.S.O.; PORTO, S.M.A., VIANA, G.M.; MONTEIRO, P.C. Sanidade do Tambaqui *Colossoma macropomum* nas fases de larvicultura e alevinagem. In: Tavares-Dias et al., (Eds). Documento n. 78 – Embrapa Embrapa Amapá, Macapá; Universidade Nilton Lins,
- TRAD, L. A. B. **Grupos focais: conceitos, procedimentos e reflexões baseadas em experiências com o uso da técnica em pesquisas de saúde**. *Physis Revista de Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 19, n. 3, p. 777-796, 2009.

- UNITED STATES ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY(EPA). **Final Ecosystem Goods and Services Classification System (FEGS-CS)**. Corvallis, Oregon. August, 2013.
- VAREJÃO, E. V. V. Distribuição de mobilidade de arsênio e metais pesados em ribeirões do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 205p.
- VEIGA, L.; GONDIM, S. M. G. **A utilização de métodos qualitativos na Ciência Política e no Marketing Político**. Opin. Publica, Campinas, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2001.
- WITECK, L.; BOMBARDELLI, R.A.; SANCHES, E.A.; OLIVEIRA, J.D.S.; BAGGIO, D.M.; SOUZA, B.E. **Motilidade espermática, fertilização dos ovócitos e eclosão dos ovos de jundiá em água contaminada por cádmio**. Revista Brasileira de Zootecnia, v.40, n.3, p.477-481, 2011.
- WOOD, C.M. An Introduction to Metals in Fish Physiology and Toxicology: Basic Principles. In: Wood, C.M; Farrell, A.P; Brauner, C.J (Eds.), Homeostasis and Toxicology of Essential Metals, Elsevier, 524p., 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A – REVISÃO E ANÁLISE CRÍTICA DO DOCUMENTO “PG 27 – PROGRAMA DE RECUPERAÇÃO DE NASCENTES DA BACIA DO RIO DOCE” E DE SEU ORÇAMENTO ASSOCIADO

1. ESCOPO BÁSICO DE PROJETOS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

Faz-se útil partir da compreensão do que se entende por “restauração ecológica”, no sentido de definir claramente quais etapas e ações dizem respeito a esse ramo de atividade. No escopo do presente projeto procura-se identificar o que constitui um projeto de restauração ecológica em um âmbito mais abrangente e genérico, incluindo todas as atividades necessárias para o completo processo de restauração, porém, excluindo-se particularidades intrínsecas aos locais de instalação de cada um dos projetos.

Há diversos documentos publicados que tratam sobre o escopo básico dos projetos de restauração ecológica (ALVES-COSTA et al., 2008; BRANCALION et al., 2015; IBAMA, 2020; SER, 2004), sendo possível delimitar três etapas básicas existentes em todos os projetos:

a) Planejamento do projeto, incluindo o diagnóstico da área a ser restaurada

Ações envolvidas:

- I. Caracterização dos meios físico e biótico na área de abrangência do projeto e seu entorno, seu estado de conservação e potencialidades ou restrições quanto ao processo de restauração;
- II. Elaboração do zoneamento ecológico na área de abrangência do projeto e seu entorno;
- III. Reconhecimento dos fatores de degradação ambiental existentes na área e definição das ações necessárias à execução do projeto;
- IV. Definição das áreas prioritárias para restauração ecológica;
- V. Escolha e detalhamento da(s) técnica(s) de restauração mais apropriada(s) à situação local;
- VI. Elaboração do projeto básico e executivo, incluindo previsão dos insumos, custos e cronograma.

b) Implantação, ou execução das técnicas de restauração, incluindo estratégias de correção imediata em eventuais falhas no desenvolvimento do projeto

Ações envolvidas:

- I. Isolamento e retirada de fatores de degradação ambiental;
- II. Adequação física e/ou química dos solos do local a ser restaurado;
- III. Eliminação seletiva e desbaste de espécies competidoras;
- IV. Controle de formigas cortadeiras;
- V. Indução do banco de sementes autóctone;
- VI. Indução e condução da regeneração natural autóctone;

VII. Adensamento e enriquecimento de espécies;

VIII. Implantação de plantio total em áreas sem potencial regenerativo.

c) Manutenção e monitoramento da restauração, envolvendo o manejo adaptativo da restauração e acompanhamento dos resultados

Ações envolvidas:

- I. Controle de formigas cortadeiras;
- II. Coroamento das covas, eliminação seletiva e desbaste de espécies competidoras;
- III. Calagem e adubação;
- IV. Replantios;
- V. Irrigação;
- VI. Amostragens de monitoramento e análise dos resultados;
- VII. Reavaliação das ações de manejo.

2. REVISÃO E ANÁLISE CRÍTICA DO PG27

Para a revisão do PG27 compara-se os itens que o compõe com os tópicos apresentados no escopo básico de projetos de restauração, buscando identificar elementos efetivamente relacionados às atividades supracitadas. Nesse sentido, ações compreendidas como peculiaridades à situação da Fundação Renova, especialmente voltadas ao engajamento social (como treinamentos, ações educativas, assistência técnica, etc) ou ações de compensação foram especificadas no contexto desta avaliação.

São revisados todos os itens que compõe o PG 27, sendo apresentados seus objetivos e ações, valores atrelados à execução das ações e a análise crítica do item, incluindo justificativa sobre a permanência ou exclusão do item no escopo do valor/hectare a ser utilizado pelo método de valoração econômica.

Item 2.1 – Definição das áreas prioritárias para recuperação de nascentes

Essa etapa tem por objetivo a definição dos locais a serem restaurados, entretanto a escolha dos locais é de competência exclusiva do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Doce (CBH-Doce), ficando ao cargo da Fundação Renova o encaminhamento de propostas de priorização de áreas para a aprovação do comitê. Proposta foi apresentada em abril de 2019 e aprovada pelo CBH-Doce em reunião plenária.

O custo Renova de R\$320,51/hectare atrelado a essa etapa estão relacionados a “pesquisa de predisposição para restauração”, tendo como ações a instalação de Unidades de Acompanhamento Local, que colaborarão na divulgação dos editais junto aos proprietários ou possuidores rurais.

Análise: A definição de áreas prioritárias é elemento essencial em projetos de restauração. Para o programa PG27 (específico para a restauração de nascentes) a etapa regional de priorização aparentemente já foi concluída, entretanto, entende-se que há a necessidade de busca de novas áreas prioritárias para restauração fora do contexto exclusivo das nascentes, sendo então indispensável para a etapa executiva dos projetos.

Item 2.2 – Edital do programa

Etapa cujo objetivo é a elaboração e divulgação de editais anuais para a inscrição de proprietários ou possuidores rurais interessados em participar do programa de restauração.

O custo Renova de R\$641,03/hectare visa suprir os custos para a criação da Unidade de Gestão Regional, responsável por prestar apoio institucional e operacional à implantação do programa e seus resultados; bem como auxiliar no lançamento e divulgação dos editais.

Análise: O valor associado a esta etapa do projeto, assim como descrito para o item 6.1, relaciona-se ao contexto social do projeto, incluindo as ações necessárias para o lançamento do edital e alcance da informação aos proprietários ou possuidores rurais, bem como ações de divulgação dos resultados obtidos com o programa. Recomenda-se a exclusão dos valores dessa etapa.

Item 2.3 – Mobilização e engajamento

Fase do projeto que inicia as ações de planejamento, com a execução de processos participativos junto aos comitês de bacia, prefeituras e a população em geral, incluindo a divulgação e inscrição dos proprietários ou possuidores interessados em se vincular ao projeto; o início da caracterização do meio físico e biológico; o zoneamento ecológico, a definição dos elementos de degradação e elementos prioritários de restauração. Todos esses elementos serão trabalhados no Diagnóstico Rural Participativo.

Os custos associados a essa etapa envolvem a elaboração do Diagnóstico Rural Participativo (R\$1846,15/hectare) e no estaqueamento das propriedades (769,23/hectare).

Análise: Todos os itens desta fase são pertinentes ao programa de restauração ecológica.

Item 2.4 – Elaboração do CAR

Etapa cuja finalidade principal é a elaboração do Cadastro Ambiental Rural das propriedades atreladas ao projeto de restauração, sob a ótica da obrigatoriedade do CAR na participação do edital.

Os valores relacionados a essa etapa (R\$256,41/hectare) estão relacionados à coleta de dados das propriedades e efetivação do cadastro.

Análise: Entende-se que a obrigatoriedade do CAR está relacionada à adequabilidade das propriedades junto aos requisitos do projeto, sendo desnecessária ao contexto do projeto de restauração em si. Recomenda-se a exclusão dos valores dessa etapa.

Item 2.5 – Elaboração de Projetos

Etapa de efetiva elaboração de projetos individuais das propriedades (PIPs), com a delimitação e aferência dos perímetros das propriedades, diagnóstico ambiental e delimitação das unidades de trabalho em campo e unidades de intervenção.

O custo Renova de R\$1.600,00/hectare para a execução dessa etapa relaciona-se à coleta de dados em campo, elaboração de projetos básico e executivo, além do acompanhamento e verificação das diretrizes técnicas estabelecidas nos projetos. O projeto contempla, em sua quase integralidade, todas as atividades enquadradas na etapa de diagnóstico de um projeto de restauração ecológica. Há, no entanto, alguns itens que se referem a peculiaridades das ações da Renova na região do desastre, quais sejam:

- Item 6.5.2.3.2.3 Subprojetos executivos de alternativa a dessedentação animal;
- Item 6.5.2.3.2.4 Subprojetos executivos de implantação de barraginhas;
- Item 6.5.2.3.2.5 Subprojetos executivos de implantação de fossas sépticas de tratamento de esgoto.

Para fins orçamentários é impossível dissociar estes elementos do valor global dos projetos, porém, há de se considerar que tais subprojetos serão elaborados apenas se houver demandas específicas.

Análise: Apesar de contemplar subprojetos que fogem do escopo das atividades de restauração ecológica, dentro da formulação orçamentária da Fundação Renova, o item engloba ações essenciais aos objetivos de restauração, sendo imprescindível sua consideração enquanto custos desta atividade.

Item 2.6 – Assistência técnica para regularização ambiental e recuperação de áreas degradadas

As ações inclusas dentro dessa fase do programa visam à assistência e acompanhamento técnico das pequenas, médias e grandes propriedades participantes do programa, independente da técnica de restauração empregada.

O custo Renova de R\$6.665,38/hectare contemplam gastos com visitas técnicas e elaboração do diagnóstico participativo e integrado da propriedade.

Análise: Etapa relacionada ao contexto da conformidade da propriedade às questões de uso sustentável do solo, onde, apesar de incluir avaliações coletivas do andamento da restauração florestal, tem seu foco na assistência técnica das práticas agrícolas desenvolvidas pelos proprietários ou posseiros. Recomenda-se a exclusão dos valores dessa etapa.

Item 2.7 – Implantação e manutenção

Etapa do projeto que condensa as efetivas ações de restauração ecológica, incluindo seis etapas com a execução de diversos procedimentos técnicos, cada qual adequado à realidade observada na propriedade sob intervenção.

O ciclo orçamentário divide o escopo dessa etapa em 1) infraestrutura rural (R\$5.990,04/hectare); 2) plantio e manutenção (R\$20.661,88/hectare); 3) cercamento e manutenção (R\$4.027,49/hectare) e 4) proteção florestal (R\$5.666,03/hectare), totalizando R\$36.345,43/hectare para a execução dos serviços. Adiciona-se a esse contexto o fornecimento de sementes e mudas de espécies nativas a serem plantadas ou replantadas (R\$2.794,65/hectare), elemento essencial na implantação dos projetos e também a execução do monitoramento das áreas restauradas (R\$4.448,39/hectare), elencado dentro do programa como a sexta etapa de restauração.

Análise: Dentre os elementos componentes do ciclo orçamentário Renova, apenas o item de infraestrutura rural (R\$5.990,04/hectare) não faz parte do escopo genérico de programas de restauração. Embora esse elemento inclua estruturas de sinalização da propriedade e das áreas de restauração, seu valor principal está relacionado à construção de estruturas físicas não pertinentes aos processos de restauração. Ademais, um elemento dentro do item monitoramento (Monitoramento hidrológico de mini ETE – R\$288,46/hectare) encaixa-se no mesmo contexto de infraestruturas, sugerindo-se sua exclusão de custos de um programa de restauração ecológica.

Item 2.8 – Pagamento por serviços ambientais

Elemento que visa compensar economicamente os proprietários e posseiros rurais participantes do programa por serviços ambientais.

O valor estipulado de R\$1.260,00/hectare destina-se ao pagamento do produtor pelos serviços ambientais fornecidos ao longo de cinco anos (R\$ 252,00 por ano por hectare).

Análise: Embora o pagamento pelos serviços ambientais aumente a garantia de que as áreas restauradas serão mantidas e conservadas durante o período de vigência do programa, o elemento não se insere no contexto de um projeto básico de restauração ecológica, representando um elemento de viés social do programa. Recomenda-se a exclusão dos valores dessa etapa.

Item 2.9 – Pesquisa e desenvolvimento

Item do programa que elenca uma série de possíveis linhas de pesquisa e desenvolvimento que poderão ser desenvolvidas e que poderão potencializar as ações de restauração realizadas.

O custo Renova para esse elemento (R\$1.708,02/hectare) inclui valores para a execução de inventários florestais visando o estabelecimento de ecossistemas de referência (item essencial em projetos de restauração) e pagamento de bolsas de estudo para os pesquisadores envolvidos nos projetos.

Análise: Embora os valores desse item no ciclo orçamentário representem elementos externos à restauração ecológica em si, entende-se que para o contexto onde houve criação de tecnossolos, com a deposição de rejeitos sobre os solos originais, será necessário estudos direcionados a compreensão dos efeitos dessa nova realidade sobre os processos de restauração ecológica. Assim sendo, recomenda-se a inclusão dos valores àquelas áreas onde os projetos serão executados sobre tais condições. Desta forma, os valores entendidos como adicionais são apresentados de forma particularizada na síntese desta análise (Tabela 2). Para as áreas onde a restauração será realizada como forma de compensação (externas à situação dos tecnossolos) recomenda-se a exclusão dos valores dessa etapa.

Item 2.10 – Gestão e controle de qualidade na restauração florestal

Tal etapa do programa apresenta ações mal definidas, incluindo atividades atreladas a outras etapas sem associação direta de valores a elas (p.ex. inventário florestal e monitoramento). Entretanto, do ponto de vista gerencial, é de suma importância a alocação de recursos para a gestão do programa como um todo.

Os valores relacionados a essa etapa do projeto incluem o gerenciamento operacional (R\$4.080,80/hectare), o gerenciamento técnico (R\$4.474,14/hectare) e a comunicação geral do projeto (R\$7,69/hectare).

Análise: Dos itens relacionados a esta etapa recomenda-se a exclusão apenas do valor atrelado a comunicação geral do projeto, entendendo que suas ações não se encaixam dentro do escopo básico de um projeto de restauração.

3. SÍNTESE

ITENS SUGERIDOS PARA EXCLUSÃO NO CICLO ORÇAMENTÁRIO PG 27

Os itens expostos na Tabela 1 são aqueles cujos objetivos não se relacionam a ações do escopo de projetos de restauração ecológica, tratando-se de peculiaridades inerentes ao trabalho da Fundação Renova. Sugere-se, assim, a desconsideração destes valores para cálculo do custo final por hectare no que tange os objetivos do projeto de valoração econômica.

Apêndice A – Tabela 1 – Itens provenientes do ciclo orçamentário PG27 recomendados para exclusão na composição do valor/hectare no contexto do método de valoração econômica.

Itens e Subitens		Custo Renova (R\$/ha.)
2	Edital (*)	641.03
2.1	Lançamento e divulgação de Edital	641.03
5	CAR - Cadastro Ambiental Rural (*)	256.41
5.1	CAR - Cadastro Ambiental Rural	256.41
7	ATER - Assistência Técnica e Extensão Rural (*)	6,665.38
7.2	ATER - Individual (Pequeno e medio produtor) - Plantio Total MUDAS	1,453.85
7.5	ATER - Individual (Grande produtor rural) - Plantio Total MUDAS	415.38
7.4	ATER - Individual (Grande produtor rural) - Condução da regeneração com plantio de mudas	484.62
7.4	ATER - Individual (Pequeno e medio produtor) - Condução da regeneração com plantio de mudas	311.54
7.6	ATER - Individual (Pequeno e medio produtor) - Plantio Total MUVUCA	2,907.69
7.6	ATER - Individual (Grande produtor rural) - Plantio Total MUVUCA	830.77
7.7	ATER - Coletivo	261.54
8.	Implantação e Manutenção	5,990.04
8.1	Infraestrutura Rural (*)	5,990.04
8.1.1	Infraestrutura Rural (abastecimento residencial e dessedentação animal)	1,774.11
8.1.2	Placas por Propriedade	64.10
8.1.3	Placas de Sinalização	6.31
8.1.4	Barragem de captação de água de chuva (escavadeira esteira)	1,282.05
8.1.5	Fossa séptica / Mini ETE (fornecimento + instalação)	2,863.46
9	PSA - Pagamento por Serviços Ambientais (*)	1,260.00
9.3	PSA de longo prazo (Total por 5 anos)	1,260.00
10	Pesquisa e Desenvolvimento	1,708.02
10.1	Inventário Florestal	189.09
10.2	Convênio Bolsa Estudos	1,518.94
11	Monitoramento (**)	288.46
11.3	Monitoramento Hidrológico (Mini ETE) 1 ano	288.46
12	Gerenciamento (**)	7.69
12.3	Comunicação Projeto (assessoria comunicação, folder, cartilha..)	7.69
Total Geral		16,817.04

ITENS SUGERIDOS PARA MANUTENÇÃO NO CICLO ORÇAMENTÁRIO PG 27

Os itens expostos na Tabela 2 foram considerados inerentes ao escopo de um projeto de restauração ecológica, muito embora com certas particularidades envolvendo a gestão por parte da Fundação Renova, uma vez que não é possível dissociar estes custos do orçamento geral informado nos documentos. A Tabela 3 apresenta os valores assumidos como necessários apenas nas situações onde o projeto de restauração será implementado sobre áreas onde houve deposição de rejeito e criação de tecnossolos, no sentido onde as ações relacionadas a esse centro de custo seriam vinculadas a estudos potencializem os resultados das técnicas de restauração sob tais condições.

Apêndice A – Tabela 2 – Itens provenientes do ciclo orçamentário PG27 recomendados para manutenção na composição do valor/hectare no contexto do método de valoração econômica.

Itens e Subitens		Custo Renova (R\$/ha.)
1	Priorização	320.51
1.2	Pesquisa de predisposição para restauração	320.51
3	Sementes e Mudas	2,794.65
3.1	Fornecimento de Sementes Nativas - Plantio Direto MUVUCA - 2.500 Nascentes (50%)	3,000.00
3.2	Fornecimento de mudas de diversidade - Plantio Direto MUVUCA - 2.500 Nascentes (50%)	583.80
3.3	Fornecimento de Mudas - Plantio Direto - 1.250 Nascentes (+ 20% taxa mortalidade) (25%)	2,702.16
3.4	Fornecimento de Mudas (+ 20% taxa mortalidade) - Condução da regeneração - 1.250 Nascentes (25%)	1,308.83
4	Mobilização e Engajamento	2,615.38
4.1	Diagnóstico Rural Participativo e cartografia social	1,846.15
4.2	Estaqueamento	769.23
6	PIP (Projeto Individual da Propriedade)	1,600.00
6.1	Elaboração de PIP (Projeto Individual da Propriedade)	1,600.00
8.	Implantação e Manutenção	30,355.39
8.2	Plantio e manutenção (Serviços e insumos para plantio)	20,661.88
8.2.1	Mão de obra Plantio MUVUCA 2500 nasc	12,472.39
8.2.2	Insumos para Plantio Total (Adubo, calcário, Hidrogel..) - MUVUCA 2500 nasc	2,247.88
8.2.3	Mão de obra plantio Total (roçada, coroamento, coveamento e manutenção..) 1250 nasc	29,325.34
8.2.4	Insumos para Plantio Total (Adubo, calcário, Hidrogel..) 1250 nasc	2,236.62
8.2.7	Mão de obra condução da regeneração 1250 nasc	20,941.82
8.2.8	Insumos para Condução da regeneração (Adubo, calcário, Hidrogel..) 1250 nasc	703.20
8.3	Cercamento e manutenção (Insumos e serviços terceiros) (*)	4,027.49
8.3.1	Mão de obra cercamento - Produtor Rural	1,363.71
8.3.2	Mão de obra cercamento - Terceirizada	593.93
8.3.3	Insumos Cercamento - Estacas,	813.99
8.3.4	Insumos Cercamento - Mourões	165.12
8.3.5	Insumos Cercamento - Arames	479.19

Itens e Subitens		Custo Renova (R\$/ha.)
8.3.6	Insumos Cercamento - grampo	17.60
8.3.7	Manutenção de cercamento	593.93
8.4	Proteção florestal (incêndio)	5,666.03
8.4.1	Elaboração do plano de proteção florestal	128.21
8.4.2	Execução do plano de proteção florestal	5,537.82
11	Monitoramento (**)	4,159.93
11.1	Controle e Gestão da qualidade 2 anos	1,618.33
11.2	Controle e Gestão PSA 3 anos	606.88
11.4	Monitoramento Hidrológico (qualiquantitativo de água de afluentes)	69.72
11.5	Monitoramento Ecológico 6 anos (Bi-anual) = 3x	1,865.00
12	Gerenciamento (**)	8,554.94
12.1	Gerenciadora Operacional	4,080.80
12.2	Gerenciadora Técnica	4,474.14
Total Geral		50,400.80

Apêndice A – Tabela 3 – Itens provenientes do ciclo orçamentário PG27 recomendados para inclusão no escopo principal de restauração para as áreas onde houve deposição de rejeito e criação de Tecnossolos.

Itens e Subitens		Custo Renova (R\$/ha.)
10	Pesquisa e Desenvolvimento	1,708.02
10.1	Inventário Florestal	189.09
10.2	Convênio Bolsa Estudos	1,518.94
Total Geral		1,708.02

CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

Algumas características sobre o ciclo orçamentário PG27 devem ser apontadas, entendendo que são elementos importantes na tomada de decisão sobre o valor final a ser considerado no método de valoração econômica.

- 1) A planilha realça determinados itens como “peculiaridades Renova” através do símbolo “(*)” e “empresas adotam parte” pelo símbolo “(**)”. Estes elementos são somados ao final da planilha e descontados do valor final por hectare, no entanto, na planilha analisada não foi fornecida uma explicação para tal dedução, compreende-se que a razão esteja associada ao reaproveitamento de ações que já estão feitas e podem atender tais demandas sem custo adicional. De toda forma, a equipe não reproduziu esta dedução no valor total obtido na orçamentação para a valoração. Dito isto, todos os elementos inseridos no tópico “itens sugeridos para manutenção no ciclo orçamentário PG27”, independentemente de apresentarem tal simbologia, são considerados essenciais à execução de projetos básicos de restauração ecológica.
- 2) O custo Renova (R\$/ha) de cada item e subitem é calculado a partir do valor global de seu componentes (conforme disponíveis na planilha de orçamento) e ponderado através da equação $/(5000 \cdot 0.78)$, onde o “5000” representa o número total de nascentes e “0.78”

representa a área total média (em hectares) de cada nascente. O cálculo é realizado para se chegar a um valor por hectare considerando a área total de intervenção (3.900 hectares).

- 3) As particularidades do processo de restauração no contexto da alteração das características dos solos nos ambientes de deposição de rejeitos ainda não são entendidas, logo, ações específicas que potencializem os resultados das técnicas de restauração sob tais condições são inexistentes, sendo impossível recomenda-las. Neste mesmo sentido, recomenda-se a inclusão do valor dos itens “Monitoramento Ecológico 6 anos (Bi-anual = 3x)” (R\$1.865,00/hectare) e “Pesquisa e Desenvolvimento” (R\$1.708,02/hectare) para o estudo e acompanhamento específico das condições e evolução dos projetos de restauração instalados sobre tecnossolos.

APÊNDICE B – METODOLOGIA DETALHADA DAS AÇÕES DE RECUPERAÇÃO

1. Modalidades de restauração ecológica

As modalidades a serem adotados para a restauração florestal nas áreas prioritárias para recuperação na bacia, contemplam na íntegra as metodologias dispostas na Lei 12.727, de 17 de outubro de 2012. Ainda em análise ao disposto no Art. 61-A em seu § 13, verificasse as seguintes possibilidades:

“§ 13. A recomposição de que trata este artigo poderá ser feita, isolada ou conjuntamente, pelos seguintes métodos:

I. Condução de regeneração natural de espécies nativas;

II. Plantio de espécies nativas;

III. Plantio de espécies nativas conjugado com a condução da regeneração natural de espécies nativas;

IV. Plantio intercalado de espécies lenhosas, perenes ou de ciclo longo, exóticas com nativas de ocorrência regional, em até 50% (cinquenta por cento) da área total a ser recomposta.”

Estes métodos, numa leitura acadêmica, podem ser classificados em três grupos: restauração passiva, restauração assistida e restauração ativa (HOLL; AIDE, 2011).

2. Definição das espécies e proporção dos grupos de plantio

As espécies escolhidas serão aquelas obrigatoriamente de ocorrência do bioma Mata Atlântica e suas diferentes fitofisionomias, sobretudo floresta estacional semidecidual (83,30%) e floresta ombrófila densa (15,24%) – feições predominantes na bacia do rio Doce (IBGE, 2004).

A lista de espécies que poderiam ser selecionadas são as 334 reveladas no estudo de prospecção e diagnóstico de viveiros na bacia do rio Doce. Além dos dados secundários será utilizado como complemento dessa seleção o conceito de ecossistema de referência. Ecossistemas de referência não representam uma cópia do que se deseja recriar e sim uma referência de onde se quer chegar (BRANCALION; RODRIGUES; GANDOLFI, 2015). Neste sentido, o ecossistema referência oferece uma direção de onde chegar baseado em diversos aspectos estruturais e florísticos. Entretanto é preciso se atentar às características do local onde se pretende restaurar para estabelecer a referência ideal. Tendo este conceito em mente, os desenhos de plantio devem ser flexíveis quanto a riqueza de espécies empregada (SER, 2004).

Neste sentido, a leitura da paisagem do entorno é fundamental (SUDING et al., 2016), seja através do mapeamento de fontes de propágulos próximas aos locais do projeto, ou até mesmo, com a escolha de espécies mais apreciadas pela fauna local e que tenham produção de frutos em diferentes estações do ano. Desta forma, a flexibilidade mencionada pode ser traduzida em um modelo de plantio baseado no processo de sucessão florestal.

No modelo defendido, o investimento inicial seria feito em estrutura, que corresponde a etapa de colonização por árvores pioneiras tolerantes e intolerantes à sombra e rápido aumento de altura e diâmetro de espécies lenhosas; visando a gradativa superação de filtros ambientais, como competidores, ou seja, alta mortalidade de espécies herbáceas colonizadoras, para finalmente obter-se estabelecimento de plântulas tolerantes a sombra cujas sementes foram dispersas por aves e morcegos, que é a principal engrenagem para se chegar a autossuficiência de povoamentos florestais (HOLL, 1999; REID; HOLL, 2013; SUDING et al., 2016). Sendo assim, se após o estabelecimento da estrutura, em 3

anos não for notado incremento em densidade e riqueza de regenerantes, a capacidade da paisagem ou do plantio em trazer e/ou atrair dispersores é duvidável, sendo necessário intervir no povoamento através de manejo e plantio de enriquecimento (BRANCALION; RODRIGUES; GANDOLFI, 2015).

Sendo assim, a ideia é adequar a composição de espécies de acordo com as peculiaridades de cada sítio trabalhado, de forma a garantir a estrutura mínima necessária para que os indicadores de diversidade definidos para 2º, 4º e 6º anos sejam atingidos. Caso o local já possua a estrutura necessária e só demande enriquecimento, a proposta é a mesma – utilizar espécies estratégicas de diversidade para atingir as metas dos indicadores estabelecidos.

3. Primeira ação de recuperação – Isolamento dos fatores de degradação

- Prevenção a incêndios florestais

De acordo com o Parecer Técnico nº 13/2017-COREC/CGBIO/DBFLO, deverão ser tomadas as seguintes medidas de forma a minimizar os riscos por fogo nas áreas de plantio: Construção de aceiros visando a redução ou eliminação de materiais; combustíveis; Localização de fontes de captação de água; Mapeamento de acessos; Treinamento da população do entorno sobre ações do plano de prevenção incêndios florestais e Aceiros. As dimensões do aceiro deverão respeitar o disposto na Resolução Conjunta SEMA/IEF nº 2075/2014 que recomenda uma faixa mínima de 3 (três) metros que deve variar conforme a topografia e a presença de material combustível.

- Cercamento

Independentemente do tipo de APP, esse procedimento será efetivado através do cercamento de todo o perímetro onde houver implantação do projeto de restauração, sempre que houver possibilidade de risco para a área em implantação, na maioria das vezes imposto por animais domésticos. A sua quantificação e o perímetro da cerca a ser estabelecida serão feitos com o auxílio de um GPS, podendo ser o de navegação. No entanto, ressalta-se que deverão ser feitos em no mínimo 15 metros de raio, no caso de APP caracterizada como uso rural consolidado e 50 metros de raio em caso de APP sem uso rural consolidado. As cercas erguidas deverão seguir os modelos abaixo:

- Fios de arame farpado (250 a 350 kgf, de 2,0 a 2,2 mm - galvanização tipo A-, estacas de Eucalipto tratado (de 2,5 m em 2,5 m, com antiracha, com 2,20 m de altura e diâmetro de 08 a 10 cm) e grampos para fixação do arame (19 x 11) galvanização tipo A. Sugere-se 5 fios, e o distanciamento entre estacas e entre arames poderá variar em até 10%.
- Fios de arame liso (250 a 350 kgf, de 2,0 a 2,2 mm - galvanização tipo A. Estacas de Eucalipto tratado (de 3 m em 3 m, com antiracha, com 2,20 m de altura e diâmetro de 08 a 10 cm) e grampos para fixação do arame (19 x 11) galvanização tipo A. Sugere-se 5 fios, e o distanciamento entre estacas e entre arames pode variar em até 10%;
- Cercas com balancins e arame farpado ou liso o número de fios de arame continua com a sugestão para 5 fios, mas em aberto;
- A implantação de arame liso no primeiro fio, quando necessário, pode ser feito com utilização de grampos e enrolando o fio a cada 5 estacas (10 m), para o caso de não uso de balancins e, se for com balancins, a cada estaca; a distância entre estacas (E) deve ser de 8 m e a distância

entre mourões (M) deve ser de 24 m, já a distância entre Balancins (B) deve ser de 2 m, ou seja, seria a seguinte sequência: M B E B E B M; com isto, a cada 314 m de cerca seriam feitos 40 buracos, consumindo 14 mourões, 26 estacas e 117 balancins; em cada vértice Horizontal deverá ser colocado um esticador, com 2,5 m de altura e com diâmetro variando de 0,14 a 0,20 m; em vértices verticais, que tenha diferença de nível, deve-se colocar uma estaca para ajuste dos fios. Caso sejam 5 fios, esses serão distanciados entre si por 30 a 40 cm, sendo que o primeiro dista do solo de 40 a 45 cm e com arame liso, sem farpa, para facilitar o deslocamento da fauna silvestre. As estacas deverão ser devidamente apiloadas, de modo a deixá-las completamente firmes. As estacas e os esticadores deverão estar fora do solo de 1,50 m a 1,60 m. Em cada vértice deverá ser colocado um esticador, também de Eucalipto tratado, com 2,5 m de altura e com diâmetro variando de 0,14 a 0,20 m. Caso a distância entre os vértices seja superior a 60 m um outro esticador deverá ser colocado no meio.

- Em casos excepcionais em que as estacas ou esticadores tenham que ser fixados em solo rochoso, deverá ser aplicado a mistura de concreto em uma caixa de 30x30 cm e 40 cm de altura. A distância do último arame em relação a solo é eficaz contra a entrada de animais domésticos de médio e grande porte.

É recomendável também que sejam criadas passagens de fauna, recomenda-se deixar, no mínimo, uma passagem para pedestres, tipo colchetes ou portão, para permitir, de forma segura, o acesso de pessoas, materiais e equipamentos ao interior das áreas.

- Coleta e Análise de solo

A coleta e a análise do solo perpassam pela coleta de amostragem e seleção da área de amostragem. O objetivo dessa amostragem é avaliar a fertilidade do solo, pois com base na análise química da amostra pode-se estabelecer valores de referência para adubação e correção do solo.

As coletas de amostras podem ser realizadas em qualquer época do ano. Entretanto, é recomendável que sejam planejadas com antecedência, pois havendo necessidade de calagem (adição de calcário), deve-se considerar que o calcário exige um tempo mínimo para reagir no solo.

Seleção da área de amostragem deve ser dividida em glebas ou talhões homogêneas, para que a amostra do solo seja representativa. Nesta subdivisão ou estratificação, leva-se em conta a vegetação, a posição topográfica (topo do morro, meia encosta, baixada, etc.), as características perceptíveis do solo (cor, textura, condição de drenagem, etc.) e o histórico da área (cultura atual e anterior, produtividade observada, uso de fertilizantes e de corretivos, etc.) (EMBRAPA, 1997). Segundo CANTARRUTI; ALVAREZ; RIBEIRO (1999) podem ocorrer casos de glebas homogêneas com grandes extensões, nesses casos sugere-se não amostrar glebas superiores a 10 ha.

A coleta das amostras pode ser feita com um enxadão ou com trado, cada qual sendo útil em respeito às peculiaridades locais. Caso o local apresente solos friáveis o uso do trado torna a coleta mais eficiente e rápida, no entanto, caso os solos sejam secos, muito argilosos, pedregosos, epicascalhentos, concrecionários ou compactos – o que em muitos ocorre com argissolos, o uso de trado não é aconselhável por não ser capaz de tirar uma amostra representativa da camada de 0 a 20 cm (ALVAREZ et al., 1999). Nestes casos a abertura de uma cova ou minitrincheira com um enxadão ou picareta pode facilitar a retirada de fatias com um facão ou pá de aço inoxidável.

Em casos de solos que não apresentem nem 20 cm de profundidade, como os Neossolos Litólicos, é aconselhável coletar a camada disponível e anotar na etiqueta a espessura desta camada para auxiliar na análise do solo e recomendação de calagem e de nutrientes (LOPES; GUILHERME, 2007).

Após a definição das glebas com características semelhantes de relevo, vegetação e solo, deve-se realizar as amostragens dos pontos de coleta por meio de um caminhar em zigue-zague, a fim de englobar as variações imperceptíveis das características do solo em campo, garantindo a representatividade da área.

Para o plantio de espécies florestais, deve-se coletar amostras de solo nas profundidades de 0-20 e 20-40. Caso se opte por corrigir as características químicas do solo até 60 cm de profundidade, por meio de gessagem, deve-se também realizar a coleta de amostras da camada de 40-60 cm.

- **Roçada**

Roçada significa “abrir espaço” para as mudas plantadas, ou seja, eliminar quaisquer competidores para que nesta fase inicial de estabelecimento não haja o risco de serem dominadas pela vegetação competitiva existente. A limpeza do terreno tem que ser feita de preferência 15 a 30 dias antes do plantio. Isto irá reduzir a competição das espécies invasoras até que as mudas estejam aclimatadas e comecem a recobrir o solo. Além disso, esta atividade melhora o rendimento, favorecendo a eficiência e a qualidade do plantio. A limpeza do terreno pode ser realizada de três diferentes maneiras: manual; semi-mecanizada e; mecanizada.

4. Segunda ação de recuperação - recuperação do solo

- **Adubação verde**

É a incorporação ao solo de plantas especialmente cultivadas para esse fim ou de outras vegetações cortadas quando ainda verdes, para serem enterradas. Antes do plantio das espécies de recobrimento, deve-se realizar a adubação verde, que consiste no plantio de leguminosas na área a ser recuperada. O objetivo desta técnica é de: aumentar o teor de nitrogênio do solo, por meio de fixação biológica; proporcionar proteção física ao solo, por meio de uma rápida cobertura vegetal, diminuindo processos erosivos, assim como a evaporação da água do solo; diminuir a infestação por plantas invasoras, devido ao rápido sombreamento da área; promover a ciclagem de nutrientes, devido à grande produção de biomassa; aumentar o teor de carbono orgânico do solo, pela decomposição dos ramos podados.

Assim, para alcançar estes objetivos, as espécies selecionadas devem ter as seguintes características: devem ser espécies de leguminosas que tenham a capacidade de se associar simbioticamente com micro-organismos fixadores de nitrogênio e devem ser herbáceas ou arbustivas de ciclo curto, com alta produção de biomassa.

Segundo Rodrigues et. al (2009) inicia-se a adubação verde com a semeadura do mix de espécies de adubo verde e arbustos nativos em todas as linhas de plantio, com o espaçamento de 1,0 m entre as linhas, e a semeadura do mix de espécies de recobrimento e leguminosas nativas a cada 3,0 m. Este espaçamento possibilita maior e mais rápido sombreamento do solo diminuindo os gastos com manutenção e o controle de competidores.

Recomenda-se realizar primeiro a semeadura de adubo verde nas entrelinhas do grupo de recobrimento, sendo introduzido em duas linhas, a um metro de distância das espécies de recobrimento. O ideal é que as espécies de recobrimento sejam plantadas quando a adubação verde estiver com cerca de 50 cm de altura.

A adubação verde será utilizada nos casos onde a intervenção for o plantio total. Para o plantio, pode-se utilizar um mix de sementes, com proporções que não ultrapassem a quantidade de sementes por metro linear recomendada para cada espécie.

- Calagem e gessagem

Enquanto não forem conhecidos os dados do ambiente de referência, deverão ser aplicadas referências técnicas para as espécies utilizadas. Para determinar a necessidade de calagem e a quantidade de calcário a ser aplicada, será utilizado o método da “neutralização do Al^{3+} e da elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} ” ou pelo método da “saturação por bases”. Para ambos os casos, a necessidade de calagem (NC) deve ser corrigida de acordo com as características físico-químicas do calcário utilizado, pela porcentagem da área de aplicação em relação à área total e pela profundidade de incorporação do calcário. O cálculo de calagem feito a partir dos dois métodos mencionados, determinará três resultados distintos:

1 – Método da neutralização do Al^{3+} e da elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , em que Y é determinado a partir do teor de argila;

2 - Método da neutralização do Al^{3+} e da elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , em que Y é determinado a partir do teor de P-rem;

3 – Método da saturação por bases.

O resultado a ser utilizado será o que apresentar maior valor determinado pelo “método da neutralização do Al^{3+} e da elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} ”.

Para incorporação na área total, o calcário deve ser uniformemente distribuído em toda superfície do solo da área em que será feita a calagem, de forma manual ou utilizando uma calcareadeira. Após a distribuição do calcário, deve-se realizar a sua incorporação em uma profundidade de 20 cm, por meio de aração seguida de gradagem.

Estes processos devem ser realizados no estado de umidade ótimo para mecanização do solo. Este critério evita a destruição da estrutura do solo, o que ocorre pela pulverização do solo arado em estado seco. No caso de áreas não mecanizáveis, deve-se distribuir o calcário em toda a superfície do solo, sem a incorporação. Para isto, deve-se considerar uma incorporação natural da camada de 5 cm.

Preferencialmente, a calagem deve ser realizada de dois a três meses antes do plantio, sendo este o tempo necessário para que as reações esperadas ocorram, sendo feita, preferencialmente, na época das chuvas, o que promoverá maior eficiência da calagem.

Deverá ser utilizado calcário dolomítico, visto que a calagem terá como objetivo a elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , devendo-se dar preferência ao que apresentar uma relação Ca/Mg entre 3/1 e 4/1.

- **Coroamento**

O coroamento deve ser feito na muda ou na regeneração natural, num raio de aproximadamente 50 cm da muda. Diferente da roçada, o coroamento deverá ser feito de forma manual tomando cuidado para remover o sistema radicular da espécie competidora e não ferir a muda ou o indivíduo regenerante. Deve-se atentar para não só remover a parte aérea das plantas competidoras, como também para remover os da base das touceiras e estolões, a fim de retardar possíveis rebrotas da vegetação invasora indesejável.

- **Espaçamento e marcação das covas**

A abertura das covas poderá ser realizada manualmente com a utilização de cavadeiras tipo alavanca e/ou boca de lobo, assim como utilizando mecanização. As dimensões das covas deverão variar conforme a qualidade do solo e deverão ter os seguintes padrões:

- 0,20m de largura x 0,20m de comprimento x 0,20m de profundidade que poderão ser utilizados em solos bem profundos e estruturados, livres de compactação aparente;
- 0,30m de largura x 0,30m de comprimento x 0,30m de profundidade que deverão ser utilizados em solos levemente compactados, mas que possuam boa estruturação e profundidade adequada;
- 0,40m de largura x 0,40m de comprimento x 0,40m de profundidade que deverão ser utilizados em solos com alto grau de antropização, compactados e estruturação comprometida;
- 0,50m de largura x 0,50m comprimento x 0,50m profundidade, deverão ser utilizados em locais altamente antropizados onde houve a remoção ou do horizonte "A" do solo ou sua mistura entre camadas do solo (áreas de empréstimo ou cascalheiras), em áreas de pilhas de estéril ou locais destinados como "bota-fora".

A justificativa para a baixa densidade de mudas é hidrológica, pois tendo em vista o estado de degradação da sub-bacias da bacia do rio Doce, plantios muito adensados podem reduzir a vazão imediata, ou em casos extremos, eliminar o remanescente hídrico existente. Por essa razão, é necessário trabalhar de maneira integrada o uso do solo nas áreas de recarga hídrica, a fim de garantir outros serviços ecossistêmicos essenciais prestados pela vegetação florestal e regularizar e melhorar a vazão da microbacia.

5. Terceira ação de recuperação - plantio

- **Adubação**

A recomendação de adubação deverá ser feita com base nos resultados da análise do solo e os resultados trazidos pelo inventário diagnóstico de ecossistema de referência. Em geral, as áreas degradadas são carentes de elementos minerais, exigindo, portanto, o emprego de uma adubação bem balanceada, de forma a compensar a carência de NPK no solo.

No entanto, existem poucas pesquisas sobre demandas de nutrientes por espécies nativas, justamente por se tratar de um grande número de espécies. Portanto, o que geralmente é feito é utilizar

recomendações para espécies florestais mais exigentes e que atendam o maior número de espécies possíveis, não exigentes.

Duas formas de adubação são possíveis, química e orgânica. Caso a análise de solo apresente locais com extrema carência de nutrientes, principalmente NPK é necessário proceder à adubação química. Em locais que os níveis não sejam tão baixos sugerimos apenas uma complementação com adubo orgânico, esterco bovino curtido ou esterco de galinha. Além disso, em locais com quadro de pobreza de nutrientes, sugerimos a aplicação de um coquetel de micronutrientes, principalmente B e Zn. Estes nutrientes podem ser aplicados conjuntamente com o N, P e K, através de formulações de adubos que contenham 0,3% de B e 0,5% de Zn, ou então, o FTE (“Fritas”) (GONÇALVES; BENEDETTI, 2000).

As características e a quantidade de fertilizante aplicado dependerão das necessidades nutricionais da espécie utilizada, da fertilidade do solo ou substrato, da forma de reação dos adubos com o solo e da eficiência dos adubos. Os nutrientes fornecidos às mudas devem ser disponibilizados de acordo com a necessidade delas, levando em consideração o tempo necessário para sua formação.

A adubação orgânica deve ser realizada misturando o adubo químico à terra de enchimento das covas, juntamente com a adubação fosfatada. Deverá ser utilizado, para cada cova, 2 litros de esterco de curral bem curtido por cova e no caso de esterco de galinha, a quantidade deve ser de 1/3 do esterco bovino. Junto à adubação orgânica deverá ser adicionado, por cova, 100 g de calcário dolomítico para cada tonelada calculada.

- Aplicação do hidrogel

O hidrogel é um polímero hidrorretentor que aumenta a capacidade de retenção da água no solo, fazendo com que fique disponível por mais tempo para as plantas. A adição de hidrogéis no solo otimiza a disponibilidade de água, reduz as perdas por percolação e lixiviação de nutrientes e melhora a aeração e drenagem do solo, acelerando o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas (HENDERSON; HENSLEY, 1986; LAMONT; O’CONNELL, 1987; VLACH, 1991). Os hidrogéis atuam como condicionadores de umidade no solo, sendo um polímero hidrorretentor, a base de poliacrilato de potássio, que auxilia principalmente na retenção e disponibilidade de água para as plântulas e mudas recém-plantadas.

O plantio será feito sempre no período chuvoso na intenção de diminuir a necessidade da irrigação, mas sempre que for possível (disponibilidade de água no local) e necessário (longo período de estiagem durante os primeiros meses de plantio), deverá ser refeita a hidratação do gel das mudas. A observação das mudas é essencial nesse período, pois é ela quem dará o sinal do momento certo da irrigação, pois a combinação de altas temperaturas do solo com um período muito prolongado sem chuva, logo após o plantio, reduz a água disponível no gel tornando necessário hidratá-lo.

Para aumentar a resistência das mudas aos períodos secos ou aos intervalos entre irrigação, recomenda-se o uso de hidrogel no momento do plantio. Segundo o fabricante, para as condições da bacia, deve ser utilizada a formulação 3 g do produto para cada litro de água. Portanto, deve-se diluir 3 kg do gel Hydroplan-EB em 1000 litros de água. Devem ser aplicados 2 L de solução de hidrogel por cova de plantio. A solução deve ser aplicada após o posicionamento da muda e o preenchimento da cova até a metade da altura do torrão de solo que acompanha as raízes da muda. Após a aplicação do hidrogel, deve-se preencher o restante da cova com solo, misturando-o ao hidrogel aplicado.

- Controle de formigas

Dentre as diferentes pragas que atacam plantios florestais, as formigas cortadeiras, dos gêneros *Atta* (saúvas) e *Acromyrmex* (quenquéns), são as responsáveis pelos maiores prejuízos. A título de ilustração, um saúva adulto, com aproximadamente três anos de idade consome, por ano, uma tonelada de folhas para se manter, e cada ano o número de formigueiros em uma área desprovida de controle pode triplicar (PAIVA et al., 2001). Desta forma, o combate a formigas cortadeiras em qualquer atividade de plantio florestal é de vital importância para o sucesso do mesmo.

Para o controle das formigas, usar iscas granuladas, a razão de 10 g/m² de formigueiro e em dias não chuvosos e com baixa umidade relativa do ar. Poderá ser também efetivada, principalmente, em dias chuvosos, com o pó formicida, que será colocado nos “olheiros”, na razão de 20 g/m² de formigueiro, por meio de uma insufladora de acionamento manual. Os trabalhadores devem, obrigatoriamente, utilizar os EPI exigidos. Todas as indicações contidas na FISPQ do produto deverão ser rigorosamente seguidas. Paiva et al. (2001) lista as seguintes etapas de combate como fundamentais para o controle das formigas cortadeiras:

1) Combate inicial: Consiste em realizar o controle em toda a área a ser plantada bem como em reservas de mata nativa do entorno e numa faixa de 100 metros de largura ao redor de toda área antes do início das atividades. A aplicação, deve ser feita de forma sistemática pela área na proporção de 10 gramas de formicida do tipo Mirex-S Max por m² de terra solta do formigueiro. A medição da área deve ser feita através das maiores dimensões longitudinais e transversais do formigueiro. No caso de quenquéns deve-se aplicar apenas 10 gramas por formigueiro identificado, que são bem menores que o das saúvas. As iscas devem ser aplicadas ao lado do formigueiro principal e próximo aos olheiros ativos. Não se deve aplicar as iscas dentro dos olheiros, pois serão rejeitadas pelas formigas. Para não haver contato do aplicador com o produto, recomenda-se o uso de luvas de látex.

2) Repasse: Esta etapa visa combater os formigueiros que resistiram e não foram totalmente controlados no combate inicial, bem como aqueles que não foram localizados na primeira operação. O repasse é feito dias antes do plantio e durante e logo após a implantação.

3) Ronda (pós-plantio): A ronda é a operação que é feita ao longo de todo o período de crescimento das mudas, até o segundo ano pós-plantio. Após o plantio a ronda é feita frequentemente nos primeiros 2 meses e depois a cada 3 meses. Nesta fase, o combate deve ser feito através da aplicação de 10 gramas por m² somente na vizinhança das mudas que foram cortadas, e com 10 gramas nos olheiros.

- Plantio

Esse tópico é direcionado para plantio total, plantio de sementes, adensamento e enriquecimento.

Antes da expedição das mudas para o campo, elas serão avaliadas quanto a sua qualidade e sanidade da parte aérea e radicular. Deverão ser colocadas nas caixas de distribuição misturadas, todavia obedecendo os respectivos percentuais e o número de espécies.

No ato do plantio as mudas devem estar com o coleto, aproximadamente, a 2 cm abaixo do nível do solo e com apertos laterais, juntar a terra do berço a do substrato que envolve a muda e nunca apertar a muda de cima para baixo. Ao redor da muda deve ser feito um ligeiro abaciamento, para acúmulo de água de chuva e também e deposição de matéria orgânica seca ao seu redor.

Em seguida a essas operações, fazer um coroamento idêntico ao projetado à regeneração natural. O replantio deverá ser feito dentro de 30 dias quando houver mais de 5% de falha. Após isso anualmente, dentro das próximas estações chuvosas e por 3 anos.

Em todas as campanhas de manutenção estima-se uma taxa acumulada de perdas de 20%. Este número é de fato maior do que referências estabelecidas como RODRIGUES et al. (2009) que preveem 10% de mortalidade. No entanto, outras referências de alguns dos mesmos autores reportam possibilidade de mortalidade de maiores que 10% após campanhas de replantio (BRANCALION et al., 2012). Portanto, considera-se 20% um valor seguro, tendo em vistas as variáveis ambientais da bacia, bem como sua distribuição pluviométrica.

O plantio total ocorre em toda a área destinada a recuperação e segue os espaçamentos adequados, com diferenciação para nascentes e APPs e Áreas de Recarga Hídrica.

O plantio de adensamento deve ocorrer caso a comunidade regenerante apresente distribuição espacial e/ou densidade de indivíduos regenerantes insatisfatórias para que a regeneração resulte na formação de uma fisionomia florestal em toda a área a ser restaurada dentro de um período razoável e sem intervenção humana, tornando-se necessárias não só ações que favoreça os indivíduos ali presentes como também ações que promovam a ocupação dos espaços vazios (BRANCALION; RODRIGUES; GANDOLFI, 2015). O adensamento deverá ocorrer com o plantio de espécies do grupo de recobrimento e dentro dos espaçamentos previamente estabelecidos.

Caso o local trabalhado apresente vegetação densa e bem distribuída, mas com ocorrência quase que exclusivamente de poucas espécies iniciais, e onde não há incremento por espécies de grupos de diversidade, havendo pouca chance de isso ocorrer em virtude da ausência de fontes de propágulos no entorno, faz-se necessário o uso da técnica de enriquecimento. O enriquecimento deverá ocorrer com o plantio de espécies de diversidade e dentro dos espaçamentos previamente estabelecidos.

Quanto ao plantio direto de sementes, para o realizar, a metodologia adotada será a muvuca. Essa técnica consiste na mistura de sementes de adubação verde (leguminosas anuais e subperenes) e espécies florestais de diferentes estágios sucessionais. Segundo URZEDO et al. (2016), a semeadura direta primeiramente se dá através do preparo do solo, e posteriormente são feitas duas gradagens com intervalo de um mês entre elas, para descompactar o solo e garantir maior eficiência no combate às gramíneas. Para o plantio utilizam-se semeadoras acopladas a tratores, as mesmas utilizadas pelos agricultores no plantio de grãos ou gramíneas. São plantadas em média 300 mil sementes por hectare (um terço de árvores nativas, um terço de nativas secundárias e um terço de leguminosas anuais e subperenes), misturadas com 50 kg a 150 kg de areia por hectare. São selecionadas em média setenta espécies para cada área de plantio, com composição variável em função dos diferentes tipos de vegetação.

Além da metodologia listada acima, variações também são possíveis. O preparo do solo em locais menos acessíveis também pode ser feito de forma manual ou até mesmo com tração animal e o plantio das sementes pode ser feito com outros implementos como calcareadeira ou até mesmo manualmente a lanço. De fato, o plantio de muvuca de sementes vem sendo adotado em diversas regiões do Brasil, e o seu uso é estimulado por instituições públicas e privadas (CAMPOS-FILHO et al., 2013; DURIGAN GISELDA; GUERIN NATALIA; DA COSTA JOSÉ NICOLA MARTORANO NEVES, 2013; PIETRO-SOUZA; SILVA, 2015).

6. Quarta ação de recuperação - replantio

Em caso de mortalidade e caso haja necessidade de replantio, os processos seguirão todas as etapas anteriores apontadas na terceira ação de recuperação, que envolvem, adubação, aplicação de hidrogel, controle de formigas e o replantio.

7. Quinta ação de recuperação – Manutenção

A manutenção deverá ocorrer pelo período de 3 anos após a implantação. A manutenção dos aceiros deverá ser uma atividade constante até o término da manutenção. A metodologia deverá ser a mesma daquela abordada na primeira ação de recuperação. A intensidade das limpezas deverá ser maior nos períodos de seca onde há maior risco de incêndios nas regiões onde se está trabalhando, e menor na época das chuvas.

Quanto ao cercamento, a integridade da cerca deverá ser checada ao longo de todas as campanhas de manutenção e tão logo alguma cerca danificada seja identificada, os responsáveis deverão consertá-la e buscar saber o motivo pelo qual a cerca foi cortada, para então adotar medidas preventivas.

O método empregado para o controle de formigas deverá ser mesmo já abordado para a implantação e na mesma periodicidade das campanhas de manutenção. Caso ao término do plantio se verifique que a intensidade de ocorrência das formigas não reduziu em função do controle já aplicado, as rondas deverão permanecer na mesma intensidade até que se constate o declínio. Nesse caso, as campanhas de controle não deverão acompanhar o calendário de manutenções e sim permanecer continuamente.

A reposição das mudas deve ocorrer anualmente e no início da estação das chuvas. Atenção deve ser tomada para utilizar adubação fosfatada nas mudas que estiverem sendo replantadas, respeitando a recomendação feita anteriormente. No primeiro ano e na medida do possível, as mudas também deverão ser compatíveis em termos de tamanho com as sobreviventes e grupos de plantio com a que morreu.

Quanto as roçadas e coroamento, o controle de plantas competidoras durante a condução da restauração é essencial para reduzir a competição por água, luz e nutrientes de plantas invasoras com indivíduos plantados. Embora qualquer planta que se desenvolva no entorno da muda possa prejudicar seu desenvolvimento por causa da competição por recursos, são as gramíneas africanas agressivas, notadamente a braquiária, o capim gordura e o colômbio que são os alvos principais da manutenção. No entanto, para a manutenção deve-se ter atenção especial para que o controle mecânico (enxadas e enxadões) ou mecanizado, não prejudiquem as mudas já plantadas.

8. Sexta ação de recuperação – Monitoramento

O monitoramento como ação de restauração se destina a verificar a necessidade de enriquecimento das áreas em processo de recuperação com espécies diversas. Pelo fato da maioria dos locais trabalhados serem áreas com uso excessivo do solo e em diferentes níveis de degradação, adotar uma estratégia que invista em autossuficiência do sistema e com espécies chave de diversidade pode representar um risco muito grande, tendo em vista que boa parte destas espécies têm estabelecimento lento e são sensíveis a determinados filtros ambientais. Entretanto, se por outro lado investir em estrutura, para superar boa parte desses filtros, podemos ter em menos tempo uma vegetação já estabelecida, fornecendo alguns serviços ambientais (como melhoria da infiltração da água no solo) e consequentemente, fornece ambientes mais amenos para o estabelecimento de outras espécies.

Portanto, o monitoramento dessas áreas se presta a verificar se já existe alguma autossuficiência daquele local, o que seria indicado pelo recrutamento de novos indivíduos, configurando assim como enriquecimento natural. Caso isto não ocorra, fica constatada a necessidade de enriquecimento via plantio de espécies de diversidade.

APÊNDICE C – APROFUNDAMENTO TEÓRICO SOBRE A DINÂMICA DA MOS NO SOLO

O solo é o principal reservatório da biodiversidade do planeta, onde ocorrem inúmeros processos biológicos e ecológicos que contribuem para o fornecimento de diversos serviços ecossistêmicos. É no solo que se encontra o principal reservatório de carbono dentre os compartimentos ambientais terrestres (BHATTACHARYA et al., 2016). Até um metro de profundidade, estima-se que haja de 1.300 a 2.000 Pg de C estocado no solo (OLIVEIRA; REATTO; ROIG, 2015; POST, 2006).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais componentes dessa matriz, condicionando diversas características químicas, físicas e biológicas do solo (DICK; GREGORICH, 2004; TAN, 2003; BAYER; MIELNICZUK, 2008). Devido à heterogeneidade de seus componentes, a MOS é comumente representada por seu elemento mais abundante: o carbono orgânico do solo (COS).

Para melhor entendimento sobre sua dinâmica, frequentemente a MOS é dividida em frações. Uma maneira de compartimentalizar a MOS é separando-a em dois grupos teóricos em termos de complexidade estrutural e tempo de residência no solo: matéria orgânica fresca e matéria orgânica humificada. O primeiro grupo é constituído de produtos da decomposição de resíduos orgânicos e do metabolismo microbiano (GUERRA et al., 2008), cuja dinâmica no solo é mais rápida (meses a décadas), enquanto que o segundo grupo é representado pelas substâncias húmicas, que são bastante estáveis e recalcitrantes no solo (formando associações com a fração mineral) e que apresentam dinâmica muito lenta (séculos a milênios) (RICE et al., 2006). De maneira geral, as macromoléculas representadas pelo primeiro grupo compõem de 10 a 15% da MOS total enquanto que as substâncias húmicas constituem a maioria da reserva de C do solo (entre 85 a 90%) (GUERRA et al., 2008; SANDERMAN; AMUNDSON, 2014).

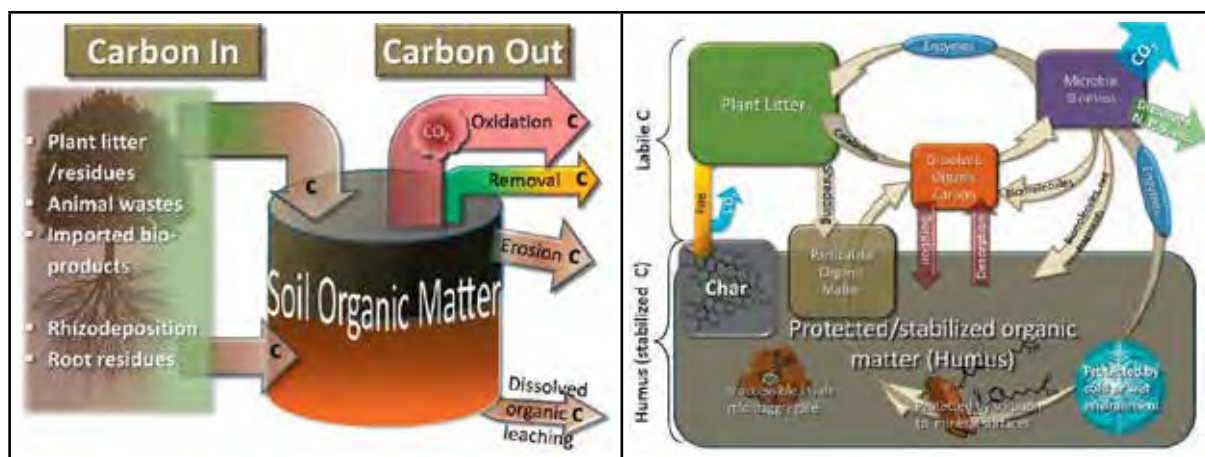
As substâncias húmicas são constituídas de uma série de compostos de coloração escura, de elevado peso molecular, separadas com base em características de solubilidade (GUERRA et al., 2008). Sua separação, de maneira geral, se dá em três frações de acordo com a solubilidade em meio ácido ou básico: a fração humina é insolúvel em meio alcalino, os ácidos húmicos são solúveis em meio alcalino e insolúveis em meio ácido, e os ácidos fúlvicos se mantêm em solução em ambas condições de pH do meio. No solo, as substâncias húmicas não estão separadas, mas antes fazem parte de uma mistura complexa e heterogênea de moléculas polimerizadas de natureza coloidal (definição clássica), e são responsáveis por desempenhar diversas funções. Devido à sua natureza anfífila (suas moléculas contêm tanto grupos polares - como ácidos carboxílicos e fenólicos, p.e. - quanto apolares) (NOVOTNY; MARTIN-NETO, 2008) e anfótera (substância com potencial para se comportar como ácido ou base, desenvolvendo cargas negativas e/ou positivas), as substâncias húmicas são responsáveis em grande parte pela formação de cargas em solos tropicais, conferindo-lhes potencial de troca catiônica (CTC) e troca aniônica (CTA). A CTC da fração húmica da MOS pode chegar a valores em torno de 400-800 cmolc kg⁻¹ (BAYER; MIELNICZUK, 2008), valores estes muito superiores aos encontrados em minerais secundários comuns em solos intemperizados.

Dentre as características químicas do solo afetadas pela MOS, ressalta-se o chamado efeito tampão, ou seja, devido as suas cargas a MOS (e em especial, o compartimento das substâncias húmicas) é responsável pela resiliência do solo no sentido de atenuar mudanças bruscas de pH, reduzir o efeito de contaminantes e elementos tóxicos e promover a capacidade de retenção de nutrientes (reserva

mineral) (BRADY; WEIL, 2010). Ainda, a própria MOS serve como fonte de macro e micronutrientes às plantas, atuando tanto como fonte quanto como dreno de elementos e sendo o fator primordial para a ciclagem de nutrientes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; TAN, 2003). Do ponto de vista físico, a MOS tem efeito cimentante no solo, promovendo a formação de agregados e, indiretamente, condicionando as demais características físicas do solo, tais como estruturação, densidade, porosidade, aeração e capacidade de infiltração de água (BAYER; MIELNICZUK, 2008; TAN, 2003). Por fim, a MOS é determinante para as características biológicas do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), pois é a partir dela que os microorganismos quimioheterotróficos e quimioautotróficos obtêm sua fonte de energia e nutrientes (BAYER; MIELNICZUK, 2008), além de a própria biomassa microbiana fazer parte de sua constituição.

O conteúdo de MOS que se acumula no solo é determinado pela diferença entre as quantidades de carbono adicionadas e as quantidades perdidas (BAYER; MIELNICZUK, 2008). A dinâmica de decomposição da MOS, ou seja, sua variação temporal, é descrita de forma geral como assumindo uma cinética de primeira ordem, o que significaria que, em teoria, o acúmulo de C no solo poderia crescer indefinidamente. No entanto, na prática ocorre uma saturação de C no solo (SIX et al., 2002) e por consequência, mesmo que ocorram adições constantes de grandes quantidades de material orgânico no solo existe um limite de acúmulo ditado pela dinâmica de transferência do C entre os compartimentos, transformando as frações mais lábeis (mais facilmente decomponíveis) em frações mais estáveis (Figura 1). Os teores de MOS em solos minerais, por exemplo, geralmente não ultrapassam 5% da constituição total do solo (WEIL; BRADY, 2017). De acordo com manuais de interpretação de análise de solo para fins agrônômicos, teores de MOS entre 3 e 7% são considerados altos ou satisfatórios (CQFS, 2004; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999; SBCS, 2017) e teores mais elevados do que estes são encontrados apenas em solos orgânicos ou hidromórficos.

Apêndice C – Figura 1 – Esquemas representando a dinâmica da matéria orgânica no solo.



Fonte: Weil e Brady (2017, adaptado).

Devido à heterogeneidade de seus componentes, a MOS é comumente representada por seu elemento mais abundante: o carbono orgânico do solo (COS). De maneira geral, cerca de 58% da matéria orgânica bruta do solo é representada pelo C (STOCKMANN et al, 2013). Assim, a quantificação da MOS se dá indiretamente através da quantificação do C (BRADY; WEIL, 2010), que por sua vez pode ser realizada por dois métodos. A chamada combustão por via úmida (Walkley-Black) é o método mais empregado em laboratórios de rotina de solo. Nessa metodologia, o C é oxidado por íons dicromato

em excesso; o dicromato residual é titulado com sulfato ferroso amoniacal, e por isso o método é chamado de método indireto de quantificação do C. Outro detalhe sobre essa metodologia é que a oxidação ocorre apenas para a matéria orgânica facilmente oxidável e, portanto, não quantifica a fração estável (substâncias húmicas). Por outro lado, a combustão seca é realizada em equipamentos automatizados (conhecidos por analisadores elementares), em que a amostra é aquecida a aproximadamente 1.000°C e o CO₂ evoluído da decomposição é mensurado por cromatografia (GUERRA; SANTOS, 2008). Embora espere-se que as concentrações de C obtidas pelo método Walkley-Black sejam inferiores às concentrações obtidas pela combustão seca, Dieckow et al., (2007) afirmam que a escolha entre os dois métodos de quantificação do COS não afeta a interpretação acerca de efeitos de manejo sobre o estoque de C do solo devido à alta correlação entre as metodologias ($R^2 > 0,96$), o que permite conclusões comparáveis em estudos sobre a MOS.

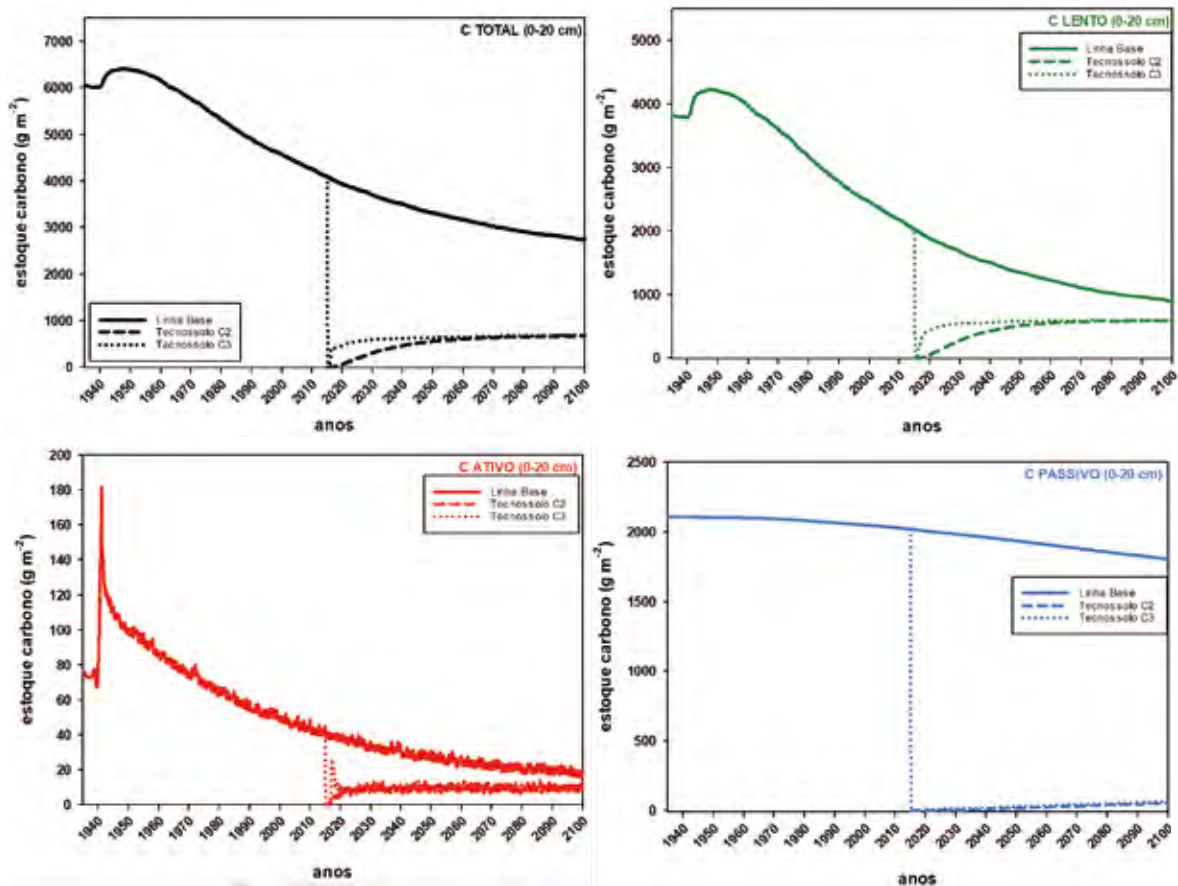
APÊNDICE D – DETALHAMENTO DOS CENÁRIOS C2 E C4

As diferenças entre os cenários C2, C3, C4 e C5 basearam-se nos eventos simulados com base no mesmo *site file*. Para o C2, a mesma sequência de eventos utilizada no C1 foi repetida, ou seja, a mesma pastagem de linha base (G2) foi simulada tanto no solo natural quanto no Tecnossolo, buscando representar a curva de recuperação passiva do COS.

O cenário C4 foi criado para representar a curva de recuperação ativa do COS, ou seja, levando em consideração práticas de manejo anuais que promovem a manutenção e/ou incremento na qualidade e quantidade de matéria orgânica, resultando na melhora das propriedades físicas e químicas do solo, tais como rotação de culturas e aplicações balanceadas de fertilizantes combinados com esterco animal (BHATTACHARYA et al., 2016; HUESO-GONZÁLEZ; MUÑOZ-ROJAS; MARTÍNEZ-MURILLO, 2018; LIU et al., 2006). Para este cenário foram inseridas práticas agrícolas anuais e permanentes ao longo da série histórica. Os mesmos eventos do cenário C3 foram repetidos, e a partir do ano de 2020 foram incorporadas ações de adubação mineral de manutenção (MED, *fert.100*) todos os anos para repor os nutrientes ao solo (seguindo o Manual de Recomendações para o Uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais – Ribeiro; Guimarães; Alvarez, 1999), aliado à adubação verde com espécies fixadoras de nitrogênio a cada três anos (CLV1, *crop.100*) e adições anuais de esterco bovino ao solo (C, *omad.100*). O esterco bovino é abundante na região, uma vez que o principal uso do solo para fins econômicos é o pasto (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c), utilizado na criação extensiva de gado.

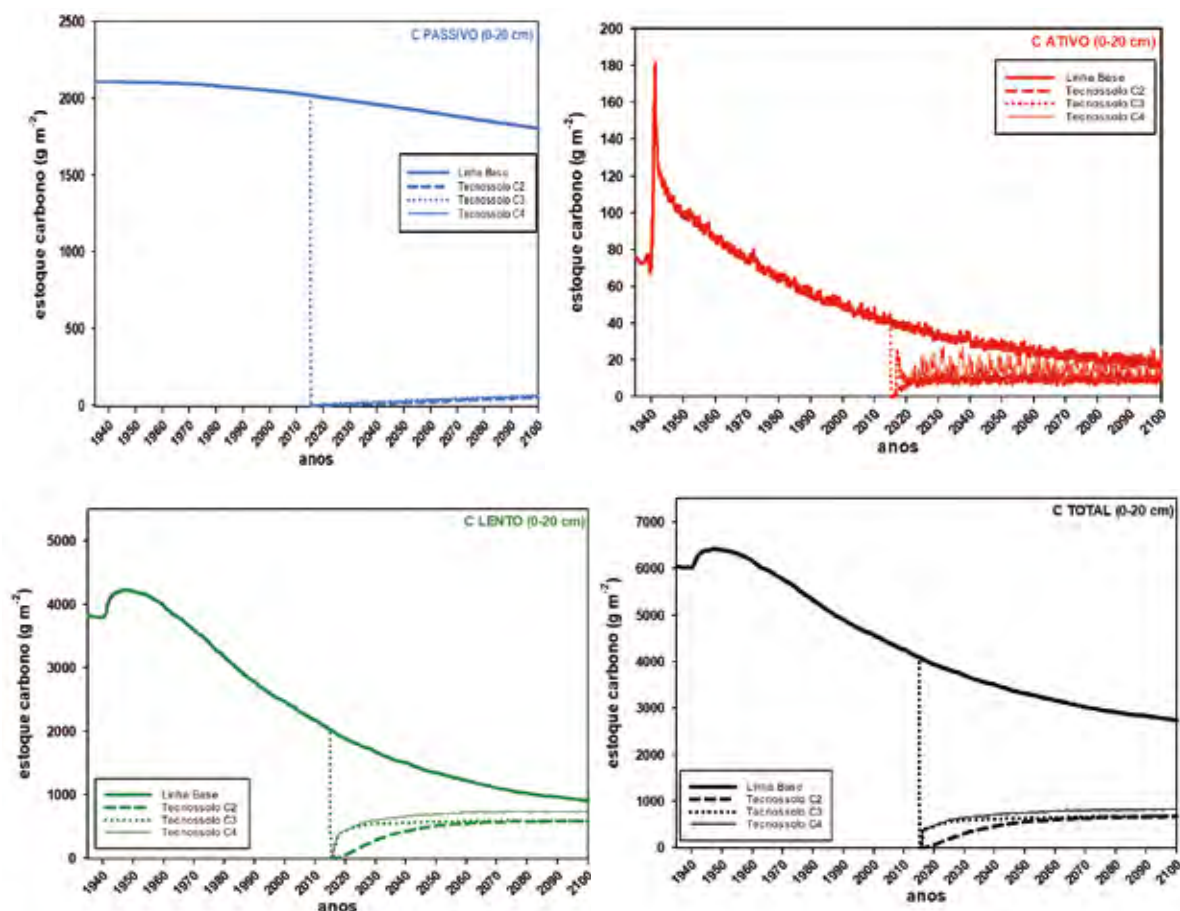
Os estoques de C obtidos nas simulações do Century para os pools passivo, lento, ativo e total, de acordo com os cenários 2, 3 e 4 (todos considerando a recuperação da área afetada com pastagens recobrindo o Tecnossolo), são apresentados na Figura 1 e Apêndice D – Figura 2.

Apêndice D – Figura 1 – Estoques de carbono do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para os cenários de linha base e do Tecnossolo (C2 e C3).



Fonte: Lactec, 2021.

Apêndice D – Figura 2 – Estoques de carbono do solo (camada 0-20 cm; pools passivo, lento, ativo e total) simulados para os cenários de linha base e do Tecnossolo (C2, C3 e C4).



Fonte: Lactec, 2021.

Quando práticas anuais de manejo da pastagem são incorporadas no modelo (cenário 4), observa-se a construção do estoque de C no Tecnossolo (incremento de 145 g m^{-2} em comparação ao C3) de maneira constante ao longo do tempo, mas ainda insuficiente para atingir os níveis de linha base (Apêndice D – Figura 02). As características físicas do Tecnossolo demonstram a elevada densidade e a baixa macroporosidade desse material ($1,95 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,08 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$, respectivamente) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) e podem explicar o possível desenvolvimento limitado das gramíneas. Novamente, assim como ocorrido para o C3, a fração passiva do C se mantém praticamente inalterada no cenário 4, pois o horizonte de tempo simulado é inferior à escala de tempo necessária para a reconstrução dessa fração (séculos a milênios) (RICE et al., 2006).

Conforme descrito no item do habitat solo, as substâncias húmicas tem papel fundamental para o funcionamento dos solos (TAN, 2003). Nesse sentido, as ações sugeridas para a recuperação ativa do C no Tecnossolo (rotação com adubos verdes, manutenção da fertilidade do solo por meio da aplicação de fertilizantes minerais e orgânicos) parecem não surtir efeito para a recuperação total do compartimento passivo e, portanto, para o C total. No entanto, os incrementos das frações ativa e lenta observados no C4 (Apêndice D – Figura 02) reforçam a importância de práticas de manejo que promovam melhores condições para o desenvolvimento do pasto. A fração ativa da MOS, embora presente em menor proporção devido à sua maior labilidade (ROSENDO; ROSA, 2018), é a engrenagem responsável por alimentar as funções bioquímicas do solo e, com isso, é fundamental para a ciclagem de nutrientes (e da própria MOS) e pela regulação da disponibilidade e fluxo de elementos no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006. SANDERMAN; AMUNDSON, 2014).

APÊNDICE E – INFORMAÇÕES UTILIZADAS PARA A CONSTRUÇÃO DOS MODELOS NO CENTURY DE TODOS OS CENÁRIOS SIMULADOS

Site file cenário de equilíbrio

*** Climate parameters	11.36000	'TMN2M(7)'	0.23700	'AFIEL(1)'
26.58000	'PRECIP(1)'	12.32000	'TMN2M(8)'	0.23700
15.50000	'PRECIP(2)'	14.67000	'TMN2M(9)'	0.23700
16.85000	'PRECIP(3)'	16.81000	'TMN2M(10)'	0.23700
7.77000	'PRECIP(4)'	17.77000	'TMN2M(11)'	0.23700
3.52000	'PRECIP(5)'	18.39000	'TMN2M(12)'	0.23700
1.26000	'PRECIP(6)'	28.81000	'TMX2M(1)'	0.23700
0.86000	'PRECIP(7)'	29.42000	'TMX2M(2)'	0.23700
1.70000	'PRECIP(8)'	28.85000	'TMX2M(3)'	0.0000
5.14000	'PRECIP(9)'	27.56000	'TMX2M(4)'	0.00000
9.43000	'PRECIP(10)'	25.67000	'TMX2M(5)'	5.90000
21.80000	'PRECIP(11)'	24.79000	'TMX2M(6)'	0.50000
29.70000	'PRECIP(12)'	24.69000	'TMX2M(7)'	3.00000
16.32000	'PRCSTD(1)'	26.26000	'TMX2M(8)'	*** External nutrient input
8.04000	'PRCSTD(2)'	27.17000	'TMX2M(9)'	parameters
6.89000	'PRCSTD(3)'	27.82000	'TMX2M(10)'	0.21
4.92000	'PRCSTD(4)'	27.71000	'TMX2M(11)'	0.0028
2.57000	'PRCSTD(5)'	28.17000	'TMX2M(12)'	-0.92
1.54000	'PRCSTD(6)'	*** Site and control parameters	0.028	EPNFA(1)
1.07000	'PRCSTD(7)'	0.00000	'IVAUTO'	0.0
1.86000	'PRCSTD(8)'	1.00000	'NELEM'	0.0
3.48000	'PRCSTD(9)'	-20.16000	'SITLAT'	0.0
4.69000	'PRCSTD(10)'	-43.11000	'SITLNG'	0.0
8.02000	'PRCSTD(11)'	0.69750	'SAND'	*** Organic matter initial values
11.04000	'PRCSTD(12)'	0.15750	'SILT'	56.0
0.58000	'PRCSKW(1)'	0.14500	'CLAY'	0.0
0.33000	'PRCSKW(2)'	1.46000	'BULKD'	60.0
0.12000	'PRCSKW(3)'	7.00000	'NLAYER'	15.0
2.05000	'PRCSKW(4)'	7.00000	'NLAYPG'	3700.0
0.75000	'PRCSKW(5)'	0.75000	'DRAIN'	0.0
2.00000	'PRCSKW(6)'	0.30000	'BASEF'	2150.0
1.71000	'PRCSKW(7)'	0.60000	'STORMF'	0.0
1.31000	'PRCSKW(8)'	1.00000	'SWFLAG'	10.0
0.12000	'PRCSKW(9)'	0.14600	'AWILT(1)'	50.0
0.33000	'PRCSKW(10)'	0.14600	'AWILT(2)'	50.0
0.76000	'PRCSKW(11)'	0.14600	'AWILT(3)'	10.0
-0.15000	'PRCSKW(12)'	0.14600	'AWILT(4)'	50.0
18.61000	'TMN2M(1)'	0.14600	'AWILT(5)'	50.0
18.60000	'TMN2M(2)'	0.14600	'AWILT(6)'	17.0
18.18000	'TMN2M(3)'	0.14600	'AWILT(7)'	117.0
16.42000	'TMN2M(4)'	0.14600	'AWILT(8)'	117.0
13.61000	'TMN2M(5)'	0.00000	'AWILT(9)'	7.0
11.85000	'TMN2M(6)'	0.00000	'AWILT(10)'	62.0
				62.0
				RCES1(1,1)
				SOM1CI(1,2)
				SOM1CI(2,1)
				SOM1CI(2,2)
				SOM2CI(1)
				SOM2CI(2)
				SOM3CI(1)
				SOM3CI(2)
				RCES1(1,1)
				RCES1(1,2)
				RCES1(1,3)
				RCES1(2,1)
				RCES1(2,2)
				RCES1(2,3)
				RCES2(1)
				RCES2(2)
				RCES2(3)
				RCES3(1)
				RCES3(2)
				RCES3(3)

100.0	CLITTR(1,1)	65.5	CRTCIS(1)	50.0	PARENT(2)
0.0	CLITTR(1,2)	0.0	CRTCIS(2)	50.0	PARENT(3)
100.0	CLITTR(2,1)	3.4	CROOTE(1)	0.0	SECNDY(1)
0.0	CLITTR(2,2)	0.09	CROOTE(2)	15.0	SECNDY(2)
66.0	RCELIT(1,1)	0.0	CROOTE(3)	2.0	SECNDY(3)
300.0	RCELIT(1,2)	0.0	WD1CIS(1)	0.0	OCCLUD
300.0	RCELIT(1,3)	0.0	WD1CIS(2)	*** Water initial parameters	
66.0	RCELIT(2,1)	0.0	WD2CIS(1)	0.00000	'RWCF(1)'
300.0	RCELIT(2,2)	0.0	WD2CIS(2)	0.00000	'RWCF(2)'
300.0	RCELIT(2,3)	0.0	WD3CIS(1)	0.00000	'RWCF(3)'
0.0	AGLCIS(1)	0.0	WD3CIS(2)	0.00000	'RWCF(4)'
0.0	AGLCIS(2)	0.3	W1LIG	0.00000	'RWCF(5)'
0.0	AGLIVE(1)	0.3	W2LIG	0.00000	'RWCF(6)'
0.0	AGLIVE(2)	0.3	W3LIG	0.00000	'RWCF(7)'
0.0	AGLIVE(3)	*** Mineral initial parameters		0.00000	'RWCF(8)'
0.0	BGLCIS(1)	0.25	MINERL(1,1)	0.00000	'RWCF(9)'
0.0	BGLCIS(2)	0.0	MINERL(2,1)	0.00000	'RWCF(10)'
3.6	BGLIVE(1)	0.0	MINERL(3,1)	0.00000	'SNLQ'
0.45	BGLIVE(2)	0.0	MINERL(4,1)	0.00000	'SNOW'
0.45	BGLIVE(3)	0.0	MINERL(5,1)	Schedule file cenário equilíbrio	
50.0	STDCIS(1)	0.0	MINERL(6,1)	0	Starting year
0.0	STDCIS(2)	0.0	MINERL(7,1)	6000	Last year
0.8	STDEDE(1)	0.0	MINERL(8,1)	Riodoce_PRE.100	
0.2	STDEDE(2)	0.0	MINERL(9,1)	Site file name	
0.2	STDEDE(3)	0.0	MINERL(10,1)	0	Labeling type
*** Forest organic matter		0.5	MINERL(1,2)	-1	Labeling year
initial parameters		0.0	MINERL(2,2)	-1.00	Microcosm
25.6	RLVCIS(1)	0.0	MINERL(3,2)	-1	CO2 Systems
0.0	RLVCIS(2)	0.0	MINERL(4,2)	2	Initial system
1.4	RLEAVE(1)	0.0	MINERL(5,2)	Initial	crop
0.06	RLEAVE(2)	0.0	MINERL(6,2)	P RTP	Initial tree
0.0	RLEAVE(3)	0.0	MINERL(7,2)	Year	Month Option
93.6	FBR CIS(1)	0.0	MINERL(8,2)	1	Block
0.0	FBR CIS(2)	0.0	MINERL(9,2)	6000	Last year
3.3	FBR CHE(1)	0.0	MINERL(10,2)	1	Repeats # years
0.13	FBR CHE(2)	0.5	MINERL(1,3)	1	Output
0.0	FBR CHE(3)	0.0	MINERL(2,3)		starting year
611.1	RLWCIS(1)	0.0	MINERL(3,3)	1	Output month
0.0	RLWCIS(2)	0.0	MINERL(4,3)	1	Output interval
31.9	RLWODE(1)	0.0	MINERL(5,3)	S	Weather choice
0.87	RLWODE(2)	0.0	MINERL(6,3)	1	1 TREE P RTP
0.0	RLWODE(3)	0.0	MINERL(7,3)	1	1 TFST
65.5	FRTCIS(1)	0.0	MINERL(8,3)	1	8 TLST
0.0	FRTCIS(2)	0.0	MINERL(9,3)	-999	-99 X
2.3	FROOTE(1)	0.0	MINERL(10,3)	Tree.100 cenário equilíbrio e C5	
0.09	FROOTE(2)	0.0	PARENT(1)	P RTP	
0.0	FROOTE(3)				

0.0	'DECID'	155.0	'CERFOR(3,4,1)'	0.00	'WOODDR(1)'
1536.0	'PRDX(2)'	2260.0	'CERFOR(3,4,2)'	0.0533	'WOODDR(2)'
768.0	'PRDX(3)'	0.0	'CERFOR(3,4,3)'	0.015	'WOODDR(3)'
30.0	'PPDF(1)'	155.0	'CERFOR(3,5,1)'	0.0006	'WOODDR(4)'
45.0	'PPDF(2)'	2478.0	'CERFOR(3,5,2)'	0.0015	'WOODDR(5)'
1.0	'PPDF(3)'	0.0	'CERFOR(3,5,3)'	0.0	'SNFXMX(2)'
2.5	'PPDF(4)'	0.5	'DECW1'	0.0	'DEL13C'
40.0	'CERFOR(1,1,1)'	0.1	'DECW2'	0.0	'CO2IPR(2)'
2122.0	'CERFOR(1,1,2)'	0.1	'DECW3'	0.0	'CO2ITR(2)'
0.0	'CERFOR(1,1,3)'	0.3	'FCFRAC(1,1)'	0.0	'CO2ICE(2,1,1)'
76.0	'CERFOR(1,2,1)'	0.3	'FCFRAC(2,1)'	0.0	'CO2ICE(2,1,2)'
765.0	'CERFOR(1,2,2)'	0.0	'FCFRAC(3,1)'	0.0	'CO2ICE(2,1,3)'
0.0	'CERFOR(1,2,3)'	0.3	'FCFRAC(4,1)'	0.0	'CO2ICE(2,2,1)'
84.0	'CERFOR(1,3,1)'	0.1	'FCFRAC(5,1)'	0.0	'CO2ICE(2,2,2)'
1366.0	'CERFOR(1,3,2)'	0.3	'FCFRAC(1,2)'	0.0	'CO2ICE(2,2,3)'
0.0	'CERFOR(1,3,3)'	0.3	'FCFRAC(2,2)'	0.0	'CO2IRS(2)'
155.0	'CERFOR(1,4,1)'	0.0	'FCFRAC(3,2)'	1.0	'BASFC2'
2260.0	'CERFOR(1,4,2)'	0.3	'FCFRAC(4,2)'	400.0	'BASFC2'
0.0	'CERFOR(1,4,3)'	0.1	'FCFRAC(5,2)'	2400.0	'SITPOT'
155.0	'CERFOR(1,5,1)'	0.045	'LEAFDR(1)'	Site file cenário Linha Base	
2478.0	'CERFOR(1,5,2)'	0.045	'LEAFDR(2)'	*** Climate parameters	
0.0	'CERFOR(1,5,3)'	0.045	'LEAFDR(3)'	26.58	PRECIP(1)
40.0	'CERFOR(2,1,1)'	0.045	'LEAFDR(4)'	15.5	PRECIP(2)
2122.0	'CERFOR(2,1,2)'	0.045	'LEAFDR(5)'	16.85	PRECIP(3)
0.0	'CERFOR(2,1,3)'	0.045	'LEAFDR(6)'	7.77	PRECIP(4)
76.0	'CERFOR(2,2,1)'	0.045	'LEAFDR(7)'	3.52	PRECIP(5)
765.0	'CERFOR(2,2,2)'	0.045	'LEAFDR(8)'	1.26	PRECIP(6)
0.0	'CERFOR(2,2,3)'	0.045	'LEAFDR(9)'	0.86	PRECIP(7)
84.0	'CERFOR(2,3,1)'	0.045	'LEAFDR(10)'	1.7	PRECIP(8)
1366.0	'CERFOR(2,3,2)'	0.045	'LEAFDR(11)'	5.14	PRECIP(9)
0.0	'CERFOR(2,3,3)'	0.045	'LEAFDR(12)'	9.43	PRECIP(10)
155.0	'CERFOR(2,4,1)'	0.008232	'BTOLAI'	21.8	PRECIP(11)
2260.0	'CERFOR(2,4,2)'	1000.0	'KLAI'	29.7	PRECIP(12)
0.0	'CERFOR(2,4,3)'	-0.47	'LAITOP'	16.32	PRCSTD(1)
155.0	'CERFOR(2,5,1)'	4.0	'MAXLAI'	8.04	PRCSTD(2)
2478.0	'CERFOR(2,5,2)'	0.0	'MAXLDR'	6.89	PRCSTD(3)
0.0	'CERFOR(2,5,3)'	0.5	'FORRTF(1)'	4.92	PRCSTD(4)
40.0	'CERFOR(3,1,1)'	0.0	'FORRTF(2)'	2.57	PRCSTD(5)
2122.0	'CERFOR(3,1,2)'	0.0	'FORRTF(3)'	1.54	PRCSTD(6)
0.0	'CERFOR(3,1,3)'	1500	'SAPK'	1.07	PRCSTD(7)
76.0	'CERFOR(3,2,1)'	0.0	'SWOLD'	1.86	PRCSTD(8)
765.0	'CERFOR(3,2,2)'	0.2	'WDLIG(1)'	3.48	PRCSTD(9)
0.0	'CERFOR(3,2,3)'	0.2	'WDLIG(2)'	4.69	PRCSTD(10)
84.0	'CERFOR(3,3,1)'	0.25	'WDLIG(3)'	8.02	PRCSTD(11)
1366.0	'CERFOR(3,3,2)'	0.35	'WDLIG(4)'	11.04	PRCSTD(12)
0.0	'CERFOR(3,3,3)'	0.35	'WDLIG(5)'	0.58	PRCSKW(1)

0.33	PRCSKW(2)	0.75	DRAIN	50.	RCES1(1,3)
0.12	PRCSKW(3)	0.3	BASEF	5.5891	RCES1(2,1)
2.05	PRCSKW(4)	0.6	STORMF	50.	RCES1(2,2)
0.75	PRCSKW(5)	1.	SWFLAG	50.	RCES1(2,3)
2.	PRCSKW(6)	0.14427	AWILT(1)	15.434	RCES2(1)
1.71	PRCSKW(7)	0.1431	AWILT(2)	117.	RCES2(2)
1.31	PRCSKW(8)	0.14211	AWILT(3)	117.	RCES2(3)
0.12	PRCSKW(9)	0.14126	AWILT(4)	6.3898	RCES3(1)
0.33	PRCSKW(10)	0.14054	AWILT(5)	62.	RCES3(2)
0.76	PRCSKW(11)	0.13993	AWILT(6)	62.	RCES3(3)
-0.15	PRCSKW(12)	0.13941	AWILT(7)	279.39	CLITTR(1,1)
18.61	TMN2M(1)	0.13897	AWILT(8)	0.0	CLITTR(1,2)
18.6	TMN2M(2)	0.1386	AWILT(9)	238.2	CLITTR(2,1)
18.18	TMN2M(3)	0.13828	AWILT(10)	0.0	CLITTR(2,2)
16.42	TMN2M(4)	0.22211	AFIEL(1)	162.	RCELIT(1,1)
13.61	TMN2M(5)	0.22095	AFIEL(2)	300.	RCELIT(1,2)
11.85	TMN2M(6)	0.21997	AFIEL(3)	300.	RCELIT(1,3)
11.36	TMN2M(7)	0.21913	AFIEL(4)	152.38	RCELIT(2,1)
12.32	TMN2M(8)	0.21842	AFIEL(5)	300.	RCELIT(2,2)
14.67	TMN2M(9)	0.21781	AFIEL(6)	300.	RCELIT(2,3)
16.81	TMN2M(10)	0.2173	AFIEL(7)	0.0	AGLCIS(1)
17.77	TMN2M(11)	0.21686	AFIEL(8)	0.0	AGLCIS(2)
18.39	TMN2M(12)	0.21649	AFIEL(9)	0.0	AGLIVE(1)
28.81	TMX2M(1)	0.21618	AFIEL(10)	0.0	AGLIVE(2)
29.42	TMX2M(2)	5.9	PH	0.0	AGLIVE(3)
28.85	TMX2M(3)	0.5	PSLSRB	0.0	BGLCIS(1)
27.56	TMX2M(4)	3.	SORPMX	0.0	BGLCIS(2)
25.67	TMX2M(5)	*** External nutrient input parameters		3.6	BGLIVE(1)
24.79	TMX2M(6)	0.21	EPNFA(1)	0.45	BGLIVE(2)
24.69	TMX2M(7)	0.0028	EPNFA(2)	50.	STDCIS(1)
26.26	TMX2M(8)	-0.92	EPNFS(1)	0.0	STDCIS(2)
27.17	TMX2M(9)	0.028	EPNFS(2)	0.8	STDEDE(1)
27.82	TMX2M(10)	0.0	SATMOS(1)	0.2	STDEDE(2)
27.71	TMX2M(11)	0.0	SATMOS(2)	0.2	STDEDE(3)
28.17	TMX2M(12)	0.0	SIRRI	*** Forest organic matter initial parameters	
*** Site and control parameters		*** Organic matter initial values			
0.0	IVAUTO	79.062	SOM1CI(1,1)	385.57	RLVCIS(1)
1.	NELEM	0.0	SOM1CI(1,2)	0.0	RLVCIS(2)
20.16	SITLAT	118.13	SOM1CI(2,1)	9.6393	RLEAVE(1)
-43.11	SITLNG	2.1981E-09	SOM1CI(2,2)	0.06	RLEAVE(2)
0.6975	SAND	3799.7	SOM2CI(1)	0.0	RLEAVE(3)
0.1575	SILT	2.0469E-08	SOM2CI(2)	4.6243E-44	FBRCIS(1)
0.145	CLAY	2108.9	SOM3CI(1)	0.0	FBRCIS(2)
1.46	BULKD	4.908E-06	SOM3CI(2)	2.3822E-44	FBRCH(1)
7.	NLAYER	14.909	RCES1(1,1)	0.13	FBRCH(2)
7.	NLAYPG	50.	RCES1(1,2)	0.0	FBRCH(3)

32789.	RLWCIS(1)	0.0	MINERL(2,3)	0.0	METABE(1,3)
0.0	RLWCIS(2)	0.0	MINERL(3,3)	0.44967	METABE(2,1)
211.54	RLWODE(1)	0.0	MINERL(4,3)	0.0	METABE(2,2)
0.87	RLWODE(2)	0.0	MINERL(5,3)	0.0	METABE(2,3)
0.0	RLWODE(3)	0.0	MINERL(6,3)	5.3029	SOM1E(1,1)
316.48	FRTCIS(1)	0.0	MINERL(7,3)	1.12	SOM1E(1,2)
0.0	FRTCIS(2)	0.0	MINERL(8,3)	1.12	SOM1E(1,3)
4.1642	FROOTE(1)	0.0	MINERL(9,3)	21.136	SOM1E(2,1)
0.09	FROOTE(2)	0.0	MINERL(10,3)	1.5	SOM1E(2,2)
0.0	FROOTE(3)	0.0	PARENT(1)	1.5	SOM1E(2,3)
4357.4	CRTCIS(1)	50.	PARENT(2)	246.18	SOM2E(1)
0.0	CRTCIS(2)	50.	PARENT(3)	31.624	SOM2E(2)
28.113	CROOTE(1)	0.0	SECNDY(1)	31.624	SOM2E(3)
0.09	CROOTE(2)	15.	SECNDY(2)	330.04	SOM3E(1)
0.0	CROOTE(3)	2.	SECNDY(3)	34.677	SOM3E(2)
9.9875E-08	WD1CIS(1)	0.0	OCCLUD	34.677	SOM3E(3)
0.0	WD1CIS(2)	*** Water initial parameters		3.5213E-09	WOOD1E(1)
16720.	WD2CIS(1)	0.73012	RWCF(1)	0.0	WOOD1E(2)
0.0	WD2CIS(2)	0.79843	RWCF(2)	0.0	WOOD1E(3)
5794.4	WD3CIS(1)	0.86562	RWCF(3)	107.87	WOOD2E(1)
0.0	WD3CIS(2)	0.89921	RWCF(4)	0.0	WOOD2E(2)
0.3	W1LIG	0.93281	RWCF(5)	0.0	WOOD2E(3)
0.3	W2LIG	0.93281	RWCF(6)	37.383	WOOD3E(1)
0.3	W3LIG	0.93281	RWCF(7)	0.0	WOOD3E(2)
*** Mineral initial parameters		0.0	RWCF(8)	0.0	WOOD3E(3)
0.69659	MINERL(1,1)	0.0	RWCF(9)	2.0364	AMINRL(1)
0.68046	MINERL(2,1)	0.0	RWCF(10)	0.0	AMINRL(2)
0.59997	MINERL(3,1)	0.0	SNLQ	0.0	AMINRL(3)
0.49363	MINERL(4,1)	0.0	SNOW	0.0	CRPSTG(1)
0.48953	MINERL(5,1)	*** Enhanced extend parameters		0.0	CRPSTG(2)
0.35218	MINERL(6,1)			0.0	CRPSTG(3)
0.24482	MINERL(7,1)	264.97	STRCIS(1,1)	0.29851	STRLIG(1)
0.093678	MINERL(8,1)	0.0	STRCIS(1,2)	0.34284	STRLIG(2)
0.0	MINERL(9,1)	222.71	STRCIS(2,1)	Schedule file cenário	
0.0	MINERL(10,1)	0.0	STRCIS(2,2)	Linha Base	
0.5	MINERL(1,2)	14.417	METCIS(1,1)	1940	Starting year
0.0	MINERL(2,2)	0.0	METCIS(1,2)	2100	Last year
0.0	MINERL(3,2)	15.489	METCIS(2,1)	Riodoce_LB_C1.100	
0.0	MINERL(4,2)	0.0	METCIS(2,2)	Site file name	
0.0	MINERL(5,2)	1.3248	STRUCE(1,1)	0	Labeling type
0.0	MINERL(6,2)	0.0	STRUCE(1,2)	-1	Labeling year
0.0	MINERL(7,2)	0.0	STRUCE(1,3)	-1.00	Microcosm
0.0	MINERL(8,2)	1.1136	STRUCE(2,1)	-1	CO2 Systems
0.0	MINERL(9,2)	0.0	STRUCE(2,2)	2	Initial system
0.0	MINERL(10,2)	0.0	STRUCE(2,3)	Initial	crop
0.5	MINERL(1,3)	0.39974	METABE(1,1)	P RTP	Initial tree
		0.0	METABE(1,2)	Year	Month Option

1	Block	212GRAZGM	0.9999	'REMF(2)'
1940	Last year	31GRAZGVER	0.9999	'REMF(3)'
1	Repeats # years	32GRAZGM	0.0	'REMF(4)'
1940	Output starting year	33GRAZGM	0.0	'REMF(5)'
		34GRAZGM	1.0	'FD(1)'
1	Output month	35GRAZGM	1.0	'FD(2)'
1	Output interval	36GRAZGM	1.0	'RETF(1,1)'
S	Weather choice	36LAST	1.0	'RETF(1,2)'
1	1 TREE PRTP	38SENM	1.0	'RETF(1,3)'
1	1 TFST	310CROPG2	1.0	'RETF(1,4)'
1	8 TLST	310PLTM	1.0	'RETF(2,1)'
1	10 TREM KILL	310FRST	1.0	'RETF(2,2)'
1	11 FIRE FKILL	311GRAZGM	1.0	'RETF(2,3)'
-999 -999 X		312GRAZGM	1.0	'RETF(2,4)'
2	Block	41GRAZGVER	1.0	'RETF(3,1)'
2100	Last year	42GRAZGM	1.0	'RETF(3,2)'
5	Repeats # years	43GRAZGM	1.0	'RETF(3,3)'
1941	Output starting year	44GRAZGM	1.0	'RETF(3,4)'
		45GRAZGM	Fire.100 cenário Linha Base	
1	Output month	46GRAZGM	FKILL	
1	Output interval	46LAST	1.0	'FLFREM'
S	Weather choice	48SENM	1.0	'FDFREM(1)'
11GRAZGVER		410CROPG2	1	'FDFREM(2)'
12GRAZGM		410PLTM	0.1	'FRET(1)'
13GRAZGM		410FRST	1.0	'FRET(2)'
14GRAZGM		411GRAZGM	1.0	'FRET(3)'
15GRAZGM		412GRAZGM	1.0	'FRTSH'
16GRAZGM		51GRAZGVER	10.0	'FNUE(1)'
16LAST		52GRAZGM	30.0	'FNUE(2)'
18SENM		53GRAZGM	Crop.100 cenário Linha Base, cenários Tecnossolo C2, C3, C4 e C5	
110CROPG2		54GRAZGM		
110PLTM		55GRAZGM		
110FRST		56GRAZGM	G2	
111GRAZGM		56LAST	70.0	'PRDX(1)'
112GRAZGM		58SENM	30.0	'PPDF(1)'
21GRAZGVER		59FERTN3	45.0	'PPDF(2)'
22GRAZGM		510CROPG2	1.0	'PPDF(3)'
23GRAZGM		510PLTM	2.5	'PPDF(4)'
24GRAZGM		510FRST	1.0	'BIOFLG'
25GRAZGM		511GRAZGM	60.0	'BIOK5'
26GRAZGM		512GRAZGM	0.7	'PLTMRF'
26LAST		-999 -999 X	70.0	'FULCAN'
28SENM		Trem.100 cenário Linha Base	0.0	'FRTC(1)'
210CROPG2		KILL	0.0	'FRTC(2)'
210PLTM		0.0	0.0	'FRTC(3)'
210FRST		0.9999	223.0	'BIOMAX'
211GRAZGM				

16.7	'PRAMN(1,1)'	0.0	'CRPRTF(3)'	0.25	'FECLIG'
217.4	'PRAMN(2,1)'	0.0	'SNFXMX(1)'	Site file cenários Tecnossolo	
217.4	'PRAMN(3,1)'	-15.0	'DEL13C'	C2, C3, C4 e C5	
50.1	'PRAMN(1,2)'	1.0	'CO2IPR(1)'	*** Climate parameters	
217.4	'PRAMN(2,2)'	0.0	'CO2ITR(1)'	26.58000	'PRECIP(1)'
217.4	'PRAMN(3,2)'	0.0	'CO2ICE(1,1,1)'	15.50000	'PRECIP(2)'
19.5	'PRAMX(1,1)'	0.0	'CO2ICE(1,1,2)'	16.85000	'PRECIP(3)'
245.3	'PRAMX(2,1)'	0.0	'CO2ICE(1,1,3)'	7.77000	'PRECIP(4)'
245.3	'PRAMX(3,1)'	0.0	'CO2ICE(1,2,1)'	3.52000	'PRECIP(5)'
52.9	'PRAMX(1,2)'	0.0	'CO2ICE(1,2,2)'	1.26000	'PRECIP(6)'
245.3	'PRAMX(2,2)'	0.0	'CO2ICE(1,2,3)'	0.86000	'PRECIP(7)'
245.3	'PRAMX(3,2)'	0.0	'CO2IRS(1)'	1.70000	'PRECIP(8)'
50.0	'PRBMN(1,1)'	Fert.100 cenário Linha		5.14000	'PRECIP(9)'
390.0	'PRBMN(2,1)'	Base, cenários		9.43000	'PRECIP(10)'
340.0	'PRBMN(3,1)'	Tecnossolo C2,		21.80000	'PRECIP(11)'
0.0	'PRBMN(1,2)'	C3, C4 e C5		29.70000	'PRECIP(12)'
0.0	'PRBMN(2,2)'	N3		16.32000	'PRCSTD(1)'
0.0	'PRBMN(3,2)'	3.0	'FERAMT(1)'	8.04000	'PRCSTD(2)'
55.0	'PRBMX(1,1)'	0.0	'FERAMT(2)'	6.89000	'PRCSTD(3)'
420.0	'PRBMX(2,1)'	0.0	'FERAMT(3)'	4.92000	'PRCSTD(4)'
420.0	'PRBMX(3,1)'	0.0	'AUFERT'	2.57000	'PRCSTD(5)'
0.0	'PRBMX(1,2)'	Graz.100 cenário Linha		1.54000	'PRCSTD(6)'
0.0	'PRBMX(2,2)'	Base, cenários		1.07000	'PRCSTD(7)'
0.0	'PRBMX(3,2)'	Tecnossolo C2,		1.86000	'PRCSTD(8)'
0.02	'FLIGNI(1,1)'	C3, C4 e C5		3.48000	'PRCSTD(9)'
0.0012	'FLIGNI(2,1)'	GVER		4.69000	'PRCSTD(10)'
0.26	'FLIGNI(1,2)'	0.16	'FLGREM'	8.02000	'PRCSTD(11)'
-0.0015	'FLIGNI(2,2)'	0.08	'FDGREM'	11.04000	'PRCSTD(12)'
0.0	'HIMAX'	0.3	'GFCRET'	0.58000	'PRCSKW(1)'
0.0	'HIWSF'	0.8	'GRET(1)'	0.33000	'PRCSKW(2)'
0.0	'HIMON(1)'	0.95	'GRET(2)'	0.12000	'PRCSKW(3)'
0.0	'HIMON(2)'	0.95	'GRET(3)'	2.05000	'PRCSKW(4)'
0.0	'EFRGRN(1)'	1.0	'GRZEFF'	0.75000	'PRCSKW(5)'
0.0	'EFRGRN(2)'	0.5	'FECF(1)'	2.00000	'PRCSKW(6)'
0.0	'EFRGRN(3)'	0.9	'FECF(2)'	1.71000	'PRCSKW(7)'
0.15	'VLOSSP'	0.5	'FECF(3)'	1.31000	'PRCSKW(8)'
0.2	'FSDETH(1)'	0.25	'FECLIG'	0.12000	'PRCSKW(9)'
0.95	'FSDETH(2)'	GM		0.33000	'PRCSKW(10)'
0.2	'FSDETH(3)'	0.1	'FLGREM'	0.76000	'PRCSKW(11)'
150.0	'FSDETH(4)'	0.01	'FDGREM'	-0.15000	'PRCSKW(12)'
0.15	'FALLRT'	0.3	'GFCRET'	18.61000	'TMN2M(1)'
0.05	'RDR'	0.8	'GRET(1)'	18.60000	'TMN2M(2)'
0.00	'RTSEN'	0.95	'GRET(2)'	18.18000	'TMN2M(3)'
2.0	'RTDTMP'	0.95	'GRET(3)'	16.42000	'TMN2M(4)'
0.0	'CRPRTF(1)'	1.0	'GRZEFF'	13.61000	'TMN2M(5)'
0.0	'CRPRTF(2)'	0.5	'FECF(1)'	11.85000	'TMN2M(6)'
		0.9	'FECF(2)'	11.36000	'TMN2M(7)'
		0.5	'FECF(3)'		

12.32000	'TMN2M(8)'	0.36	'AFIEL(5)'	0.0	'RCELIT(2,2)
14.67000	'TMN2M(9)'	0.36	'AFIEL(6)'	0.0	'RCELIT(2,3)
16.81000	'TMN2M(10)'	0.00000	'AFIEL(7)'	0.0	'AGLCIS(1)
17.77000	'TMN2M(11)'	0.00000	'AFIEL(8)'	0.0	'AGLCIS(2)
18.39000	'TMN2M(12)'	0.0000	'AFIEL(9)'	0.0	'AGLIVE(1)
28.81000	'TMX2M(1)'	0.00000	'AFIEL(10)'	0.0	'AGLIVE(2)
29.42000	'TMX2M(2)'	6.20000	'PH'	0.0	'AGLIVE(3)
28.85000	'TMX2M(3)'	0.50000	'PSLSRB'	0.0	'BGLCIS(1)
27.56000	'TMX2M(4)'	3.00000	'SORPMX'	0.0	'BGLCIS(2)
25.67000	'TMX2M(5)'	*** External nutrient input		0.0	'BGLIVE(1)
24.79000	'TMX2M(6)'	parameters		0.0	'BGLIVE(2)
24.69000	'TMX2M(7)'	0.21	'EPNFA(1)	0.0	'BGLIVE(3)
26.26000	'TMX2M(8)'	0.0028	'EPNFA(2)	0.0	'STDCIS(1)
27.17000	'TMX2M(9)'	-0.92	'EPNFS(1)	0.0	'STDCIS(2)
27.82000	'TMX2M(10)'	0.028	'EPNFS(2)	0.0	'STDEDE(1)
27.71000	'TMX2M(11)'	0.0	'SATMOS(1)	0.0	'STDEDE(2)
28.17000	'TMX2M(12)'	0.0	'SATMOS(2)	0.0	'STDEDE(3)
*** Site and control parameters		0.0	'SIRRI	*** Forest organic matter	
0.00000	'IVAUTO'	*** Organic matter initial values		initial parameters	
1.00000	'NELEM'	0.0	'SOM1CI(1,1)	0.0	'RLVCIS(1)
-20.16000	'SITLAT'	0.0	'SOM1CI(1,2)	0.0	'RLVCIS(2)
-43.11000	'SITLNG'	0.0	'SOM1CI(2,1)	0.0	'RLEAVE(1)
0.45	'SAND'	0.0	'SOM1CI(2,2)	0.0	'RLEAVE(2)
0.40	'SILT'	0.0	'SOM2CI(1)	0.0	'RLEAVE(3)
0.15	'CLAY'	0.0	'SOM2CI(2)	0.0	'FBRCIS(1)
1.95000	'BULKD'	0.0	'SOM3CI(1)	0.0	'FBRCIS(2)
5.00000	'NLAYER'	0.0	'SOM3CI(2)	0.0	'FBRCH(1)
5.00000	'NLAYPG'	0.0	'RCES1(1,1)	0.0	'FBRCH(2)
0.75000	'DRAIN'	0.0	'RCES1(1,2)	0.0	'FBRCH(3)
0.30000	'BASEF'	0.0	'RCES1(1,3)	0.0	'RLWCIS(1)
0.60000	'STORMF'	0.0	'RCES1(2,1)	0.0	'RLWCIS(2)
1.00000	'SWFLAG'	0.0	'RCES1(2,2)	0.0	'RLWODE(1)
0.067	'AWILT(1)'	0.0	'RCES1(2,3)	0.0	'RLWODE(2)
0.067	'AWILT(2)'	0.0	'RCES2(1)	0.0	'RLWODE(3)
0.067	'AWILT(3)'	0.0	'RCES2(2)	0.0	'FRTCIS(1)
0.067	'AWILT(4)'	0.0	'RCES2(3)	0.0	'FRTCIS(2)
0.067	'AWILT(5)'	0.0	'RCES3(1)	0.0	'FROOTE(1)
0.067	'AWILT(6)'	0.0	'RCES3(2)	0.0	'FROOTE(2)
0.0	'AWILT(7)'	0.0	'RCES3(3)	0.0	'FROOTE(3)
0.0	'AWILT(8)'	0.0	'CLITTR(1,1)	0.0	'CRTCIS(1)
0.00000	'AWILT(9)'	0.0	'CLITTR(1,2)	0.0	'CRTCIS(2)
0.00000	'AWILT(10)'	0.0	'CLITTR(2,1)	0.0	'CROOTE(1)
0.36	'AFIEL(1)'	0.0	'CLITTR(2,2)	0.0	'CROOTE(2)
0.36	'AFIEL(2)'	0.0	'RCELIT(1,1)	0.0	'CROOTE(3)
0.36	'AFIEL(3)'	0.0	'RCELIT(1,2)	0.0	'WD1CIS(1)
0.36	'AFIEL(4)'	0.0	'RCELIT(1,3)	0.0	'WD1CIS(2)
		0.0	'RCELIT(2,1)	0.0	'WD2CIS(1)

0.0	'WD2CIS(2)	0.00000	'RWCF(2)'	21GRAZGVER
0.0	'WD3CIS(1)	0.00000	'RWCF(3)'	22GRAZGM
0.0	'WD3CIS(2)	0.00000	'RWCF(4)'	23GRAZGM
0.3	'W1LIG	0.00000	'RWCF(5)'	24GRAZGM
0.3	'W2LIG	0.00000	'RWCF(6)'	25GRAZGM
0.3	'W3LIG	0.00000	'RWCF(7)'	26GRAZGM
*** Mineral initial parameters		0.00000	'RWCF(8)'	26LAST
0.25	'MINERL(1,1)	0.00000	'RWCF(9)'	28SENM
0.0	'MINERL(2,1)	0.00000	'RWCF(10)'	210CROPG2
0.0	'MINERL(3,1)	0.00000	'SNLQ'	210PLTM
0.0	'MINERL(4,1)	0.00000	'SNOW'	210FRST
0.0	'MINERL(5,1)	Schedule file cenário		211GRAZGM
0.0	'MINERL(6,1)	Tecnossolo C2		212GRAZGM
0.0	'MINERL(7,1)	2015	Starting year	31GRAZGVER
0.0	'MINERL(8,1)	2100	Last year	32GRAZGM
0.0	'MINERL(9,1)	Riodoce_Tecnossolo_C2aC4.100		33GRAZGM
0.0	'MINERL(10,1)	Site file name		34GRAZGM
0.5	'MINERL(1,2)	0	Labeling type	35GRAZGM
0.0	'MINERL(2,2)	-1	Labeling year	36GRAZGM
0.0	'MINERL(3,2)	-1.00	Microcosm	36LAST
0.0	'MINERL(4,2)	-1	CO2	38SENM
0.0	'MINERL(5,2)	Systems		310CROPG2
0.0	'MINERL(6,2)	2	Initial system	310PLTM
0.0	'MINERL(7,2)	G2	Initial crop	310FRST
0.0	'MINERL(8,2)	Initial tree		311GRAZGM
0.0	'MINERL(9,2)	Year Month	Option	312GRAZGM
0.0	'MINERL(10,2)	1	Block	41GRAZGVER
0.5	'MINERL(1,3)	2100	Last year	42GRAZGM
0.0	'MINERL(2,3)	5	Repeats # years	43GRAZGM
0.0	'MINERL(3,3)	2015	Output starting year	44GRAZGM
0.0	'MINERL(4,3)	1	Output month	45GRAZGM
0.0	'MINERL(5,3)	1	Output interval	46GRAZGM
0.0	'MINERL(6,3)	S	Weather choice	46LAST
0.0	'MINERL(7,3)	11GRAZGVER		48SENM
0.0	'MINERL(8,3)	12GRAZGM		410CROPG2
0.0	'MINERL(9,3)	13GRAZGM		410PLTM
0.0	'MINERL(10,3)	14GRAZGM		410FRST
0.0	'PARENT(1)	15GRAZGM		411GRAZGM
50.0	'PARENT(2)	16GRAZGM		412GRAZGM
50.0	'PARENT(3)	16LAST		51GRAZGVER
0.0	'SECNDY(1)	18SENM		52GRAZGM
15.0	'SECNDY(2)	110CROPG2		53GRAZGM
2.0	'SECNDY(3)	110PLTM		54GRAZGM
0.0	'OCCLUD	110FRST		55GRAZGM
*** Water initial parameters		111GRAZGM		56GRAZGM
0.00000	'RWCF(1)'	112GRAZGM		56LAST

58SENM	2 1 FERT PS4	1 10 CROP G2
59FERTN3	2 1 FERT MED	1 10 PLTM
510CROPG2	2 1 OMAD M6.0T	1 10 FRST
510PLTM	2 1 IRRI A50	1 11 GRAZ GM
510FRST	2 1 FERT N4	1 12 GRAZ GM
511GRAZGM	2 1 CROP EGCP	-999 -999 X
512GRAZGM	2 1 PLTM	3 Block
-999 -999 X	2 1 FRST	2100 Last year
Schedule file cenário	2 1 CROP GGC1	5 Repeats # years
Tecnossolo C3	2 1 PLTM	2021 Output starting year
2015 Starting year	2 1 FRST	1 Output month
2100 Last year	2 2 CULT CTIL	1 Output interval
Riodoce_Tecnossolo_C2aC4.100	2 2 FERT PS4	S Weather choice
Site file name	2 2 FERT MED	11GRAZGVER
0 Labeling type	2 2 OMAD M6.0T	12GRAZGM
-1 Labeling year	2 2 IRRI A50	13GRAZGM
-1.00 Microcosm	2 2 FERT N4	14GRAZGM
-1 CO2 Systems	2 2 CROP EGCP	15GRAZGM
2 Initial system	2 2 PLTM	16GRAZGM
G2 Initial crop	2 2 FRST	16LAST
Initial tree	2 2 CROP GGC1	18SENM
Year Month Option	2 2 PLTM	110CROPG2
1 Block	2 2 FRST	110PLTM
2016 Last year	2 6 LAST	110FRST
2 Repeats # years	2 8 SENM	111GRAZGM
2015 Output starting year	2 10 CROP G2	112GRAZGM
1 Output month	2 10 PLTM	21GRAZGVER
1 Output interval	2 11 FRST	22GRAZGM
S Weather choice	2 11 FERT N3	23GRAZGM
1 11 CULT CTIL	-999 -999 X	24GRAZGM
1 11 FERT PS4	2 Block	25GRAZGM
1 11 FERT MED	2020 Last year	26GRAZGM
1 11 OMAD M6.0T	1 Repeats # years	26LAST
1 11 IRRI A50	2017 Output starting year	28SENM
1 12 CULT CTIL	1 Output month	210CROPG2
1 12 FERT PS4	1 Output interval	210PLTM
1 12 FERT MED	S Weather choice	210FRST
1 12 OMAD M6.0T	1 1 GRAZ GVER	211GRAZGM
1 12 IRRI A50	1 2 GRAZ GM	212GRAZGM
1 12 CROP EGCP	1 3 GRAZ GM	31GRAZGVER
1 12 PLTM	1 4 GRAZ GM	32GRAZGM
1 12 FRST	1 5 GRAZ GM	33GRAZGM
1 12 CROP GGC1	1 6 GRAZ GM	34GRAZGM
1 12 PLTM	1 6 LAST	35GRAZGM
1 12 FRST	1 8 SENM	36GRAZGM
2 1 CULT CTIL	1 9 FERT MED	36LAST

38SENM	16.971	CLTEFF(4)	0.4	'FRTC(2)'
310CROPG2	Fert.100 cenários Tecnossolo			1.0
310PLTM	C3, C4 e C5			400.0
310FRST	PS4		8.5	'PRAMN(1,1)'
311GRAZGM	0.0	'FERAMT(1)'	100.0	'PRAMN(2,1)'
312GRAZGM	3.5	'FERAMT(2)'	125.0	'PRAMN(3,1)'
41GRAZGVER	4.14	'FERAMT(3)'	8.5	'PRAMN(1,2)'
42GRAZGM	0.0	'AUFERT'	100.0	'PRAMN(2,2)'
43GRAZGM	MED		125.0	'PRAMN(3,2)'
44GRAZGM	0.0	'FERAMT(1)'	15.0	'PRAMX(1,1)'
45GRAZGM	0.0	'FERAMT(2)'	133.0	'PRAMX(2,1)'
46GRAZGM	0.0	'FERAMT(3)'	160.0	'PRAMX(3,1)'
46LAST	1.5	'AUFERT'	15.0	'PRAMX(1,2)'
48SENM	N4		133.0	'PRAMX(2,2)'
410CROPG2	4.0	'FERAMT(1)'	160.0	'PRAMX(3,2)'
410PLTM	0.0	'FERAMT(2)'	17.0	'PRBMN(1,1)'
410FRST	4.6	'FERAMT(3)'	100.0	'PRBMN(2,1)'
411GRAZGM	0.0	'AUFERT'	125.0	'PRBMN(3,1)'
412GRAZGM	Omad.100 cenários Tecnossolo			0.0
51GRAZGVER	C3, C4 e C5			0.0
52GRAZGM	M6.0T		0.0	'PRBMN(2,2)'
53GRAZGM	316.2	'ASTGC'	0.0	'PRBMN(3,2)'
54GRAZGM	0.0	'ASTLBL'	22.0	'PRBMX(1,1)'
55GRAZGM	0.25	'ASTLIG'	133.0	'PRBMX(2,1)'
56GRAZGM	15.0	'ASTREC(1)'	160.0	'PRBMX(3,1)'
56LAST	150.0	'ASTREC(2)'	0.0	'PRBMX(1,2)'
58SENM	150.0	'ASTREC(3)'	0.0	'PRBMX(2,2)'
59FERTN3	Irri.100 cenários Tecnossolo			0.0
510CROPG2	C3, C4 e C5			0.04
510PLTM	A50		0.0	'FLIGNI(1,1)'
510FRST	1.0	'AUIRRI'	0.0	'FLIGNI(2,1)'
511GRAZGM	0.75	'FAWHC'	0.12	'FLIGNI(1,2)'
512GRAZGM	0.0	'IRRAUT'	0.0	'FLIGNI(2,2)'
-999 -999 X	0.0	'IRRAMT'	0.02	'HIMAX'
Cult.100 cenários Tecnossolo			0.0	'HIWSF'
C3, C4 e C5			2.0	'HIMON(1)'
CTIL	EGCP		1.0	'HIMON(2)'
0.0	370.0	'PRDX(1)'	0.0	'EFRGRN(1)'
0.05	30.0	'PPDF(1)'	0.0	'EFRGRN(2)'
0.95	45.0	'PPDF(2)'	0.0	'EFRGRN(3)'
0.05	0.8	'PPDF(3)'	0.02	'VLOSSP'
0.95	3.5	'PPDF(4)'	0.3	'FSDETH(1)'
0.95	1.0	'BIOFLG'	0.4	'FSDETH(2)'
1.0	200.0	'BIOK5'	0.1	'FSDETH(3)'
3.396	1.0	'PLTMRF'	500.0	'FSDETH(4)'
16.971	150.0	'FULCAN'	0.5	'FALLRT'
1.000	0.4	'FRTC(1)'	0.2	'RDR' 0.6
			0.15	'RTSEN'

2.0	'RTDTMP'	0.0	'PRBMN(3,2)'	0	Labeling type
0.0	'CRPRTF(1)'	22.0	'PRBMX(1,1)'	-1	Labeling year
0.0	'CRPRTF(2)'	133.0	'PRBMX(2,1)'	-1.00	Microcosm
0.0	'CRPRTF(3)'	160.0	'PRBMX(3,1)'	-1	CO2 Systems
0.02	'SNFXMX(1)'	0.0	'PRBMX(1,2)'	2	Initial system
-27.0	'DEL13C'	0.0	'PRBMX(2,2)'	G2	Initial crop
1.225	'CO2IPR(1)'	0.0	'PRBMX(3,2)'		Initial tree
0.77	'CO2ITR(1)'	0.04	'FLIGNI(1,1)'	Year Month Option	
1.0	'CO2ICE(1,1,1)'	0.0	'FLIGNI(2,1)'	1	Block
1.0	'CO2ICE(1,1,2)'	0.12	'FLIGNI(1,2)'	2016	Last year
1.0	'CO2ICE(1,1,3)'	0.0	'FLIGNI(2,2)'	2	Repeats # years
1.225	'CO2ICE(1,2,1)'	0.02	'HIMAX'	2015	Output starting year
1.0	'CO2ICE(1,2,2)'	0.0	'HIWSF'		
1.0	'CO2ICE(1,2,3)'	2.0	'HIMON(1)'	1	Output month
1.0	'CO2IRS(1)'	1.0	'HIMON(2)'	1	Output interval
GGC1		0.0	'EFRGRN(1)'	S Weather choice	
270.0	'PRDX(1)'	0.0	'EFRGRN(2)'	1 11	CULT CTIL
30.0	'PPDF(1)'	0.0	'EFRGRN(3)'	1 11	FERT PS4
45.0	'PPDF(2)'	0.02	'VLOSSP'	1 11	FERT MED
0.8	'PPDF(3)'	0.2	'FSDETH(1)'	1 11	OMAD M6.0T
3.5	'PPDF(4)'	0.95	'FSDETH(2)'	1 11	IRRI A50
1.0	'BIOFLG'	0.1	'FSDETH(3)'	1 12	CULT CTIL
60.0	'BIOK5'	150.0	'FSDETH(4)'	1 12	FERT PS4
0.5	'PLTMRF'	0.15	'FALLRT'	1 12	FERT MED
150.0	'FULCAN'	0.2	'RDR'	1 12	OMAD M6.0T
0.5	'FRTC(1)'	0.15	'RTSEN'	1 12	IRRI A50
0.5	'FRTC(2)'	2.0	'RTDTMP'	1 12	CROP EGCP
1.0	'FRTC(3)'	0.0	'CRPRTF(1)'	1 12	PLTM
400.0	'BIOMAX'	0.0	'CRPRTF(2)'	1 12	FRST
25.0	'PRAMN(1,1)'	0.0	'CRPRTF(3)'	1 12	CROP GGC1
100.0	'PRAMN(2,1)'	0.0175	'SNFXMX(1)'	1 12	PLTM
125.0	'PRAMN(3,1)'	-27.0	'DEL13C'	1 12	FRST
60.0	'PRAMN(1,2)'	1.1875	'CO2IPR(1)'	2 1	CULT CTIL
100.0	'PRAMN(2,2)'	0.77	'CO2ITR(1)'	2 1	FERT PS4
125.0	'PRAMN(3,2)'	1.0	'CO2ICE(1,1,1)'	2 1	FERT MED
40.0	'PRAMX(1,1)'	1.0	'CO2ICE(1,1,2)'	2 1	OMAD M6.0T
133.0	'PRAMX(2,1)'	1.0	'CO2ICE(1,1,3)'	2 1	IRRI A50
160.0	'PRAMX(3,1)'	1.1875	'CO2ICE(1,2,1)'	2 1	FERT N4
100.0	'PRAMX(1,2)'	1.0	'CO2ICE(1,2,2)'	2 1	CROP EGCP
133.0	'PRAMX(2,2)'	1.0	'CO2ICE(1,2,3)'	2 1	PLTM
160.0	'PRAMX(3,2)'	1.0	'CO2IRS(1)'	2 1	FRST
17.0	'PRBMN(1,1)'	Schedule file cenário		2 1	CROP GGC1
100.0	'PRBMN(2,1)'	Tecnossolo C4		2 1	PLTM
125.0	'PRBMN(3,1)'	2015	Starting year	2 1	FRST
0.0	'PRBMN(1,2)'	2100	Last year	2 2	CULT CTIL
0.0	'PRBMN(2,2)'	Riodoce_Tecnossolo_C2aC4.100	Site file name	2 2	FERT PS4
				2 2	FERT MED

2 2 OMAD M6.0T	1 1 GRAZ GVER	Omad.100 cenário	
2 2 IRRI A50	1 2 GRAZ GM	Tecnossolo C4	
2 2 FERT N4	1 3 GRAZ GM	C	
2 2 CROP EGCP	1 4 GRAZ GM	29.00	'ASTGC'
2 2 PLTM	1 5 GRAZ GM	0.00	'ASTLBL'
2 2 FRST	1 6 GRAZ GM	0.25	'ASTLIG'
2 2 CROP GGC1	1 6 LAST	2.84	'ASTREC(1)'
2 2 PLTM	1 8 SENM	36.25	'ASTREC(2)'
2 2 FRST	1 8 OMAD C	36.25	'ASTREC(3)'
2 6 LAST	1 9 FERT MED	Crop.100 cenário Tecnossolo	
2 8 SENM	1 10 CROP G2	C4	
2 10 CROP G2	1 10 PLTM	CLV1	
2 10 PLTM	1 10 FRST	205.0	'PRDX(1)'
2 11 FRST	1 11 GRAZ GM	22.0	'PPDF(1)'
2 11 FERT N3	1 12 GRAZ GM	35.0	'PPDF(2)'
-999 -999 X	2 1 GRAZ GVER	0.8	'PPDF(3)'
2 Block	2 2 GRAZ GM	3.5	'PPDF(4)'
2020 Last year	2 3 GRAZ GM	1.0	'BIOFLG'
1 Repeats # years	2 4 GRAZ GM	60.0	'BIOK5'
2017 Output starting year	2 5 GRAZ GM	0.5	'PLTMRF'
1 Output month	2 6 GRAZ GM	100.0	'FULCAN'
1 Output interval	2 6 LAST	0.4	'FRTC(1)'
S Weather choice	2 8 SENM	0.2	'FRTC(2)'
1 1 GRAZ GVER	2 8 OMAD C	1.0	'FRTC(3)'
1 2 GRAZ GM	2 9 FERT MED	400.0	'BIOMAX'
1 3 GRAZ GM	2 10 CROP G2	8.0	'PRAMN(1,1)'
1 4 GRAZ GM	2 10 PLTM	100.0	'PRAMN(2,1)'
1 5 GRAZ GM	2 10 FRST	125.0	'PRAMN(3,1)'
1 6 GRAZ GM	2 11 GRAZ GM	25.0	'PRAMN(1,2)'
1 6 LAST	2 12 GRAZ GM	100.0	'PRAMN(2,2)'
1 8 SENM	3 1 GRAZ GVER	125.0	'PRAMN(3,2)'
1 9 FERT MED	3 2 GRAZ GM	15.0	'PRAMX(1,1)'
1 10 CROP G2	3 3 GRAZ GM	133.0	'PRAMX(2,1)'
1 10 PLTM	3 4 GRAZ GM	160.0	'PRAMX(3,1)'
1 10 FRST	3 5 GRAZ GM	40.0	'PRAMX(1,2)'
1 11 GRAZ GM	3 6 GRAZ GM	133.0	'PRAMX(2,2)'
1 12 GRAZ GM	3 6 LAST	160.0	'PRAMX(3,2)'
-999 -999 X	3 8 SENM	17.0	'PRBMN(1,1)'
3 Block	3 8 OMAD C	100.0	'PRBMN(2,1)'
2100 Last year	3 9 FERT MED	125.0	'PRBMN(3,1)'
3 Repeats # years	3 10 CROP CLV1	0.0	'PRBMN(1,2)'
2021 Output starting year	3 10 PLTM	0.0	'PRBMN(2,2)'
1 Output month	3 10 FRST	0.0	'PRBMN(3,2)'
1 Output interval	3 11 GRAZ GM	22.0	'PRBMX(1,1)'
S Weather choice	3 12 GRAZ GM	133.0	'PRBMX(2,1)'
	-999 -999 X	160.0	'PRBMX(3,1)'
		0.0	'PRBMX(1,2)'

0.0	'PRBMX(2,2)'	G2	Initial crop	2 2	FRST
0.0	'PRBMX(3,2)'	P RTP	Initial tree	2 2	CROP GGC1
0.04	'FLIGNI(1,1)'	Year Month	Option	2 2	PLTM
0.0	'FLIGNI(2,1)'	1	Block	2 2	FRST
0.12	'FLIGNI(1,2)'	2016	Last year	2 6	LAST
0.0	'FLIGNI(2,2)'	2	Repeats # years	2 8	SENM
0.02	'HIMAX'	2015	Output starting year	2 10	CROP G2
0.0	'HIWSF'			2 10	PLTM
2.0	'HIMON(1)'	1	Output month	2 11	FRST
1.0	'HIMON(2)'	1	Output interval	2 11	FERT N3
0.0	'EFRGRN(1)'	S	Weather choice	-999	-999 X
0.0	'EFRGRN(2)'	1 11	CULT CTIL	2	Block
0.0	'EFRGRN(3)'	1 11	FERT PS4	2020	Last year
0.02	'VLOSSP'	1 11	FERT MED	1	Repeats # years
0.2	'FSDETH(1)'	1 11	OMAD M6.0T	2017	Output starting year
0.95	'FSDETH(2)'	1 11	IRRI A50		
0.1	'FSDETH(3)'	1 12	CULT CTIL	1	Output month
150.0	'FSDETH(4)'	1 12	FERT PS4	1	Output interval
0.15	'FALLRT'	1 12	FERT MED	S	Weather choice
0.2	'RDR'	1 12	OMAD M6.0T	1 1	GRAZ GVER
0.15	'RTSEN'	1 12	IRRI A50	1 2	GRAZ GM
2.0	'RTDTMP'	1 12	CROP EGCP	1 3	GRAZ GM
0.0	'CRPRTF(1)'	1 12	PLTM	1 4	GRAZ GM
0.0	'CRPRTF(2)'	1 12	FRST	1 5	GRAZ GM
0.0	'CRPRTF(3)'	1 12	CROP GGC1	1 6	GRAZ GM
0.05	'SNFXMX(1)'	1 12	PLTM	1 6	LAST
-27.0	'DEL13C'	1 12	FRST	1 8	SENM
1.3	'CO2IPR(1)'	2 1	CULT CTIL	1 9	FERT MED
0.77	'CO2ITR(1)'	2 1	FERT PS4	1 10	CROP G2
1.0	'CO2ICE(1,1,1)'	2 1	FERT MED	1 10	PLTM
1.0	'CO2ICE(1,1,2)'	2 1	OMAD M6.0T	1 10	FRST
1.0	'CO2ICE(1,1,3)'	2 1	IRRI A50	1 11	GRAZ GM
1.3	'CO2ICE(1,2,1)'	2 1	FERT N4	1 12	GRAZ GM
1.0	'CO2ICE(1,2,2)'	2 1	CROP EGCP	-999	-999 X
1.0	'CO2ICE(1,2,3)'	2 1	PLTM	3	Block
1.0	'CO2IRS(1)'	2 1	FRST	2100	Last year
	Schedule file cenário	2 1	CROP GGC1	1	Repeats # years
	Tecnossolo C5	2 1	PLTM	2021	Output starting year
2015	Starting year	2 1	FRST		
2100	Last year	2 2	CULT CTIL	1	Output month
Riodoce_Tecnossolo_C2aC4.100	Site file name	2 2	FERT PS4	1	Output interval
		2 2	FERT MED	S	Weather choice
0	Labeling type	2 2	OMAD M6.0T	11	TREE P RTP
-1	Labeling year	2 2	IRRI A50	1 1	TFST
-1.00	Microcosm	2 2	FERT N4	1 8	TLST
-1	CO2 Systems	2 2	CROP EGCP	-999	-999 X
2	Initial system	2 2	PLTM		

APÊNDICE F – DADOS E VALORES ESTIMADOS E UTILIZADOS PARA MENSURAÇÃO DA PERDA INTERINA

Apêndice F – Tabela 1 – Planilha de dados utilizados para mensuração da perda interina da quantidade de água em m³ perdida pelo desastre do rompimento da barragem de Fundão, compartimento 1.

Ano (meses)	Período (Sazonalidade)	Mes	LB	Vazão (log da vazão menos o log da média da vazão)	Pred (turbidez)	QDA (em comparação a Lb)	Vazão observada	Segundo no mês	Quant água mensal m ³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
0,000	1	11	44,043	-0,024	não há dado registrado	0,000	48,521	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,083	1	12	108,092	0,178	11.527,12	0,142	87,470	2.678.400	234.279.216,00	33.270.425,52	201.008.790,48	199.723.767,76
0,167	1	01	160,777	0,267	6.892,50	0,327	130,147	2.678.400	348.586.848,00	113.951.846,33	234.635.001,67	231.644.609,59
0,250	1	02	89,697	0,136	2.886,85	0,400	76,838	2.505.600	192.525.829,71	76.950.306,15	115.575.523,56	113.373.086,36
0,333	1	03	87,485	0,130	2.022,79	0,490	81,524	2.678.400	218.353.968,00	106.939.159,19	111.414.808,81	108.592.972,08
0,417	-1	04	37,134	0,023	443,20	0,680	45,163	2.592.000	117.062.496,00	79.558.580,29	37.503.915,71	36.320.357,46
0,500	-1	05	23,215	-0,083	258,76	0,699	43,929	2.678.400	117.659.088,00	82.251.462,22	35.407.625,78	34.071.009,91
0,583	-1	06	17,777	-0,142	179,36	0,727	43,662	2.592.000	113.170.608,00	82.268.518,77	30.902.089,23	29.545.459,08
0,667	-1	07	13,652	-0,202	127,63	0,748	32,911	2.678.400	88.148.304,00	65.919.300,33	22.229.003,67	21.117.261,49
0,750	-1	08	11,296	-0,244	97,37	0,770	27,791	2.678.400	74.435.760,00	57.279.926,15	17.155.833,85	16.193.627,01
0,833	-1	09	11,324	-0,244	85,96	0,802	24,537	2.592.000	63.599.040,00	51.015.106,35	12.583.933,65	11.802.212,24
0,917	1	10	20,626	-0,194	225,28	0,705	28,352	2.678.400	75.937.392,00	53.520.039,04	22.417.352,96	20.890.365,10
1,000	1	11	44,043	-0,024	340,82	0,797	52,553	2.592.000	136.218.240,00	108.609.416,77	27.608.823,23	25.563.734,39
1,083	1	12	108,092	0,178	571,85	0,883	117,496	2.678.400	314.702.496,00	277.737.139,17	36.965.356,83	34.008.384,59
1,167	1	01	160,777	0,267	686,29	0,920	52,871	2.678.400	141.609.168,00	130.248.423,27	11.360.744,73	10.385.145,90
1,250	1	02	89,697	0,136	423,99	0,903	48,463	2.419.200	117.241.776,00	105.885.539,44	11.356.236,56	10.314.660,34
1,333	1	03	87,485	0,130	385,78	0,915	47,973	2.678.400	128.490.624,00	117.528.050,32	10.962.573,68	9.893.449,15
1,417	-1	04	37,134	0,023	102,40	0,970	35,502	2.592.000	92.019.888,00	89.238.572,95	2.781.315,05	2.494.020,89
1,500	-1	05	23,215	-0,083	69,37	0,963	36,829	2.678.400	98.643.312,00	94.994.806,31	3.648.505,69	3.250.720,49

Ano (meses)	Período (Sazonalidade)	Mes	LB	Vazão (log da vazão menos o log da média da vazão)	Pred (turbidez)	QDA (em compraço a lb)	Vazão observada	Segundo no mês	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
1,583	-1	06	17,777	-0,142	54,18	0,961	31,626	2.592.000	81.973.728,00	78.792.502,65	3.181.225,35	2.816.266,41
1,667	-1	07	13,652	-0,202	42,54	0,959	26,651	2.678.400	71.381.520,00	68.459.949,49	2.921.570,51	2.569.865,38
1,750	-1	08	11,296	-0,244	35,26	0,959	22,013	2.678.400	58.958.928,00	56.536.484,35	2.422.443,65	2.117.202,43
1,833	-1	09	11,324	-0,244	33,41	0,964	15,981	2.592.000	41.421.888,00	39.937.176,11	1.484.711,89	1.289.334,45
1,917	1	10	20,626	-0,194	93,09	0,911	15,804	2.678.400	42.329.952,00	38.559.608,46	3.770.343,54	3.253.261,88
2,000	1	11	44,043	-0,024	148,59	0,951	32,172	2.592.000	83.390.256,00	79.288.539,26	4.101.716,74	3.516.563,52
2,083	1	12	108,092	0,178	261,40	0,979	87,228	2.678.400	233.632.080,00	228.684.313,71	4.947.766,29	4.214.797,16
2,167	1	01	160,777	0,267	327,23	0,987	51,623	2.678.400	138.268.080,00	136.530.452,47	1.737.627,53	1.470.750,11
2,250	1	02	89,697	0,136	209,96	0,981	90,639	2.419.200	219.274.560,00	215.045.906,89	4.228.653,11	3.556.304,68
2,333	1	03	87,485	0,130	197,67	0,983	132,199	2.678.400	354.081.024,00	347.927.607,13	6.153.416,87	5.141.951,06
2,417	-1	04	37,134	0,023	54,12	0,996	76,034	2.592.000	197.080.992,00	196.387.239,06	693.752,94	576.011,48
2,500	-1	05	23,215	-0,083	37,71	0,994	47,877	2.678.400	128.234.016,00	127.515.302,25	718.713,75	592.921,17
2,583	-1	06	17,777	-0,142	30,22	0,993	40,727	2.592.000	105.564.384,00	104.857.605,50	706.778,50	579.347,36
2,667	-1	07	13,652	-0,202	24,30	0,992	33,125	2.678.400	88.721.136,00	88.016.529,39	704.606,61	573.874,75
2,750	-1	08	11,296	-0,244	20,59	0,991	40,260	2.678.400	107.832.384,00	106.900.552,96	931.831,04	754.088,43
2,833	-1	09	11,324	-0,244	19,90	0,992	33,226	2.592.000	86.122.224,00	85.469.161,56	653.062,44	525.115,10
2,917	1	10	20,626	-0,194	56,51	0,970	41,848	2.678.400	112.086.720,00	108.756.008,17	3.330.711,83	2.661.040,97
3,000	1	11	44,043	-0,024	91,79	0,986	78,446	2.592.000	203.332.896,00	200.576.161,47	2.756.734,53	2.188.387,11
3,083	1	12	108,092	0,178	164,14	0,996	94,577	2.678.400	253.315.296,00	252.243.222,31	1.072.073,69	845.606,94
3,167	1	01	160,777	0,267	208,63	0,998	68,103	2.678.400	182.408.112,00	182.055.107,06	353.004,94	276.655,55
3,250	1	02	89,697	0,136	135,79	0,996	53,888	2.419.200	130.364.640,00	129.820.281,81	544.358,19	423.894,78
3,333	1	03	87,485	0,130	129,56	0,996	74,161	2.678.400	198.632.304,00	197.879.920,20	752.383,80	582.140,00
3,417	-1	04	37,134	0,023	35,92	1,000	62,600	2.592.000	162.259.632,00	162.259.632,00	0,00	0,00
3,500	-1	05	23,215	-0,083	25,33	1,000	50,989	2.678.400	136.568.160,00	136.505.285,82	62.874,18	48.027,47
3,583	-1	06	17,777	-0,142	20,53	0,999	36,902	2.592.000	95.648.688,00	95.567.397,30	81.290,70	61.698,26

Ano (meses)	Período (Sazonalidade)	Mes	LB	Vazão (log da vazão menos o log da média da vazão)	Pred (turbidez)	QDA (em compração a Lb)	Vazão observada	Segundo no mês	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
3,667	-1	07	13,652	-0,202	16,68	0,999	28,785	2.678.400	77.099.040,00	76.997.011,28	102.028,72	76.943,02
3,750	-1	08	11,296	-0,244	14,28	0,998	26,585	2.678.400	71.206.128,00	71.088.572,72	117.555,28	88.085,34
3,833	-1	09	11,324	-0,244	13,94	0,999	25,369	2.592.000	65.755.584,00	65.664.279,77	91.304,23	67.977,80
3,917	1	10	20,626	-0,194	39,93	0,989	26,341	2.678.400	70.552.080,00	69.800.479,64	751.600,36	556.003,95
4,000	1	11	44,043	-0,024	65,42	0,996	50,863	2.592.000	131.837.760,00	131.331.544,84	506.215,16	372.083,79
4,083	1	12	108,092	0,178	117,96	1,000	100,968	2.678.400	270.432.864,00	270.308.191,36	124.672,64	91.052,41
4,167	1	01	160,777	0,267	151,11	1,000	161,025	2.678.400	431.289.928,42	431.289.928,42	0,00	0,00
4,250	1	02	89,697	0,136	99,09	0,999	120,122	2.505.600	300.976.966,02	300.814.913,75	162.052,26	116.843,57
4,333	1	03	87,485	0,130	95,23	1,000	120,580	2.678.400	322.962.688,42	322.818.841,64	143.846,78	103.053,92
4,417	-1	04	37,134	0,023	26,59	1,000	93,086	2.592.000	241.278.423,16	241.278.423,16	0,00	0,00
4,500	-1	05	23,215	-0,083	18,87	1,000	73,216	2.678.400	196.102.216,42	196.102.216,42	0,00	0,00
4,583	-1	06	17,777	-0,142	15,39	1,000	63,685	2.592.000	165.071.690,53	165.071.690,53	0,00	0,00
4,667	-1	07	13,652	-0,202	12,58	1,000	55,246	2.678.400	147.969.629,05	147.969.629,05	0,00	0,00
4,750	-1	08	11,296	-0,244	10,83	1,000	50,263	2.678.400	134.625.330,95	134.625.330,95	0,00	0,00
4,833	-1	09	11,324	-0,244	10,63	1,000	49,862	2.592.000	129.241.792,42	129.241.792,42	0,00	0,00
4,917	1	10	20,626	-0,194	30,62	0,996	55,896	2.678.400	149.712.044,21	149.138.958,35	573.085,86	392.542,78
5,000	1	11	44,043	-0,024	50,43	0,999	82,922	2.592.000	214.932.641,68	214.763.949,75	168.691,93	114.809,10
5,083	1	12	108,092	0,178	91,37	1,000	133,167	2.678.400	356.675.452,54	356.675.452,54	0,00	0,00
5,167	1	01	160,777	0,267	117,61	1,000	161,025	2.678.400	431.289.928,42	431.289.928,42	0,00	0,00
5,250	1	02	89,697	0,136	77,47	1,000	120,122	2.419.200	290.598.449,95	290.598.449,95	0,00	0,00
5,333	1	03	87,485	0,130	74,79	1,000	120,580	2.678.400	322.962.688,42	322.962.688,42	0,00	0,00
5,417	-1	04	37,134	0,023	20,97	1,000	93,086	2.592.000	241.278.423,16	241.278.423,16	0,00	0,00
5,500	-1	05	23,215	-0,083	14,94	1,000	73,216	2.678.400	196.102.216,42	196.102.216,42	0,00	0,00
5,583	-1	06	17,777	-0,142	12,24	1,000	63,685	2.592.000	165.071.690,53	165.071.690,53	0,00	0,00
5,667	-1	07	13,652	-0,202	10,04	1,000	55,246	2.678.400	147.969.629,05	147.969.629,05	0,00	0,00

Ano (meses)	Período	Mes	LB	Vazão (log da vazão menos o log da média da vazão)	Pred (turbidez)	QDA (em compração a Lb)	Vazão observada	Segundo no mês	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
5,750	-1	08	11,296	-0,244	8,68	1,000	50,263	2.678.400	134.625.330,95	134.625.330,95	0,00	0,00
5,833	-1	09	11,324	-0,244	8,55	1,000	49,862	2.592.000	129.241.792,42	129.241.792,42	0,00	0,00
5,917	1	10	20,626	-0,194	24,71	0,999	55,896	2.678.400	149.712.044,21	149.540.625,82	171.418,39	108.717,91
6,000	1	11	44,043	-0,024	40,83	1,000	82,922	2.592.000	214.932.641,68	214.932.641,68	0,00	0,00
6,083	1	12	108,092	0,178	74,23	1,000	133,167	2.678.400	356.675.452,54	356.675.452,54	0,00	0,00
6,167	1	01	160,777	0,267	95,85	1,000	161,025	2.678.400	431.289.928,42	431.289.928,42	0,00	0,00
6,250	1	02	89,697	0,136	63,34	1,000	120,122	2.419.200	290.598.449,95	290.598.449,95	0,00	0,00
6,333	1	03	87,485	0,130	61,33	1,000	120,580	2.678.400	322.962.688,42	322.962.688,42	0,00	0,00
6,417	-1	04	37,134	0,023	17,24	1,000	93,086	2.592.000	241.278.423,16	241.278.423,16	0,00	0,00
6,500	-1	05	23,215	-0,083	12,33	1,000	73,216	2.678.400	196.102.216,42	196.102.216,42	0,00	0,00
6,583	-1	06	17,777	-0,142	10,12	1,000	63,685	2.592.000	165.071.690,53	165.071.690,53	0,00	0,00
6,667	-1	07	13,652	-0,202	8,33	1,000	55,246	2.678.400	147.969.629,05	147.969.629,05	0,00	0,00
6,750	-1	08	11,296	-0,244	7,21	1,000	50,263	2.678.400	134.625.330,95	134.625.330,95	0,00	0,00
6,833	-1	09	11,324	-0,244	7,13	1,000	49,862	2.592.000	129.241.792,42	129.241.792,42	0,00	0,00
6,917	1	10	20,626	-0,194	20,65	1,000	55,896	2.678.400	149.712.044,21	149.711.345,56	698,65	410,28
7,000	1	11	44,043	-0,024	34,20	1,000	82,922	2.592.000	214.932.641,68	214.932.641,68	0,0	0,00
7,083	1	12	108,092	0,178	62,32	1,000	133,167	2.678.400	356.675.452,54	356.675.452,54	0,0	0,00
7,167	1	01	160,777	0,267	80,67	1,000	161,025	2.678.400	431.289.928,42	431.289.928,42	0,0	0,00
7,250	1	02	89,697	0,136	53,42	1,000	120,122	2.419.200	290.598.449,95	290.598.449,95	0,0	0,00
7,333	1	03	87,485	0,130	51,84	1,000	120,580	2.678.400	322.962.688,42	322.962.688,42	0,0	0,00
7,417	-1	04	37,134	0,023	14,61	1,000	93,086	2.592.000	241.278.423,16	241.278.423,16	0,0	0,00
7,500	-1	05	23,215	-0,083	10,46	1,000	73,216	2.678.400	196.102.216,42	196.102.216,42	0,0	0,00
7,583	-1	06	17,777	-0,142	8,61	1,000	63,685	2.592.000	165.071.690,53	165.071.690,53	0,0	0,00
7,667	-1	07	13,652	-0,202	7,10	1,000	55,246	2.678.400	147.969.629,05	147.969.629,05	0,0	0,00
7,750	-1	08	11,296	-0,244	6,16	1,000	50,263	2.678.400	134.625.330,95	134.625.330,95	0,0	0,00

Ano (meses)	Período (Sazonalidade)	Mes	LB	Vazão (log da vazão menos o log da média da vazão)	Pred (turbidez)	QDA (em compração a lb)	Vazão observada	Segundo no mês	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
7,833	-1	09	11,324	-0,244	6,10	1,000	49,862	2.592.000	129.241.792,42	129.241.792,42	0,0	0,00
7,917	1	10	20,626	-0,194	17,70	1,000	55,896	2.678.400	149.712.044,21	149.712.044,21	0,0	0,00
8,000	1	11	44,043	-0,024	29,37	1,000	82,922	2.592.000	214.932.641,68	214.932.641,68	0,0	0,00
TOTAL									16.651.253.066,19	996.742.258,05	961.908.474,14	

Fonte: Lactec, 2021.

Apêndice F – Tabela 2 – Planilha de dados utilizados para mensuração da perda interina da quantidade de água em m³ perdida pelo desastre do rompimento da barragem de Fundão, compartimento 2A.

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp 1	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
0,0000	1	11	54,572	-0,003	não há dado registrado	0,000	129,371	0	0,1090	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0833	1	12	116,657	0,209	9,032,76	0,198	232,113	2.678.400	0,1090	553.921.841,08	109.513.589,59	444.408.251,49	441.567.208,08
0,1667	1	01	152,522	0,283	5.310,09	0,379	356,764	2.678.400	0,1090	851.391.339,41	322.838.475,12	528.552.864,29	521.816.527,91
0,2500	1	02	92,164	0,143	2.469,42	0,449	195,736	2.505.600	0,1090	436.973.393,71	196.166.530,29	240.806.863,41	236.217.985,25
0,3333	1	03	86,237	0,125	1.723,77	0,531	178,691	2.678.400	0,1090	426.432.576,29	226.411.381,04	200.021.195,25	194.955.197,64
0,4167	-1	04	41,205	0,022	735,72	0,563	101,970	2.592.000	0,1090	235.494.865,88	132.660.777,70	102.834.088,18	99.588.823,49
0,5000	-1	05	26,600	-0,100	449,69	0,579	100,009	2.678.400	0,1090	238.664.776,64	138.209.373,53	100.455.403,10	96.663.274,06
0,5833	-1	06	20,993	-0,166	323,41	0,606	102,431	2.592.000	0,1090	236.558.944,36	143.351.567,62	93.207.376,73	89.115.487,13
0,6667	-1	07	17,031	-0,224	242,29	0,629	80,752	2.678.400	0,1090	192.708.095,26	121.225.915,84	71.482.179,42	67.907.131,49
0,7500	-1	08	13,732	-0,284	183,97	0,646	66,504	2.678.400	0,1090	158.707.044,75	102.590.940,74	56.116.104,01	52.968.760,69
0,8333	-1	09	13,665	-0,285	162,66	0,680	65,531	2.592.000	0,1090	151.340.480,85	102.971.051,62	48.369.429,23	45.364.691,63
0,9167	1	10	24,838	-0,222	243,10	0,735	77,080	2.678.400	0,1090	183.945.854,55	135.258.435,87	48.687.418,69	45.371.010,31
1,0000	1	11	54,572	-0,003	369,26	0,830	155,810	2.592.000	0,1090	359.834.235,15	298.625.005,42	61.209.229,72	56.675.233,05
1,0833	1	12	116,657	0,209	555,27	0,902	419,901	2.678.400	0,1090	1.002.063.812,24	903.795.885,51	98.267.926,72	90.407.173,95
1,1667	1	01	152,522	0,283	608,59	0,930	158,088	2.678.400	0,1090	377.265.376,35	350.746.410,70	26.518.965,65	24.241.661,43
1,2500	1	02	92,164	0,143	404,07	0,916	142,775	2.419.200	0,1090	307.749.046,82	281.775.007,45	25.974.039,37	23.591.741,18
1,3333	1	03	86,237	0,125	359,41	0,923	122,941	2.678.400	0,1090	293.390.434,61	270.914.723,42	22.475.711,19	20.283.768,41
1,4167	-1	04	41,205	0,022	183,55	0,913	90,450	2.592.000	0,1090	208.890.594,56	190.729.157,61	18.161.436,94	16.285.462,91
1,5000	-1	05	26,600	-0,100	129,02	0,899	91,524	2.678.400	0,1090	218.415.723,14	196.274.174,27	22.141.548,87	19.727.524,82
1,5833	-1	06	20,993	-0,166	103,86	0,895	77,327	2.592.000	0,1090	178.583.507,19	159.845.296,87	18.738.210,33	16.588.511,19
1,6667	-1	07	17,031	-0,224	85,42	0,893	65,713	2.678.400	0,1090	156.819.070,46	139.976.449,06	16.842.621,40	14.815.069,30

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp 1	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
1,7500	-1	08	13,732	-0,284	70,16	0,889	55,718	2.678.400	0,1090	132.966.507,23	118.227.190,89	14.739.316,34	12.882.081,45
1,8333	-1	09	13,665	-0,285	66,36	0,898	44,701	2.592.000	0,1090	103.234.280,13	92.748.612,53	10.485.667,60	9.105.828,93
1,9167	1	10	24,838	-0,222	105,14	0,921	42,941	2.678.400	0,1090	102.474.663,97	94.385.070,52	8.089.593,45	6.980.150,67
2,0000	1	11	54,572	-0,003	168,09	0,960	95,125	2.592.000	0,1090	219.685.919,91	210.941.163,99	8.744.755,92	7.497.224,11
2,0833	1	12	116,657	0,209	264,46	0,982	279,667	2.678.400	0,1090	667.404.877,05	655.689.600,95	11.715.276,10	9.979.758,44
2,1667	1	01	152,522	0,283	301,80	0,989	138,033	2.678.400	0,1090	329.405.131,91	325.630.163,02	3.774.968,89	3.195.181,83
2,2500	1	02	92,164	0,143	207,76	0,983	343,580	2.419.200	0,1090	740.582.645,00	727.799.531,01	12.783.114,00	10.750.621,28
2,3333	1	03	86,237	0,125	190,94	0,984	395,778	2.678.400	0,1090	944.497.147,49	929.051.708,27	15.445.439,21	12.906.600,39
2,4167	-1	04	41,205	0,022	100,45	0,978	212,213	2.592.000	0,1090	490.095.800,62	479.480.250,39	10.615.550,23	8.813.914,04
2,5000	-1	05	26,600	-0,100	72,54	0,971	127,544	2.678.400	0,1090	304.373.787,58	295.436.579,87	8.937.207,71	7.372.976,55
2,5833	-1	06	20,993	-0,166	59,86	0,967	100,529	2.592.000	0,1090	232.166.757,89	224.523.079,72	7.643.678,18	6.265.534,05
2,6667	-1	07	17,031	-0,224	50,36	0,964	81,813	2.678.400	0,1090	195.241.560,46	188.203.290,03	7.038.270,42	5.732.398,19
2,7500	-1	08	13,732	-0,284	42,25	0,960	99,974	2.678.400	0,1090	238.580.481,76	229.110.103,43	9.470.378,33	7.663.945,90
2,8333	-1	09	13,665	-0,285	40,74	0,963	82,207	2.592.000	0,1090	189.852.846,89	182.870.940,67	6.981.906,22	5.614.018,15
2,9167	1	10	24,838	-0,222	65,72	0,973	107,670	2.678.400	0,1090	256.946.436,47	249.979.346,95	6.967.089,51	5.566.290,80
3,0000	1	11	54,572	-0,003	106,85	0,989	213,163	2.592.000	0,1090	492.289.520,25	486.842.583,70	5.446.936,56	4.323.958,51
3,0833	1	12	116,657	0,209	170,76	0,996	255,869	2.678.400	0,1090	610.614.379,51	608.421.100,78	2.193.278,73	1.729.966,64
3,1667	1	01	152,522	0,283	197,74	0,998	199,555	2.678.400	0,1090	476.225.059,45	475.308.182,09	916.877,36	718.571,27
3,2500	1	02	92,164	0,143	138,01	0,996	151,055	2.419.200	0,1090	325.597.428,42	324.301.550,97	1.295.877,45	1.009.107,03
3,3333	1	03	86,237	0,125	128,48	0,996	194,080	2.678.400	0,1090	463.157.813,96	461.355.743,81	1.802.070,15	1.394.311,13
3,4167	-1	04	41,205	0,022	68,41	0,994	161,178	2.592.000	0,1090	372.232.895,24	369.958.043,62	2.274.851,62	1.748.862,95
3,5000	-1	05	26,600	-0,100	49,98	0,990	128,399	2.678.400	0,1090	306.414.377,94	303.467.314,98	2.947.062,96	2.251.162,34
3,5833	-1	06	20,993	-0,166	41,69	0,988	91,843	2.592.000	0,1090	212.106.116,92	209.646.639,33	2.459.477,60	1.866.701,91
3,6667	-1	07	17,031	-0,224	35,43	0,987	72,196	2.678.400	0,1090	172.291.799,20	169.969.236,47	2.322.562,73	1.751.516,59

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp 1	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
3,7500	-1	08	13,732	-0,284	30,01	0,984	65,540	2.678.400	0,1090	156.407.603,69	153.949.241,23	2.458.362,46	1.842.075,46
3,8333	-1	09	13,665	-0,285	29,21	0,985	60,463	2.592.000	0,1090	139.636.964,81	137.588.203,08	2.048.761,73	1.525.343,50
3,9167	1	10	24,838	-0,222	47,53	0,990	66,364	2.678.400	0,1090	158.374.099,24	156.752.082,15	1.622.017,09	1.199.903,52
4,0000	1	11	54,572	-0,003	77,91	0,997	141,822	2.592.000	0,1090	327.530.629,41	326.484.017,93	1.046.611,48	769.291,79
4,0833	1	12	116,657	0,209	125,51	1,000	305,785	2.678.400	0,1090	729.735.357,05	729.461.300,35	274.056,70	200.152,37
4,1667	1	01	152,522	0,283	146,44	1,000	467,734	2.678.400	0,1090	1.116.214.933,22	1.116.214.933,22	0,00	0,00
4,2500	1	02	92,164	0,143	102,94	0,999	359,406	2.505.600	0,1090	802.362.755,71	801.872.741,18	490.014,53	353.312,22
4,3333	1	03	86,237	0,125	96,49	0,999	332,041	2.678.400	0,1090	792.393.570,91	791.900.174,15	493.396,76	353.476,62
4,4167	-1	04	41,205	0,022	51,72	0,998	259,317	2.592.000	0,1090	598.879.066,63	597.932.999,70	946.066,93	673.443,19
4,5000	-1	05	26,600	-0,100	38,02	0,997	197,901	2.678.400	0,1090	472.275.998,02	470.759.477,74	1.516.520,28	1.072.610,45
4,5833	-1	06	20,993	-0,166	31,90	0,996	171,041	2.592.000	0,1090	395.010.814,70	393.333.452,60	1.677.362,10	1.178.786,97
4,6667	-1	07	17,031	-0,224	27,27	0,995	151,836	2.678.400	0,1090	362.346.504,73	360.429.364,72	1.917.140,01	1.338.680,79
4,7500	-1	08	13,732	-0,284	23,23	0,993	130,022	2.678.400	0,1090	310.288.028,44	308.250.186,79	2.037.841,66	1.413.866,28
4,8333	-1	09	13,665	-0,285	22,73	0,994	130,320	2.592.000	0,1090	300.967.671,84	299.116.692,55	1.850.979,29	1.276.010,25
4,9167	1	10	24,838	-0,222	37,17	0,996	151,812	2.678.400	0,1090	362.288.670,86	360.850.586,24	1.438.084,63	985.035,19
5,0000	1	11	54,572	-0,003	61,24	0,999	249,522	2.592.000	0,1090	576.257.195,91	575.887.045,48	370.150,43	251.918,62
5,0833	1	12	116,657	0,209	99,11	1,000	396,605	2.678.400	0,1090	946.471.030,68	946.471.030,68	0,00	0,00
5,1667	1	01	152,522	0,283	116,17	1,000	467,734	2.678.400	0,1090	1.116.214.933,22	1.116.214.933,22	0,00	0,00
5,2500	1	02	92,164	0,143	82,02	1,000	359,406	2.419.200	0,1090	774.695.074,48	774.695.074,48	0,00	0,00
5,3333	1	03	86,237	0,125	77,21	1,000	332,041	2.678.400	0,1090	792.393.570,91	792.393.570,91	0,00	0,00
5,4167	-1	04	41,205	0,022	41,55	1,000	259,317	2.592.000	0,1090	598.879.066,63	598.856.399,50	22.667,13	15.036,17
5,5000	-1	05	26,600	-0,100	30,66	0,999	197,901	2.678.400	0,1090	472.275.998,02	471.881.201,59	394.796,43	260.212,84
5,5833	-1	06	20,993	-0,166	25,83	0,999	171,041	2.592.000	0,1090	395.010.814,70	394.463.007,86	547.806,84	358.754,75
5,6667	-1	07	17,031	-0,224	22,16	0,998	151,836	2.678.400	0,1090	362.346.504,73	361.633.459,05	713.045,68	463.983,20

Ano	Período	Mes	LB	Vazão	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp 1	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
5,7500	-1	08	13,732	-0,284	18,94	0,997	130,022	2.678.400	0,1090	310.288.028,44	309.450.637,70	837.390,74	541.411,85
5,8333	-1	09	13,665	-0,285	18,60	0,997	130,320	2.592.000	0,1090	300.967.671,84	300.210.243,04	757.428,81	486.582,09
5,9167	1	10	24,838	-0,222	30,52	0,999	151,812	2.678.400	0,1090	362.288.670,86	361.790.577,23	498.093,64	317.936,21
6,0000	1	11	54,572	-0,003	50,45	1,000	249,522	2.592.000	0,1090	576.257.195,91	576.257.195,91	0,00	0,00
6,0833	1	12	116,657	0,209	81,91	1,000	396,605	2.678.400	0,1090	946.471.030,68	946.471.030,68	0,00	0,00
6,1667	1	01	152,522	0,283	96,30	1,000	467,734	2.678.400	0,1090	1.116.214.933,22	1.116.214.933,22	0,00	0,00
6,2500	1	02	92,164	0,143	68,19	1,000	359,406	2.419.200	0,1090	774.695.074,48	774.695.074,48	0,00	0,00
6,3333	1	03	86,237	0,125	64,38	1,000	332,041	2.678.400	0,1090	792.393.570,91	792.393.570,91	0,00	0,00
6,4167	-1	04	41,205	0,022	34,74	1,000	259,317	2.592.000	0,1090	598.879.066,63	598.879.066,63	0,00	0,00
6,5000	-1	05	26,600	-0,100	25,71	1,000	197,901	2.678.400	0,1090	472.275.998,02	472.275.998,02	0,00	0,00
6,5833	-1	06	20,993	-0,166	21,71	1,000	171,041	2.592.000	0,1090	395.010.814,70	394.947.288,82	63.525,88	38.520,98
6,6667	-1	07	17,031	-0,224	18,68	1,000	151,836	2.678.400	0,1090	362.346.504,73	362.168.094,26	178.410,47	107.493,36
6,7500	-1	08	13,732	-0,284	16,01	0,999	130,022	2.678.400	0,1090	310.288.028,44	310.002.389,07	285.639,37	170.999,20
6,8333	-1	09	13,665	-0,285	15,75	0,999	130,320	2.592.000	0,1090	300.967.671,84	300.716.314,44	251.357,40	149.514,18
6,9167	1	10	24,838	-0,222	25,91	1,000	151,812	2.678.400	0,1090	362.288.670,86	362.214.447,70	74.223,17	43.867,70
7,0000	1	11	54,572	-0,003	42,93	1,000	249,522	2.592.000	0,1090	576.257.195,91	576.257.195,91	0,00	0,00
7,0833	1	12	116,657	0,209	69,85	1,000	396,605	2.678.400	0,1090	946.471.030,68	946.471.030,68	0,00	0,00
7,1667	1	01	152,522	0,283	82,30	1,000	467,734	2.678.400	0,1090	1.116.214.933,22	1.116.214.933,22	0,00	0,00
7,2500	1	02	92,164	0,143	58,40	1,000	359,406	2.419.200	0,1090	774.695.074,48	774.695.074,48	0,00	0,00
7,3333	1	03	86,237	0,125	55,25	1,000	332,041	2.678.400	0,1090	792.393.570,91	792.393.570,91	0,00	0,00
7,4167	-1	04	41,205	0,022	29,88	1,000	259,317	2.592.000	0,1090	598.879.066,63	598.879.066,63	0,00	0,00
7,5000	-1	05	26,600	-0,100	22,15	1,000	197,901	2.678.400	0,1090	472.275.998,02	472.275.998,02	0,00	0,00
7,5833	-1	06	20,993	-0,166	18,75	1,000	171,041	2.592.000	0,1090	395.010.814,70	395.010.814,70	0,00	0,00
7,6667	-1	07	17,031	-0,224	16,16	1,000	151,836	2.678.400	0,1090	362.346.504,73	362.346.504,73	0,00	0,00

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp 1	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
7,7500	-1	08	13,732	-0,284	13,87	1,000	130,022	2.678.400	0,1090	310.288.028,44	310.274.005,59	14.022,85	7.773,00
7,8333	-1	09	13,665	-0,285	13,67	1,000	130,320	2.592.000	0,1090	300.967.671,84	300.966.868,20	803,65	442,62
7,9167	1	10	24,838	-0,222	22,53	1,000	151,812	2.678.400	0,1090	362.288.670,86	362.288.670,86	0,00	0,00
8,0000	1	11	54,572	-0,003	37,39	1,000	249,522	2.592.000	0,1090	576.257.195,91	576.257.195,91	0,00	0,00
TOTAL										41.537.636.145,61	2.435.188.649,42	2.328.669.362,41	

Fonte: Lactec, 2021.

Apêndice F – Tabela 3 – Planilha de dados utilizados para mensuração da perda interina da quantidade de água em m³ perdida pelo desastre do rompimento da barragem de Fundão, compartimento 2B.

Ano	Período	Mes	LB	Vazão	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. 2A	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
0,0000	1	11	83,9368	0,0209	não há dado registrado	0,00	201,25	0	0,4568	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0833	1	12	184,8077	0,2153	6739,66	0,37	415,94	2.678.400	0,4568	605.123.775,63	222.244.757,14	382.879.018,49	380.431.323,35
0,1667	1	01	234,2500	0,2737	4211,21	0,56	912,58	2.678.400	0,4568	1.327.648.408,31	745.286.633,08	582.361.775,23	574.939.651,39
0,2500	1	02	130,3086	0,1292	1793,78	0,64	380,60	2.505.600	0,4568	517.990.534,81	330.781.607,82	187.208.926,99	183.641.425,03
0,3333	1	03	125,2250	0,1194	1298,72	0,72	333,30	2.678.400	0,4568	484.900.552,46	348.785.346,55	136.115.205,91	132.667.774,72
0,4167	-1	04	57,0427	0,0160	298,49	0,88	189,81	2.592.000	0,4568	267.233.269,49	236.406.905,36	30.826.364,13	29.853.537,77
0,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	169,30	0,90	207,48	2.678.400	0,4568	301.853.011,19	271.307.165,92	30.545.845,27	29.392.758,59
0,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	119,56	0,92	177,94	2.592.000	0,4568	250.525.587,88	229.601.087,05	20.924.500,84	20.005.896,00
0,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	89,27	0,93	149,40	2.678.400	0,4568	217.354.886,06	202.269.050,34	15.085.835,72	14.331.345,77
0,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	68,22	0,94	120,09	2.678.400	0,4568	174.714.349,64	164.458.289,40	10.256.060,24	9.680.836,01
0,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	58,75	0,95	100,32	2.592.000	0,4568	141.242.514,08	134.588.686,35	6.653.827,73	6.240.488,01
0,9167	1	10	32,9884	-0,2092	161,55	0,90	147,38	2.678.400	0,4568	214.413.474,34	192.310.389,34	22.103.085,00	20.597.503,92
1,0000	1	11	83,9368	0,0209	302,43	0,94	376,46	2.592.000	0,4568	530.014.452,74	499.880.621,00	30.133.831,74	27.901.706,07
1,0833	1	12	184,8077	0,2153	510,24	0,97	829,69	2.678.400	0,4568	1.207.059.288,10	1.170.465.210,14	36.594.077,96	33.666.805,45
1,1667	1	01	234,2500	0,2737	566,29	0,98	300,01	2.678.400	0,4568	436.467.767,38	427.234.139,71	9.233.627,67	8.440.694,05
1,2500	1	02	130,3086	0,1292	335,21	0,97	345,80	2.419.200	0,4568	454.395.940,08	442.974.014,66	11.421.925,42	10.374.324,32
1,3333	1	03	125,2250	0,1194	303,69	0,98	272,38	2.678.400	0,4568	396.265.553,80	387.806.451,22	8.459.102,59	7.634.128,97
1,4167	-1	04	57,0427	0,0160	82,41	1,00	205,80	2.592.000	0,4568	289.747.435,17	288.768.125,38	979.309,79	878.152,61
1,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	53,21	1,00	214,11	2.678.400	0,4568	311.489.603,47	310.155.124,57	1.334.478,91	1.188.984,83
1,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	41,71	1,00	166,63	2.592.000	0,4568	234.600.853,98	233.600.627,68	1.000.226,30	885.477,58
1,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	33,96	1,00	142,91	2.678.400	0,4568	207.911.645,10	207.057.517,83	854.127,26	751.305,53
1,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	27,91	1,00	112,11	2.678.400	0,4568	163.099.973,58	162.452.957,84	647.015,74	565.488,20
1,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	25,59	1,00	77,67	2.592.000	0,4568	109.347.211,38	108.981.432,78	365.778,60	317.644,76

Ano	Período	Mes	LB	Vazão	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. 2A	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
1,9167	1	10	32,9884	-0,2092	74,27	0,98	77,80	2.678.400	0,4568	113.182.951,17	111.236.487,20	1.946.463,97	1.679.517,26
2,0000	1	11	83,9368	0,0209	145,81	0,99	231,86	2.592.000	0,4568	326.434.127,52	324.064.032,21	2.370.095,31	2.031.976,18
2,0833	1	12	184,8077	0,2153	256,55	1,00	630,32	2.678.400	0,4568	917.012.127,10	914.458.766,46	2.553.360,64	2.175.102,16
2,1667	1	01	234,2500	0,2737	295,59	1,00	281,85	2.678.400	0,4568	410.042.148,27	409.371.963,67	670.184,60	567.252,80
2,2500	1	02	130,3086	0,1292	180,95	1,00	960,03	2.419.200	0,4568	1.261.509.741,96	1.257.991.824,73	3.517.917,23	2.958.574,56
2,3333	1	03	125,2250	0,1194	168,98	1,00	831,53	2.678.400	0,4568	1.209.739.612,96	1.206.829.613,55	2.909.999,41	2.431.669,25
2,4167	-1	04	57,0427	0,0160	47,14	1,00	461,59	2.592.000	0,4568	649.871.153,14	649.871.153,14	0,00	0,00
2,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	31,21	1,00	281,70	2.678.400	0,4568	409.819.231,10	409.819.231,10	0,00	0,00
2,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	25,03	1,00	239,48	2.592.000	0,4568	337.168.880,22	337.168.880,22	0,00	0,00
2,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	20,81	1,00	185,89	2.678.400	0,4568	270.444.997,62	270.444.997,62	0,00	0,00
2,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	17,45	1,00	203,10	2.678.400	0,4568	295.469.914,68	295.469.914,68	0,00	0,00
2,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	16,28	1,00	172,87	2.592.000	0,4568	243.380.036,40	243.380.036,40	0,00	0,00
2,9167	1	10	32,9884	-0,2092	48,06	1,00	210,70	2.678.400	0,4568	306.525.668,11	305.448.400,13	1.077.267,98	860.673,14
3,0000	1	11	83,9368	0,0209	95,83	1,00	448,59	2.592.000	0,4568	631.569.105,31	631.086.509,28	482.596,03	383.100,70
3,0833	1	12	184,8077	0,2153	171,08	1,00	493,63	2.678.400	0,4568	718.148.103,63	718.148.103,63	0,00	0,00
3,1667	1	01	234,2500	0,2737	199,81	1,00	434,03	2.678.400	0,4568	631.435.198,57	631.435.198,57	0,00	0,00
3,2500	1	02	130,3086	0,1292	123,88	1,00	344,43	2.419.200	0,4568	452.591.953,49	452.591.953,49	0,00	0,00
3,3333	1	03	125,2250	0,1194	117,08	1,00	430,04	2.678.400	0,4568	625.630.435,25	625.630.435,25	0,00	0,00
3,4167	-1	04	57,0427	0,0160	33,03	1,00	313,91	2.592.000	0,4568	441.954.893,27	441.954.893,27	0,00	0,00
3,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	22,10	1,00	249,41	2.678.400	0,4568	362.843.698,62	362.843.698,62	0,00	0,00
3,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	17,91	1,00	179,48	2.592.000	0,4568	252.688.588,46	252.688.588,46	0,00	0,00
3,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	15,03	1,00	147,50	2.678.400	0,4568	214.584.299,29	214.584.299,29	0,00	0,00
3,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	12,71	1,00	132,41	2.678.400	0,4568	192.626.957,25	192.626.957,25	0,00	0,00
3,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	11,96	1,00	117,08	2.592.000	0,4568	164.837.632,54	164.837.632,54	0,00	0,00
3,9167	1	10	32,9884	-0,2092	35,60	1,00	120,63	2.678.400	0,4568	175.492.369,70	175.423.175,53	69.194,17	51.187,08
4,0000	1	11	83,9368	0,0209	71,54	1,00	669,29	2.592.000	0,4568	942.286.434,00	942.286.434,00	0,00	0,00

Ano	Período	Mes	LB	Vazão	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. 2A	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
4,0833	1	12	184,8077	0,2153	128,65	1,00	1017,94	2.678.400	0,4568	1.480.927.434,11	1.480.927.434,11	0,00	0,00
4,1667	1	01	234,2500	0,2737	151,31	1,00	1172,54	2.678.400	0,4568	1.705.837.090,62	1.705.837.090,62	0,00	0,00
4,2500	1	02	130,3086	0,1292	94,44	1,00	917,39	2.505.600	0,4568	1.248.539.018,82	1.248.539.018,82	0,00	0,00
4,3333	1	03	125,2250	0,1194	89,83	1,00	852,74	2.678.400	0,4568	1.240.582.812,14	1.240.582.812,14	0,00	0,00
4,4167	-1	04	57,0427	0,0160	25,49	1,00	667,19	2.592.000	0,4568	939.330.678,67	939.330.678,67	0,00	0,00
4,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	17,16	1,00	513,29	2.678.400	0,4568	746.750.033,40	746.750.033,40	0,00	0,00
4,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	13,98	1,00	449,55	2.592.000	0,4568	632.914.001,97	632.914.001,97	0,00	0,00
4,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	11,80	1,00	405,25	2.678.400	0,4568	589.566.353,53	589.566.353,53	0,00	0,00
4,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	10,03	1,00	367,95	2.678.400	0,4568	535.306.165,55	535.306.165,55	0,00	0,00
4,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	9,49	1,00	357,36	2.592.000	0,4568	503.126.554,59	503.126.554,59	0,00	0,00
4,9167	1	10	32,9884	-0,2092	28,36	1,00	409,96	2.678.400	0,4568	596.424.007,32	596.424.007,32	0,00	0,00
5,0000	1	11	83,9368	0,0209	57,25	1,00	669,29	2.592.000	0,4568	942.286.434,00	942.286.434,00	0,00	0,00
5,0833	1	12	184,8077	0,2153	103,41	1,00	1017,94	2.678.400	0,4568	1.480.927.434,11	1.480.927.434,11	0,00	0,00
5,1667	1	01	234,2500	0,2737	122,14	1,00	1172,54	2.678.400	0,4568	1.705.837.090,62	1.705.837.090,62	0,00	0,00
5,2500	1	02	130,3086	0,1292	76,54	1,00	917,39	2.419.200	0,4568	1.205.485.949,21	1.205.485.949,21	0,00	0,00
5,3333	1	03	125,2250	0,1194	73,09	1,00	852,74	2.678.400	0,4568	1.240.582.812,14	1.240.582.812,14	0,00	0,00
5,4167	-1	04	57,0427	0,0160	20,82	1,00	667,19	2.592.000	0,4568	939.330.678,67	939.330.678,67	0,00	0,00
5,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	14,07	1,00	513,29	2.678.400	0,4568	746.750.033,40	746.750.033,40	0,00	0,00
5,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	11,50	1,00	449,55	2.592.000	0,4568	632.914.001,97	632.914.001,97	0,00	0,00
5,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	9,74	1,00	405,25	2.678.400	0,4568	589.566.353,53	589.566.353,53	0,00	0,00
5,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	8,31	1,00	367,95	2.678.400	0,4568	535.306.165,55	535.306.165,55	0,00	0,00
5,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	7,88	1,00	357,36	2.592.000	0,4568	503.126.554,59	503.126.554,59	0,00	0,00
5,9167	1	10	32,9884	-0,2092	23,64	1,00	409,96	2.678.400	0,4568	596.424.007,32	596.424.007,32	0,00	0,00
6,0000	1	11	83,9368	0,0209	47,86	1,00	669,29	2.592.000	0,4568	942.286.434,00	942.286.434,00	0,00	0,00
6,0833	1	12	184,8077	0,2153	86,71	1,00	1017,94	2.678.400	0,4568	1.480.927.434,11	1.480.927.434,11	0,00	0,00
6,1667	1	01	234,2500	0,2737	102,70	1,00	1172,54	2.678.400	0,4568	1.705.837.090,62	1.705.837.090,62	0,00	0,00

Ano	Período	Mes	LB	Vazão	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. 2A	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
6,2500	1	02	130,3086	0,1292	64,54	1,00	917,39	2.419.200	0,4568	1.205.485.949,21	1.205.485.949,21	0,00	0,00
6,3333	1	03	125,2250	0,1194	61,79	1,00	852,74	2.678.400	0,4568	1.240.582.812,14	1.240.582.812,14	0,00	0,00
6,4167	-1	04	57,0427	0,0160	17,65	1,00	667,19	2.592.000	0,4568	939.330.678,67	939.330.678,67	0,00	0,00
6,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	11,95	1,00	513,29	2.678.400	0,4568	746.750.033,40	746.750.033,40	0,00	0,00
6,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	9,80	1,00	449,55	2.592.000	0,4568	632.914.001,97	632.914.001,97	0,00	0,00
6,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	8,31	1,00	405,25	2.678.400	0,4568	589.566.353,53	589.566.353,53	0,00	0,00
6,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	7,11	1,00	367,95	2.678.400	0,4568	535.306.165,55	535.306.165,55	0,00	0,00
6,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	6,76	1,00	357,36	2.592.000	0,4568	503.126.554,59	503.126.554,59	0,00	0,00
6,9167	1	10	32,9884	-0,2092	20,32	1,00	409,96	2.678.400	0,4568	596.424.007,32	596.424.007,32	0,00	0,00
7,0000	1	11	83,9368	0,0209	41,23	1,00	669,29	2.592.000	0,4568	942.286.434,00	942.286.434,00	0,00	0,00
7,0833	1	12	184,8077	0,2153	74,84	1,00	1017,94	2.678.400	0,4568	1.480.927.434,11	1.480.927.434,11	0,00	0,00
7,1667	1	01	234,2500	0,2737	88,83	1,00	1172,54	2.678.400	0,4568	1.705.837.090,62	1.705.837.090,62	0,00	0,00
7,2500	1	02	130,3086	0,1292	55,93	1,00	917,39	2.419.200	0,4568	1.205.485.949,21	1.205.485.949,21	0,00	0,00
7,3333	1	03	125,2250	0,1194	53,65	1,00	852,74	2.678.400	0,4568	1.240.582.812,14	1.240.582.812,14	0,00	0,00
7,4167	-1	04	57,0427	0,0160	15,35	1,00	667,19	2.592.000	0,4568	939.330.678,67	939.330.678,67	0,00	0,00
7,5000	-1	05	34,9405	-0,1047	10,42	1,00	513,29	2.678.400	0,4568	746.750.033,40	746.750.033,40	0,00	0,00
7,5833	-1	06	27,4226	-0,1644	8,55	1,00	449,55	2.592.000	0,4568	632.914.001,97	632.914.001,97	0,00	0,00
7,6667	-1	07	22,5141	-0,2130	7,27	1,00	405,25	2.678.400	0,4568	589.566.353,53	589.566.353,53	0,00	0,00
7,7500	-1	08	18,6542	-0,2593	6,23	1,00	367,95	2.678.400	0,4568	535.306.165,55	535.306.165,55	0,00	0,00
7,8333	-1	09	17,7489	-0,2716	5,93	1,00	357,36	2.592.000	0,4568	503.126.554,59	503.126.554,59	0,00	0,00
7,9167	1	10	32,9884	-0,2092	17,86	1,00	409,96	2.678.400	0,4568	596.424.007,32	596.424.007,32	0,00	0,00
8,0000	1	11	83,9368	0,0209	36,30	1,00	669,29	2.592.000	0,4568	942.286.434,00	942.286.434,00	0,00	0,00
TOTAL										64.376.312.451,44	1.541.581.026,85	1.507.526.306,07	

Apêndice F – Tabela 4 – Planilha de dados utilizados para mensuração da perda interina da quantidade de água em m³ perdida pelo desastre do rompimento da barragem de Fundão, compartimento 3.

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. ZB	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
0,0000	1	11	130,60	0,01	não há dado registrado	0,11	214,17	0	0,8950	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0833	1	12	283,87	0,26	2567,01	0,76	507,96	2.678.400	0,8950	142819194,50	108083681,87	34735512,63	34.513.453,07
0,1667	1	01	301,49	0,28	1759,97	0,86	1097,95	2.678.400	0,8950	308701739,17	266313747,24	42387991,93	41.847.762,58
0,2500	1	02	206,54	0,16	972,69	0,90	545,81	2.505.600	0,8950	143559738,73	129745171,47	13814567,26	13.551.313,28
0,3333	1	03	181,34	0,11	716,36	0,93	398,29	2.678.400	0,8950	111984256,51	104269816,79	7714439,73	7.519.053,77
0,4167	-1	04	38,99	0,00	179,86	0,91	237,74	2.592.000	0,8950	64687287,63	58690896,78	5996390,85	5.807.155,20
0,5000	-1	05	26,60	-0,13	113,89	0,92	254,12	2.678.400	0,8950	71448506,43	65681960,39	5766546,04	5.548.862,51
0,5833	-1	06	21,21	-0,20	84,14	0,93	210,25	2.592.000	0,8950	57208380,34	53235238,42	3973141,92	3.798.717,33
0,6667	-1	07	18,45	-0,24	67,95	0,94	177,50	2.678.400	0,8950	49906967,85	46934173,09	2972794,76	2.824.115,98
0,7500	-1	08	15,67	-0,29	54,32	0,95	133,40	2.678.400	0,8950	37507273,33	35546694,97	1960578,35	1.850.616,81
0,8333	-1	09	14,53	-0,32	47,27	0,95	103,70	2.592.000	0,8950	28215415,78	26937725,33	1277690,45	1.198.319,56
0,9167	1	10	61,94	-0,23	140,29	0,98	154,56	2.678.400	0,8950	43456931,82	42696139,39	760792,44	708.970,05
1,0000	1	11	130,60	0,01	251,94	0,99	579,59	2.592.000	0,8950	157701367,45	156041081,83	1660285,62	1.537.302,05
1,0833	1	12	283,87	0,26	466,80	0,99	1081,65	2.678.400	0,8950	304119162,53	302329357,71	1789804,81	1.646.632,84
1,1667	1	01	301,49	0,28	466,96	1,00	403,57	2.678.400	0,8950	113467884,52	112945094,92	522789,60	477.895,28
1,2500	1	02	206,54	0,16	320,62	1,00	476,21	2.419.200	0,8950	120934456,97	120371856,90	562600,07	510.999,27
1,3333	1	03	181,34	0,11	273,81	1,00	362,70	2.678.400	0,8950	101977794,18	101556749,40	421044,78	379.982,41
1,4167	-1	04	38,99	0,00	76,72	0,99	297,60	2.592.000	0,8950	80974998,14	80063985,64	911012,50	816.910,04
1,5000	-1	05	26,60	-0,13	52,93	0,99	293,00	2.678.400	0,8950	82380172,90	81418273,96	961898,94	857.026,09
1,5833	-1	06	21,21	-0,20	41,90	0,99	231,50	2.592.000	0,8950	62989069,58	62271434,48	717635,10	635.306,03
1,6667	-1	07	18,45	-0,24	35,83	0,99	194,79	2.678.400	0,8950	54766897,13	54177411,79	589485,34	518.521,79
1,7500	-1	08	15,67	-0,29	30,06	0,99	158,00	2.678.400	0,8950	44422859,09	43963784,30	459074,79	401.228,84

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. ZB	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
1,8333	-1	09	14,53	-0,32	27,26	0,99	122,85	2.592.000	0,8950	33426706,77	33106535,60	320171,17	278.038,94
1,9167	1	10	61,94	-0,23	83,87	1,00	103,54	2.678.400	0,8950	29112503,73	29041181,49	71322,24	61.540,79
2,0000	1	11	130,60	0,01	155,43	1,00	261,76	2.592.000	0,8950	71222488,52	71144869,83	77618,68	66.545,56
2,0833	1	12	283,87	0,26	296,11	1,00	871,11	2.678.400	0,8950	244923511,54	244873480,05	50031,49	42.619,75
2,1667	1	01	301,49	0,28	303,66	1,00	396,53	2.678.400	0,8950	111489139,43	111485528,37	3611,05	3.056,44
2,2500	1	02	206,54	0,16	213,19	1,00	1253,81	2.419.200	0,8950	318409353,58	318361508,58	47845,00	40.237,73
2,3333	1	03	181,34	0,11	185,76	1,00	1068,87	2.678.400	0,8950	300525913,08	300492089,76	33823,33	28.263,63
2,4167	-1	04	38,99	0,00	53,01	1,00	625,03	2.592.000	0,8950	170066234,17	169640706,17	425528,01	353.308,80
2,5000	-1	05	26,60	-0,13	37,18	1,00	401,69	2.678.400	0,8950	112939028,00	112613335,75	325692,25	268.688,10
2,5833	-1	06	21,21	-0,20	29,89	1,00	333,70	2.592.000	0,8950	90797254,06	90525168,54	272085,52	223.028,89
2,6667	-1	07	18,45	-0,24	25,92	1,00	273,00	2.678.400	0,8950	76757750,61	76531139,34	226611,26	184.566,08
2,7500	-1	08	15,67	-0,29	22,03	1,00	272,28	2.678.400	0,8950	76553681,47	76326714,40	226967,07	183.674,11
2,8333	-1	09	14,53	-0,32	20,22	1,00	206,51	2.592.000	0,8950	56189848,58	56031478,41	158370,17	127.342,44
2,9167	1	10	61,94	-0,23	62,89	1,00	238,78	2.678.400	0,8950	67136026,63	67131338,49	4688,14	3.745,55
3,0000	1	11	130,60	0,01	117,76	1,00	522,22	2.592.000	0,8950	142092345,56	142092345,56	0,00	0,00
3,0833	1	12	283,87	0,26	226,51	1,00	667,17	2.678.400	0,8950	187583892,07	187583892,07	0,00	0,00
3,1667	1	01	301,49	0,28	234,38	1,00	660,41	2.678.400	0,8950	185682058,37	185682058,37	0,00	0,00
3,2500	1	02	206,54	0,16	165,95	1,00	438,85	2.419.200	0,8950	111446602,35	111446602,35	0,00	0,00
3,3333	1	03	181,34	0,11	145,74	1,00	488,55	2.678.400	0,8950	137362385,65	137362385,65	0,00	0,00
3,4167	-1	04	38,99	0,00	41,90	1,00	385,70	2.592.000	0,8950	104947136,24	104908417,23	38719,00	29.766,44
3,5000	-1	05	26,60	-0,13	29,60	1,00	306,71	2.678.400	0,8950	86236354,09	86185790,69	50563,40	38.623,68
3,5833	-1	06	21,21	-0,20	23,95	1,00	223,33	2.592.000	0,8950	60765804,31	60724206,00	41598,31	31.572,41
3,6667	-1	07	18,45	-0,24	20,90	1,00	180,77	2.678.400	0,8950	50826548,75	50790597,11	35951,64	27.112,25
3,7500	-1	08	15,67	-0,29	17,87	1,00	157,03	2.678.400	0,8950	44150132,02	44116752,78	33379,24	25.011,40
3,8333	-1	09	14,53	-0,32	16,49	1,00	135,89	2.592.000	0,8950	36973700,54	36946959,96	26740,58	19.908,89
3,9167	1	10	61,94	-0,23	51,58	1,00	139,45	2.678.400	0,8950	39208393,69	39208393,69	0,00	0,00

Ano	Periodo	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. ZB	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
4,0000	1	11	130,60	0,01	97,07	1,00	281,21	2.592.000	0,8950	76514318,80	76514318,80	0,00	0,00
4,0833	1	12	283,87	0,26	187,63	1,00	807,56	2.678.400	0,8950	227056215,18	227056215,18	0,00	0,00
4,1667	1	01	301,49	0,28	195,05	1,00	1647,56	2.678.400	0,8950	463230473,28	463230473,28	0,00	0,00
4,2500	1	02	206,54	0,16	138,71	1,00	1263,38	2.505.600	0,8950	332296652,65	332296652,65	0,00	0,00
4,3333	1	03	181,34	0,11	122,34	1,00	1147,51	2.678.400	0,8950	322635146,82	322635146,82	0,00	0,00
4,4167	-1	04	38,99	0,00	35,32	1,00	864,06	2.592.000	0,8950	235103393,31	235103393,31	0,00	0,00
4,5000	-1	05	26,60	-0,13	25,04	1,00	642,79	2.678.400	0,8950	180726943,43	180726943,43	0,00	0,00
4,5833	-1	06	21,21	-0,20	20,34	1,00	544,04	2.592.000	0,8950	148027865,34	148027865,34	0,00	0,00
4,6667	-1	07	18,45	-0,24	17,81	1,00	488,04	2.678.400	0,8950	137219120,29	137219120,29	0,00	0,00
4,7500	-1	08	15,67	-0,29	15,28	1,00	433,74	2.678.400	0,8950	121952206,71	121952206,71	0,00	0,00
4,8333	-1	09	14,53	-0,32	14,15	1,00	409,67	2.592.000	0,8950	111467929,01	111467929,01	0,00	0,00
4,9167	1	10	61,94	-0,23	44,39	1,00	504,52	2.678.400	0,8950	141851485,21	141851485,21	0,00	0,00
5,0000	1	11	130,60	0,01	83,80	1,00	897,14	2.592.000	0,8950	244104546,38	244104546,38	0,00	0,00
5,0833	1	12	283,87	0,26	162,44	1,00	1549,27	2.678.400	0,8950	435595982,51	435595982,51	0,00	0,00
5,1667	1	01	301,49	0,28	169,34	1,00	1647,56	2.678.400	0,8950	463230473,28	463230473,28	0,00	0,00
5,2500	1	02	206,54	0,16	120,75	1,00	1263,38	2.419.200	0,8950	320838147,39	320838147,39	0,00	0,00
5,3333	1	03	181,34	0,11	106,78	1,00	1147,51	2.678.400	0,8950	322635146,82	322635146,82	0,00	0,00
5,4167	-1	04	38,99	0,00	30,90	1,00	864,06	2.592.000	0,8950	235103393,31	235103393,31	0,00	0,00
5,5000	-1	05	26,60	-0,13	21,97	1,00	642,79	2.678.400	0,8950	180726943,43	180726943,43	0,00	0,00
5,5833	-1	06	21,21	-0,20	17,88	1,00	544,04	2.592.000	0,8950	148027865,34	148027865,34	0,00	0,00
5,6667	-1	07	18,45	-0,24	15,69	1,00	488,04	2.678.400	0,8950	137219120,29	137219120,29	0,00	0,00
5,7500	-1	08	15,67	-0,29	13,49	1,00	433,74	2.678.400	0,8950	121952206,71	121952206,71	0,00	0,00
5,8333	-1	09	14,53	-0,32	12,52	1,00	409,67	2.592.000	0,8950	111467929,01	111467929,01	0,00	0,00
5,9167	1	10	61,94	-0,23	39,37	1,00	504,52	2.678.400	0,8950	141851485,21	141851485,21	0,00	0,00
6,0000	1	11	130,60	0,01	74,46	1,00	897,14	2.592.000	0,8950	244104546,38	244104546,38	0,00	0,00
6,0833	1	12	283,87	0,26	144,62	1,00	1549,27	2.678.400	0,8950	435595982,51	435595982,51	0,00	0,00

Ano	Período	Mes	LB	Vazao	Pred	QDA	Vazão observada	Segundo no mês	Peso por comp. ZB	Quant água mensal m³	Quantidade de água limpa	Quantidade de água suja	Quantidade de água suja descontada
6,1667	1	01	301,49	0,28	151,04	1,00	1647,56	2.678.400	0,8950	463230473,28	463230473,28	0,00	0,00
6,2500	1	02	206,54	0,16	107,90	1,00	1263,38	2.419.200	0,8950	320838147,39	320838147,39	0,00	0,00
6,3333	1	03	181,34	0,11	95,58	1,00	1147,51	2.678.400	0,8950	322635146,82	322635146,82	0,00	0,00
6,4167	-1	04	38,99	0,00	27,71	1,00	864,06	2.592.000	0,8950	235103393,31	235103393,31	0,00	0,00
6,5000	-1	05	26,60	-0,13	19,73	1,00	642,79	2.678.400	0,8950	180726943,43	180726943,43	0,00	0,00
6,5833	-1	06	21,21	-0,20	16,09	1,00	544,04	2.592.000	0,8950	148027865,34	148027865,34	0,00	0,00
6,6667	-1	07	18,45	-0,24	14,14	1,00	488,04	2.678.400	0,8950	137219120,29	137219120,29	0,00	0,00
6,7500	-1	08	15,67	-0,29	12,18	1,00	433,74	2.678.400	0,8950	121952206,71	121952206,71	0,00	0,00
6,8333	-1	09	14,53	-0,32	11,32	1,00	409,67	2.592.000	0,8950	111467929,01	111467929,01	0,00	0,00
6,9167	1	10	61,94	-0,23	35,63	1,00	504,52	2.678.400	0,8950	141851485,21	141851485,21	0,00	0,00
7,0000	1	11	130,60	0,01	67,49	1,00	897,14	2.592.000	0,8950	244104546,38	244104546,38	0,00	0,00
7,0833	1	12	283,87	0,26	131,25	1,00	1549,27	2.678.400	0,8950	435595982,51	435595982,51	0,00	0,00
7,1667	1	01	301,49	0,28	137,27	1,00	1647,56	2.678.400	0,8950	463230473,28	463230473,28	0,00	0,00
7,2500	1	02	206,54	0,16	98,19	1,00	1263,38	2.419.200	0,8950	320838147,39	320838147,39	0,00	0,00
7,3333	1	03	181,34	0,11	87,09	1,00	1147,51	2.678.400	0,8950	322635146,82	322635146,82	0,00	0,00
7,4167	-1	04	38,99	0,00	25,28	1,00	864,06	2.592.000	0,8950	235103393,31	235103393,31	0,00	0,00
7,5000	-1	05	26,60	-0,13	18,02	1,00	642,79	2.678.400	0,8950	180726943,43	180726943,43	0,00	0,00
7,5833	-1	06	21,21	-0,20	14,71	1,00	544,04	2.592.000	0,8950	148027865,34	148027865,34	0,00	0,00
7,6667	-1	07	18,45	-0,24	12,95	1,00	488,04	2.678.400	0,8950	137219120,29	137219120,29	0,00	0,00
7,7500	-1	08	15,67	-0,29	11,16	1,00	433,74	2.678.400	0,8950	121952206,71	121952206,71	0,00	0,00
7,8333	-1	09	14,53	-0,32	10,38	1,00	409,67	2.592.000	0,8950	111467929,01	111467929,01	0,00	0,00
7,9167	1	10	61,94	-0,23	32,73	1,00	504,52	2.678.400	0,8950	141851485,21	141851485,21	0,00	0,00
8,0000	1	11	130,60	0,01	62,05	1,00	897,14	2.592.000	0,8950	244104546,38	244104546,38	0,00	0,00
TOTAL										16.328.073.768,28	132.427.395,49	128.986.796,67	

Fonte: Lactec, 2021.

APÊNDICE G – DETALHAMENTO DA METODOLOGIA DA DINÂMICA POPULACIONAL DO PEIXE CASCUDO (*HYPOSTOMUS AFFINIS*)

- **Descrição do modelo de dinâmica populacional**

Cada passo de tempo (n) do modelo representa um ano. A cada iteração/tempo (n), surgem novos indivíduos juvenis (aqui definido como a capacidade de suporte da primeira idade de vida – C_a , Brito et al., 2017) provenientes tanto de reprodução local quanto de migração (recrutamento). Então, todos os indivíduos são submetidos a uma probabilidade de sobrevivência, sendo que indivíduos com idade superior à idade máxima estimada para a espécie são excluídos da população. A probabilidade de sobrevivência dos adultos (S_a) e a idade máxima para a espécie foram calculadas a partir dos dados de coleta de campo (ver 2.4 Parâmetros populacionais), sendo que apenas a sobrevivência foi estimada tanto para as estações da APDL (S_a') quanto aquelas do controle (S_{a0}). A cada passo de tempo, o tamanho populacional foi calculado.

As simulações para as populações da APDL se iniciam com C_a juvenis (indivíduos na primeira idade de vida) e com os parâmetros (i.e. mortalidade e idade máxima dos indivíduos) associados ao controle (condição pré-desastre/linha base) até a geração $nt = 200$, quando a dinâmica populacional atinge flutuações dentro de um intervalo constante ao longo do tempo. Após a geração nt , há uma redução no número de indivíduos da população (resultado do efeito agudo da passagem da lama de rejeitos, ver descrição abaixo) e então apenas o parâmetro de sobrevivência é ajustado àquele estimado para a condição pós-desastre (S_a' , resultado do efeito crônico da deposição da lama de rejeitos), enquanto o valor de recrutamento e idade máxima são mantidos iguais àquelas pré-desastre. Para as simulações da linha base, os parâmetros foram mantidos nos valores relacionados à condição pré-desastre ao longo de toda a simulação. Em ambos os casos, um total de 400 anos foram simulados.

Para cada conjunto de parâmetros, 100 réplicas foram simuladas. A iteração 201 foi normalizada para o ano 2015, ano de ocorrência do Desastre da Samarco, e o tamanho populacional na geração 204 foi normalizado para aquele estimado para a APDL do Rio Doce (ver Estimativa de tamanho populacional). Adicionalmente foram criados cenários nos quais a qualidade ambiental da APDL se recupera gradativamente, além da inclusão de atividade de peixamento na APDL.

Para estimar a recuperação natural da bacia, dois cenários de melhoria na qualidade ambiental foram criados. O primeiro considera a remoção do total dos rejeitos liberados pelo rompimento da barragem, $44 \times 10^6 \text{ m}^3$, com remoção total estimada para 163 anos após o desastre (ver relatório Hidrologia). O segundo considera apenas os $15,44 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rejeitos que passaram para jusante da UHE de Candonga e, possivelmente, atingiram o Rio Doce, com estimativa de 57 anos para sua completa remoção. Para isso, a probabilidade de sobrevivência estimada pelos dados empíricos foi considerada para as populações da APDL em 2018, com aumento linear de seu valor até alcançar a probabilidade de sobrevivência estimada para as condições pré-desastre nos tempos estimados para a completa remoção da lama de rejeitos (anos 2178 e 2072, respectivamente).

Para simular o cenário com peixamento, foi utilizado o cenário de recuperação natural do ambiente em 163 anos, com incremento anual de 100 e 200 mil indivíduos com 1 ano de idade completo. Nessas simulações, a atividade de peixamento foi iniciada em 2025 e mantida ao longo de 25 e 50 anos, além de um cenário no qual a atividade de peixamento foi suspensa apenas quando a população da

APDL atingiu 100% do tamanho populacional estimado para a linha base. Considerando uma estimativa conservadora, os cenários de peixamento foram simulados considerando apenas a estimativa inferior de tamanho populacional (ver 2.5 Estimativa de tamanho populacional para detalhes).

- **Parâmetros populacionais**

As probabilidades de sobrevivência por ano foram estimadas a partir da redução no número de indivíduos em cada idade. Para identificação da idade de cada indivíduo, os espécimes de *H. affinis* amostrados nas coletas de ictiofauna, realizadas pelo Lactec, foram separados por classes de tamanho e datas de coleta, essas baseadas no primeiro dia de cada uma das sete fases de campo (i.e. 20/06/2018, 07/09/2018, 24/10/2018, 18/02/2019, 25/05/2019, 22/08/2019, 14/11/2019). Posteriormente, utilizamos a função ELEFAN (Pauly, 1985) no pacote “TropFishR” (Mildenberger et al., 2017) do software R 4.0.2 (R CoreTeam, 2020) para estimar o coeficiente de crescimento anual (k) e o comprimento assintótico L_{∞} (em centímetro) da população. Para a identificação destes coeficientes, utilizamos apenas a população controle afim de eliminar eventuais tendências promovidas pelo desastre. Após a identificação de k e L_{∞} , as estimativas de idade foram geradas seguindo a equação de crescimento de Von Bertalanffy (1938):

$$L_t = L_{\infty} (1 - e^{-k(t-t_0)})$$

que equivale à:

$$t = t_0 - \frac{\ln(1 - \frac{L_t}{L_{\infty}})}{k}$$

na qual L_t é o comprimento total em centímetros na idade t (em anos) e t_0 é a idade teórica (em anos) em que o comprimento do indivíduo é zero (assumimos $t_0=0$). Esta relação foi feita utilizando a função VBGF no pacote “TropFishR” do software R 4.0.2. A distribuição de idades para os indivíduos da APDL foi obtida a partir dos valores de k e L_{∞} estimados para o controle.

Uma vez que estimativas do coeficiente de crescimento anual são influenciados pelos intervalos de classe de tamanho (Wang et al., 2020), avaliamos as estimativas de k e L_{∞} considerando diferentes valores: 1,0 cm, 1,5 cm, 2,0 cm, 2,5 cm, 3,0 cm, 3,5 cm e 4,0 cm. Para cada estimativa, avaliamos a distribuição de idades para juvenis e adultos, e identificamos a menor classe de tamanho (maior resolução) que não gera estimativas de idade fora do esperado para o grupo (e.g. Antoniuti et al., 1985, Nomura, 1988, Agostinho et al., 1991, Gibbs et al., 2013). Assim, foram descartados os tamanhos de classe cujas estimativas de idade de maturação dos indivíduos amostrados foram superiores a 3 anos, ou que indicaram indivíduos amostrados com mais de 10 anos.

A partir do histograma de idades, separado por classes de 1 ano, calculamos o coeficiente de mortalidade instantâneo (Z) para cada área (i.e. APDL, controle) através do método Jones e van Zalinge (1981), disponível na função `catchCurve` (usando a opção “cumulative = TRUE”) do pacote “TropFishR” do software R 4.0.2. A sobrevivência em tempo discreto (anual) utilizada no modelo de crescimento populacional (S_a) foi obtida através da transformação: $S_a = \exp(-Z)$ (Gotelli, 2001).

• 3.1 Estimativa dos parâmetros populacionais

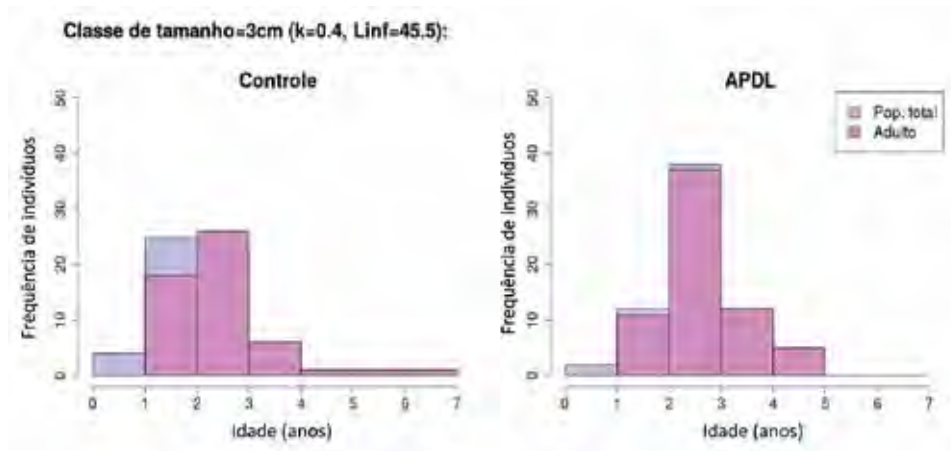
Os valores do coeficiente de crescimento (k), comprimento assintótico (L_{∞}) e, consequentemente, a idade dos indivíduos variaram quando estimados segundo diferentes tamanhos de classe (Tabela 1, Figura 2). Para a classe de tamanho igual a 1,0 cm, a estimativa da idade da primeira maturação foi no 8º ano de vida e a idade máxima dos indivíduos foi de 35 anos de vida. Para as classes de tamanho igual a 1,5 cm, 2,0 cm e 2,5 cm, a idade da primeira maturação foi no 5º ou 4º ano de vida, enquanto a idade máxima ultrapassou 10 anos de vida. Portanto, essas estimativas para as classes de tamanho de 1,0 a 2,5 cm se mostraram fora do esperado para o grupo (Antoniuti *et al.*, 1985, Nomura, 1988, Agostinho *et al.*, 1991, Gibbs *et al.*, 2013). A maior resolução (menor classe de tamanho) que gerou estimativas congruentes com o grupo, foi a classe de tamanho igual a 3,0 cm (Figura 1), em que a idade da primeira maturação ocorre no 2º ano de vida e a idade máxima é de 7 anos.

Apêndice G – Tabela 1 – Estimativas do coeficiente de crescimento (k), comprimento assintótico (L_{∞}), sobrevivência de tempo discreto (S_a), idade da primeira maturação, idade máxima e densidade populacional relativa (DR, das populações da APDL comparadas às do controle para o caso sem recuperação após a estabilização da densidade populacional) de *Hypostomus affinis* da bacia do Rio Doce para diferentes tamanhos de classe (TC, em cm). O tamanho de classe igual a 3,0 cm melhor se ajusta aos dados empíricos da espécie. LB – linha base/controle. APDL – área de passagem e depósito da lama de rejeitos.

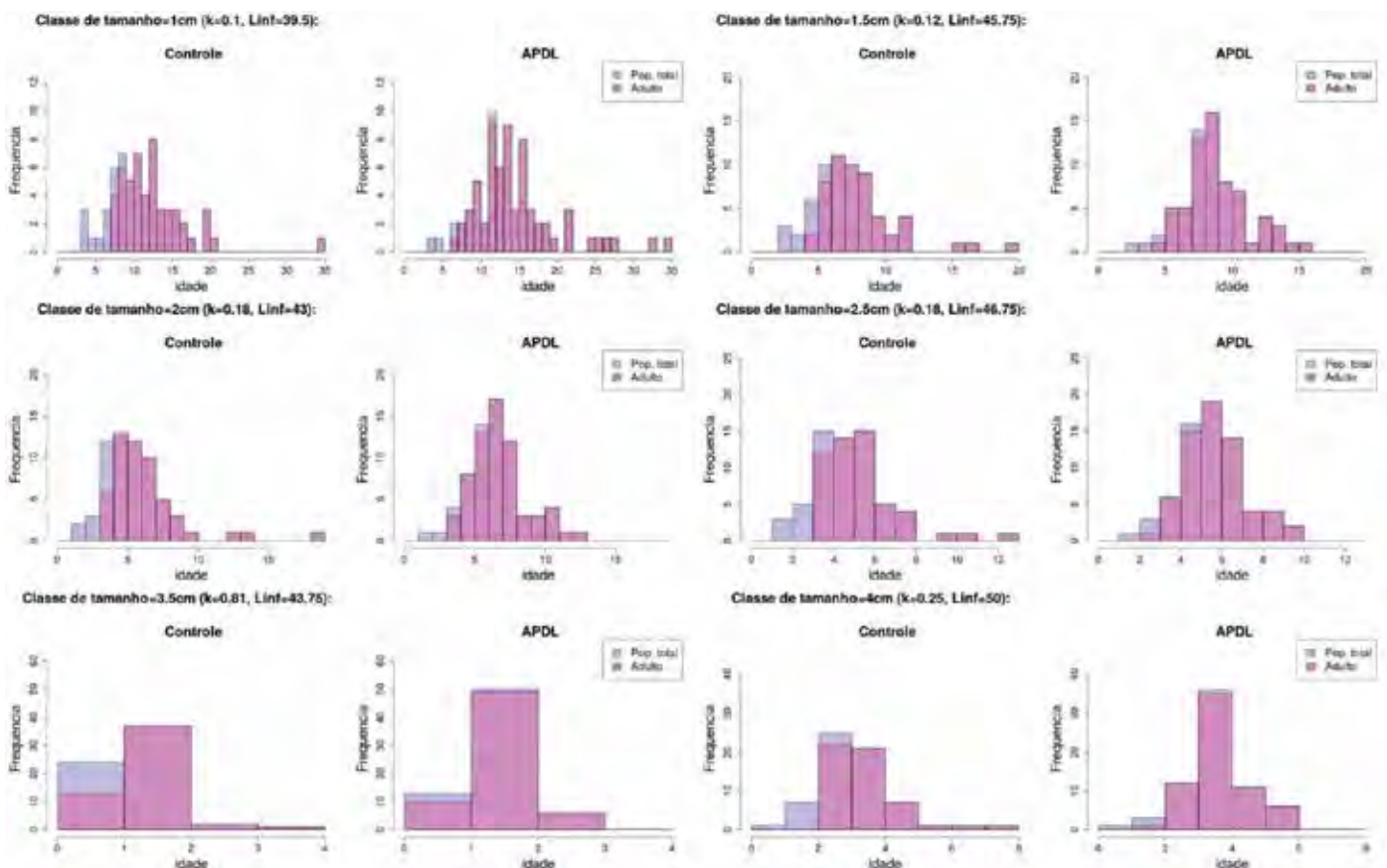
TC	k	L_{∞}	1ª maturação		Idade máxima		S_a		DR
			LB	APDL	LB	APDL	LB	APDL	
1,0	0,10	39,5	8	3	35	35	0,86	0,85	88%
1,5	0,12	45,8	5	6	20	16	0,74	0,6	53%
2,0	0,18	43,0	4	4	19	13	0,75	0,55	41%
2,5	0,18	46,8	4	4	13	10	0,61	0,47	56%
3,0	0,40	45,5	2	2	7	5	0,42	0,30	59%
3,5	0,81	43,8	1	1	4	3	0,15	0,11	64%
4,0	0,25	50,0	3	3	8	6	0,43	0,34	67%

Para essa estimativa, a densidade populacional relativa da APDL se estabiliza em 59% da população controle se nenhum tipo de recuperação é imposto (ver resultados detalhados em Modelo de Dinâmica Populacional). Para as demais estimativas (considerando outros tamanhos de classe), as densidades populacionais das populações da APDL se mantiveram abaixo de 100% da população controle, com a maioria das estimativas entre 50% e 67% (Tabela 1). Entretanto, reforçamos que as estimativas mais adequadas são aqueles referentes a tamanhos de classe de 3,0 cm, em que a população da APL se estabiliza em 59% da linha base.

Apêndice G – Figura 1 – Frequência dos indivíduos das populações de *Hypostomus affinis* coletados nas estações controle e da APDL da bacia do Rio Doce por classe etária (anos), estimados para tamanho igual a 3,0 cm ($k = 0,4$ e $L_{\infty} = 45,5$).



Apêndice G – Figura 2 – Frequência dos indivíduos das populações de *Hypostomus affinis* coletados nas estações controle e da APDL da bacia do Rio Doce por classe etária (anos), segundo diferentes tamanhos de classe.



APÊNDICE H – DETALHAMENTO DOS VALORES BRUTOS OBTIDOS EM CADA UMA DAS LOCALIDADES E SÍTIOS AMOSTRAIS CONTEMPLADOS NOS ESTUDOS UTILIZADOS

Fonte	Localização	Sítio Amostrai	Área Basal (m ² ha-1)	Densidade (Indvs ha-1)
Silva et al. 2005	São Mateus - ES	1	7.51	1450
Silva et al. 2005	São Mateus - ES	2	7.21	1225
Silva et al. 2005	São Mateus - ES	3	17	1100
Silva et al. 2005	São Mateus - ES	4	31.1	450
Londe et al. 2013	Piraquê-Açu - ES	1	25	5100
Londe et al. 2013	Piraquê-Açu - ES	2	13	-
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	1	22.8	1178
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	2	26.4	2760
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	3	13.4	7866
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	4	36.1	1700
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	5	23.6	1000
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	6	18.8	720
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	7	41.1	700
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	8	25.1	1433
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	9	10.3	1500
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	10	17.4	6300
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	11	21.3	1300
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	12	20.4	5257
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	13	72.2	6900
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	14	23.2	6550
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	15	18.8	6800
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	16	45.7	1875
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	17	25	2867
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	18	46.6	6800
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	19	16.2	1200
Petri et al. 2011	Anchieta - ES	20	21.4	740
Bernini et al. 2014a	Itabapoana - ES/RJ	1	19.9	1800
Bernini et al. 2014a	Itabapoana - ES/RJ	2	25.3	2767
Bernini et al. 2014a	Itabapoana - ES/RJ	3	14.3	4233
Bernini et al. 2014a	Itabapoana - ES/RJ	4	16.8	4400
Bernini et al. 2014a	Itabapoana - ES/RJ	5	15.5	3333
Bernini et al. 2014a	Itabapoana - ES/RJ	6	21.3	2467
Martins et al. 2011	Rio Cururupe - BA	1	12.3	11300
Martins et al. 2011	Rio Cururupe - BA	2	8.9	1200
Martins et al. 2011	Rio Cururupe - BA	3	13.3	1100
Martins et al. 2011	Rio Cururupe - BA	4	12.4	1200
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	1	22.51	37467
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	2	23.51	16540
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	3	30.18	-

Fonte	Localização	Sítio Amostrai	Área Basal (m ² ha-1)	Densidade (Indvs ha-1)
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	4	43.47	-
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	5	35.92	-
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	6	47.25	-
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	7	42.75	-
Bernini et al. 2014b	Rio das Ostras - RJ	8	17.61	-
Calegario et al., 2015	São João - RJ	1	35.52	14720
Calegario et al., 2015	São João - RJ	2	30.82	13000
Calegario et al., 2015	São João - RJ	3	19.56	5240
Calegario et al., 2015	São João - RJ	4	8.01	1020
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	1	29.66	6550
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	2	24.17	6143
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	3	22.47	4209
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	4	16.12	5380
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	5	30.91	11868
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	6	37.57	4792
Tognella et al. 2020	Centro e Norte - ES	7	26.8	8072
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	1	13.5	10700
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	2	17	8800
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	3	14.9	12500
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	4	17.4	2875
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	5	23.1	21000
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	6	19.8	1475
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	7	25.9	7000
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	8	17.7	2583
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	9	48.3	4600
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	10	18.7	2560
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	11	38.6	2700
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	12	13.6	5846
Bernini & Rezende 2010	Itabapoana - ES/RJ	13	34.4	18143

APÊNDICE I – DETALHAMENTO DE TODOS OS CÁLCULOS NECESSÁRIOS AO ALCANÇE DOS RESULTADOS DAS CURVAS DE CRESCIMENTO OBTIDAS

Ano	deltad R. mangle			deltad L. racemosa			deltad A. germinans			Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa			Avicennia germinans			Média Simples da Area Basal		
										DAP (cm)	H (cm)	AB (m² ha⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m² ha⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m² ha⁻¹)	AB (m² ha⁻¹)	Desv. Pad.	
0	0,090	0,082	0,056							0,1	144,722	0,003	0,1	144,154	0,003	0,1	141,802	0,003	0,0033	0,000	
1	0,159	0,141	0,085							0,190	151,653	0,012	0,182	150,030	0,011	0,156	144,498	0,008	0,0103	0,002	
2	0,263	0,229	0,127							0,349	163,936	0,040	0,324	160,122	0,035	0,241	148,591	0,019	0,0314	0,011	
3	0,393	0,342	0,182							0,612	184,142	0,124	0,553	176,427	0,101	0,368	154,665	0,045	0,0899	0,041	
4	0,531	0,468	0,253							1,006	214,286	0,334	0,895	200,712	0,265	0,551	163,398	0,100	0,2331	0,120	
5	0,654	0,587	0,334							1,536	254,766	0,780	1,363	233,713	0,614	0,803	175,471	0,213	0,5358	0,291	
6	0,754	0,689	0,421							2,191	304,349	1,586	1,950	274,866	1,257	1,137	191,410	0,428	1,0902	0,597	
7	0,832	0,772	0,508							2,945	361,091	2,867	2,639	322,787	2,302	1,559	211,458	0,803	1,9908	1,067	
8	0,891	0,836	0,588							3,777	423,139	4,715	3,411	375,926	3,845	2,066	235,534	1,412	3,3239	1,712	
9	0,938	0,888	0,659							4,668	489,024	7,203	4,247	432,932	5,962	2,654	263,298	2,329	5,1649	2,533	
10	0,975	0,929	0,720							5,606	557,663	10,388	5,135	492,746	8,715	3,313	294,273	3,629	7,5774	3,521	
11	1,005	0,962	0,772							6,581	628,268	14,315	6,063	554,568	12,153	4,033	327,954	5,377	10,6150	4,663	
12	1,030	0,989	0,816							7,585	700,257	19,020	7,025	617,792	16,314	4,805	363,866	7,633	14,3224	5,949	
13	1,050	1,012	0,853							8,615	773,197	24,534	8,014	681,956	21,233	5,621	401,601	10,445	18,7372	7,369	
14	1,068	1,032	0,885							9,665	846,752	30,882	9,027	746,701	26,935	6,474	440,814	13,856	23,8911	8,912	
15	1,084	1,048	0,912							10,734	920,658	38,086	10,058	811,738	33,443	7,359	481,223	17,903	29,8107	10,570	
16	1,097	1,062	0,936							11,817	994,703	46,164	11,106	876,835	40,774	8,272	522,597	22,617	36,5186	12,337	
17	1,109	1,074	0,957							12,914	1068,711	55,132	12,168	941,797	48,944	9,208	564,747	28,026	44,0341	14,205	
18	1,119	1,084	0,975							14,023	1142,534	65,004	13,242	1006,461	57,964	10,164	607,517	34,152	52,3731	16,168	
19	1,128	1,092	0,991							15,142	1216,046	75,789	14,325	1070,686	67,840	11,139	650,777	41,017	61,5489	18,220	

Ano	deltad R. mangle			deltad L. racemosa			deltad A. germinans			Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa			Avicennia germinans			Média Simples da Área Basal	
										DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	Desv. Pad.
20	1,135	1,099	1,005							16,269	1289,136	87,498	15,418	1134,349	78,580	12,130	694,418	48,640	71,5725	20,355
21	1,142	1,105	1,018							17,404	1361,710	100,135	16,517	1197,344	90,185	13,135	738,348	57,037	82,4523	22,566
22	1,148	1,109	1,030							18,546	1433,681	113,707	17,622	1259,575	102,655	14,154	782,487	66,223	94,1948	24,847
23	1,153	1,113	1,040							19,694	1504,971	128,215	18,731	1320,957	115,987	15,184	826,766	76,211	106,8044	27,191
24	1,157	1,115	1,050							20,847	1575,513	143,661	19,844	1381,417	130,176	16,224	871,127	87,013	120,2833	29,591
25	1,160	1,116	1,059							22,003	1645,244	160,044	20,959	1440,885	145,214	17,274	915,516	98,639	134,6323	32,041
26	1,162	1,116	1,066							23,163	1714,105	177,360	22,075	1499,302	161,090	18,332	959,887	111,099	149,8499	34,531
27	1,164	1,115	1,074							24,325	1782,046	195,606	23,191	1556,614	177,793	19,399	1004,197	124,401	165,9332	37,054
28	1,165	1,114	1,080							25,489	1849,018	214,775	24,307	1612,773	195,307	20,472	1048,409	138,551	182,8775	39,603
29	1,166	1,111	1,086							26,654	1914,979	234,859	25,420	1667,737	213,614	21,553	1092,489	153,556	200,6763	42,167
30	1,165	1,108	1,091							27,820	1979,888	255,849	26,531	1721,468	232,696	22,639	1136,406	169,421	219,3218	44,739
31	1,165	1,103	1,096							28,985	2043,710	277,732	27,639	1773,934	252,532	23,730	1180,130	186,149	238,8044	47,310
32	1,163	1,098	1,101							30,150	2106,411	300,498	28,743	1825,108	273,098	24,826	1223,635	203,744	259,1131	49,870
33	1,161	1,093	1,104							31,313	2167,964	324,130	29,841	1874,966	294,369	25,927	1266,897	222,208	280,2354	52,410
34	1,158	1,086	1,108							32,474	2228,341	348,613	30,933	1923,489	316,318	27,031	1309,894	241,542	302,1578	54,922
35	1,155	1,079	1,111							33,633	2287,518	373,929	32,019	1970,664	338,918	28,139	1352,603	261,748	324,8649	57,396
36	1,152	1,071	1,114							34,788	2345,476	400,061	33,098	2016,478	362,138	29,250	1395,006	282,823	348,3405	59,824
37	1,147	1,062	1,116							35,940	2402,196	426,987	34,169	2060,925	385,947	30,363	1437,084	304,768	372,5670	62,198
38	1,143	1,053	1,118							37,087	2457,663	454,685	35,231	2104,001	410,312	31,479	1478,820	327,580	397,5258	64,510
39	1,137	1,043	1,119							38,230	2511,864	483,135	36,284	2145,706	435,202	32,597	1520,197	351,255	423,1972	66,754
40	1,132	1,032	1,120							39,367	2564,789	512,311	37,327	2186,042	460,580	33,716	1561,201	375,791	449,5605	68,923
41	1,125	1,021	1,121							40,499	2616,430	542,188	38,359	2225,016	486,411	34,837	1601,817	401,183	476,5942	71,013
42	1,119	1,010	1,122							41,624	2666,781	572,741	39,380	2262,636	512,661	35,958	1642,032	427,426	504,2759	73,019
43	1,112	0,998	1,122							42,743	2715,839	603,942	40,390	2298,914	539,292	37,080	1681,833	454,513	532,5824	74,940
44	1,104	0,985	1,122							43,854	2763,602	635,764	41,388	2333,864	566,268	38,202	1721,209	482,438	561,4899	76,775

Ano	deltad R. mangle	deltad L. racemosa	deltad A. germinans	Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa				Avicennia germinans				Média Simples da Área Basal	
				DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	Desv. Pad.
45	1,096	0,972	1,122	44,958	2810,072	668,178	42,374	2367,502	593,551	39,324	1760,149	511,193	590,9741	78,524		
46	1,088	0,959	1,121	46,055	2855,250	701,155	43,346	2399,847	621,106	40,446	1798,642	540,769	621,0100	80,193		
47	1,079	0,945	1,120	47,142	2899,142	734,664	44,305	2430,919	648,893	41,567	1836,679	571,159	651,5722	81,786		
48	1,070	0,931	1,119	48,221	2941,754	768,676	45,250	2460,742	676,878	42,686	1874,251	602,351	682,6349	83,312		
49	1,060	0,917	1,117	49,291	2983,094	803,159	46,181	2489,338	705,022	43,805	1911,350	634,336	714,1722	84,783		
50	1,050	0,902	1,115	50,351	3023,172	838,081	47,098	2516,734	733,291	44,922	1947,968	667,102	746,1578	86,213		
51	1,040	0,887	1,113	51,401	3061,999	873,411	48,000	2542,956	761,647	46,038	1984,098	700,637	778,5652	87,621		
52	1,030	0,872	1,111	52,442	3099,588	909,117	48,887	2568,033	790,056	47,151	2019,733	734,930	811,3680	89,027		
53	1,019	0,856	1,108	53,471	3135,953	945,167	49,759	2591,993	818,484	48,262	2054,868	769,968	844,5395	90,459		
54	1,008	0,841	1,105	54,490	3171,110	981,528	50,615	2614,867	846,897	49,370	2089,498	805,735	878,0534	91,945		
55	0,996	0,825	1,102	55,498	3205,076	1018,168	51,456	2636,686	875,263	50,475	2123,617	842,219	911,8833	93,516		
56	0,985	0,809	1,099	56,494	3237,868	1055,055	52,281	2657,480	903,549	51,577	2157,221	879,404	946,0028	95,211		
57	0,973	0,793	1,095	57,479	3269,505	1092,158	53,090	2677,281	931,725	52,676	2190,306	917,276	980,3862	97,066		
58	0,961	0,777	1,091	58,452	3300,007	1129,443	53,882	2696,122	959,762	53,772	2222,870	955,818	1015,0075	99,124		
59	0,949	0,761	1,087	59,413	3329,395	1166,880	54,659	2714,035	987,631	54,863	2254,909	995,014	1049,8414	101,426		
60	0,936	0,744	1,083	60,361	3357,690	1204,437	55,420	2731,051	1015,305	55,950	2286,422	1034,847	1084,8629	104,014		
61	0,923	0,728	1,079	61,297	3384,914	1242,084	56,164	2747,203	1042,758	57,034	2317,405	1075,299	1120,0474	106,932		
62	0,911	0,712	1,074	62,221	3411,091	1279,791	56,892	2762,523	1069,967	58,112	2347,859	1116,354	1155,3705	110,219		
63	0,898	0,696	1,069	63,131	3436,244	1317,526	57,604	2777,044	1096,907	59,186	2377,781	1157,993	1190,8087	113,912		
64	0,885	0,679	1,064	64,029	3460,396	1355,262	58,299	2790,796	1123,556	60,255	2407,171	1200,197	1226,3387	118,044		
65	0,871	0,663	1,058	64,914	3483,573	1392,970	58,979	2803,810	1149,895	61,319	2436,030	1242,948	1261,9379	122,645		
66	0,858	0,647	1,053	65,785	3505,797	1430,621	59,642	2816,119	1175,904	62,377	2464,358	1286,227	1297,5842	127,738		
67	0,845	0,631	1,047	66,643	3527,095	1468,189	60,289	2827,750	1201,565	63,430	2492,154	1330,014	1333,2560	133,342		
68	0,831	0,616	1,041	67,488	3547,492	1505,647	60,921	2838,735	1226,862	64,477	2519,421	1374,288	1368,9326	139,470		
69	0,818	0,600	1,035	68,319	3567,012	1542,970	61,536	2849,102	1251,780	65,518	2546,160	1419,032	1404,5937	146,131		

Ano	deltaD R. mangle	deltaD L. racemosa	deltaD A. germinans	Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa			Avicennia germinans			Média Simples da Área Basal	
				DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	Desv. Pad.
70	0,804	0,584	1,029	69,137	3585,680	1580,132	62,136	2858,879	1276,304	66,553	2572,372	1464,223	1440,2196	153,329
71	0,791	0,569	1,022	69,942	3603,523	1617,109	62,720	2868,094	1300,423	67,582	2598,060	1509,842	1475,7913	161,065
72	0,777	0,554	1,016	70,732	3620,565	1653,879	63,289	2876,773	1324,125	68,604	2623,226	1555,868	1511,2907	169,336
73	0,763	0,539	1,009	71,509	3636,832	1690,419	63,843	2884,943	1347,401	69,620	2647,873	1602,280	1546,6999	178,135
74	0,750	0,524	1,002	72,273	3652,347	1726,708	64,382	2892,629	1370,242	70,629	2672,004	1649,057	1582,0022	187,455
75	0,736	0,509	0,995	73,023	3667,137	1762,725	64,906	2899,855	1392,639	71,631	2695,623	1696,179	1617,1811	197,285
76	0,723	0,495	0,988	73,759	3681,225	1798,451	65,415	2906,644	1414,588	72,626	2718,733	1743,625	1652,2211	207,614
77	0,709	0,481	0,980	74,482	3694,637	1833,867	65,911	2913,020	1436,082	73,614	2741,338	1791,373	1687,1072	218,430
78	0,696	0,467	0,973	75,191	3707,395	1868,957	66,392	2919,004	1457,117	74,594	2763,442	1839,402	1721,8251	229,720
79	0,682	0,453	0,965	75,887	3719,523	1903,702	66,859	2924,616	1477,690	75,567	2785,051	1887,691	1756,3612	241,469
80	0,669	0,440	0,957	76,569	3731,046	1938,088	67,312	2929,878	1497,800	76,532	2806,167	1936,220	1790,7025	253,663
81	0,656	0,427	0,950	77,238	3741,984	1972,099	67,752	2934,809	1517,445	77,489	2826,798	1984,966	1824,8366	266,287
82	0,642	0,414	0,942	77,893	3752,362	2005,723	68,179	2939,427	1536,623	78,439	2846,947	2033,910	1858,7519	279,327
83	0,629	0,401	0,933	78,536	3762,200	2038,945	68,593	2943,749	1555,337	79,380	2866,620	2083,029	1892,4372	292,768
84	0,616	0,389	0,925	79,165	3771,521	2071,754	68,994	2947,793	1573,587	80,314	2885,823	2132,305	1925,8821	306,595
85	0,603	0,377	0,917	79,782	3780,346	2104,140	69,383	2951,575	1591,375	81,239	2904,561	2181,715	1959,0767	320,793
86	0,591	0,365	0,908	80,385	3788,694	2136,091	69,760	2955,110	1608,704	82,156	2922,840	2231,241	1992,0118	335,346
87	0,578	0,353	0,900	80,976	3796,586	2167,599	70,124	2958,413	1625,576	83,064	2940,666	2280,860	2024,6784	350,241
88	0,565	0,342	0,891	81,554	3804,042	2198,655	70,478	2961,497	1641,997	83,964	2958,046	2330,554	2057,0686	365,462
89	0,553	0,331	0,883	82,119	3811,079	2229,252	70,820	2964,377	1657,971	84,856	2974,986	2380,302	2089,1747	380,994
90	0,541	0,320	0,874	82,672	3817,718	2259,382	71,151	2967,064	1673,501	85,739	2991,492	2430,085	2120,9895	396,824
91	0,529	0,310	0,865	83,213	3823,975	2289,040	71,471	2969,570	1688,595	86,613	3007,570	2479,884	2152,5064	412,935
92	0,517	0,299	0,856	83,742	3829,868	2318,221	71,780	2971,907	1703,258	87,478	3023,228	2529,679	2183,7194	429,315
93	0,505	0,289	0,847	84,259	3835,414	2346,921	72,080	2974,084	1717,496	88,334	3038,472	2579,452	2214,6228	445,948
94	0,493	0,280	0,839	84,764	3840,629	2375,135	72,369	2976,114	1731,315	89,182	3053,310	2629,184	2245,2113	462,820

Ano	deltaD R. mangle	deltaD L. racemosa	deltaD A. germinans	Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa			Avicennia germinans			Média Simples da Área Basal	
				DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	Desv. Pad.
95	0,482	0,270	0,830	85,257	3845,528	2402,860	72,649	2978,003	1744,723	90,020	3067,747	2678,858	2275,4804	479,918
96	0,470	0,261	0,820	85,739	3850,127	2430,095	72,919	2979,763	1757,727	90,850	3081,790	2728,454	2305,4255	497,227
97	0,459	0,252	0,811	86,209	3854,441	2456,837	73,180	2981,401	1770,335	91,670	3095,448	2777,957	2335,0430	514,734
98	0,448	0,243	0,802	86,669	3858,483	2483,086	73,432	2982,924	1782,553	92,482	3108,726	2827,348	2364,3292	532,425
99	0,437	0,235	0,793	87,117	3862,267	2508,842	73,676	2984,342	1794,390	93,284	3121,632	2876,612	2393,2811	550,288
100	0,427	0,227	0,784	87,554	3865,807	2534,103	73,911	2985,660	1805,854	94,077	3134,174	2925,730	2421,8959	568,308
101	0,416	0,219	0,775	87,981	3869,114	2558,872	74,137	2986,885	1816,952	94,861	3146,357	2974,689	2450,1711	586,473
102	0,406	0,211	0,765	88,398	3872,201	2583,149	74,356	2988,023	1827,694	95,635	3158,190	3023,471	2478,1048	604,770
103	0,396	0,204	0,756	88,804	3875,079	2606,936	74,567	2989,081	1838,087	96,401	3169,679	3072,062	2505,6952	623,186
104	0,386	0,196	0,747	89,200	3877,760	2630,236	74,771	2990,064	1848,139	97,157	3180,831	3120,447	2532,9408	641,710
105	0,376	0,189	0,738	89,586	3880,254	2653,050	74,967	2990,977	1857,860	97,904	3191,654	3168,612	2559,8405	660,329
106	0,367	0,183	0,728	89,962	3882,571	2675,382	75,157	2991,824	1867,256	98,642	3202,154	3216,542	2586,3934	679,031
107	0,357	0,176	0,719	90,329	3884,722	2697,235	75,339	2992,610	1876,337	99,370	3212,340	3264,225	2612,5990	697,804
108	0,348	0,170	0,710	90,686	3886,715	2718,614	75,515	2993,340	1885,111	100,089	3222,216	3311,646	2638,4570	716,638
109	0,339	0,163	0,701	91,034	3888,559	2739,522	75,685	2994,017	1893,586	100,799	3231,792	3358,794	2663,9671	735,520
110	0,330	0,157	0,692	91,373	3890,263	2759,963	75,848	2994,645	1901,770	101,500	3241,073	3405,656	2689,1296	754,441
111	0,321	0,152	0,682	91,703	3891,835	2779,944	76,005	2995,228	1909,671	102,192	3250,066	3452,220	2713,9448	773,389
112	0,313	0,146	0,673	92,024	3893,283	2799,468	76,157	2995,768	1917,298	102,874	3258,779	3498,475	2738,4133	792,355
113	0,305	0,141	0,664	92,337	3894,614	2818,541	76,303	2996,269	1924,658	103,547	3267,217	3544,409	2762,5358	811,327
114	0,296	0,135	0,655	92,642	3895,835	2837,168	76,444	2996,733	1931,758	104,211	3275,388	3590,014	2786,3134	830,297
115	0,288	0,130	0,646	92,939	3896,953	2855,356	76,579	2997,164	1938,608	104,866	3283,299	3635,277	2809,7471	849,254
116	0,281	0,125	0,637	93,227	3897,974	2873,110	76,710	2997,563	1945,214	105,512	3290,955	3680,191	2832,8382	868,189
117	0,273	0,121	0,628	93,508	3898,904	2890,437	76,835	2997,932	1951,583	106,149	3298,363	3724,745	2855,5883	887,094
118	0,266	0,116	0,619	93,781	3899,748	2907,342	76,956	2998,275	1957,724	106,776	3305,530	3768,931	2877,9989	905,960
119	0,258	0,112	0,610	94,046	3900,513	2923,832	77,072	2998,592	1963,643	107,395	3312,462	3812,740	2900,0718	924,778

Ano	deltaD R. mangle	deltaD L. racemosa	deltaD A. germinans	Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa			Avicennia germinans			Média Simples da Área Basal	
				DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	Desv. Pad.
120	0,251	0,108	0,601	94,305	3901,204	2939,914	77,184	2998,886	1969,347	108,005	3319,165	3856,165	2921,8088	943,540
121	0,244	0,104	0,592	94,556	3901,825	2955,595	77,292	2999,158	1974,843	108,606	3325,645	3899,198	2943,2121	962,238
122	0,237	0,100	0,583	94,800	3902,380	2970,881	77,395	2999,411	1980,138	109,198	3331,909	3941,833	2964,2838	980,864
123	0,231	0,096	0,575	95,037	3902,875	2985,778	77,495	2999,644	1985,238	109,781	3337,962	3984,062	2985,0260	999,412
124	0,224	0,092	0,566	95,268	3903,313	3000,295	77,590	2999,860	1990,150	110,356	3343,809	4025,878	3005,4412	1017,874
125	0,218	0,089	0,557	95,492	3903,699	3014,437	77,683	3000,061	1994,880	110,922	3349,458	4067,278	3025,5318	1036,243
126	0,212	0,085	0,549	95,710	3904,035	3028,212	77,771	3000,246	1999,435	111,479	3354,913	4108,254	3045,3004	1054,514
127	0,206	0,082	0,540	95,922	3904,326	3041,627	77,856	3000,418	2003,819	112,028	3360,179	4148,802	3064,7496	1072,679
128	0,200	0,079	0,532	96,128	3904,574	3054,689	77,938	3000,577	2008,040	112,568	3365,263	4188,918	3083,8821	1090,732
129	0,194	0,076	0,524	96,328	3904,784	3067,405	78,017	3000,724	2012,101	113,100	3370,170	4228,596	3102,7008	1108,669
130	0,189	0,073	0,515	96,522	3904,957	3079,781	78,093	3000,860	2016,010	113,624	3374,904	4267,834	3121,2084	1126,483
131	0,183	0,070	0,507	96,710	3905,097	3091,826	78,166	3000,986	2019,772	114,139	3379,472	4306,627	3139,4080	1144,170
132	0,178	0,067	0,499	96,893	3905,205	3103,545	78,236	3001,103	2023,390	114,646	3383,877	4344,972	3157,3024	1161,724
133	0,173	0,065	0,491	97,071	3905,285	3114,946	78,303	3001,211	2026,872	115,145	3388,125	4382,867	3174,8948	1179,141
134	0,168	0,062	0,483	97,244	3905,339	3126,036	78,368	3001,311	2030,220	115,636	3392,221	4420,309	3192,1883	1196,417
135	0,163	0,060	0,475	97,412	3905,368	3136,821	78,430	3001,404	2033,441	116,118	3396,169	4457,295	3209,1859	1213,546
136	0,158	0,057	0,467	97,574	3905,376	3147,309	78,490	3001,490	2036,539	116,593	3399,975	4493,825	3225,8909	1230,526
137	0,153	0,055	0,459	97,732	3905,363	3157,505	78,547	3001,569	2039,518	117,060	3403,641	4529,896	3242,3064	1247,353
138	0,149	0,053	0,452	97,885	3905,332	3167,418	78,602	3001,643	2042,382	117,520	3407,174	4565,507	3258,4358	1264,023
139	0,144	0,051	0,444	98,034	3905,283	3177,053	78,655	3001,711	2045,136	117,971	3410,576	4600,658	3274,2823	1280,532
140	0,140	0,049	0,436	98,179	3905,220	3186,417	78,706	3001,774	2047,784	118,415	3413,853	4635,347	3289,8493	1296,879
141	0,136	0,047	0,429	98,319	3905,142	3195,517	78,755	3001,832	2050,329	118,851	3417,008	4669,575	3305,1400	1313,059
142	0,132	0,045	0,422	98,455	3905,052	3204,358	78,802	3001,886	2052,775	119,280	3420,046	4703,340	3320,1578	1329,071
143	0,128	0,043	0,414	98,586	3904,951	3212,947	78,847	3001,937	2055,127	119,702	3422,969	4736,644	3334,9062	1344,912
144	0,124	0,042	0,407	98,714	3904,840	3221,290	78,890	3001,983	2057,387	120,116	3425,783	4769,488	3349,3884	1360,580

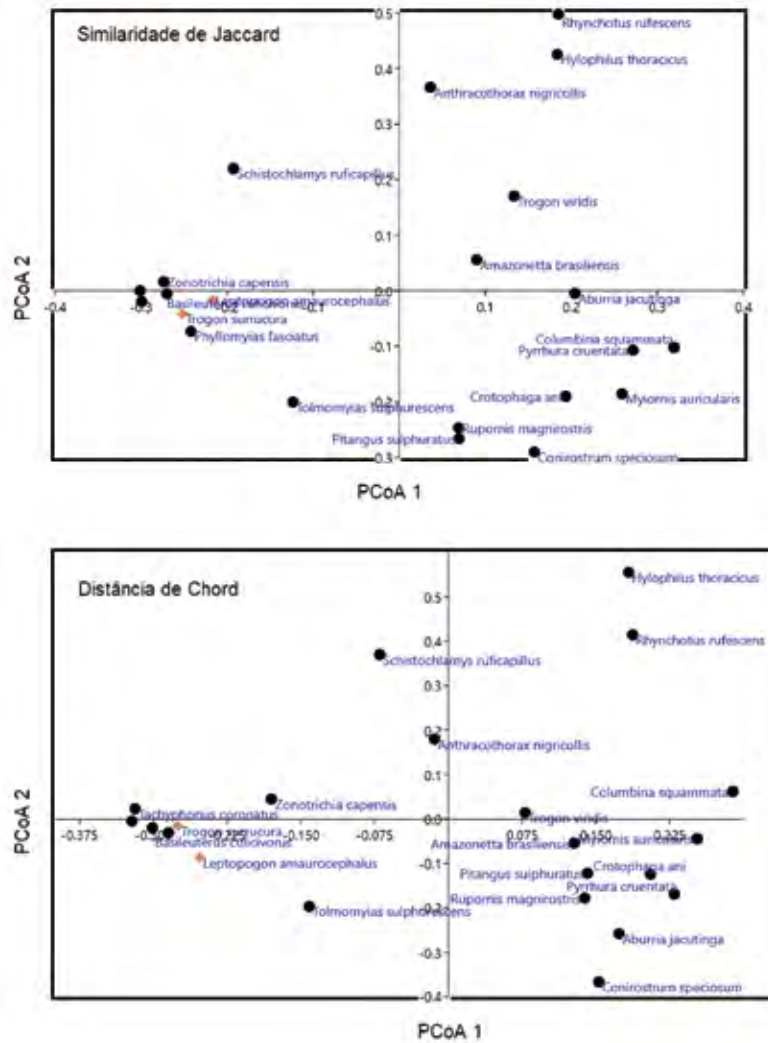
Ano	deltaD R. mangle	deltaD L. racemosa	Rhizophora mangle			Laguncularia racemosa			Avicennia germinans			Média Simples da Área Basal		
			DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	DAP (cm)	H (cm)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	Desv. Pad.	
145	0,120	0,040	0,400	98,838	3904,719	3229,394	78,932	3002,026	2059,559	120,523	3428,490	4801,870	3363,6079	1376,073
146	0,117	0,038	0,393	98,959	3904,591	3237,264	78,972	3002,066	2061,647	120,923	3431,094	4833,793	3377,5681	1391,389
147	0,113	0,037	0,386	99,076	3904,455	3244,907	79,010	3002,103	2063,652	121,316	3433,599	4865,258	3391,2724	1406,526
148	0,110	0,035	0,379	99,189	3904,313	3252,327	79,047	3002,137	2065,580	121,702	3436,008	4896,266	3404,7243	1421,483
149	0,106	0,034	0,372	99,299	3904,166	3259,531	79,083	3002,169	2067,431	122,081	3438,324	4926,819	3417,9271	1436,259
150	0,103	0,033	0,366	99,405	3904,014	3266,525	79,117	3002,198	2069,210	122,454	3440,551	4956,918	3430,8843	1450,853

APÊNDICE J – PADRÕES DE CO-OCORRÊNCIA DE TROGON SURRUCURA E LEPTOPOGON AMAUROCEPHALUS EM DADOS EMPÍRICOS OBTIDOS NO DIAGNÓSTICO DOS DANOS NO RIO DOCE

Um dos requerimentos para o levantamento de dados usados na valoração econômica é o uso de um modelo de adequabilidade ambiental da espécie-alvo (*Trogon surrucura*) na bacia do rio Doce. Em etapa anterior do diagnóstico (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c) foram gerados mapas de adequabilidade ambiental para várias espécies, dentre as quais a ave *Leptopogon amaurocephalus*. Essa espécie apresenta características ecológicas e biogeográficas que coincidem com aquelas da espécie-alvo para valoração, tornando plausível adotar o modelo de adequabilidade ambiental construído com seus dados de ocorrência para representar a adequabilidade de *T. surrucura* naquela bacia.

Em adição aos fundamentos teóricos que embasam essa decisão, realizou-se uma exploração dos dados empíricos obtidos pelo Lactec no diagnóstico de campo do rio Doce, no intuito de validar os padrões de co-ocorrência dessas duas espécies. A partir dos dados brutos obtidos no estudo, foram selecionadas 20 espécies de aves aleatórias, incluindo os dois táxons de interesse. Elencou-se o número total de registros dessas espécies em cada um dos 18 sítios amostrais e em cada uma das 7 campanhas de amostragem. Computaram-se matrizes de similaridade para mensurar a congruência de co-ocorrência entre as espécies nos dados de campo, tendo-se selecionado dois índices, quais sejam, de similaridade de Jaccard e distância de Chord. Uma das diferenças entre estes índices refere-se a que o primeiro é insensível à dupla-ausência, ao passo que o último leva essa informação também em consideração no cômputo da métrica (LEGENDRE; DE CÁCERES, 2013). Procurou-se, assim, contemplar duas formas de avaliação dos dados para tornar mais robusta a avaliação de co-ocorrências. As matrizes de similaridades foram usadas para construir ordenações, por Análise de Coordenadas Principais (PCoA), e visualizar em dois eixos a distribuição dos dados (Figura 1). Nessas ordenações, cada ponto representa uma espécie e a distância entre os pontos é proporcional à distância computada a partir dos dados de registros. Assim, espécies que aparecem mais próximas entre si nas ordenações apresentam mais congruência nos dados de co-ocorrência.

Apêndice J – Figura 1 – Ordenações (PCoA) com base nos índices de similaridade de Jaccard (acima) e distância de Chord (abaixo) a partir do número total de registros de 20 espécies de aves obtidos no diagnóstico do rio Doce. Apresentam-se em destaque (losangos laranja) as espécies-alvo para valoração (Trogon surrucura e Leptopogon amaurocephalus).



APÊNDICE K – LISTAGEM DAS AVES QUE NIDIFICAM EM CAVIDADES COM OCORRÊNCIA NA BACIA DO RIO DOCE

Apêndice K – Tabela 1 – Aves que nidificam em cavidades com ocorrência na bacia do rio Doce, classificadas de acordo com o tipo de nidificação (aves escavadoras primárias, escavadoras facultativas, ou não escavadoras) e tamanho corporal (Comprimento Total, em centímetros).

Espécie	Tipo	Tamanho
<i>Dendrocygna autumnalis</i>	Não escavador	43–53
<i>Cairina moschata</i>	Não escavador	66–84
<i>Amazonetta brasiliensis</i>	Não escavador	35–40
<i>Cathartes aura</i>	Não escavador	62–81
<i>Cathartes burrovianus</i>	Não escavador	53–65
<i>Coragyps atratus</i>	Não escavador	56–74
<i>Sarcoramphus papa</i>	Não escavador	71–81
<i>Tyto furcata</i>	Não escavador	29–44
<i>Megascops choliba</i>	Não escavador	20–24
<i>Pulsatrix perspicillata</i>	Não escavador	43–52
<i>Pulsatrix koeniswaldiana</i>	Não escavador	44
<i>Bubo virginianus</i>	Não escavador	51
<i>Strix hylophila</i>	Não escavador	35
<i>Ciccaba virgata</i>	Não escavador	29–38
<i>Nyctibius grandis</i>	Não escavador	45–57
<i>Nyctibius griseus</i>	Não escavador	33–38
<i>Chaetura meridionalis</i>	Não escavador	11,5–13,5
<i>Trogon viridis</i>	Escavador facultativo	25–28
<i>Trogon surrucura</i>	Escavador primário	26–28
<i>Trogon rufus</i>	Escavador facultativo	23–25
<i>Nonnula rubecula</i>	Não escavador	14–16
<i>Ramphastos toco</i>	Escavador facultativo	55–61
<i>Ramphastos vitellinus</i>	Não escavador	46–56
<i>Ramphastos dicolorus</i>	Escavador facultativo	42–48
<i>Pteroglossus bailloni</i>	Escavador facultativo	35–39
<i>Pteroglossus aracari</i>	Não escavador	43–46
<i>Picumnus cirratus</i>	Escavador primário	10
<i>Melanerpes candidus</i>	Escavador primário	24–29
<i>Melanerpes flavifrons</i>	Escavador primário	17
<i>Veniliornis affinis</i>	Escavador primário	15–18
<i>Veniliornis maculifrons</i>	Escavador primário	15
<i>Veniliornis passerinus</i>	Escavador primário	14–15
<i>Piculus aurulentus</i>	Escavador primário	21–22
<i>Piculus chrysocloros</i>	Escavador primário	18–21
<i>Celeus flavescens</i>	Escavador primário	27–30
<i>Colaptes melanochloros</i>	Escavador primário	27–29
<i>Colaptes campestris</i>	Escavador primário	28–31

Espécie	Tipo	Tamanho
<i>Hylatomus lineatus</i>	Escavador primário	30–36
<i>Campephilus robustus</i>	Escavador primário	32–37
<i>Campephilus melanoleucos</i>	Escavador primário	33–38
<i>Milvago chimachima</i>	Não escavador	40–45
<i>Herpetotheres cachinnans</i>	Não escavador	45–53
<i>Micrastur ruficollis</i>	Não escavador	31–38
<i>Micrastur semitorquatus</i>	Não escavador	46–58
<i>Falco sparverius</i>	Não escavador	21–31
<i>Falco rufigularis</i>	Não escavador	23–30
<i>Primolius maracana</i>	Não escavador	36–43
<i>Diopsittaca nobilis</i>	Unknown	30
<i>Psittacara leucophthalmus</i>	Não escavador	32–35
<i>Aratinga solstitialis</i>	Não escavador	30
<i>Pyrrhura leucotis</i>	Não escavador	23
<i>Pyrrhura cruentata</i>	Não escavador	30
<i>Pyrrhura frontalis</i>	Não escavador	24–28
<i>Forpus xanthopterygius</i>	Não escavador	12–13
<i>Brotogeris tirica</i>	Escavador facultativo	23
<i>Brotogeris chiriri</i>	Escavador facultativo	20–25
<i>Touit surdus</i>	Unknown	16
<i>Pionus maximiliani</i>	Não escavador	25–29
<i>Pionus reichenowi</i>	Não escavador	24–28
<i>Amazona aestiva</i>	Não escavador	37
<i>Amazona amazonica</i>	Não escavador	31
<i>Amazona farinosa</i>	Não escavador	38–43
<i>Amazona rhodocorytha</i>	Não escavador	35
<i>Amazona vinacea</i>	Não escavador	30
<i>Chamaeza campanisona</i>	Não escavador	19–20
<i>Dendrocincla turdina</i>	Não escavador	19–21
<i>Sittasomus griseicapillus</i>	Não escavador	13–19,5
<i>Xiphorhynchus fuscus</i>	Não escavador	15–18,5
<i>Campylorhamphus falcularius</i>	Não escavador	24–28
<i>Xiphorhynchus picus</i>	Não escavador	18–22
<i>Lepidocolaptes angustirostris</i>	Não escavador	18–22
<i>Lepidocolaptes squamatus</i>	Não escavador	19
<i>Dendrocolaptes platyrostris</i>	Não escavador	25–27
<i>Xiphocolaptes albicollis</i>	Não escavador	27,5–33
<i>Xenops rutilans</i>	Escavador facultativo	12
<i>Xenops minutus</i>	Escavador facultativo	11–12
<i>Anabazenops fuscus</i>	Não escavador	20
<i>Philydor rufum</i>	Não escavador	18–19
<i>Syndactyla rufosuperciliata</i>	Não escavador	17–18
<i>Tityra cayana</i>	Não escavador	20–22

Espécie	Tipo	Tamanho
<i>Tityra inquisitor</i>	Não escavador	17–20,5
<i>Attila rufus</i>	Não escavador	20–21
<i>Myiarchus tuberculifer</i>	Não escavador	15–17
<i>Myiarchus swainsoni</i>	Não escavador	19,5–21
<i>Myiarchus ferox</i>	Não escavador	18
<i>Myiarchus tyrannulus</i>	Não escavador	20
<i>Sirystes sibilator</i>	Não escavador	18–18,5
<i>Casiornis rufus</i>	Não escavador	18
<i>Pitangus sulphuratus</i>	Não escavador	20,5–23,5
<i>Machetornis rixosa</i>	Não escavador	19,5
<i>Myiodynastes maculatus</i>	Não escavador	19,5–23
<i>Myiozetetes similis</i>	Não escavador	16–18,5
<i>Colonia colonus</i>	Não escavador	18–28
<i>Lathrotriccus euleri</i>	Não escavador	12,7–13,5
<i>Xolmis cinereus</i>	Não escavador	22,5–23
<i>Notiochelidon cyanoleuca</i>	Não escavador	12–13
<i>Stelgidopteryx serripennis</i>	Não escavador	12,5–14,5
<i>Progne tapera</i>	Não escavador	16
<i>Tachycineta albiventer</i>	Não escavador	14
<i>Tachycineta leucorrhoa</i>	Não escavador	13
<i>Hirundo rustica</i>	Não escavador	18
<i>Troglodytes musculus</i>	Não escavador	11,5–12,5
<i>Zonotrichia capensis</i>	Não escavador	11,8–13,4
<i>Gnorimopsar chopi</i>	Não escavador	23
<i>Cissopis leverianus</i>	Não escavador	25–26
<i>Tangara palmarum</i>	Não escavador	17
<i>Tersina viridis</i>	Não escavador	14

APÊNDICE L – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA PERDIDA PONDERADA PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS AFETADOS PELO DESASTRE DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem (segundo diagnóstico)	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância Científica + Patrimonial	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância	Bem receberá compensação na área?
1	Mariana	Lavra Córrego da Lavoura	Sítio	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	24.688	2.474	10,02	2	2,5	4,5	2	4.949	
1	Mariana	Mina Santo Antônio	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	20.000	20.000	100,00	2	1,5	3,5	1,5	30.000	Não
1	Mariana	Fazenda Fábrica Nova	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	10.000	10.000	100,00	2	1	3	1,5	15.000	Não
1	Mariana	Fazenda Ouro Fino	Sítio	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	73.536	26.506	36,04	2	3	5	2	53.011	
1	Mariana	Vestígios de Mineração da Ponte de Camargos	Sítio	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	10.394	4.076	39,21	2	2	4	1,5	6.114	
1	Mariana	PCH Bicas	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	56.512	56.512	100,00	2	1,5	3,5	1,5	84.768	Não
1	Mariana	Arraial	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	48.555	27.414	56,46	2	2,5	4,5	2	54.828	
1	Mariana	Ponte do Gama	SIAHA	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	1.211	1.133	93,60	1	1	2	1	1.133	Não
1	Mariana	Antiga Bateria de Fornos e Carvão	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	999	386	38,63	1	1	2	1	386	
1	Mariana	Ruínas do Pé de Jaca	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	1.753	774	44,13	2	2	4	1,5	1.160	

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem (segundo diagnóstico)	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância Científica + Significância Patrimonial	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância	Bem receberá compensação na área?
1	Mariana	Paracatu de Baixo	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	296.640	209.602,20	70,66	3	3	6	2	419.204	
1	Mariana	Fazenda do Gualaxo	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	7.264	6.427	88,48	2	1,5	3,5	1,5	9.640	Não
1	Mariana	Ruínas Carlos Leal da Maia	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	3.694	2.471	66,91	1	1	2	1	2.471	
1	Barra Longa	Catas	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	101.260	53.554	52,89	1	1,5	2,5	1,5	80.331	
1	Barra Longa	Gesteira Velha	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	63.405	34.655,65	54,66	3	3	6	2	69.311	
1	Barra Longa	Fazenda Boa Vista da Outra Banda	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	34.910	12.648	36,23	3	3	6	2	25.295	
1	Barra Longa	Gesteira 1	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	296	296	100,00	1	1	2	1	296	Não
1	Barra Longa	Quintais da sede de Barra Longa	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	216.170	99.911,42	46,22	3	2	5	2	199.823	
1	Barra Longa	Fazenda Bueno	SIAHA	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	15.568	6.100,20	39,18	1	1,5	2,5	1,5	9.150	
1	Barra Longa	Apaga Fogo	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	11.927	9.446	79,19	3	1	4	1,5	14.168	Não
1	Rio Doce	Sistema Hidráulico da Fazenda do Carmo	SIAHA	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	3.477	734	21,11	1	1,5	2,5	1,5	1.101	

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem (segundo diagnóstico)	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância Científica + Significância Patrimonial	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância	Bem receberá compensação na área?
1	Barra Longa/ Ponte Nova	Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway	Sítio	Histórico	1	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	5.798	3.827	66,01	2	2	4	1,5	5.741	
1	Santa Cruz do Escalvado	Soberbo Velho	SIAHA	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	91.140	88.965	97,61	2	2	4	1,5	133.447	Não
1	Rio Doce	Marimbondo	Sítio	Histórico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	65.886	65.886	100,00	3	1,5	4,5	2	131.772	Não
1	Santa Cruz do Escalvado	Lapa da Candonga	Sítio	Lítico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	2.500	2.500	100,00	3	1,5	4,5	2	5.000	Não
1	Rio Doce	Candonga	Sítio	Lítico	1	1. Soterramento de bem arqueológico	2.500	2.500	100,00	3	1,5	4,5	2	5.000	Não
2	Governador Valadares	Pontes da Estrada de Ferro Vitória-Minas em Derribadinha	SIAHA	Histórico	1	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	67.932	57.932	85,28	2	1,5	3,5	1,5	86.898	Não
2	Tumiritinga	Terra Prometida I	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	26.539	3.395	12,79	3	2	5	2	6.790	
2	Conselheiro Pena	Segredo I	Sítio	Lítico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	36.814	8.636	23,46	3	1,5	4,5	2	17.273	
2	Conselheiro Pena	Porto Conselheiro Pena	SIAHA	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	3.033	1.777	58,59	1	1,5	2,5	1,5	2.666	
2	Conselheiro Pena	Estela I	Sítio	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	92.810	13.632	14,69	3	1	4	1,5	20.447	

Compartmento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem (segundo diagnóstico)	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância Científica + Significância Patrimonial	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância	Bem receberá compensação na área?
2	Conselheiro Pena	Estela II	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	10.846	3.340	30,79	3	1,5	4,5	2	6.680	
2	Resplendor	Rufino	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	17.358	3.549	20,44	3	1,5	4,5	2	7.097	
2	Resplendor	Schwenck	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	25.058	3.805	15,19	3	1,5	4,5	2	7.611	
2	Itueta	Hermes Piepper	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	436.976	204.386	46,77	3	2	5	2	408.771	
2	Aimorés	Valdivino	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	1.645	419	25,50	3	1	4	1,5	629	
2	Aimorés	Umbigo do Menino	Sítio	Lítico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	643	242	37,67	3	1	4	1,5	363	
2	Aimorés	Porto de Aimorés / Curtume	SIAHA	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	59.152	59.152	100,00	2	1,5	3,5	1,5	88.728	Não
2	Aimorés	João Reis	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	5.809	1.435	24,70	3	1,5	4,5	2	2.870	
2	Aimorés	Santa Fé II	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	35.333	10.514	29,76	3	1,5	4,5	2	21.027	
3	Baixo Guandu	Quartel do Porto do Souza	Sítio	Histórico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	6.428	1.309	20,37	3	3	6	2	2.619	

Compartmento	Município	Bem Arqueológico	Tipologia do bem (segundo diagnóstico)	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância Científica + Significância Patrimonial	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância	Bem receberá compensação na área?
3	Linhares	Lençol Grande	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	2.500	646	25,85	3	1,5	4,5	2	1.292	
3	Linhares	Fazenda Goytacaz 1	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	5.536	1.328	23,99	3	1,5	4,5	2	2.657	
3	Linhares	Maria Bonita	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	7.980	2.844	35,64	3	1	4	1,5	4.267	
3	Linhares	Progresso	Sítio	Cerâmico e lito-cerâmico	1	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	22.161	2.341	10,56	3	1	4	1,5	3.511	
5	São Mateus	Vapor Miranda	Sítio	Histórico	2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	800	800	100,00	2	1,5	3,5	1,5	1.200	Não
5	Linhares	Naufrágio Degredo 1	Sítio	Histórico	2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	1.680	1.680	100,00	2	2,5	4,5	2	3.360	Não
5	Linhares	Naufrágio Degredo 2	Sítio	Histórico	2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	1.320	1.320	100,00	2	2,5	4,5	2	2.640	Não
5	Linhares	Naufrágio Comboios 1	Sítio	Histórico	2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	48	48	100,00	2	1	3	1,5	72	Não
5	Linhares	Naufrágio Comboios 2	SIAHA	Histórico	2	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	120	120	100,00	1	1	2	1	120	Não
Total	-	-	-	-	-	-	2.038.602	1.133.448	-	-	-	-	-	2.062.689	-

APÊNDICE M – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA COMPENSADA PONDERADA PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS AFETADOS PELO DESASTRE E QUE POSSUEM ÁREAS REMANESCENTES APTAS PARA COMPENSAÇÃO

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial	Diferença entre a área total e a área afetada (LB compensação)	Porcentagem da área que sobrou pra compensação	Área a ser compensada ponderada pelo fator
1	Mariana	Lavra Córrego da Lavoura	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	24.688	2.474	10,02	2	4.949	22.214	0,90	44.428
1	Mariana	Fazenda Ouro Fino	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	73.536	26.506	36,04	2	53.011	47.030	0,64	94.061
1	Mariana	Vestígios de Mineração da Ponte de Camargos	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	10.394	4.076	39,21	1,5	6.114	6.318	0,61	9.477
1	Mariana	Arraial Antiga	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	48.555	27.414	56,46	2	54.828	21.141	0,44	42.282
1	Mariana	Bateria de Fornos e Carvão	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	999	386	38,63	1	386	613	0,61	613
1	Mariana	Ruínas do Pé de Jaca	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	1.753	774	44,13	1,5	1.160	979	0,56	1.469
1	Mariana	Paracatu de Baixo	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	296.640	209.602,20	70,66	2	419.204	87.037	0,29	174.075
1	Mariana	Ruínas Carlos Leal da Maia	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	3.694	2.471	66,91	1	2.471	1.222	0,33	1.222
1	Barra Longa	Catas	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	101.260	53.554	52,89	1,5	80.331	47.706	0,47	71.558
1	Barra Longa	Gesteira Velha	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	63.405	34.655,65	54,66	2	69.311	28.749	0,45	57.498
1	Barra Longa	Fazenda Boa Vista da Outra Banda	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	34.910	12.648	36,23	2	25.295	22.262	0,64	44.525

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial	Diferença entre a área total e a área afetada (LB compensação)	Porcentagem da área que sobrou pra compensação	Área a ser compensada ponderada pelo fator
1	Barra Longa	Quintais da sede de Barra Longa	Histórico	1. Soterramento de bem arqueológico	216.170	99.911,42	46,22	2	199.823	116.258	0,54	232.517
1	Barra Longa	Fazenda Bueno	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	15.568	6.100,20	39,18	1,5	9.150	9.468	0,61	14.201
1	Rio Doce	Sistema Hidráulico da Fazenda do Carmo	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	3.477	734	21,11	1,5	1.101	2.743	0,79	4.114
1	Barra Longa/ Ponte Nova	Ruína do Pontilhão da Leopoldina Railway	Histórico	4. Aceleração da degradação de vestígios arqueológicos	5.798	3.827	66,01	1,5	5.741	1.971	0,34	2.956
2	Tumiritinga	Terra Prometida I	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	26.539	3.395	12,79	2	6.790	23.144	0,87	46.287
2	Conselheiro Pena	Segredo I	Lítico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	36.814	8.636	23,46	2	17.273	28.177	0,77	56.355
2	Conselheiro Pena	Porto Conselheiro Pena	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	3.033	1.777	58,59	1,5	2.666	1.256	0,41	1.884
2	Conselheiro Pena	Estela I	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	92.810	13.632	14,69	1,5	20.447	79.178	0,85	118.767
2	Conselheiro Pena	Estela II	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	10.846	3.340	30,79	2	6.680	7.506	0,69	15.012
2	Resplendor	Rufino	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	17.358	3.549	20,44	2	7.097	13.810	0,80	27.619
2	Resplendor	Schwenck	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	25.058	3.805	15,19	2	7.611	21.253	0,85	42.505

Compartimento	Município	Bem Arqueológico	Categoria	Dano a ser valorado (+ relevante)	Área total (LB) m²	Área afetada m² (descontado m² quando houve sobreposição com BM)	Porcentagem afetada	Fator Significância Científica e Patrimonial	Área afetada em m² x fator de significância científica e patrimonial	Diferença entre a área total e a área afetada (LB compensação)	Porcentagem da área que sobrou pra compensação	Área a ser compensada ponderada pelo fator
2	Itueta	Hermes Piepper	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	436.976	204.386	46,77	2	408.771	232.590	0,53	465.180
2	Aimorés	Valdivino	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	1.645	419	25,50	1,5	629	1.226	0,75	1.838
2	Aimorés	Umbigo do Menino	Lítico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	643	242	37,67	1,5	363	401	0,62	601
2	Aimorés	João Reis	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	5.809	1.435	24,70	2	2.870	4.374	0,75	8.748
2	Aimorés	Santa Fé II	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	35.333	10.514	29,76	2	21.027	24.820	0,70	49.639
3	Baixo Guandu	Quartel do Porto do Souza	Histórico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	6.428	1.309	20,37	2	2.619	5.118	0,80	10.237
3	Linhares	Lençol Grande	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	2.500	646	25,85	2	1.292	1.854	0,74	3.707
3	Linhares	Fazenda Goytacaz 1	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	5.536	1.328	23,99	2	2.657	4.208	0,76	8.416
3	Linhares	Maria Bonita	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	7.980	2.844	35,64	1,5	4.267	5.136	0,64	7.704
3	Linhares	Progresso	Cerâmico e lito- cerâmico	2. Perturbação de camadas sedimentares associadas ao bem arqueológico	22.161	2.341	10,56	1,5	3.511	19.820	0,89	29.730
Total	-	-	-	-	1.638.313	748.732	-	-	1.449.446	889.581	-	1.689.227

**APÊNDICE N – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA COMPENSADA PONDERADA
PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS
SELECIONADOS NA BACIA DO RIO DOCE E LOCALIZADOS EM AMBIENTE TERRESTRE**

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção da estimativa de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
1	1	Ponte Nova/ MG	Bom Jardim ou Carioca	23K 708266 7734622	Lito-cerâmico	1	15.000	CNSAs análogos; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017; Scientia, 2010; Tab 2015 sítios históricos	3	2	5	2	ARKAIOS, 2012	30.000,00
1	2	Rio Doce/ MG	Pasto do Quilombo	23K 726320 7766871	Histórico	1	5.000	CNSAs análogos; ALCAN, 2004	1	2	3	1,5	ARKAIOS, 2006b	7.500,00
1	3	Mariana/ MG	Mirandinha	23K 660129 7769224	Registro rupestre	1	63	Não se aplica	3	1	4	1,5	Portal Iphan MG; ARTEFACTO CONSULTORIA, 2014; CARMO; KAMINO, 2017; LUME, 2020; SETE, 2012	94,50
1	4	Mariana/ MG	Fazenda do Tesoureiro	23K 666459 7755596	Histórico	1	262.200	Não se aplica	3	3	6	2	CARMO; KAMINO, 2017; Artefacto, 2011; LUME, 2020, p. v. III, p. 3 a 16	524.400,00
1	5	Mariana/ MG	Conjunto de Mineração do Divino	23K 687310 7747804	Histórico	1	301.600	CNSAs análogos; ALCAN, 2004; BRANDT, 2009, SETE, 2012; MARIANA, 2008; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em setembro e outubro de 2018	2	3	5	2	Portal Iphan MG; IPHAN/Consórcio Candonga, 2006; DELPHI, 2006	603.200,00
1	6	Ponte Nova/ MG	Fazenda Camponesa	23K 714599 7745639	Histórico	1	147.920	CNSAs análogos; Portal Iphan MG; ALCAN, 2004; ARTEFACTO, 2014; BRANDT, 2009; LUME, 2020, v. II, p. 40 a 48, v. III, p. 3 a 16	3	2	5	2	PARALELO 20, 2000	295.840,00

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
1	7	Mariana/MG	Alicerce de Pedra - João Carneiro	23K 714640 7745672	Histórico	1	5.000	ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em setembro e outubro de 2018	1	2	3	1,5	PARALELO 20, 2000	7.500,00
1	8	Mariana/MG	Canal da Fazenda do Morro	23K 687070 7747630	Histórico	1	400	CNSAs análogos; ALCAN, 2004	1	1	2	1	Portal Iphan MG; IPHAN/Consórcio Candonga, 2006; DELPHI, 2006	400,00
1	9	Mariana/MG	Canal de Adução Mirandinha	23K 679522 7736963	Histórico	1	100	Não se aplica	1	1	2	1	CNSA; ALCAN, 2004	100,00
1	10	Mariana/MG	Canela 1	23K 664007 7760371	Histórico	1	5.000	Não se aplica	2	1	3	1,5	LUME, 2020, v. II, p. 77 e 81	7.500,00
1	11	Mariana/MG	Conjunto Ruínas Casarões Sec XIX	23K 661852 7762536	Histórico	1	5.000	Não se aplica	1	1	2	1	LUME, 2020, v. II, p. 20 e 21	5.000,00
1	12	Mariana/MG	Fazenda Córrego do Fraga I	23K 664042 7749979	Histórico	1	5.000	CNSAs análogos; ALCAN, 2004	2	1	3	1,5	ARTEFACTO, 2011	7.500,00
1	13	Mariana/MG	Fazenda Córrego do Fraga II	23K 664485 7749864	Histórico	1	5.000	CNSAs análogos; ALCAN, 2004	2	1	3	1,5	ARTEFACTO, 2011	7.500,00
1	31	Mariana/MG	Garimpo II	23K 674655 7735181	Histórico	1	900	CNSAs análogos; ALCAN, 2004	1	2	3	1,5	CNSA; ALCAN, 2004	1.350,00
1	33	Mariana/MG	Jardim do Antigo Palácio Episcopal	23K 665373 7745333	Histórico	1	5000	CNSAs análogos; ALCAN, 2004	1	1	2	1	ARTEFACTO, 2010	5.000,00

Compartmento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção da estimativa de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
2	1	Sem Peixe/ MG	Iris	23K 734664 7784396	Lito-cerâmico	1	47.109	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	94.218,00
2	2	Alpercata/ MG	Sula	23K 805715 7895301	Lito-cerâmico	1	6.660	Não se aplica	3	2	5	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	13.320,00
2	3	Alpercata/ MG	Paivas	23K 809977 7900924	Lito-cerâmico	1	6.014	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	12.028,00
2	4	Governador Valadares/ MG	Ibituruna	24K 198065 7912516	Lito-cerâmico	1	44.323	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	88.646,00
2	5	Itueta/ MG	Estrela do Norte	24K 275197 7858003	Lítico	1	12.500	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	2	2	4	1,5	Linha Base	18.750,00
2	6	Conselheiro Pena/ MG	Boa Vista II	24K 235096 7887593	Lito-cerâmico	1	8.964	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	17.928,00
2	7	Conselheiro Pena/ MG	Estela III	24K 242935 7878560	Lítico	1	3.720	Não se aplica	2	2	4	1,5	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	5.580,00
2	8	Rio Casca/ MG	Córrego Preto	23K 736013 7782995	Lito-cerâmico	1	2.310	Não se aplica	3	2	5	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	4.620,00
2	9	Sobrália/ MG	Córrego do Bugre	23K 792844 7880029	Lito-cerâmico	1	7.200	Não se aplica	3	2	5	2	Linha Base; ARKAIOS, 2014	14.400,00

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
2	10	Alpercata/ MG	Fazenda Bela Vista	24K 184510 7904218	Lito-cerâmico	1	2.030	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	4.060,00
2	11	Alpercata/ MG	Juazeiro	24K 184789 7904190	Lito-cerâmico	1	2.970	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	5.940,00
2	12	Tumiritinga/ MG	Terra Prometida II	24K 214232 7904449	Lito-cerâmico	1	598	Não se aplica	2	3	5	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	1.196,00
2	14	Tumiritinga/ MG	Rio 19	24K 216475 7900723	Lito-cerâmico	1	7.500	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017; ARKAIOS, 2014.	2	3	5	2	Linha Base; CNSA	15.000,00
2	15	Galileia/ MG	Jerri	24K 218497 7901478	Lítico	1	2.400	Não se aplica	3	2	5	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	4.800,00
2	16	São Domingos do Prata/ MG	São Domingos do Prata - 2	24K 237169 7885380	Histórico	1	550	Não se aplica	1	1	2	1	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	550,00
2	17	Periquito/ MG	Base de Ponte e Estrutura Metálica de Ponte Ferroviária em Periquito	24 K 267686 7860226	Histórico	1	110	Não se aplica	2	3	5	2	PILÓ, 2008, p. 39 e 79 a 82	220,00

Compartmento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
2	18	Aimorés/ MG	Quartel da Ilha do Lorena	24K 286055 7843771	Histórico	1	585	Não se aplica	3	3	6	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	1.170,00
3	1	Linhares/ ES	Lagoa Bonita 22	24K 412295 7871350	Sambaqui/ Acampamento litorâneo	1	1.100	Linha Base; CNSAs análogos	2	2	4	1,5	TEIXEIRA, 2005	1.650,00
3	2	Linhares/ ES	Lagoa Bonita 24 e 25	24K 408835 7869047	Sambaqui/ Acampamento litorâneo	1	1.100	Linha Base; CNSAs análogos	2	2	4	1,5	Linha Base; CNSA	1.650,00
3	3	Colatina/ ES	Barra da Liberdade	24K 340419 7842664	Lito-cerâmico	1	1.440	Não se aplica	2	2	4	1,5	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	2.160,00
3	4	Colatina/ ES	Parteli	24K 301902 7844230	Lito-cerâmico	1	17.845	Não se aplica	3	3	6	2	Linha Base; CNSA	35.690,00
3	5	Mariândia/ ES	Mariândia	24K 338121 7842566	Lito-cerâmico	1	448	Não se aplica	1	3	4	1,5	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	672,00
3	6	Linhares/ ES	Amargoso 1	24K 349579 7840015	Cerâmico	1	20.000	Não se aplica	3	2	5	2	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017	40.000,00
3	7	Mariândia/ ES	Feijoal	24K 401820 7866384	Lítico	1	19.300	CNSAs análogos; Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em setembro de 2017, setembro e outubro de 2018	2	2	4	1,5	TEIXEIRA, 2005	28.950,00
3	8	Linhares/ ES	Linhares Agroindustrial 08/LASA 8	24K 352202 7841495	Lítico	1	19.300	CNSAs análogos; PARALELO 20	2	2	4	1,5	XAVIER, 2013	28.950,00

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção da estimativa de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
3	9	Linhares/ ES	Linhares 24K Agroindustrial 399728 09/LASA 9 7867269	Lítico	1	19.300	CNSAs análogos; PARALELO 20	2	2	4	1,5	PEROTA, 2011b	28.950,00	
3	10	Linhares/ ES	Linhares 24K Agroindustrial 399012 01/LASA 1 7867095	Lítico	1	19.300	CNSAs análogos; PARALELO 20	2	2	4	1,5	PEROTA, 2011b	28.950,00	
3	11	Aimorés/ MG	Ji Mirim 24K 393038 7865420	Cerâmico	1	59.500	CNSAs análogos; PARALELO 20	3	2	5	2	PEROTA, 2011b	119.000,00	
3	12	Colatina/ ES	Quitungo 24L 292099 7842594	Histórico	1	22.000	CNSAs análogos; Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017, setembro e outubro de 2018; PILÓ, 2008, p. 39, 48 a 52 e 66	3	2	5	2	Tabela de sítios arqueológicos MG – 2014	44.000,00	
3	13	Colatina/ ES	São João Grande 24K 327937 7870210	Cerâmico	1	59.500	Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2018; BAETA, 2016; PILÓ; BAETA, 2007.	3	2	5	2	Linha Base	119.000,00	
3	14	Linhares/ ES	Lagoa Bonita 18 24K 307183 7847302	Sambaqui/ Acampamento litorâneo	1	1.100	CNSAs análogos; Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em outubro de 2017, setembro e outubro de 2018; PILÓ, 2008, p. 39, 48 a 52 e 66	2	2	4	1,5	Linha Base	1.650,00	
3	15	Linhares/ ES	Linhares 24K Agroindustrial 413396 06/LASA 6 7873486	Cerâmico	1	20.000	Linha Base; CNSAs análogos	3	3	6	2	TEIXEIRA, 2005	40.000,00	
3	16	Linhares/ ES	Alvarenga 24K 394507 7869316	Histórico	1	5.450	CNSAs análogos; Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em setembro de 2017, setembro e outubro de 2018	2	2	4	1,5	PEROTA, 2011b	8.175,00	

Compartimento	Prioridade	Município	Bem	Arqueológico	Coordenadas UTM	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica e Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
3	34	Linhares/ ES	Barro Novo 2		24K 414456 7869006	Cerâmico	1	20000	CNSAs análogos; Linha base; ZANETTINI ARQUEOLOGIA - Etapa de Campo realizada em setembro de 2017, setembro e outubro de 2018	3	3	6	2	TEIXEIRA, 2005	40.000,00
Total	-	-	-	-	-	-	-	1.225.409	-	-	-	-	-	-	2.374.757,50

**APÊNDICE O – TABELA COMPLETA DO CÁLCULO DA ÁREA COMPENSADA PONDERADA
PELO FATOR DE SIGNIFICÂNCIA CIENTÍFICA E PATRIMONIAL DOS BENS ARQUEOLÓGICOS
SELECIONADOS NA BACIA DO RIO DOCE E LOCALIZADOS EM AMBIENTE AQUÁTICO**

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Localização (coordenadas geográficas)	Categoria	Grupos de bens (1: C1, C2, C3-4; 2: C5)	Área total do bem (m²), ou seja, área para compensação (LB)	Fontes utilizadas para construção da estimativa de área	Significância Científica	Significância Patrimonial	Significância total	Fator Sig Científica + Sig Patrimonial (Equivalência)	Fontes	Área compensada pelo fator
5	1	Vila Velha/ES	Santa Maria	20° 19' S e 40° 15' W	Histórico	Submerso	1050	Estimada (baseada em BARBOSA, 2014)	1	2	3	1,5	www.brasilmergulho.com.br	1.575,00
5	2	Guanabara/ES	Guanabara	20° 49' 36" S e 40° 36' 42" W	Histórico	Submerso	1050	Estimada (baseada em BARBOSA, 2014)	1	1	2	1	(ANTUNES, 2018)	1.050,00
5	3	Iriri/ES	Paquetá	20° 50' 30" S e 40° 40' 53" W	Histórico	Submerso	2400	Estimada (baseada em SANTOS, 2015)	1	1	2	1	(ANTUNES, 2018)	2.400,00
5	4	Anchieta/ES	Sítio Arqueológico Caldeira	20° 52' 36,43" S e 40° 38' 59,35" W	Histórico	Submerso	1050	Estimada (baseada em BARBOSA, 2014)	2	1	3	1,5	(ANTUNES, 2018; COSTA, 2016; FIGUEIREDO & COSTA, 2017.)	1.575,00
Total	-	-	-	-	-	-	5.550	-	-	-	-	-	-	6.600

Continuação dos dados da tabela

Compartimento	Prioridade	Município	Bem Arqueológico	Ano do Naufrágio	Motivo do Naufrágio	Nacionalidade	Tipo de embarcação	Material Casco
5	1	Vila Velha/ES	Santa Maria	1879	Encalhe	Não disponível	Vapor	Ferro
5	2	Guanabara/ES	Guanabara	1930	Choque	Brasileira	Vapor	Ferro
5	3	Iriri/ES	Paquetá	1969	Acidentes Diversos	Brasileira	Cargueiro	Aço
5	4	Anchieta/ES	Sítio Arqueológico Caldeira	Desconhecido	Não disponível	Não disponível	Vapor	Aço e Madeira