

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região
Marinha e Costeira Adjacente**

RELATÓRIO ANUAL 2020 DO PMBA/Fest-RRDM

MATRIZ DE RESULTADOS

AMBIENTES DULCÍCOLA, COSTEIRO E MARINHO

RT-36F RRDM/DEZ 20

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius Ribeiro de Castro

Vitória,

Dezembro de 2020

COORDENAÇÕES

Ambiente Dulcícola

Jorge Abdala Dergam dos Santos (UFV)

Ambientes Marinho e Costeiro

Fabian Sá (UFES)

Anexo 1

Camila de Martinez Gaspar Martins (FURG)

Subprojetos

Camila de Martinez Gaspar Martins (FURG)

Juliana Zomer Sandrini (FURG)

Marta Marques de Souza (FURG)

Anexo 3

Daniel Rigo (UFES)

Paulo Sergio Salomon (UFRJ)

Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Edmilson Teixeira (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Paulo Sergio Salomon (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

Subprojetos

Jacqueline Albino (UFES)

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

Anexo 6

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Subprojetos

Agnaldo Silva Martins (UFES)

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

Anexo 7

Maurício Hostim Silva (UFES)

Tomas Hrbek (UFAM)

Subprojetos

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Jorge Abdala Dergam dos Santos (UFV)

Maurício Hostim Silva (UFES)

Tomas Hrbek (UFAM)

Anexo 8

Heitor Evangelista (UERJ)

Coordenação Técnico-Científica (CTEC)

Adalto Bianchini

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

Escritório de Projetos (EscPro)

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Karla Pereira Rainha

Kennedy Gera Nishio

Luiz Otavio da Cruz de Oliveira Castro

Sidnei Vieira

Walter Luiz Alda Júnior

Wanessa da Costa Cruz

Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

Núcleo de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (NADEC)

Alex Cardoso Bastos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. METODOLOGIA	7
2.1. LISTA DE IMPACTOS	7
2.2. MATRIZ DE RESULTADOS	8
2.3. ESPACIALIZAÇÃO DOS RESULTADOS E DEFINIÇÃO DAS ÁREAS IMPACTADAS	10
3. RESULTADOS DA MATRIZ INTERATIVA	11
4. ESPACIALIZAÇÃO DOS RESULTADOS	22
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
6. REFERÊNCIAS	37
7. APÊNDICE	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráficos da distribuição dos pesos de cada critério para cada ambiente estudado.	14
Figura 2: Gráfico representado a consolidação da categoria de impacto Ecotoxicologia.	16
Figura 3: Resultados da Categoria de impacto Ecotoxicologia, por critério e por ambiente.	17
Figura 4: Gráfico representando a consolidação da categoria de impacto Química.	18
Figura 5: Resultados da Categoria de impacto Química, por critério e por ambiente.	19
Figura 6: Gráfico representando a consolidação da categoria de impacto Ecologia.	20
Figura 7: Resultados da Categoria de impacto Ecologia, por critério e por ambiente.	21
Figura 8: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Dulcícola.	23
Figura 9: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Marinho.	24
Figura 10: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Costeiro.	25
Figura 11: Mapa da distribuição dos impactos no Ambiente Dulcícola.	27
Figura 12: Mapa da distribuição dos impactos no Ambiente Marinho.	28
Figura 13: Mapa da distribuição dos impactos no Ambiente Costeiro.	30
Figura 14: Mapa de identificação de áreas impactadas no âmbito do PMBA/Fest-RRDM.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Representação final da Matriz de Resultados para o Ambiente Dulcícola. Número de cruzamentos (linha x coluna) = 46. Número de cruzamentos com análise do impacto, descartando-se os impactos nulos = 31.....	12
Quadro 2: Representação final da Matriz de Resultados para o Ambiente Costeiro. Número de cruzamentos (linha x coluna) = 26. Número de cruzamentos com análise do impacto, descartando-se os impactos nulos= 18.....	12
Quadro 3: Representação final da Matriz de Resultados para o Ambiente Marinho. Número de cruzamentos (linha x coluna) = 71. Número de cruzamentos com análise do impacto, descartando-se os impactos nulos = 61.....	13

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do PMBA, no âmbito do TR4, executado pela Fest-RRDM, englobou o monitoramento de vários indicadores e diversas análises abióticas e bióticas, sempre com o objetivo de entender as alterações na qualidade e na biodiversidade dos ambientes dulcícola, costeiro e marinho. Para este fim, e buscando dar robustez às análises executadas e suas relações com possíveis alterações ou impactos, foram estabelecidos critérios básicos, desde o primeiro relatório apresentado, para definir as alterações ou impactos observados. Esses critérios foram definidos conforme suas características em relação aos indicadores, considerando: **(A)** dados pretéritos pré-rompimento; **(B)** dados pretéritos pós-rompimento da barragem identificados pela RRDM, mas anteriores ao PMBA/Fest-RRDM (Pré-PMBA); **(C)** análise espacial dos resultados entre pontos amostrais impactados e não impactados; **(D)** correlação direta com a presença dos metais característicos do rejeito; **(E)** dados disponíveis na literatura científica; **(F)** valores orientadores da legislação nacional vigente; e **(G)** valores orientadores internacionais. Essa definição de critérios vem sendo usada para apontar a origem do processo de análise de impacto, ou seja, como se chegou a um conceito de que o ambiente está alterado ou contaminado, e se a biodiversidade apresenta alguma resposta biológica/ecológica em diferentes níveis, a depender do critério.

Para tanto, o conceito de impacto foi definido conforme o Artigo 1º da Resolução n.º 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), para o qual Impacto Ambiental é "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas, biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem diretamente ou indiretamente: A saúde, a segurança, e o bem estar da população; As atividades sociais e econômicas; A biota; As condições estéticas e sanitárias ambientais; A qualidade dos recursos ambientais". O princípio básico é que alterações induzidas antropicamente, ou em decorrência das atividades antrópicas, sejam produzidas no meio ambiente, afetando a biodiversidade e os recursos naturais e ecossistêmicos. O que de alguma forma gera uma ameaça à saúde, segurança e atividades sociais e econômicas.

Nesse relatório, buscando-se uma forma complementar e integrativa de avaliação temporal e espacial dos impactos diretos ou indiretos derivados do rompimento da Barragem de Fundão, decidiu-se adaptar uma Matriz de Resultados a partir de uma Matriz de Impacto amplamente utilizada em EIA-RIMA (LEOPOLD, 1971). O conceito aplicado aqui não é o mesmo de uma matriz de impacto, que na verdade é uma matriz de previsão que leva à indicação de ações que subsidiarão as atividades e ações visando monitorar e mitigar os impactos que serão causados por um empreendimento, mas, sim, volta-se à apresentação e análise do conjunto de impactos, resultados e critérios observados nos dois anos de execução do PMBA/RRDM-Fest.

O objetivo da presente Matriz de Resultados é avaliar, a partir de uma lista de impactos definidos por pesquisadores que conduziram os estudos específicos do PMBA/Fest-RRDM, impactos ocorrentes em diferentes compartimentos (abiótico e biótico) e níveis tróficos, usando critérios que foram baseados tanto nas matrizes de impacto usadas em EIA-RIMA, quanto na experiência de execução do PMBA. Dessa forma, foi possível, a partir de um impacto/alteração reconhecido, definir como esse impacto se distribuiu nas matrizes água, sedimento, organismos e nos diferentes níveis tróficos, além de mostrar a distribuição espacial, a base da análise (critérios A, B, C, D, E, F e G), a persistência, o caráter positivo, negativo ou nulo, dentre outros. Podendo assim, essa análise, ser apresentada por ambiente, ou comparativamente entre ambientes.

No presente relatório, a Matriz de Resultados foi utilizada para uma avaliação macro, ou seja, as principais respostas ou variações de critérios de análise são apresentadas para cada ambiente ou para cada categoria de impacto, e não para cada nível trófico. Uma descrição ou análise detalhada para cada nível trófico é possível de ser feita, mas exige mais tempo e talvez uma revisão da Matriz, para que mais informações específicas possam ser inseridas nela.

A apresentação dos resultados da análise da Matriz de Resultados está expressa a partir de gráficos que mostram a relação entre os diferentes critérios e categorias de impacto para os três ambientes estudados. Uma avaliação espacial é também apresentada, como desdobramento da Matriz de Resultados, visando apontar as áreas impactadas nos três ambientes.

2. METODOLOGIA

Como mencionado acima, a Matriz de Resultados foi adaptada a partir da Matriz de Impacto de Leopold (1971). A metodologia de adequação, definição dos critérios e construção da matriz encontra-se descrita abaixo.

2.1. LISTA DE IMPACTOS

A definição de uma lista de impactos ou alterações observadas pelos indicadores do PMBA/Fest-RRDM foi produzida de forma *ad hoc*, onde o conjunto de coordenadores/pesquisadores de cada Anexo definiu os impactos observados no âmbito do seu tema específico, a partir da sistematização de suas análises. Os impactos foram identificados, agrupados e categorizados seguindo as referências usadas pela Fest-RRDM, desde 2019, sendo eles: **(A)** dados pretéritos pré-rompimento; **(B)** dados pretéritos pós-rompimento da barragem identificados pela RRDM, mas anteriores ao PMBA/Fest-RRDM (Pré-PMBA); **(C)** análise espacial dos resultados entre pontos amostrais impactados e não impactados; **(D)** correlação direta com a presença dos metais característicos do rejeito; **(E)** dados disponíveis na literatura científica; **(F)** valores orientadores da legislação nacional vigente; e **(G)** valores orientadores internacionais.

Embora a lista de impactos seja diferente para cada ambiente, os impactos foram organizados em categorias que correspondem a temas transversais que se repetem nos ambientes. As categorias identificadas para as matrizes de resultados do PMBA/Fest-RRDM foram: Ecotoxicologia, Hidrodinâmica/Hidrologia, Sedimentologia, Química, Ecologia, Saúde, Comportamento, Genética e Vulnerabilidade.

Dessa forma, os impactos ambientais identificados pelo PMBA/Fest-RRDM ao longo de toda a área monitorada, considerando-se sempre que possível a relação causa/efeito, puderam ser categorizados por um comitê multidisciplinar *ad hoc* responsável pela elaboração, adaptação e aplicação da presente Matriz de Resultados, através de discussões interdisciplinares.

2.2. MATRIZ DE RESULTADOS

Para uma análise aderente à estrutura organizacional e operacional do PMBA/Fest-RRDM, foram desenvolvidas três matrizes de resultados, uma para cada ambiente estudado (Dulcícola, Costeiro e Marinho).

A partir da discussão interdisciplinar, estabeleceu-se uma metodologia própria para análise dos impactos identificados pelo PMBA/Fest-RRDM, utilizando-se como instrumento básico uma matriz de interação, a qual foi denominada “Matriz de Resultados”. Conforme já mencionado, a Matriz de Resultados é uma adequação da Matriz de Leopold (1971), ou seja, é uma matriz de interação composta por linhas e colunas, onde as linhas elencam os impactos observados/listados; e as colunas, os compartimentos ambientais monitorados, seja ele abiótico (água e sedimento) ou biótico (Microbiota, Fitoplâncton, Zooplâncton, Ictioplâncton, Perifíton, Crustáceos, Bentos – Macrofauna, Meiofauna e Nematofauna, Invertebrados, Caranguejo, Crustáceos, Corais, Peixes, Tartarugas, Cetáceos, Aves, Algas, Macrófitas, Mangue e Restinga). Essa interação é feita a partir de critérios que estão diretamente associados aos impactos, como, por exemplo, a Duração, a Abrangência Espacial, o Caráter, a Definição, entre outros.

A metodologia de avaliação dos impactos ambientais tem como base a Matriz de Leopold (LEOPOLD, 1971), porém com as devidas adaptações para enquadramento no escopo do PMBA/Fest-RRDM, uma vez que sua aplicação ocorre após impacto agudo e durante a ocorrência de impacto crônico. Essa matriz de interação funciona como uma listagem de controle bidimensional, dispondo ao longo de seus eixos, vertical e horizontal, respectivamente, os impactos ambientais organizados em categorias, e os compartimentos ambientais que foram afetados. A interseção das linhas e colunas resultam em células em que são apresentados o valor final do impacto.

Para a interpretação, classificação e valoração dos impactos ambientais, desenvolveu-se uma análise minuciosa com base em critérios preestabelecidos, sendo eles: Caráter (Ca), Definição (Def), Abrangência Espacial (Ab), Nível Ambiental/Trófico (Nat), Duração (D) e Reversibilidade (R). Para cada um destes critérios foi determinado um valor à sua classificação, referente ao impacto, da seguinte forma:

Caráter (Ca) – caracteriza o efeito do impacto no ambiente.

- Negativo (-1): efeito negativo entre os fatores associados;
- Nulo (0): não há relação entre os fatores associados;
- Positivo (1): efeito positivo entre os fatores associados.
- Células em branco ou com “–”, representam que o impacto não se aplica ou que o impacto não foi medido naquele compartimento.

Definição (Def) – é atribuída à referência através da qual o impacto foi identificado (A, B, C, D, E, F e/ou G).

- Alta (3): o impacto se baseia em um ou mais das seguintes referências: A, B e D;
- Média (2): o impacto se baseia em um ou mais das seguintes referências: D, F e G;
- Baixa (1): o impacto se baseia em um ou mais das seguintes referências: C, D, E

Abrangência Espacial (Ab) – está relacionada à distribuição espacial do impacto.

- Regional (3): verificado em mais de 1 ecossistema/compartimento/setor;
- Local (2): verificado em 1 ecossistema/compartimento/setor;
- Pontual (1): verificado em um único ponto amostral.

Nível Ambiental/Trófico (Nat) – associação do impacto aos níveis da cadeia trófica.

- Grande (3): alcançou vários níveis da cadeia trófica;
- Média (2): alcançou a base da cadeia trófica;
- Baixa (1): o efeito foi restrito ao respectivo compartimento (água/sedimento/etc.).

Duração (D) - corresponde ao tempo de permanência do impacto na área em que se manifesta.

- Permanente (3): é sempre verificado, independente das condições;
- Média (2): verificado em eventos sazonais;
- Curta (1): associado a evento meteorológico específico.

Reversibilidade (R) – relaciona-se à possibilidade de reversão do impacto no ambiente abiótico e na biodiversidade aquática.

- Irreversível (3): se a qualidade da água e do sedimento, e consequentemente a biodiversidade aquática, não poderiam retornar aos níveis/condições aceitáveis/anteriores;
- Parcialmente Reversível (2): se a qualidade da água e do sedimento, e consequentemente a biodiversidade aquática, poderiam retornar aos níveis/condições aceitáveis embora diferentes das anteriores;
- Reversível (1): se a qualidade da água e do sedimento, e consequentemente a biodiversidade aquática, poderiam retornar aos níveis/condições aceitáveis/anteriores.

Cabe destacar e ressaltar que, no contexto da biodiversidade aquática, a reversibilidade dos impactos observados na água e no sedimento, dependerá do esforço conjunto das esferas ecológica, socioeconômica e institucional (MEFFE et al., 2006), para que um grau aceitável de recomposição da biodiversidade aquática seja alcançado.

As matrizes construídas para cada Ambiente representam uma **análise quantitativa**, com base nos impactos e critérios em que o cruzamento entre as linhas e colunas apresentam um número referente a esta análise. Entretanto, para uma comparação entre os ambientes foi realizada uma **análise qualitativa**, haja vista as especificidades de cada um deles, ou seja, o comportamento dos valores foi avaliado (por exemplo, tendências de aumento ou diminuição, maiores e menores valores) e não o valor bruto propriamente dito.

Os resultados são apresentados em uma matriz com células coloridas que representam os 3 pesos definidos para os critérios. Uma matriz consolidada com o somatório de todos os critérios para cada impacto, em cada compartimento ambiental (abiótico e biótico), é apresentada por Ambiente. As planilhas Excel com a matriz e seus resultados estão disponibilizadas como Material Suplementar (MRAD, MRAC e MRAM). A análise dos resultados foi feita a partir de gráficos de distribuição mostrando o comportamento dos critérios em cada ambiente; a distribuição de categorias de impacto em cada ambiente; e por critério.

Tendo em vista que a Matriz de Resultados apresentada é ainda um produto em construção, as análises aqui apresentadas terão um caráter macro de avaliação dos impactos com a relação entre os Ambientes, em função dos tipos de impacto e critérios.

2.3. ESPACIALIZAÇÃO DOS RESULTADOS E DEFINIÇÃO DAS ÁREAS IMPACTADAS

Um dos objetivos do PMBA/Fest-RRDM é, dentre outros, reconhecer os impactos ou alterações ambientais e delimitar sua região de abrangência. São apresentados mapas contendo os impactos (representados por números), os compartimentos abióticos e bióticos (representados por símbolos) e a sua posição geográfica (representada pela localização do símbolo). É importante ressaltar, que a localização do símbolo no mapa não representa as coordenadas geográficas das estações amostrais, apenas representam o local ou região em que o impacto foi observado. Inicialmente, são apresentados os mapas contendo todos os impactos observados nos diferentes ambientes considerados, Dulcícola, Costeiro e Marinho (Figura 8, Figura 9 e Figura 10). Entretanto, para melhor visualizar os resultados da matriz, também foram espacializados os impactos e compartimentos ambientais (abiótico e biótico) que tivessem sido classificados no critério Definição com o peso mais alto, ou seja, quando o impacto foi reconhecido a partir da comparação com dados pretéritos ao desastre (Figura 11, Figura 12 e Figura 13). Essa escolha visa dar ênfase ao que vem sendo discutido incessantemente em relação ao nexo causal das alterações e qualidade ambiental e respostas biológicas observadas. Porém, isso não significa que os outros pesos dados a esse critério não tenham nexos causais, uma vez que o conceito de impacto ambiental usado no Artigo 1º da

Resolução n.º 001/86 do CONAMA, refere-se a nexos causais relacionados a qualquer atividade antrópica.

3. RESULTADOS DA MATRIZ INTERATIVA

Os resultados estão apresentados de forma a sempre buscar uma análise entre Ambientes, seja para comparação entre critérios ou categorias de impacto. As matrizes de interação bruta cruzando todos os impactos com os compartimentos ambientais, para cada ambiente estudado, estão disponíveis nos Materiais Suplementares MRAD, MRAC e MRAM. O Quadro 1, Quadro 2 e Quadro 3 apresentam a totalização das matrizes por ambiente, indicando ainda o número de cruzamentos entre linhas e colunas, ou seja, a distribuição de cada impacto listado nos diferentes compartimentos abióticos e bióticos. Os impactos também foram categorizados como Ecotoxicologia, Sedimentologia, Hidrodinâmica/Hidrologia, Química, Ecologia, Saúde, Genética, Uso do Habitat/Vulnerabilidade e Comportamento. As categorias de impacto que são comuns aos 3 ambientes são Ecotoxicologia, Química e Ecologia. Os resultados mostram forte influência dos grupos de organismos definidos nos termos de referência. No ambiente Dulcícola, os impactos mais frequentes no compartimento abiótico foram observados na água, enquanto que no compartimento biótico, o grupo mais impactado foi o de peixes, seguido por macrófitas e perifíton (Quadro 1). Já no ambiente costeiro, os impactos químicos no compartimento abiótico ficaram restritos aos sedimentos. Da mesma forma, os caranguejos do Manguezal se apresentaram como o organismo-modelo nesse ecossistema, tendo mostrado o maior nível de impacto no compartimento biótico (Quadro 2). Esse padrão pode também estar relacionado com o desenho amostral, onde, por exemplo, não houve medição prevista no TR4 para bioacumulação em macrófitas. No ambiente marinho (Quadro 3), água e sedimentos apresentaram-se impactados em quatro categorias: Ecotoxicologia, Hidrodinâmica, Sedimentologia e Química. No compartimento biótico do ambiente marinho, todos os grupos bióticos listados apresentaram algum tipo de impacto, destacando-se o plâncton e o bentos. É importante destacar que as células vazias (representadas com um traço) indicam que o impacto não se aplica a esse compartimento. Por exemplo, a resposta biológica à contaminação não se aplica ao compartimento abiótico; ou não houve medição prevista no TR4. Dessa forma, as células vazias sugerem a existência de potenciais indicadores de impacto que não foram contemplados no TR4 e que poderiam contribuir na compreensão da estrutura, composição e função ecossistêmica. Portanto, os resultados aqui apresentados podem subsidiar a revisão do TR4.

Quadro 1: Representação final da Matriz de Resultados para o Ambiente Dulcícola. Número de cruzamentos (linha x coluna) = 46. Número de cruzamentos com análise do impacto, descartando-se os impactos nulos = 31.

CATEGORIAS	IMPACTOS	AMBIENTE DULCÍCOLA									
		Abiótico		Biótico							
		Água	Sedimento	Microbiota	Fitoplâncton	Zooplâncton	Perífiton	Macrófitas	Peixes	Invertebrados	Crustáceos
Ecotoxicologia	IBR biomarcador - resposta biológica frente à contaminação	-	-	-	0	0	-	-	-11	-	-11
	Índice de toxicidade - amostras exercendo toxicidade	-9	-10	-	-	-	-	-	-	-	-
Química	Contaminação por metais	-10	-11	-	-10	-10	-	-	-13	-	-13
	Variação na concentração de nutrientes	-11	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Sedimentologia	Aumento da concentração do Material Particulado em Suspensão (MPS) e turbidez	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecologia	Redução da riqueza de espécies	-	-	-	-10	0	0	0	0	-8	-
	Aumento na abundância de espécies indicadoras de impacto	-	-	-12	-10	-9	-9	-11	-11	0	-
	Redução da abundância de espécies sensíveis a Fe	-	-	-	-	-	-10	-	-	-	-
	Aumento na biomassa de espécies invasivas e/ou introduzidas	-	-	-	-	-	-	-11	-13	-	-
	Baixa diversidade taxonômica e funcional de espécies	-	-	0	0	-9	-11	-10	-13	-8	-
	Alterações de comunidades	-	-	0	0	0	0	-12	-13	0	-
Genética	Diminuição da diversidade filogenética e funcional das comunidades	-	-	-	-	-	-	-	-14	-	-

Quadro 2: Representação final da Matriz de Resultados para o Ambiente Costeiro. Número de cruzamentos (linha x coluna) = 26. Número de cruzamentos com análise do impacto, descartando-se os impactos nulos= 18.

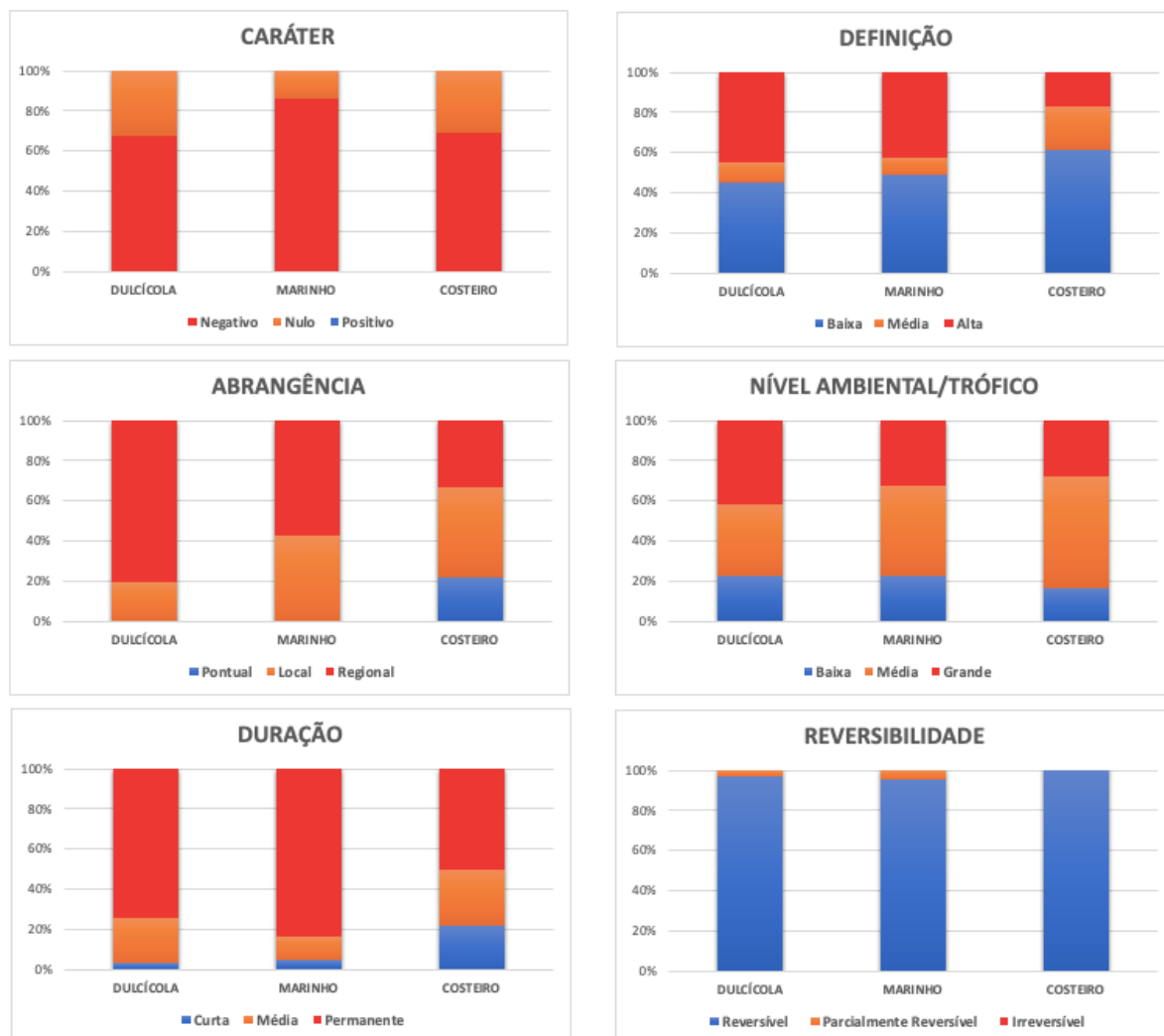
CATEGORIAS	IMPACTOS	AMBIENTE COSTEIRO											
		Abiótico				Biótico							
		Água	Sedimento Restinga	Sedimento Praia	Sedimento Mangue	Bentos: macrofauna	Bentos: meiofauna	Bentos: nematofauna	Caranguejo Mangue	Aves	Invertebrados Praia	Mangue Vegetação	Restinga Vegetação
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica (IBR marcador)	-	-	-	-	-9	-	-	-8	-	-11	-	-
Química	Contaminação por metais	-	-9	-7	-8	0	-	-	-11	-8	-7	-9	-7
Saúde	Alteração na Saúde e/ou Fisiologia	-	-	-	-	0	-	-	-9	0	0	-10	-9
Ecologia	Alteração nos índices ecológicos	-	-	-	-	-11	-11	-9	-10	0	0	0	0

Quadro 3: Representação final da Matriz de Resultados para o Ambiente Marinho. Número de cruzamentos (linha x coluna) = 71. Número de cruzamentos com análise do impacto, descartando-se os impactos nulos = 61.

CATEGORIAS	IMPACTOS	AMBIENTE MARINHO													
		Abiótico		Biótico											
		Água	Sedimento	Microbiota	Fitoplâncton	Zooplâncton	Ictioplâncton	Crustáceos	Bentos	Corais	Peixes	Tartarugas	Cetáceos	Aves	Algas
Ecotoxicologia	IBR biomarcador - resposta biológica frente à contaminação	-	-	-	-10	-10	-	-11	-	-9	-11	-	-	-	-
	Índice de toxicidade - amostras exercendo toxicidade	-10	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hidrodinâmica/ Hidrologia	Aumento da mobilização e ressuspensão do fundo	-11	-11	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-9	-	-	-	-	-
Sedimentologia	Deposição do rejeito em fundo inconsolidado	-	-11	-	-	-	-	-9	-9	-	-	-	-	-	-
	Deposição do rejeito em fundo consolidado (recifes/rodolitos)	-	-9	-	-	-	-	-	-	-7	-	-	-	-	-
Química	Contaminação por metais	-11	-11	-	-12	-12	-	-13	-	-9	-13	-9	-10	-12	-9
	Contaminação por compostos orgânicos	-9	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-9	0	0	-
	Aumento das concentrações de nutrientes	-12	-	-	-10	-10	-10	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecologia	Alterações dos índices ecológicos/alteração na comunidade/população	-	-	-8	-12	-12	-10	-7	-12	0	-10	0	0	0	-11
Saúde	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia	-	-	-	-12	0	-12	0	-12	-	0	-12	-12	0	-8
Comportamento	Aumento nas taxas de enalhe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-12	-	-
Genética	Alteração da diversidade genética	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-11	-11	-13	-	-
Vulnerabilidade	Alteração e uso do Habitat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-9	-11	-11	-11	-

A Figura 1 apresenta uma série de gráficos que mostra os percentuais do peso de cada critério distribuídos pelos ambientes estudados. O caráter avalia se o impacto foi positivo, nulo e negativo. Não foi possível observar qualquer impacto positivo, mas quando o impacto listado não era observado em determinado compartimento abiótico ou biótico que foi medido para impacto, o peso atribuído foi zero, indicando que o caráter do impacto é nulo, ou seja, não há resultado para esse impacto. Observando o gráfico de Caráter, destaca-se que nos ambientes dulcícola e costeiro, 67% e 69%, respectivamente, dos cruzamentos com impacto são de caráter negativo. No ambiente marinho, este valor sobe para 86%. Um dos critérios mais importantes a título de nexo causal é a Definição. Na Figura 1, pode ser observado que nos ambientes dulcícola e marinho, 45% e 43% dos impactos listados, respectivamente, são baseados em dados pretéritos (alto), enquanto que no ambiente costeiro, esse valor diminui para 17%. Se considerarmos o conjunto alto e médio, ou seja, incluirmos os impactos definidos com base na presença dos metais relacionados ao rejeito e com valores acima de níveis de referência nacional ou internacional, observa-se um percentual de 55%, 51% e 39% para os ambientes dulcícola, marinho e costeiro, respectivamente. Isso mostra claramente que, considerando-se todos os impactos listados pela Fest-RRDM nos três Ambientes, pelo menos cerca de 40% têm suporte baseado em dados pretéritos ou em níveis de referência. Se considerarmos apenas os ambientes dulcícola e marinho, esse percentual supera 50%.

Figura 1: Gráficos da distribuição dos pesos de cada critério para cada ambiente estudado.



A Abrangência Espacial é mais um critério importante para a análise dos resultados. A matriz mostra que 80% dos impactos observados no ambiente dulcícola são regionais, ou seja, ocorrem na calha e nos lagos e lagoas, enquanto no ambiente marinho, a abrangência regional está representada em 57% dos impactos observados. Isso significa que o impacto foi observado em pelo menos dois setores contínuos, dentre os quatro possíveis. Já o ambiente costeiro, este possui uma divisão maior dos pesos de abrangência, sendo o único que apresenta o peso 1 ou local, que significaria o impacto em apenas um ecossistema ou um setor, dentre os três possíveis. Mesmo assim, o ambiente costeiro tem 44% dos impactos classificados como sendo de abrangência local.

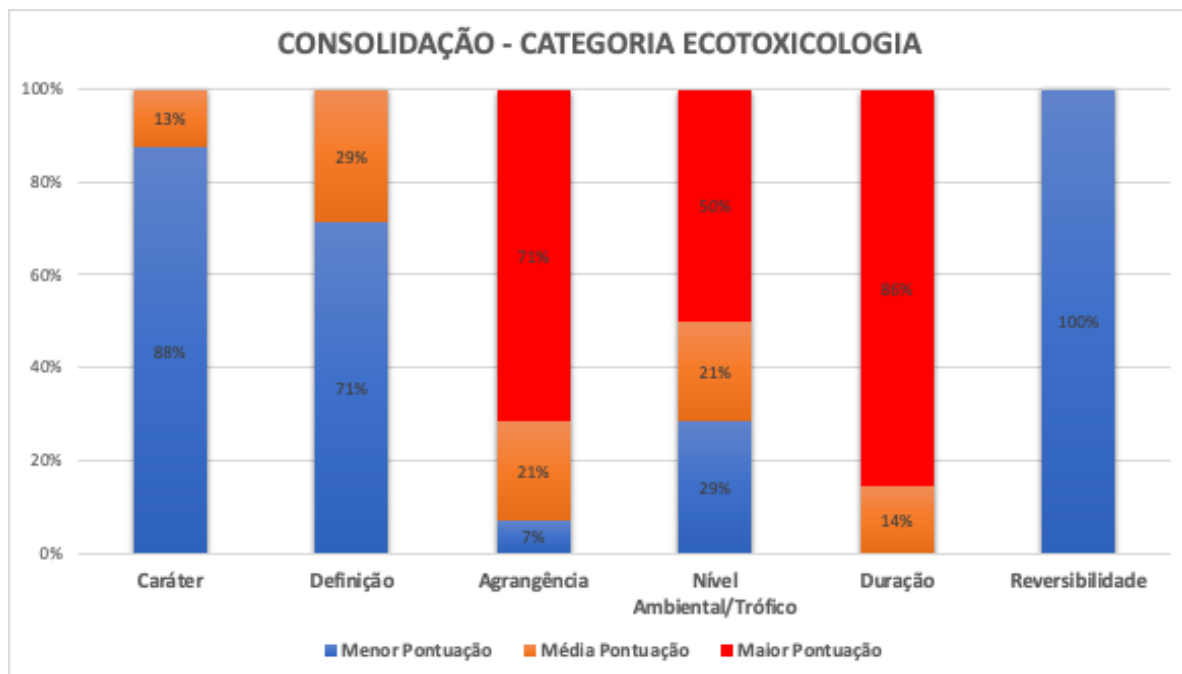
O gráfico do critério Níveis Ambientais/Tróficos mostra que impactos no compartimento abiótico e em dois níveis de cadeia trófica foram observados em todos os ambientes. Os percentuais mais baixos observados para o compartimento abiótico é função da avaliação estar focada na biota, o que leva a uma maior caracterização de tipos de impacto em categorias como Ecologia, Saúde, Genética, Uso

do habitat, etc. Entretanto, é interessante notar que nos ambientes costeiro e marinho, os impactos na base da cadeia trófica (plâncton e bentos) possuem um percentual mais elevado do que em níveis tróficos superiores, enquanto que no ambiente dulcícola é praticamente igual (45% e 48%, respectivamente). O critério de Duração mostra que a maioria dos impactos foi classificada como permanentes, ou seja, os impactos estão sendo persistentes desde antes da implementação do PMBA/Fest-RRDM ou foram observados durante os 18 meses de monitoramento. O ambiente costeiro apresenta uma distribuição mais igualitária entre os três pesos, mostrando que existe um componente sazonal relevante para os impactos observados ao longo da costa. O critério de Reversibilidade manteve o caráter potencial da matriz de Leopold (1971) e não há prazo definido para essa reversibilidade. Neste contexto, há que se destacar o fato de que um elevado potencial de reversibilidade somente se concretizará se forem devidamente e integralmente investidos os esforços conjuntos das esferas ecológica, socioeconômica e institucional (MEFFE et al., 2006), bem como aplicados as melhores tecnologias e boas práticas de mitigação de impactos e restauração ambiental, para que um grau aceitável de recomposição da biodiversidade aquática seja alcançado.

Referente às três categorias de impacto observadas nos ambientes estudados (Ecotoxicologia, Química e Ecologia), a Ecotoxicologia está associada aos marcadores e biomarcadores que indicam a toxicidade e a resposta biológica à contaminação. Por sua vez, a categoria Química representa a contaminação por metais, bioacumulação e alterações ou contaminações por nutrientes ou compostos orgânicos, porém, os principais impactos estão associados aos metais. Por fim, a categoria Ecologia representa alterações nos índices ecológicos ou alterações e mudanças na população ou comunidade. A lista dos impactos em cada categoria e em cada ambiente está apresentada como Material Suplementar à este documento (MRAD, MRAC e MRAM).

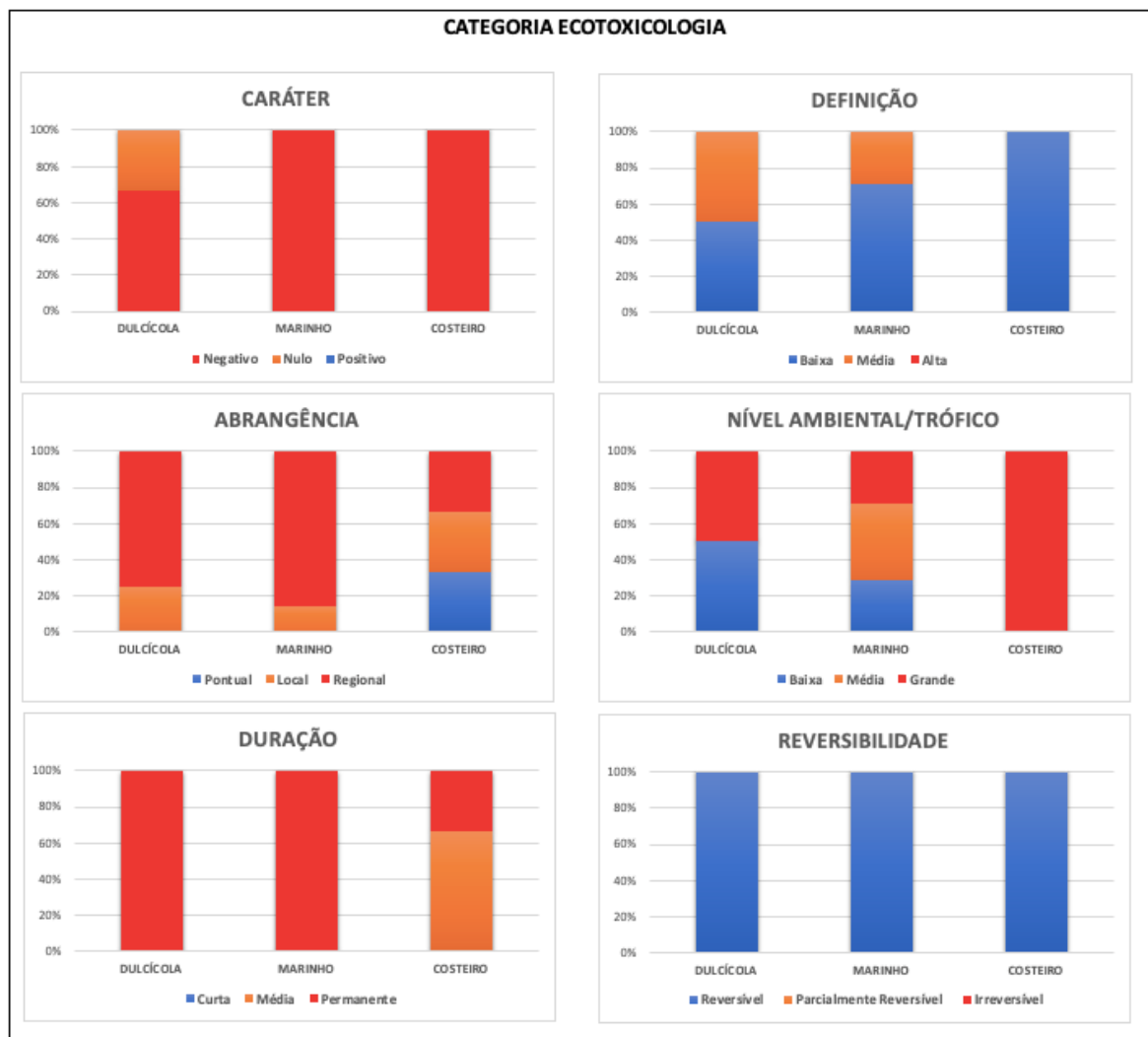
A Figura 2 apresenta a consolidação dos critérios, considerando todos os ambientes, para a categoria de impacto Ecotoxicologia. O gráfico mostra que a escala regional de Abrangência ocorre em 71% dos casos e que o impacto é permanente em 86% da sua ocorrência. A Definição do impacto usando os critérios adotados em 2019 pela Fest-RRDM mostra que, em 71% dos casos, o impacto foi definido a partir de dados distribuídos espacialmente ou comparados com dados de literatura.

Figura 2: Gráfico representado a consolidação da categoria de impacto Ecotoxicologia.



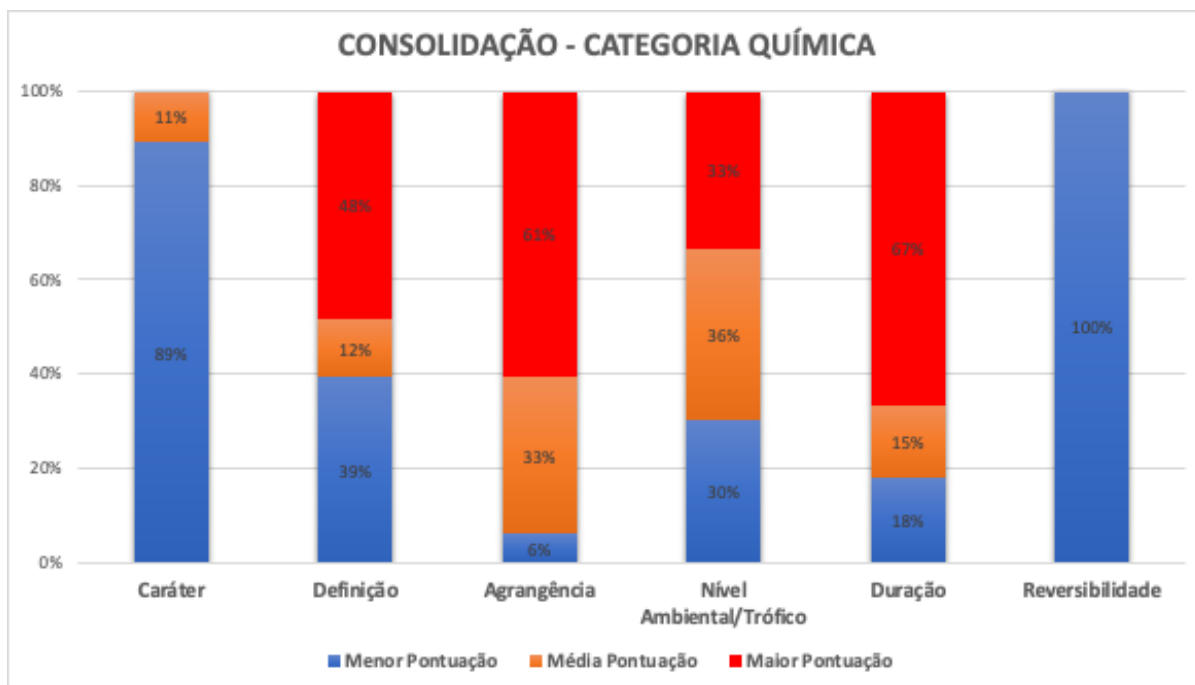
A distribuição dos critérios por ambiente para a categoria Ecotoxicologia está apresentada na Figura 3. Na distribuição por ambiente, destaca-se que os pesos mais altos para a maioria dos critérios estão nos ambientes dulcícola e marinho. Esse resultado pode ser função do padrão de amostragem e dos organismos que são coletados, bem como das análises que são realizadas nos diferentes ambientes.

Figura 3: Resultados da Categoria de impacto Ecotoxicologia, por critério e por ambiente.



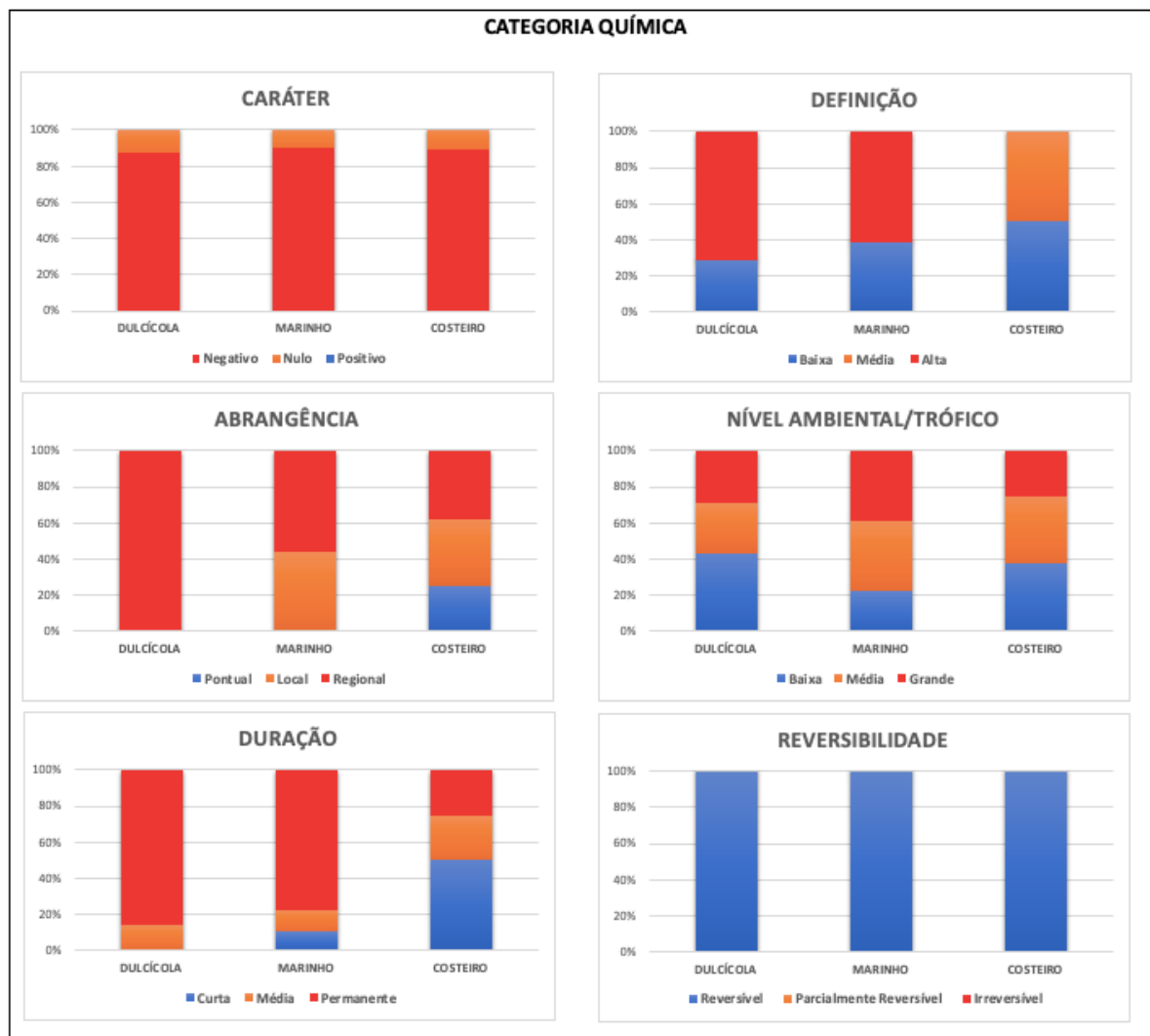
A consolidação dos resultados da categoria de impacto Química está apresentada na Figura 4. Em função do tipo de impacto causado pelo rompimento da Barragem de Fundão, os indicadores geoquímicos e de bioacumulação são objetos de análise em vários níveis tróficos e nas matrizes água e sedimento. Observa-se que 48% dos impactos definidos nesta categoria receberam o maior peso, ou seja, foram baseados em dados pretéritos. Se forem somados os impactos que correspondem a definição de metais do rejeito avaliados em níveis de referência, esse percentual chega a 60% dos impactos listados e analisados. Isso indica que essas análises estão efetivamente apontando para impactos comnexo causal. Além disso, 61% dos casos ocorrem em escala regional e 67% foram considerados de duração permanente. O caráter nulo dessa categoria ocorreu em apenas 11% dos casos.

Figura 4: Gráfico representando a consolidação da categoria de impacto Química.



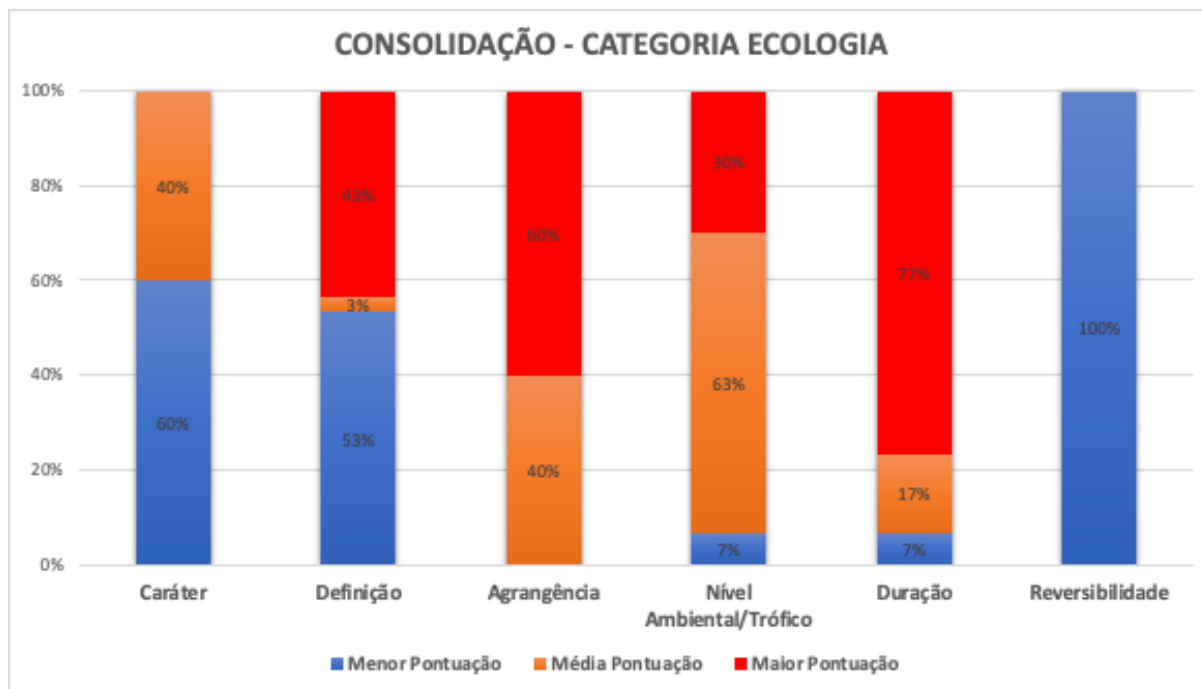
Os impactos categorizados como químicos mostram padrões interessantes quando analisados os critérios por ambiente (Figura 5). Mais de 50% dos impactos definidos nos ambientes dulcícola e marinho apresentaram os valores mais altos, ou seja, usaram dados pretéritos para comparação. O ambiente costeiro já se mostrou mais dependente da relação dos metais do rejeito com os níveis de referência. Em termos de Abrangência dessa categoria, o único ambiente que tem 100% de abrangência regional é o dulcícola, enquanto o marinho tem quase 50% de abrangência regional e local. O ambiente costeiro é mais equilibrado entre os três pesos de abrangência espacial. Essa análise é interessante porque mostra a bacia do Baixo Rio Doce com um alto nível de impacto, enquanto no ambiente marinho, parte do impacto associado à contaminação por metais está concentrado possivelmente nas áreas mais próximas da foz do Rio Doce (pelo menos em dois setores) e que parte deste impacto está se dispersando e alcançando um terceiro setor, o chamado setor Norte. Já o ambiente costeiro, com seus três ecossistemas mais fragmentados, mostra uma maior variabilidade espacial dos impactos associados à categoria Química. Vale ainda destacar que os dados desta categoria nos ambientes dulcícola e marinho apontam para uma duração do impacto permanente (alta), em cerca de 80% dos casos.

Figura 5: Resultados da Categoria de impacto Química, por critério e por ambiente.



A Figura 6 apresenta a consolidação dos critérios, considerando-se todos os ambientes, para a categoria de impacto Ecologia. O gráfico mostra que 43% dos impactos que compõem essa categoria foram definidos com uso de dados pretéritos. A escala regional de Abrangência ocorre em 60% dos casos e o impacto é permanente em 70% da sua ocorrência. O que diferencia essa categoria das outras descritas até aqui é justamente o Caráter do impacto. Para os impactos associados às alterações dos índices ecológicos ou alterações nas comunidades ou populações, 40% dos casos foram considerados nulos. Esse resultado pode estar mais associado às populações de alto nível trófico, que possuem um tempo de resposta maior do que grupos como plâncton e bentos de fundo inconsolidado, bem como, requerem escala temporal maior de estudo e monitoramento para caracterização de uma dinâmica populacional alterada por causas antrópicas.

Figura 6: Gráfico representando a consolidação da categoria de impacto Ecologia.



Os impactos da categoria Ecologia apresentaram um padrão nos ambientes que pode ser considerado como sendo distinto daquele observado para as outras duas categorias (Figura 7). A Definição dos impactos nos ambientes costeiro e marinho chegou a 50% baseada no peso mais alto (dados pretéritos). No ambiente dulcícola, este percentual ficou próximo a 40%. Embora a Abrangência Espacial tenha sido maior no ambiente dulcícola (~70%), a duração dos impactos no ambiente costeiro foi definida como permanente em 100% dos casos. No ambiente marinho, houve uma divisão em torno de 50% para a Abrangência Espacial, tanto em escala regional quanto local, sendo que a duração dos impactos nessa categoria foi definida como sendo permanente em cerca de 85% dos casos.

Figura 7: Resultados da Categoria de impacto Ecologia, por critério e por ambiente.



As categorias de impacto Sedimentologia, Saúde e Genética foram observadas em apenas dois ambientes dos três estudados e não necessariamente sempre nos mesmos ambientes. Para evitar comparações que podem não ser equivalentes, será apontada a importância de cada uma delas para o ambiente (ou os ambientes) em questão. A categoria de impactos de Sedimentologia tem um caráter importante no ambiente marinho, por estar associada à presença de rejeito em fundos inconsolidados e consolidados. Essa categoria tem os seus impactos caracterizados pelo mais alto grau de Definição em 50% dos casos, e apresentam uma Abrangência regional. A categoria de Saúde engloba a presença de doenças crônicas, alterações na fisiologia, perda de funções, etc. Esta categoria foi definida nos ambientes marinho e costeiro, sendo que embora 40% dos casos tenham Caráter nulo, mais de 80% foram definidos a partir de dados pretéritos. Já para o ambiente costeiro, esse percentual diminui para aproximadamente 40%. Essa categoria está bastante associada à

megafauna e aos caranguejos, bem como à flora de Manguezais e Restinga. A diminuição da diversidade filogenética e funcional das comunidades compõe a categoria de impacto Genética. Essa categoria foi avaliada nos ambientes dulcícola e marinho e possuem 100% de Caráter negativo e de Duração permanente. No ambiente dulcícola, a Abrangência é regional enquanto no ambiente marinho é local, possivelmente mais associada às regiões próximas à foz do Rio Doce.

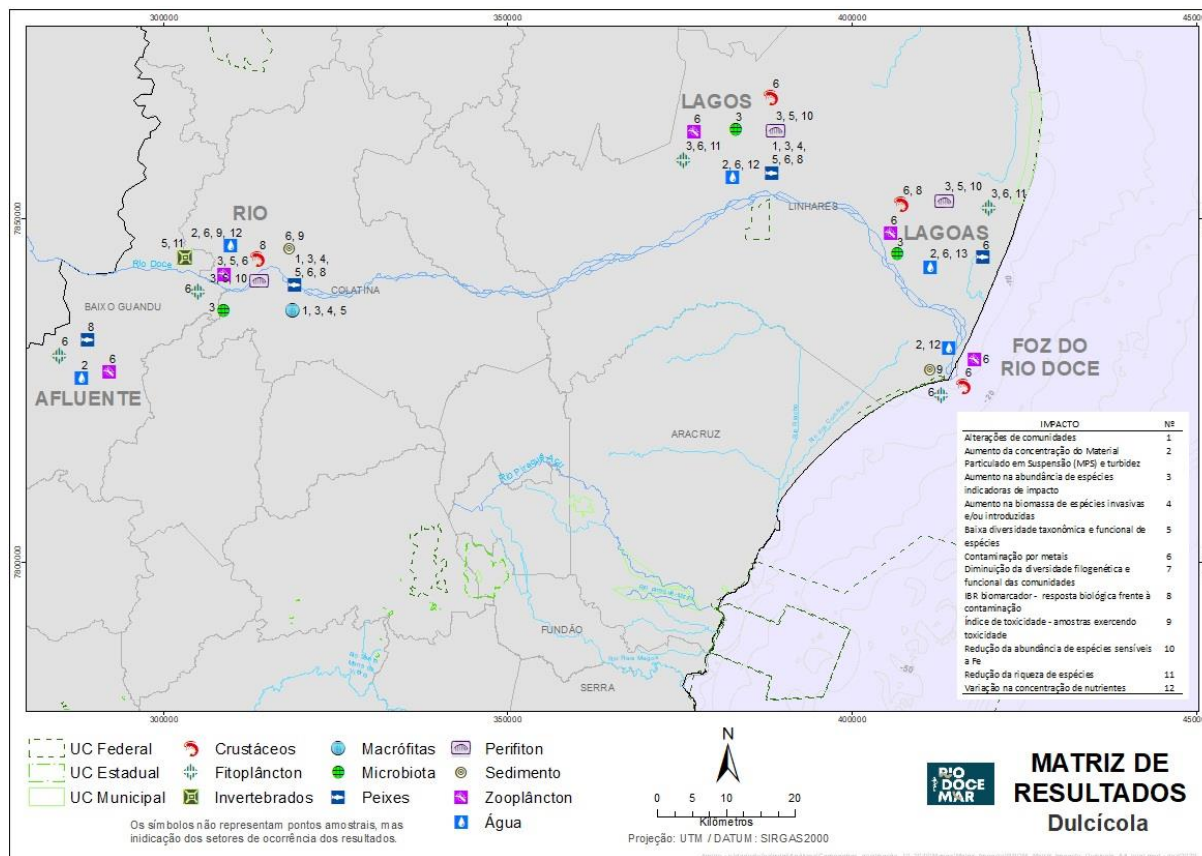
4. ESPACIALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise obtida a partir da Matriz de Resultados permitiu a geração de mapas temáticos que mostram a interação entre impactos, critérios e compartimentos bióticos e abióticos. O passo seguinte da análise foi avaliar a distribuição espacial dos impactos nos diferentes compartimentos estudados. Para tal, buscou-se, a partir de uma visão mais geral para depois focar em critérios mais determinantes, como Definição, onde os impactos foram determinados tendo como base os dados pretéritos.

Assim, os mapas das Figura 8, Figura 9 e Figura 10 mostram uma visão mais generalizada da distribuição dos impactos nos três ambientes. Nestes mapas, foram plotados todos os impactos observados nos compartimentos abiótico e biótico, sendo que o único filtro controle para limitar a plotagem foi a Abrangência Espacial, onde só impactos locais e regionais aparecem nos mapas.

O mapa do ambiente dulcícola (Figura 8) mostra um total de 31 casos/notificações que representam os diferentes tipos de impacto nos diferentes compartimentos abiótico e biótico. O ambiente marinho apresenta um total de 61 casos, enquanto o costeiro possui 14 casos. Uma análise nessa escala de abordagem é sempre mais complexa, porém uma primeira avaliação mostra que no ambiente dulcícola, os impactos bióticos e abióticos observados se concentraram no rio, na região próxima a Colatina, e na foz do Rio Doce, além de aparecerem também em lagos e lagoas. A concentração dos impactos ocorreu tanto sob o critério de Definição quanto na adoção dos demais critérios.

Figura 8: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Dulcícola.



No que concerne o ambiente marinho, pode ser notado que os impactos estão concentrados nos setores APA/REVIS, FOZ e NORTE, formando um corredor com diversos tipos de impactos, em praticamente todas as categorias e compartimentos abiótico e biótico (Figura 9). O ambiente costeiro apresentou um menor número de casos, mas, mesmo assim, os casos se distribuíram ao longo dos 3 setores costeiros, englobando impactos nos compartimentos abiótico e biótico (Figura 10).

Figura 9: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Marinho.

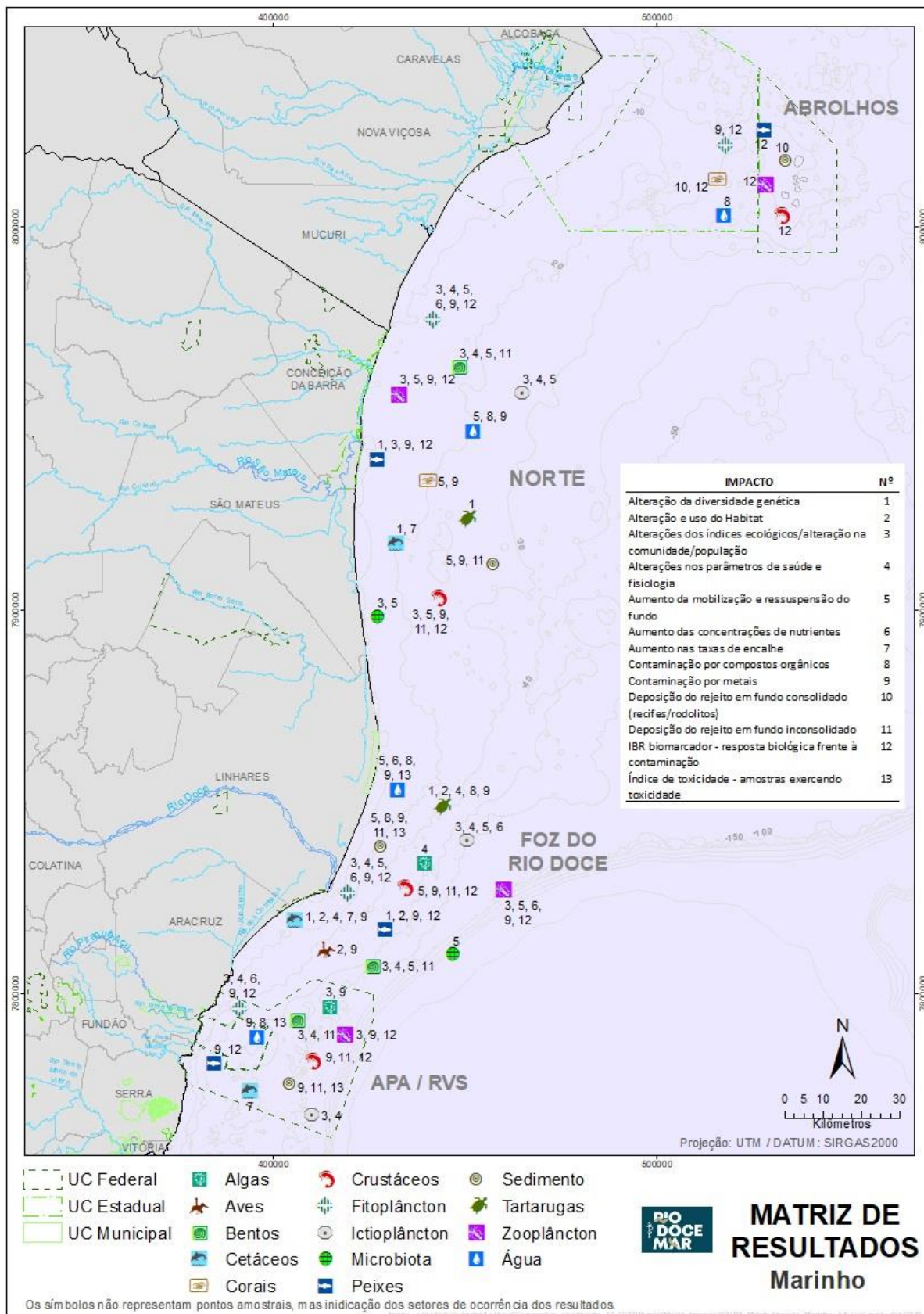
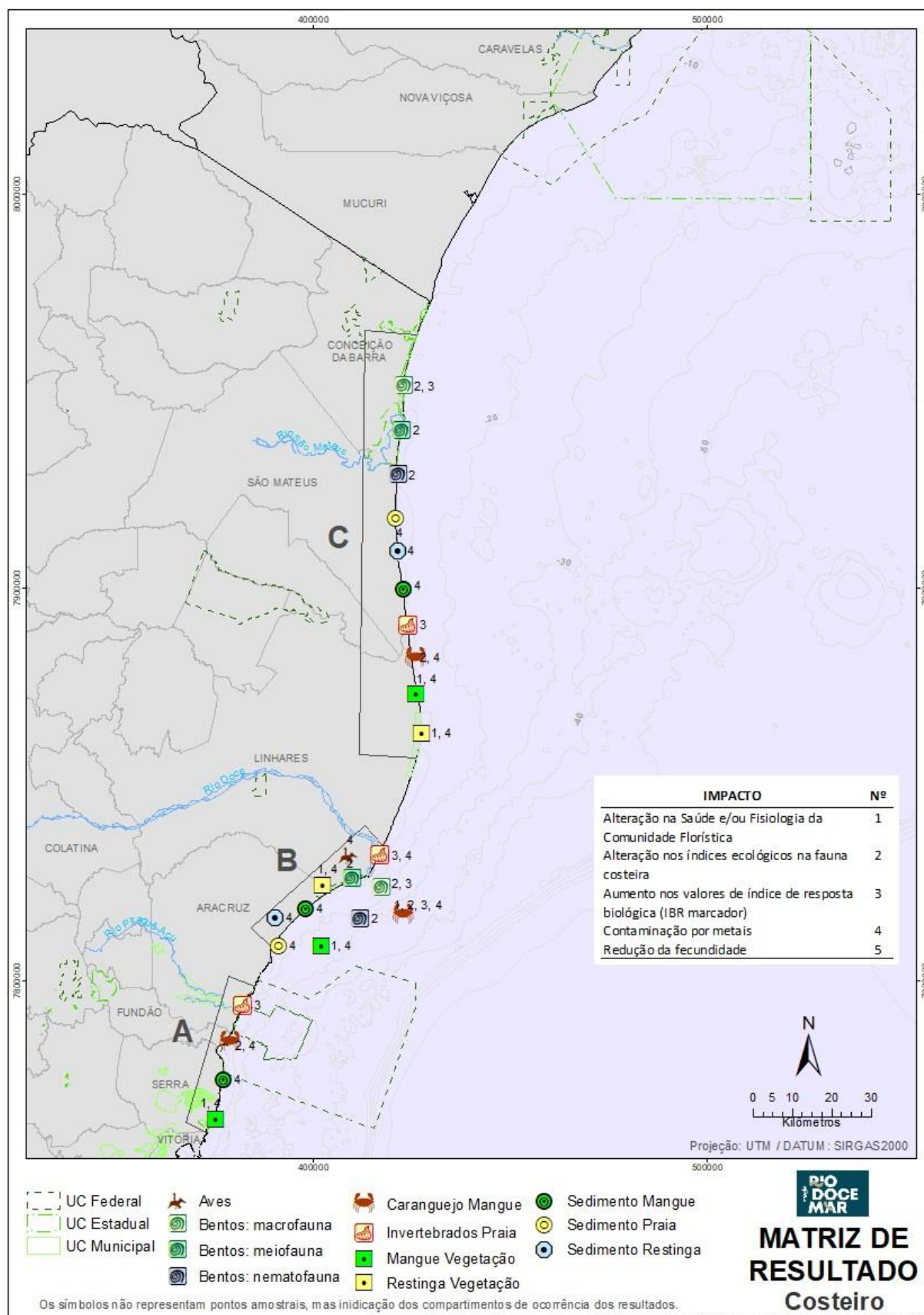


Figura 10: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Costeiro.

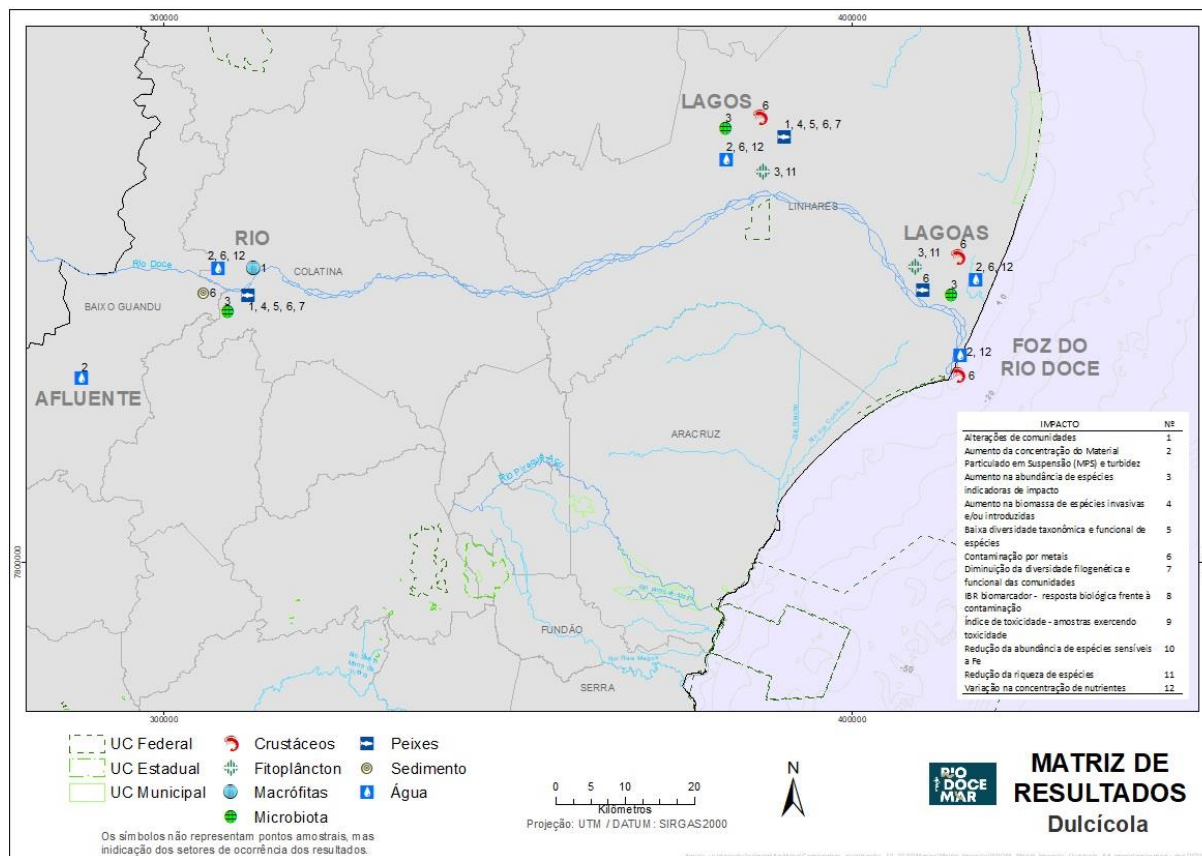


Várias são as possibilidades de espacialização dos resultados a partir dessa matriz de interação. Cabe ao pesquisador, analista, ou gestor definir o que seria mais importante de ser avaliado em cada momento, adotando assim uma abordagem avaliativa do tipo top-down ou bottom-up. Para proceder com a avaliação nesse relatório, foi definido o critério que pode ser considerado como mais robusto se o interesse for discutir onexo causal, ou discutir como o impacto ou a alteração foi definido. Nesse sentido, utilizou-se o critério Definição no seu peso máximo como filtro básico para plotar os impactos nos diferentes compartimentos abiótico e biótico. O segundo filtro usado foi a Abrangência Espacial, ou seja, foram empregados os pesos médio e alto que se referem à ocorrência local e regional.

Os mapas da Figura 11, Figura 12 e Figura 13 apresentam a distribuição espacial dos impactos nos diferentes compartimentos abióticos e bióticos que foram definidos com peso 3, e cuja Abrangência esteja com os pesos 2 e 3.

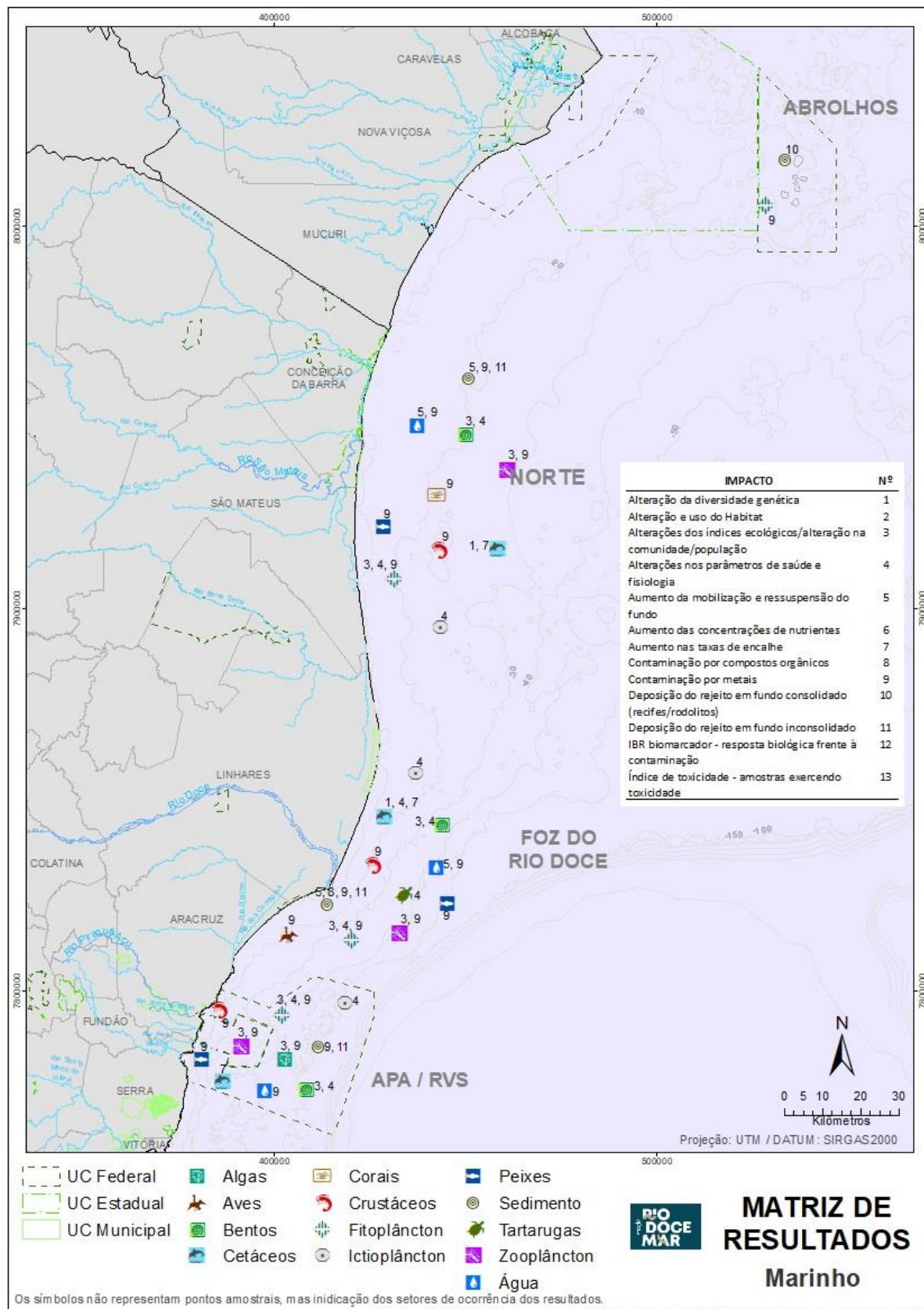
Os resultados no ambiente dulcícola apontam para 14 cruzamentos definidos pelo peso 3 no critério Definição. Isso corresponde a 45% dos casos de impacto. A distribuição dos impactos em seus compartimentos abiótico e biótico a partir do critério usado é mostrada na Figura 11. A matriz água apresenta impacto em todos os setores do ambiente dulcícola, sempre associado à contaminação por metais. Em termos bióticos, o destaque são os peixes, que apresentam 5 impactos distintos marcados pelas categorias Química, Ecologia e Genética, e ocorrem ao longo do Rio Doce, incluindo sua foz, lagoas e lagos. Fitoplâncton, macrófitas e crustáceos também apresentaram impactos ao longo do ambiente dulcícola, considerando o critério usado.

Figura 11: Mapa da distribuição dos impactos no Ambiente Dulcícola.



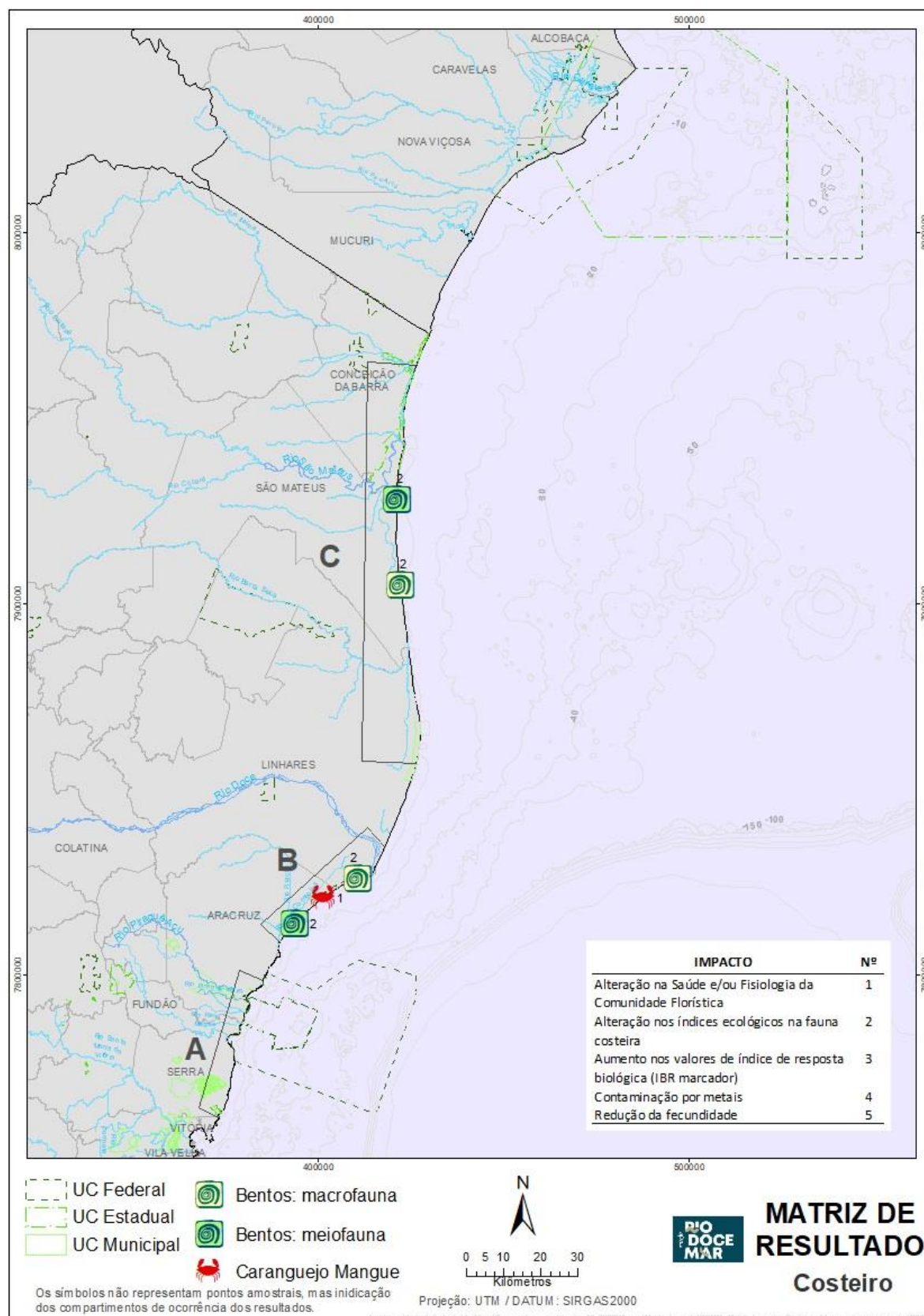
No ambiente marinho, 26 cruzamentos da matriz, ou seja, 43% dos casos de impacto, foram definidos com peso 3. Todos os 4 setores do ambiente marinho apontam para algum impacto, porém a maior concentração está nos setores APA, FOZ e NORTE, sendo que no setor NORTE, embora o mapa não permita essa observação, a maioria dos impactos observados estão no limite sul deste setor, na região de Degredo e Barra Nova, conforme é descrito nos relatórios relativos à esse ambiente (Figura 12). O compartimento abiótico se mostra alterado e com evidências de impacto em todos os setores. O mesmo pode ser observado para o biótico, destacando que apenas dois casos de impacto foram descritos para Abrolhos dentro do critério usado para os mapas. Dessa forma, ao se concentrar a análise espacial nos 3 principais setores, observa-se uma tendência de distribuição dos mesmos impactos nos mesmos compartimentos abiótico e biótico ao longo dos 3 setores. As únicas exceções são para grupos da megafauna e algas, que tendem a se concentrar mais nos setores da APA e FOZ. Importante destacar que os impactos observados nesse mapa estão associados principalmente à contaminação por metais, deposição de rejeito, alteração na saúde e alteração na comunidade.

Figura 12: Mapa da distribuição dos impactos no Ambiente Marinho.



No ambiente costeiro, apenas 17% dos casos (cruzamentos na matriz) possuem peso 3 para o critério Definição. Todos os casos observados ocorreram para bentos (Figura 13). Os impactos definidos no bentos estão associados às categorias de Saúde e Ecologia e distribuídos na região da foz do Rio Doce e no compartimento C, ao norte de Degredo. Embora não tenham dados pretéritos como critério definidor, os impactos no meio abiótico e biótico por contaminação de metais foram amplamente observados em escala local e regional.

Figura 13: Mapa da distribuição dos impactos no Ambiente Costeiro.



Os resultados obtidos desde o primeiro ano de execução do PMBA/Fest-RRDM proporcionaram a identificação e caracterização das **áreas impactadas** pelo rompimento da barragem de Fundão (Mariana/MG), considerando-se a extensão da malha amostral na região de atuação do referido Programa de Monitoramento. Com base nos dados do primeiro ano de monitoramento, estas áreas foram identificadas, apresentadas e validadas durante o workshop de avaliação interna do Relatório Anual de 2019 do PMBA/Fest-RRDM. A identificação e caracterização das áreas impactadas foram realizadas com base nos dados dos parâmetros e indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade obtidos, consolidados, analisados e interpretados pelos diferentes Anexos do PMBA/Fest-RRDM.

A partir da Matriz de Resultados, foi possível criar critérios avaliativos para consolidar o entendimento das macrorelações entre os impactos e os compartimentos abióticos e bióticos. Assim, a geração de um mapa de áreas impactadas pode ser feita com base em diferentes critérios, desde que os impactos ou alterações sejam observados ao longo da área de monitoramento. Os mapas apresentados nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13 usaram um critério de definição robusto, que consolida impactos definidos com base em dados de antes e depois da chegada do rejeito de minério no ecossistema. Entretanto, nem toda alteração observada a partir de dados antes e depois pode estar necessariamente associada ao impacto causado pelo rompimento da Barragem de Fundão. Da mesma maneira, impactos observados e definidos por meio de outros critérios também são consistentes com o cenário de alteração dos ecossistemas, e não podem de forma nenhuma serem descartados da análise. A aplicação do critério usado aqui serve como forma de destacar os impactos que foram definidos com base em antes e depois da chegada do rejeito de minério no ecossistema.

Para um melhor entendimento das relações observadas nos mapas, a análise dos critérios por categoria de impacto deve ser usada (Item 3). Considerando que a categoria Ecotoxicologia não tem peso 3 na Definição, pode-se utilizar as categorias Química e Ecologia. Nos ambientes marinho e dulcícola, mais de 35% dos casos observados foram por Definição com peso 3, porém no ambiente costeiro não houve peso 3 (possivelmente devido à ausência de dados pretéritos), mas 50% foi baseado em peso 2. Por outro lado, na categoria Ecologia, o peso 3 para definição ficou acima de 40% no ambiente dulcícola e acima de 50% nos ambientes marinho e costeiro, respectivamente.

De maneira geral, observa-se que, dentre as categorias de impacto mais observadas (em pelo menos 2 ambientes), a Ecotoxicologia (impactos de resposta biológica à contaminação e toxicidade da água e sedimento) não dispôs de dados pretéritos para as análises comparativas em todos os 3 ambientes estudados. No entanto, cabe destacar que os indicadores de Ecotoxicologia apontam para uma avaliação direta de impacto no ambiente. Por outro lado, as demais categorias (Química, Sedimentologia, Ecologia, Genética e Saúde) tiveram a disponibilidade de dados pretéritos na definição dos impactos nos 3 ambientes estudados. Neste contexto, cabe destacar que essa interação entre as categorias é também uma forma de apontar que, mesmo que impactos que podem diretamente indicar onexo causal, como contaminação por metais associados ao rejeito de minério, não tenham sido definidos por dados pretéritos, a resposta biológica aponta para um impacto

relacionado à presença deste rejeito. Além disso, é importante também considerar o peso 2 da Definição, porque é um indicador direto de contaminação pelo metal ou de alteração da qualidade do ambiente.

Não bastasse a análise por meio de gráficos, como mostrado no item 3, os mapas das Figura 8, Figura 9 e Figura 10 ainda permitem ao analista avaliar a interação entre os impactos listados e os compartimentos abióticos e bióticos afetados. Desta forma, permitem uma análise das áreas que estão sofrendo impacto ou apresentando alterações nos meios abiótico e biótico e nos diferentes grupos biológicos estudados.

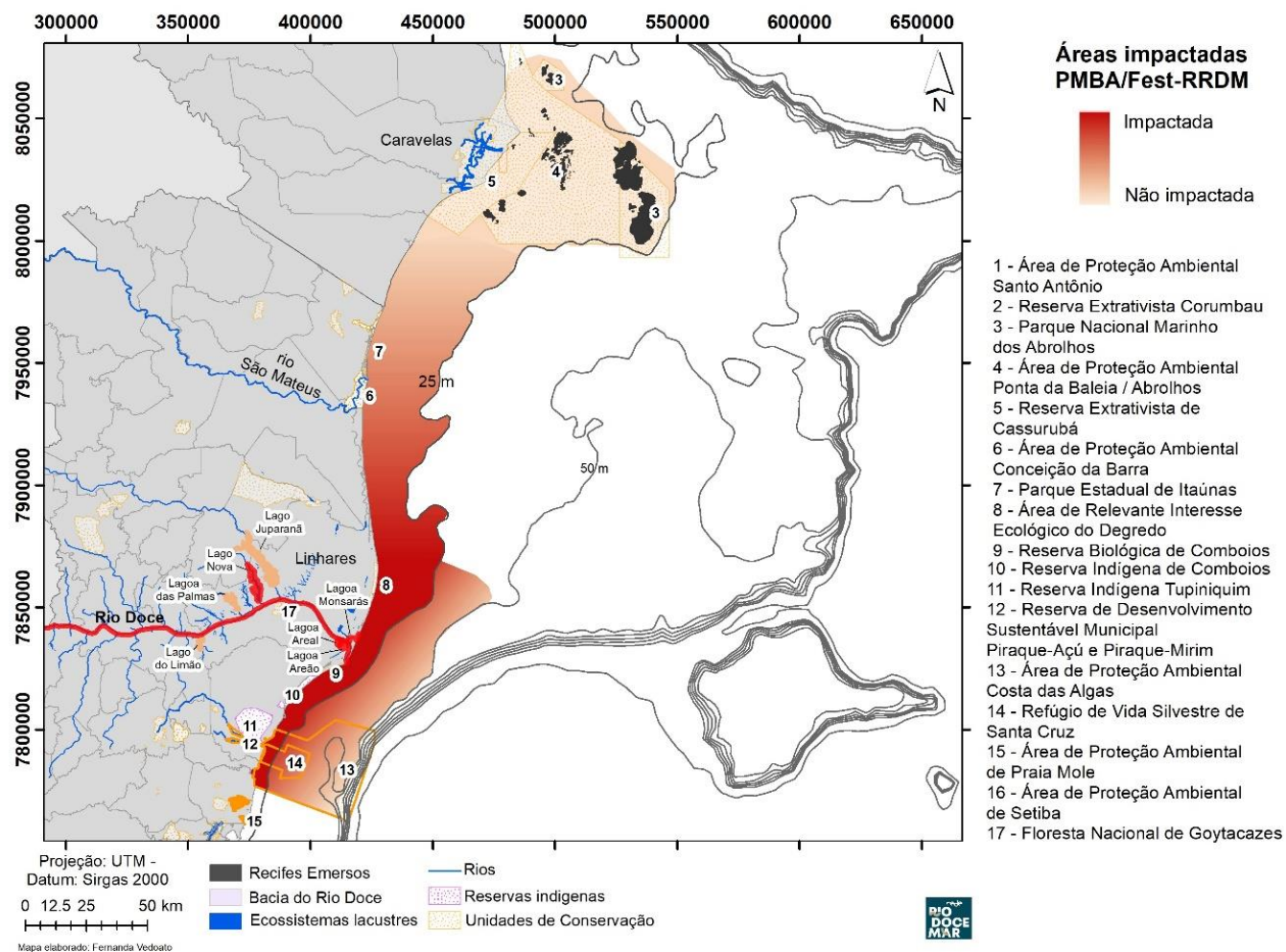
Avaliando a macro distribuição dos casos de impactos nos mapas, com o conhecimento específico da distribuição desses impactos considerando a localização das estações, é possível, de forma mais sistemática, propor as áreas impactadas, indicando possíveis limites graduais. É sempre importante ressaltar que o monitoramento ambiental executado no escopo do TR4 não tem definida uma escala de amostragem. Por ser um monitoramento baseado na biodiversidade, a distribuição das estações segue um padrão de amostragem baseado em critérios ambientais como distância da costa ou da foz, gradiente de profundidade, distribuição de habitats, morfologia da costa ou do fundo, padrões hidrodinâmicos, variação de salinidade, dentre outros. Isso significa que não existe uma malha regular baseada em uma escala pré-definida. Assim, a representatividade de uma área se dá pelo conjunto de estações que estão ali representando algum critério ambiental definido. No caso do PMBA/Fest-RRDM, foi feita uma análise da distribuição das estações e, com base na morfologia, tipos de fundo e habitat, foram definidos setores ao longo da costa e do mar. No ambiente marinho, também houve uma setorização pelo gradiente de profundidade, isso com base na ação hidrodinâmica e na distribuição de sedimentos. No ambiente costeiro, a tipologia das praias foi um critério dominante na definição dos 3 compartimentos costeiros. Dito isso, é importante ressaltar que as áreas que foram consideradas como impactadas foram aqui definidas com base nos mapas produzidos a partir da Matriz de Resultados, utilizando peso 3 para Definição. Os limites dessas áreas foram detalhados em função dessa setorização ou agrupamento de estações que representariam setores com faixas de profundidade ou morfologia e tipo de fundo similar, ou compartimentos costeiros distintos.

O mapa de áreas impactadas é apresentado na Figura 14. A partir da avaliação da Matriz de Resultados, o trecho do Rio Doce no território espírito-santense se apresenta com impactos comprovados em diferentes compartimentos (abiótico e biótico) e de duração permanente em mais de 70% dos casos. A região costeira estudada já mostra um certo grau de fragmentação na análise, e isso pode ser em função do padrão amostral, da frequência de coleta das amostras e o fato de que esse ambiente integra três ecossistemas distintos (praias, restinga e manguezal). Mesmo assim, foi possível observar que os impactos ao longo desses ecossistemas são considerados permanentes em 50% dos casos, sendo bem caracterizados na fauna bentônica e concentrados na foz do Rio Doce e no setor ao norte da mesma.

No ambiente marinho, a área impactada corresponde, principalmente, à região da plataforma interna, com os indicadores mais persistentes sendo bem marcados nas estações até a isóbata de 25 m nos setores APA, FOZ e sul do setor NORTE (Degredo e Barra Nova). Tendo a Matriz de Resultados como base dessa análise, observou-se que foram definidos 61 casos de impacto no ambiente marinho, sendo que quase a totalidade desses casos foi observada nos 3 setores: APA, FOZ e NORTE. Desses casos, 26 possuem Definição com peso 3 (43%), ou seja, existe uma análise consolidada que aponta para a ocorrência persistente e regional de diferentes tipos de impacto no ambiente marinho, tanto no meio abiótico quanto no meio biótico. Praticamente todos os grupos biológicos estudados apresentaram alguma alteração em uma ou mais de uma categoria de impacto.

Por fim, o mapa de áreas impactadas não está delimitando ou quantificando o impacto em maior ou menor grau de importância ou magnitude. O mapa aponta para as áreas onde os impactos foram reconhecidos e definidos. O gradiente de energia da alteração ambiental geralmente varia em função da distância à fonte do impacto. O Rio Doce já é a fonte carreadora do impacto, logo o ambiente dulcícola responde às alterações naturais e antrópicas na bacia hidrográfica, mas o Rio Doce está definido como área impactada, como mostra a Matriz de Resultados. No caso dos ambientes costeiro e marinho, também há o reflexo do que acontece na bacia como um todo, mas a foz do Rio Doce em Regência é o ponto de partida do impacto, onde o gradiente de variabilidade poderia ser medido. Os impactos foram reconhecidos, classificados, apresentados por critérios e a tendência é que haja uma diminuição da energia do impacto direto nas áreas mais distantes à foz do Rio Doce.

Figura 14: Mapa de identificação de áreas impactadas no âmbito do PMBA/Fest-RRDM.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de uma matriz de interação foi pensado como uma forma de complementar o processo de avaliação temporal e espacial dos impactos diretos ou indiretos derivados do rompimento da Barragem de Fundão, nos ambientes dulcícola, costeiro e marinho estudados no âmbito do PMBA/Fest-RRDM. A matriz aqui apresentada foi denominada de Matriz de Resultado visando apresentar o conjunto de impactos, resultados e critérios observados nos dois anos de execução do PMBA/Fest-RRDM. A Matriz de Resultados se mostrou uma ferramenta com potencial de apontar, em macro escala, as diversas propriedades inerentes aos impactos nos diferentes compartimentos abiótico e biótico. Essas propriedades são marcadas pelos critérios que caracterizam a natureza e a evolução temporal e espacial dos impactos. Para cada impacto listado ou definido por pesquisadores que estão analisando os dados do monitoramento, têm-se critérios que abrangem o caráter positivo, nulo ou negativo, a base de informação/análise ou comparação que levou à definição do impacto, a abrangência espacial do impacto e sua persistência ao longo do tempo e em que nível ambiental ou trófico o mesmo foi observado.

Em linhas gerais, é importante destacar que esse passo é ainda inicial, e deve ser aprofundado e discutido com os vários atores-chave envolvidos para que o desenvolvimento e uso de uma Matriz de Resultados seja feita de forma amplamente participativa. A matriz aqui apresentada é uma ferramenta em construção, que pode ser aprimorada e adequada para as necessidades dos responsáveis pela gestão ambiental e os tomadores de decisão. O seu uso neste relatório foi feito em escala de macro observação, ou seja, a interação de categorias de impacto ou de impactos listados com grupos e compartimentos abióticos e bióticos, nos 3 ambientes estudados. A depender dos objetivos e interesses de gestores e empreendedores é possível desdobrar essa matriz em matrizes mais específicas, que visem análises bottom-up, por exemplo, o comportamento ou à resposta ao impacto de um grupo biológico específico, ou o entendimento dos impactos em um setor específico de cada ambiente. Entretanto, a ideia conceitual de relacionar impactos observados, com critérios e grupos abiótico e biótico se mostrou válida e importante.

Em termos de análise de resultados, a matriz apontou para a ocorrência de categorias de impacto presentes nos três ambientes (Ecotoxicologia, Química e Ecologia), mostrando que os impactos de maior abrangência estão relacionados à resposta biológica à contaminação e à toxicidade na água e no sedimento, à contaminação por metais e bioacumulação e à alguma alteração em índices ecológicos e a nível de comunidade ou população. Esse indicativo mostra que os impactos ou alterações ambientais são ainda perceptíveis tanto no meio abiótico quanto no meio biótico. Isso não significa que impactos observados apenas em dois ambientes não sejam significativos ou importantes, até porque a não observação de um impacto pode se dar em função da malha amostral ou dos indicadores que não estão sendo coletados nos três ambientes.

Avaliando a matriz sob essa ótica, é possível ainda identificar pontos que devem ser usados na revisão do TR4. Os resultados mostram que, em muitos critérios, os ambientes dulcícola e marinho possuem macro respostas semelhantes, enquanto o ambiente costeiro se mostra bastante fragmentado. Essa fragmentação pode ser justamente da falta de um projeto integrado para os ecossistemas costeiros, ou seja, um projeto que inclua uma base de indicadores a serem coletados de forma uniforme e padronizada ao longo das praias e estuários, incluindo mangues e restingas. Fica clara a necessidade de se discutir uma padronização da frequência amostral ao longo das praias e estuários, contemplando uma análise abiótica robusta com qualidade de água e sedimentos, incluindo toxicidade e o monitoramento de plâncton e seus biomarcadores. A observação da matriz também pode levar a comparação entre grupos bióticos que não estão sendo analisados em todos os ambientes. A variação dos números de cruzamentos definidos em cada ambiente é um primeiro passo para verificar as lacunas no monitoramento.

Um outro aspecto relevante para o uso matriz de resultados é que ela ser adaptada de acordo com perguntas a serem formuladas por analistas e gestores. No caso desse relatório, foi definido que um critério relevante a ser mostrado é a Definição. Esse critério aponta como o impacto foi definido, considerando base de dados, níveis de referência, variação espacial, etc. O maior peso (3) para a Definição corresponde à comparação de dados pretéritos ao rompimento da barragem. O peso 3 definiu 45%, 43% e 17% dos casos de impacto reconhecidos nos ambientes dulcícola, marinho e costeiro, respectivamente. Para todos os ambientes, esses impactos ocorreram em uma abrangência espacial classificada como regional, ou seja, foram observados em mais de 1 setor/compartimento ou ecossistema.

Mesmo que essa análise tenha que ser feita com cautela, ou seja, deve-se considerar que nem todo impacto com dado pré-rompimento esteja associado diretamente ao rompimento, como nem todo impacto, que não tem dado pretérito, deve ser descartado ou não considerado como indicador direto denexo causal, a combinação das análises apresentadas na espacialização e nos gráficos por categoria de impacto, mostra que há dados robustos que mostram alterações ambientais regionais e persistentes, de diferentes categorias e em diferentes níveis abiótico e biótico.

Por fim, o mapa de áreas impactadas não está delimitando ou quantificando o impacto em maior ou menor grau de importância, já que essa análise pode ser subjetiva e precisa de uma análise participativa e uma pergunta ou objetivo primário. Uma das possibilidades de aperfeiçoamento da matriz de resultado é justamente desenvolver uma forma de avaliar essa importância ou magnitude do impacto com base nos critérios ou parâmetros de interesse do analista. Então se o gestor definir o problema que ele está enfrentando ou o conflito que existe ou que uma decisão precisa ser tomada, ele pode criar um mapa ou avaliar, por exemplo, onde que a resposta biológica à contaminação possui o critério de duração permanente. São várias as possibilidades de ajuste na matriz para apoiar o gestor ou o empreendedor poluidor na busca por tomadas de decisão. É ainda possível tentar cruzar informações como delimitar áreas com contaminação de água por metais permanente e ver se esse impacto possui alguma resposta ecológica ou de bioacumulação em grupos específicos.

Embora ainda haja muito espaço para aperfeiçoamento da Matriz de Resultados aqui proposta, ela se mostrou uma ferramenta importante para avaliação e análise das condições ambientais e as respostas na biodiversidade.

6. REFERÊNCIAS

LEOPOLD, L. B. **A procedure for evaluating environmental impact**. Geological Survey Circular, Washington, n. 645, p. 1-16. 1971

MEFFE, G.K.; GROOM, M.J.; CARROLL, C.R. **Ecosystem approaches to conservation. Responses to a complex world**. In: pp.467-507. Principles of Conservation Biology 3ª Edição Sinauer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts, Estados Unidos, 2006

7. APÊNDICE

TABELAS DE IMPACTOS OBSERVADOS PELO PMBA/Fest-RRDM E UTILIZADAS PARA CONSTRUÇÃO DA MATRIZ DE RESULTADOS DO RA2020

As referências utilizadas para definir os tipos de impactos foram: (A) dados pretéritos pré-rompimento; (B) dados pós-rompimento da barragem no âmbito da RRDM (dados anteriores ao PMBA/Fest-RRDM); (C) análise espacial dos resultados entre pontos amostrais impactados e não impactados; (D) correlação direta com a presença dos metais característicos do rejeito; (E) dados disponíveis na literatura científica; (F) dados da legislação nacional vigente; e (G) valores orientadores internacionais.

Os impactos são apresentados nas tabelas a seguir, organizados por Anexo e por ambiente monitorado (Dulcícola, Costeiro e Marinho):

IMPACTO	REFERÊNCIA
AMBIENTE DULCÍCOLA	
Anexo 1 Ecotoxicologia - Índice de bioacumulação:	
Aumento na bioacumulação de metais em camarões e peixes coletados no setor Lagoas ao longo das campanhas de monitoramento.	C, D
Aumento de Fe no plâncton dos setores Rio e Afluente na campanha 4 (jan/fev 2020) em comparação às demais campanhas.	C, D
Aumento nos teores de Fe, Mn, Pb, Zn e Cu nos tecidos de camarões e peixes das lagoas durante o Período de Transição em comparação ao Ano 1.	C, D
Altos teores de Fe e outros elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Mn e Pb no plâncton de todos os setores dulcícolas em comparação a dados pretéritos coletados na foz do Rio Doce antes da chegada da lama (nov/2015).	A, B, D
Altos teores de Cd, Cr, Cu e Mn nos camarões dulcícolas em comparação a dados pretéritos coletados na foz do Rio Doce antes da chegada da lama (nov/2015).	A, B, D
Altos teores de Fe, Cd, Cr, Cu, Mn e Pb em peixes dulcícolas coletados em diferentes pontos da calha do Rio Doce em comparação a dados pretéritos antes da chegada da lama (nov/2015).	A, B, D
Anexo 1 Ecotoxicologia - Índice de resposta biológica (IBR biomarcador):	
Aumento no Índice de resposta biológica (IBR biomarcador) em camarões durante o Período de Transição em comparação ao Ano 1, com destaque para os setores Rio e Lagoas.	C, D
Aumento de danos no DNA (sítios AP) e de proteínas carboniladas (PCO) durante o Período de Transição em comparação ao Ano 1 em camarões e em peixes.	C, D
Aumento nos níveis de danos lipídicos (LPO) e metalotioneínas (MT) em	C, D

IMPACTO	REFERÊNCIA
camarões na campanha 3 (set/out 2019) em relação às demais campanhas.	
Anexo 1 Ecotoxicologia - Índice de toxicidade:	
Maiores valores de toxicidade associados ao estuário do Rio Doce (RDO-16) em comparação aos demais pontos em todas as campanhas realizadas.	C, D, F
Maior toxicidade associada ao sedimento do que na água em todas as campanhas realizadas.	C, D, F
Maior valor de toxicidade observado durante o monitoramento foi em amostras de sedimento do ponto RDO-16 coletado na campanha 3 (set/out 2019).	C, D, F
Anexo 1 Ecotoxicologia - Indicadores microbianos:	
Presença de táxons sugeridos como bioindicadores de metais e do rejeito da barragem de Fundão em todas as campanhas avaliadas, tanto na água, quanto no sedimento.	B, C, D, E
Aumento dos táxons <i>Acinetobacter</i> e <i>Exiguobacterium</i> , conhecidos bioindicadores de metais na campanha 4 (jan/fev 2020) em comparação às demais campanhas.	B, C, D, E
Grande abundância dos táxons sugeridos como bioindicadores da presença de metais e do rejeito da barragem de Fundão, como <i>Anaerolineacea</i> e <i>Pirellulaceae</i> , no sedimento, com maior abundância destacada para o ponto do Rio Doce em Linhares (RDO-15).	B, C, D, E
Anexo 3 Dulcícola - Limnologia	
Aumento da concentração do Material Particulado em Suspensão (MPS) e dos valores de turbidez da água no ambiente fluvial e lacustre	A, B, C, F* * Turbidez
Variação do pH da água no ambiente fluvial e lacustre	A, B, C, F
Variação dos valores do potencial Redox da água no ambiente lacustre	B, C
Variação das concentrações de Oxigênio Dissolvido do ambiente fluvial e lacustre (hipoxia e anoxia)	A, B, C, F
Elevação das concentrações de Fósforo total da água no ambiente lacustre e fluvial	A, B, C, F
Aumento das concentrações de Nitrogênio total e inorgânico dissolvido da água no ambiente lacustre e fluvial	A, B, C, F
Variações das concentrações de silício inorgânico dissolvido na água do ambiente fluvial	B, C
Contaminação da água do Rio Doce por metais (Fe, Al e Mn)	A, B, C, D F, G
Contaminação da água do Rio Doce por metais (Ba e Pb)	C, D, F, G
Contaminação do sedimento do Rio Doce por metais (Fe, Al e Mn)	A, B, C, D
Contaminação de água de lagos e lagoas por metais (Fe, Al, Mn e Ba)	B, C, D, F, G
Presença de elementos de terras raras (ETR) característicos do rejeito no sedimento e MPS do Rio Doce	C, D, E
Presença de elementos de terras raras (ETR) característicos do rejeito no sedimento de alguns lagos e lagoas	C, D, E
Variações dos teores de oxihidróxidos de Fe dos sedimentos no ambiente fluvial	B, C, D, E

IMPACTO	REFERÊNCIA
e lacustre	
Anexo 3 Dulcícola - Fitoplâncton	
Redução da riqueza de espécies nos lagos e lagoas	A
Aumento na abundância de cianobactérias	A
Aumento da abundância de cianobactérias potencialmente produtoras de toxinas	A, E
Anexo 3 Dulcícola - Perifíton	
Baixa diversidade de espécies	E, G
Aumento abundância de cianobactérias	E
Alta abundância espécies indicadoras de condições meso-eutróficas	E, G
Redução da abundância de espécies sensíveis a Fe	E
Aumento abundância espécies indicadoras Mn	E
Anexo 3 Dulcícola Macrófitas	
Redução da diversidade de espécies no Rio Doce	E
Ausência de espécies com registros anteriores na calha do Rio Doce	A
Aumento na biomassa das espécies invasivas <i>Eichornia azurea</i> e <i>Eichhornia crassipes</i>	E
Abundância de espécies introduzidas em ambientes mais alterados	E
Anexo 3 Dulcícola - Zooplâncton	
Baixa diversidade de espécies na calha do Rio Doce	E
Aumento na abundância de espécies generalistas	E
Erosão da diversidade funcional em áreas com maior concentração de Fe dissolvido	E
Anexo 7 Ictiofauna Dulcícola	
Extirpação de espécies presentes na calha	A
Sobrevivência de espécies, restrita a tributários	A
Redução da diversidade de espécies no Rio Doce	A, B, E
Aumento do número e biomassa de espécies introduzidas	A, E
Baixo recrutamento de espécies nativas e alto recrutamento de espécies introduzidas	E
Abundância de espécies introduzidas em ambientes mais alterados	E
Predominância de guildas de insetívoros, carnívoros e onívoros em substituição de iliófagos e detritívoros	E
Ausência da Crumatá <i>Prochilodus vimboides</i> , nativos detritívoro e iliófago de piracema no Baixo Rio Doce (Cat. IUCN Vulnerable)	A
Ausência da Piabanha <i>Brycon dulcis</i> , espécie onívora indicadora de habitat não alterado (Cat. IUCN Endangered)	A
Diminuição da diversidade filogenética e funcional das comunidades de peixes (somente as espécies nativas)	B
Diminuição da diversidade filogenética e funcional das comunidades de peixes	B

IMPACTO	REFERÊNCIA
Perda total ou drástica redução na riqueza de macroinvertebrados	E
Simplificação da diversidade de macroinvertebrados por perda de habitats	E
Predomínio e altas densidades de macroinvertebrados tolerantes e resistentes (Diptera Chironomidae, Classe Oligochaeta e outros)	E
Qualidade de água através de macroinvertebrados bentônicos	E
Qualidade de habitats em impactado, alterado e natural pelo uso de protocolos de avaliação de habitats	E
AMBIENTE COSTEIRO	
Anexo 1 Ecotoxicologia – Índice de bioacumulação	
Maiores níveis de acumulação de metais (IBR bioacumulação) em caranguejos de mangue coletados no setor B (próximo à foz do Rio Doce), principalmente durante o Período de Transição.	C, D
Tendência geral de diminuição na acumulação de metais (IBR bioacumulação) em invertebrados de praia ao longo das campanhas de monitoramento.	C, D
Maiores níveis de acumulação de metais (IBR bioacumulação) em aves coletadas durante a campanha 1 (set/out 2018).	C, D
Anexo 1 Ecotoxicologia – Índice de resposta biológica (IBR biomarcador)	
Maiores valores do Índice de resposta biológica (IBR biomarcador) em caranguejos de mangue coletados durante os períodos de chuva (campanha 2 – jan/fev 2019 e campanha 4 – jan/fev 2020).	C
Maiores valores de IBR biomarcador em caranguejos de praia coletados durante os períodos de seca (campanha 1 - set/out 2018 e campanha 3 - set/out 2019).	C
Frequente coocorrência de elevados níveis de bioacumulação (IBR bioacumulação) e de resposta biológica (IBR biomarcadores) no setor B, relativo às áreas do entorno da foz do Rio Doce.	C, D
Anexo 4 Praias	
Presença de lama na antepraia e alteração na morfologia da praia	C, D, E
Alteração das concentrações dos elementos químicos associados ao rejeito	A, D, E, F, G
Redução dos parâmetros da diversidade da macrofauna	A, C, D, E
Alteração dos parâmetros da diversidade da meiofauna	A, C, D, E
Alteração dos parâmetros da diversidade da nematofauna	C, D, E
Alteração na densidade das espécies/grupos chaves	A, C, D, E
Anexo 5 Restinga	
Contaminação do sedimento por metais	A, C, D, E, G
Contaminação do tecido vegetal por metais	C, D e E
Alterações na Fotossíntese	C, D e E
Alterações no Metabolismo primário	C, D e E
Alterações no Sistema antioxidante	C, D e E
Dano oxidativo	C, D e E

IMPACTO	REFERÊNCIA
Floração	C, D e E
Anexo 5 Manguezal	
Impacto de metais (Fe e Mn) nos sedimentos em Caravelas, nos rios Piraquê-Açu, Mirim e São Mateus em diferentes escalas espacial e temporal ao longo do monitoramento.	A (algumas áreas), C, E, F, G.
Impacto de metais (Fe e Mn) no rio Urussuquara nos períodos chuvosos de 2018-2019.	C, E, F, G.
Impacto de metal (Mn) na Costa das Algas no período chuvoso 2019-2020.	A, C, E, F, G.
Impacto por Pb em São Mateus durante o período chuvoso 2018-2019.	C, E, F, G.
Impacto por Pb no rio Piraquê-Mirim no período chuvoso 2019-2020.	C, E, F, G.
Impacto por Cu nos sedimentos em todos os estuários com declínio ao longo do monitoramento em escala espacial.	C, E, F, G.
Impacto de Fe, Mn, Cu e Zn na área intertidal do Rio Doce em escala espacial e temporal correlacionados à vazão do rio.	A, C, E, F, G.
Impacto de Fe nas folhas nos manguezais dos rios Piraquê-Açu, Costas das Algas, Urussuquara, Barra Nova, Rio Doce, São Mateus e Caravelas ao longo do monitoramento variando entre os locais de acordo com os períodos chuvosos e secos, sendo neste último maior.	A (para alguns estuários), C, E.
Impacto de Mn nas folhas nos manguezais do rio São Mateus e Caravelas ao longo do monitoramento variando entre os locais de acordo com os períodos chuvosos e secos.	C e E.
A espécie <i>R. mangle</i> entre a vegetação de mangue é a mais susceptível aos impactos por Fe.	C e E
A espécie <i>L. racemosa</i> é a mais susceptível aos impactos por Mn.	C
Redução da assimilação de carbono ao longo do monitoramento associados ao Fe e Mn nas folhas para todos os manguezais.	C
Redução da eficiência fotoquímica associado ao Fe e Mn ao longo do monitoramento para nas localidades Barra do Riacho, Costa das Algas e Urussuquara.	C
Influência negativa do Fe sobre a produção de pigmentos fotossintetizantes.	C
Tendência de redução da assimilação do carbono para <i>T. pernambucense</i> no rio Doce ao longo do monitoramento.	C
Redução da eficiência fotoquímica associado ao Fe e Mn ao longo do monitoramento para <i>T. pernambucense</i> no rio Doce no período seco.	C
Aumento dos metais Fe, Mn, Cu nas folhas de <i>T. pernambucense</i> no rio Doce.	C
Aumento do Pb nas folhas dos rios Piraquê-Açu, Mirim, Barra do Riacho, Barra Nova, São Mateus e Caravelas no chuvoso 2019-2020.	C
O estresse oxidativo da vegetação monitorada aumentou ao longo do monitoramento em todos os estuários.	C
Introdução de espécies <i>U. cordatus</i> e <i>G. cruentata</i> na zona intertidal do rio Doce.	A e C

IMPACTO	REFERÊNCIA
Aumento da densidade de <i>U. cordatus</i> em Barra Nova e Urussuquara.	C
Redução do recrutamento de <i>C. guanhumi</i> nos estuários ao longo do monitoramento.	C
Redução da densidade de <i>C. guanhumi</i> no rio Urussuquara.	C
Aumento de densidade de recrutas de <i>U. cordatus</i> no rio Piraquê-Mirim, indicando comprometimento da população de adultos preteritamente.	C
Redução da fecundidade para as fêmeas de <i>U. cordatus</i> no rio São Mateus.	A
Bioacumulação de Fe, Mn e outros metais nas espécies <i>U. cordatus</i> e <i>C. guanhumi</i> em todos os estuários ao longo do monitoramento com base nos dados do Anexo 1 Ecotoxicologia e com base nos dados de contaminação nas folhas da vegetação de mangue.	C
Os impactos variam de intensidade espacial e temporalmente em função dos fatores climáticos e oceanográficos.	C
AMBIENTE MARINHO	
Anexo 1 Ecotoxicologia– Índice de bioacumulação	
Altos níveis de Fe no zooplâncton em relação aos dados pretéritos à chegada dos rejeitos na foz do Rio Doce (nov/2015). Além do Fe, outros elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn e Pb ainda são encontrados em níveis bastantes elevados no zooplâncton.	A, B, D
Maiores valores de IBR bioacumulação nos diferentes organismos coletados nos setores APA, Foz e Norte em todas as campanhas realizadas.	C, D
Acumulação dos elementos característicos do rejeito nos tecidos de camarões associada principalmente nos setores APA, Foz e Norte em todas as campanhas de coleta.	C, D
Altos níveis de Cd, Cr, Cu e Mn no músculo de camarões em relação aos dados pretéritos à chegada dos rejeitos na foz do Rio Doce (nov/2015).	A, B, D
Aumento no teor de alguns elementos analisados em camarões em comparação aos camarões coletados em diversos pontos da região marinha adjacente à foz do Rio Doce entre dez/2015 e fev/2016.	A, B, D
Concentrações superiores de metais, principalmente Cd, Cr, Cu, Fe e Mn, no músculo de peixes em comparação àquelas encontradas nestes mesmos organismos entre novembro de 2015 e início de 2016 , em diversos pontos da região marinha capixaba.	A, B, D
Anexo 1 Ecotoxicologia - Índice de resposta biológica (IBR biomarcador)	
Ao longo de todo o monitoramento, os maiores valores do Índice de resposta biológica (IBR biomarcador) no plâncton foram observados nos organismos coletados nos setores Foz e Norte.	C, D
Tendência de aumento dos efeitos biológicos para a comunidade planctônica no sentido Sul → Norte, corroborando os resultados do IBR bioacumulação.	C, D
Para a comunidade de peixes, o Índice de resposta biológica (IBR biomarcador)	C, D

IMPACTO	REFERÊNCIA
também apresentou um padrão de aumento no sentido Sul → Norte, na maioria das campanhas.	
Para corais, os maiores valores de IBR biomarcador foram encontrados nas campanhas 2 (jan/fev 2019) e 3 (set/out 2019).	C, D
Maiores valores de Índice de resposta biológica (IBR biomarcador) para organismos (plâncton, camarões e peixes) coletados nos setores APA, Foz e Norte na maioria das campanhas realizadas.	C, D
Anexo 1 Ecotoxicologia – Índice de Toxicidade	
Aumento da toxicidade da água nos pontos da foz do Rio Doce (FRD1 e FRD6) e Revis Santa Cruz (CA1 e CA2) no Período de Transição em relação ao Ano 1.	C, D, F
Independente do período de amostragem e do ponto de coleta, a toxicidade ficou sempre mais associada ao sedimento do que à água.	C, D, F
Maior impacto do ponto de vista ecotoxicológico no setor norte da foz do Rio Doce, uma vez que, de maneira geral, o ponto FRD6 foi considerado mais tóxico e o ponto DEG1 ficou associado à variável “toxicidade” na maior parte das análises estatísticas.	C, D, F
Anexo 1 Ecotoxicologia - Indicadores microbianos	
Aumento na abundância do gênero bacteriano <i>Acinetobacter</i> na água do mar durante a campanha 4 (jan/fev 2020), inclusive na APA Costa das Algas e no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, em decorrência do drástico aumento na abundância deste táxon nas águas do Rio Doce, que pode estar relacionado ao aumento na concentração de metais no ambiente dulcícola durante o mesmo período.	B, C, D, E
Grande abundância de táxons sugeridos como potenciais bioindicadores da presença do rejeito da barragem, principalmente na foz do Rio Doce e suas proximidades durante todas as campanhas, com destaque para o bioindicador <i>Anaerolineaceae</i>	B, C, D, E
Aumento na concentração das bactérias mais abundantes no Rio Doce, hgcI clade, <i>Anaerolineaceae</i> , <i>Pirellulaceae</i> , <i>Exiguobacterium</i> e <i>Acinetobacter</i> nos corais de Abrolhos na campanha 4 (jan/fev 2020).	B, C, D, E
Anexo 3 Marinho - Modelagem	
Aumentos de turbidez no fundo durante a entrada de ondulações remotas	E
Aumento de clorofila-a e turbidez em eventos de ressuspensão e aumento do aporte fluvial	E
Deposição primária de sedimentos em regiões adjacentes à foz	C
Anexo 3 Marinho – Sedimentologia e Mapeamento de Habitats	
Presença e acúmulo de rejeito no depósito sedimentar	A e B
Aumento da mobilidade do sedimento de fundo	A e B
Aumento da Concentração de Material Particulado em Suspensão	A e B
Anexo 3 Marinho – Hidrogeoquímica Marinha	
Contaminação por metais do depósito sedimentar nos setores Abrolhos, Norte,	A, B e F

IMPACTO	REFERÊNCIA
Foz e APA/REVIS	
Contaminação por metais na água nos setores Abrolhos, Norte, Foz e APA/REVIS	A, B e F
Hidrocarbonetos e HPA em sedimentos do setor Foz	E e B
Contaminação por compostos nitrogenados, Hidrocarbonetos e HPA em água nos setores APA/REVIS, Foz Norte e Abrolhos	E
Aumento das concentrações de nutrientes no setor Foz	A e B
Anexo 3 Marinho Fitoplâncton	
Aumento na abundância de organismos e mudança na composição qualitativa da comunidade fitoplanctônica marinha e estuarina.	A e B
Alterações na saúde fisiológica da comunidade.	A e B
Anexo 3 Marinho - Zooplâncton	
Redução dos valores de Diversidade, Riqueza e Equitabilidade	A, B, C, E
Abundância relativa das espécies indicadoras	C, E
Relação juvenis/adultos de Paracalanídeos	C, E
Anexo 3 Marinho - Ictioplâncton	
Alteração no recrutamento de larvas de peixes	D e E
Larvas de peixe com o trato digestivo destruído	A, B, D e E
Diminuição da diversidade e riqueza das larvas de peixes	B, C e D
Diminuição no número de táxons	B e E
Anexo 3 Marinho - Bentos fundos inconsolidados	
Aumento da mortalidade (vestígios) de organismos	A, B, C, D e E
Aumento na captura de poliquetas	A, B, C, D e E
Aumento na captura de crustáceos amphipodas	A, B, C, D e E
Anexo 3 Marinho - Fundos Recifais, Rodolitos e Macroalgas	
Possíveis efeitos do rompimento da barragem podem ter implicado em degradação da integridade celular de macroalgas. No entanto, não é possível rejeitar a hipótese de que o rompimento tenha interagido com outros estressores, naturais e antropogênicos, resultando nos efeitos (alterações) constatados.	B, C, D, E
Possíveis efeitos do rompimento da barragem podem ter implicado em alterações espaço-temporais na estrutura de comunidades bênticas recifais. No entanto, não é possível rejeitar a hipótese de que o rompimento tenha interagido com outros estressores, naturais e antropogênicos, resultando nos efeitos (alterações) constatados.	A, B, C, E
Possíveis efeitos do rompimento da barragem podem ter implicado em alterações em processos ecológicos característicos dos recifes e bancos de rodolitos, especificamente a mineralização de CaCO_3 e recrutamento de corais. No entanto, não é possível rejeitar a hipótese de que o rompimento tenha interagido com outros estressores, naturais e antropogênicos, resultando nos efeitos (alterações) constatados	A, B, C, E

IMPACTO	REFERÊNCIA
Possíveis efeitos do rompimento da barragem podem ter implicado em alterações na natureza sedimentar do fundo recifal (e.g. mineralogia). No entanto, não é possível rejeitar a hipótese de que o rompimento tenha interagido com outros estressores, naturais e antropogênicos, resultando nos efeitos (alterações) constatados	B, C, D, E
Efeitos inequívocos do rompimento da barragem em nível de organismos e comunidades, incluindo presença de contaminantes, inclusive metais e/ou partículas metálicas oriundos do rompimento, em macroalgas, corais e algas coralináceas formadoras de rodólitos, confirmando que os efeitos do evento são de maior magnitude nas áreas recifais mais próximas da foz do rio Doce, mas se estendem até a região adjacente ao Parque Nacional Marinho de Abrolhos.	A, B, C, D, E
Efeitos inequívocos do rompimento da barragem em nível de organismos e comunidades, incluindo alterações na estrutura de comunidades de macroalgas na área da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, com aumento na abundância de algas mais tolerantes a rejeitos de mineração após o rompimento.	A, B, C, E
Anexo 6 Megafauna - Cetáceos	
Encalhes - As taxas de encalhes anuais sugerem influência do impacto sobre as populações de boto-cinza e toninha, com aumento de encalhes para o boto mais acentuado na fase aguda do rompimento da barragem e para toninha na fase crônica (Pós).	A, B
A predominância de encalhes de animais imaturos (boto-cinza e toninha) na fase considerada aguda do desastre.	A, B, C
Distribuição sazonal das toninhas na fase aguda imediatamente após o rompimento da barragem, com predominância de encalhes no inverno e com grandeza na ordem de 3,5 vezes maior que a fase Pretérita.	A, B, C
A taxa de distribuição espacial de encalhes para a toninha na fase pretérita era mais próxima da foz do Rio Doce ao longo do litoral de Linhares, já, após o desastre, os encalhes desta espécie predominaram mais afastada da foz no município de São Mateus. Para os botos-cinza no Período de Transição do PMBA e na fase aguda do rompimento da barragem em relação à Pretérita, apresentaram na região sul do ES aumentos expressivos nos índices de encalhes em nove municípios.	A, B
Taxa de óbitos de botos-cinza por ocorrência de doenças infecciosas na análise pretérita com a fase aguda e crônica do rompimento da barragem houve um aumento de 14,8 vezes maior na fase aguda e outro aumento expressivo na fase crônica, de 20,7 vezes. Na avaliação da taxa de óbito das toninhas em relação à análise comparativa pretérita houve predominância de ocorrência das doenças infecciosas na fase crônica do rompimento da barragem.	A,B
<i>Genética</i> - Diminuição da diversidade genética mitocondrial de <i>Sotalia guianensis</i> no período pós-rompimento quando comparado ao pré-rompimento.	A, B, C, E

IMPACTO	REFERÊNCIA
Contaminantes - Concentração de ferro nos tecidos de cetáceos.	D, E
Concentração de manganês nos tecidos de cetáceos.	D, E
Concentração de cádmio nos tecidos de cetáceos.	E
Concentração de mercúrio nos tecidos de cetáceos.	E, G
Histopatologia - Achados histopatológicos	A, E, G
Alterações ósseas	E
Microbiologia - Patógenos que acometeram os cetáceos	E, G
Anexo 6 Megafauna - Aves	
Contaminação das aves marinhas que se alimentam na foz do Rio Doce e adjacências.	A, B, D
Anexo 6 Megafauna - Tartarugas	
<i>Chelonia mydas</i> amostradas na APA Costa das Algas, entre novembro de 2018 e fevereiro de 2020 apresentaram menor diversidade haplotípica ($N=76$, $h=0.496\pm0.050$) que amostras analisadas antes do rompimento da barragem (entre 2000 e 2006) na Serra - ES ($N=157$, $h=0.595\pm0.0300$ – NARO-MACIEL et al., 2012).	A, D, E
<i>Chelonia mydas</i> amostradas na APA Costa das Algas, entre novembro de 2018 e fevereiro de 2020 apresentaram menor diversidade haplotípica ($N=76$, $h=0.496\pm0.050$) e menor heterozigosidade observada ($H_o=0.666$) que amostras analisadas da população na área controle ($N=25$, $h=0.627\pm0.058$ e $H_o=0.734$ – Coroa Vermelha, BA).	C, D
<i>Caretta caretta</i> amostradas em Povoação, entre outubro de 2018 e janeiro de 2020 apresentaram menor diversidade haplotípica ($N=115$, $h=0.469\pm0.034$) que amostras analisadas da população na área controle ($N=19$, $h=0.591\pm0.088$ – Arembepe, BA).	C, D
<i>Chelonia mydas</i> amostradas na APA Costa das Algas, entre novembro de 2018 e fevereiro de 2020 apresentaram coeficiente de endogamia mais alto ($FIS = 0.135$) que a população na área controle ($FIS = 0.046$ – Coroa Vermelha, BA).	C, D
<i>Dermochelys coriacea</i> amostradas na Foz do Rio Doce (criticamente ameaçada e única população de desova regular da espécie no Brasil) entre 2018/2019 e 2019/2020 permanecem extremamente ameaçadas. Ela apresentou índices de diversidade muito mais baixos ($h=0.385$; $H_o=0.505$ e $H_e=0.517$) quando comparados aos de outras populações do mundo (Ilha de Santa Cruz: $H_o=0.69$ e $H_e=0.70$ – STEAWART & DUTTON, 2011 e Guiana Francesa: $h=0,706$; $H_o=0,633$ e $H_e=0,683$ - MOLFETTI et al., 2013), e aos da população de <i>C. caretta</i> da mesma localidade afetada ($h=0,469$; $H_o=0.836$ e $H_e=0.824$).	D, E
<i>Dermochelys coriacea</i> amostradas Foz do Rio Doce nas temporadas 2018/2019 e 2019/2020 apresentaram diversidade haplotípica ligeiramente menor ($N=14$, $h=0.385\pm0.149$) para o DNAm quando comparadas com amostras pré-rompimento da barragem da mesma região ($N=9$, $h=0.389\pm0.164$).	A, D,E
Perda de haplótipos de linhagens mitocondriais para <i>Caretta caretta</i> e <i>Chelonia</i>	A, D, E

IMPACTO	REFERÊNCIA
<i>mydas</i> nas áreas impactadas, quando comparadas ao período pré-rompimento.	
<i>Chelonia mydas</i> amostradas na APA Costa das Algas, entre novembro de 2018 e fevereiro de 2020 apresentaram menor diversidade haplotípica ($N=76$, $h=0.496\pm0.050$) que amostras analisadas antes do rompimento da barragem (entre 2000 e 2006) na Serra - ES ($N=157$, $h=0.595\pm0.0300$ – NARO-MACIEL et al., 2012).	A, D, E
Lesões oftalmológicas em <i>Caretta caretta</i> inéditas.	A, C
Influência negativa dos contaminantes na saúde de <i>Caretta caretta</i> em área de desova.	C, D
Transferência de contaminante do sedimento para os ovos de tartarugas <i>Caretta caretta</i> , durante o período de incubação.	C, D
Influência negativa dos metais pesados em parâmetros reprodutivos de <i>Caretta caretta</i> .	C, D
Alta concentração de metais no sangue de <i>Chelonia mydas</i> .	C, D
Maior prevalência de fibropapilomatose para <i>Chelonia mydas</i> na área impactada.	A, C
<i>Chelonia mydas</i> com parâmetros de saúde piores na área impactada.	C, D
Níveis elevados de contaminantes orgânicos causadores de lesões hepáticas em <i>Chelonia mydas</i> na área afetada.	C
Alta concentração de contaminantes orgânicos no sangue de <i>Chelonia mydas</i> .	C
Anexo 6 Megafauna - Sobrevoos	
SOBREVOOS - BIOACÚSTICA - Dronemonitoramento e ROV Aumento da vulnerabilidade (sensibilidade e suscetibilidade) da população da toninha (<i>Pontoporia blainvillei</i>) ao longo do todo o período de monitoramento devido a maior agregação e uso intensivo como área de alimentação da região próximo á foz do Rio Doce, que foi a mais impactada pela lama rejeito	B, C, E
Habitats de maior abundância e uso para a megafauna (foz do Rio Doce e 30km ao sul, recifes costeiros e bancos de rodolito da APA Costa das Algas e Recifes Esquecidos) são áreas potencialmente impactadas pela lama de rejeito.	B, C, E
SOBREVOOS - BIOACÚSTICA - Sobrevoos tripulados Sobreposição de mais de 50% da população da toninha (<i>Pontoporia blainvillei</i>) com a região de maior aporte de rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Fundão.	B, C, E
Alta sobreposição de Odontocetos com a região de maior aporte de rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Fundão.	B, C, E
Alta sobreposição de tartarugas marinhas (família Cheloniidae) com a região de maior aporte de rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Fundão.	B, C, E
Alta sobreposição de aves marinhas (família Sternidae) com a região de maior aporte de rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Fundão.	B, C, E
SOBREVOOS - BIOACÚSTICA - Bioacústica de cetáceos Diminuição da área acústica ativa dos cliques por atenuação.	B, C, E

IMPACTO	REFERÊNCIA
Alterações espectrais e temporais das vocalizações utilizadas em contexto social e comunicação.	B, C, E
Anexo 7 Ictiofauna Marinha	
Alteração nos indicadores ecológicos (biomassa, riqueza, diversidade e equitatividade) de peixes estuarinos/marinhos	C
Alteração na estrutura da comunidade de peixes estuarinos/marinhos	C
Alteração nos índices ecológicos (abundância, biomassa e riqueza) de espécies de pós-larvas de peixes estuarinos/marinhos	C
Alteração nos índices de diversidade de pós-larvas de peixes estuarinos/marinhos	C
Alteração na composição da assembleia de pós-larvas de peixes estuarinos/marinhos	C
Alteração na densidade do camarão sete-barbas (<i>Xiphopenaeus kroyeri</i>)	C
Alteração na estrutura da comunidade de crustáceos estuarinos/marinhos	C
Alteração na genética de populações (diversidade genética) de peixes marinhos/recifais	C, E
Alteração nos índices ecológicos (abundância, biomassa e riqueza) de espécies de peixes recifais	C
Alteração nos índices de diversidade de peixes recifais	C
Alteração na composição da assembleia de peixes recifais	C
Alteração na diversidade trófica da comunidade aquática estuarina do Rio Doce	C
Anexo 8 Sedimentação em Abrolhos	
Traços da mistura sedimentar dos rejeitos da barragem de Fundão e os sedimentos presentes na calha do Rio Doce foram detectados na região de Abrolhos, a partir de análises isotópicas de Sr e Nd em sedimentos superficiais	A, B, C, D
Os sedimentos coletados na região de Santarém e Gualaxo do Norte, representantes diretos dos rejeitos da barragem, isoladamente não demonstraram ser fontes de sedimentos exógenas em Abrolhos.	A, B, C, E, D
Traços da mistura sedimentar dos rejeitos da barragem de Fundão e os sedimentos presentes na calha do Rio Doce não foram detectados ao Norte da região de Abrolhos (no ponto controle localizado em Recifes de Fora em Porto Seguro)	B, C
Os arcos interno e externo da zona recifal de Abrolhos apresentam diferentes níveis de impacto decorrente dos aportes das misturas sedimentares dos rejeitos da barragem de Fundão e dos sedimentos presentes na calha do Rio Doce, a partir de análises isotópicas de Sr e Nd. As amostras do arco interno (próximas a linha de costa) apresentaram sinais isotópicos persistentes durante todo o período de monitoramento. Esses resultados corroboram modelos de dispersão de plumas sedimentares para a região.	C, D
O aporte de traços da mistura sedimentar dos rejeitos da barragem de Fundão e os sedimentos presentes na calha do Rio Doce sobre o arco externo da zonal	C, D

IMPACTO	REFERÊNCIA
recifal de Abrolhos dependeu fortemente das condições de ventos de superfície na região entre Abrolhos e a Foz do Rio Doce.	
Através do estabelecimento de um modelo de mistura isotópica aplica aos sedimentos coletados em Abrolhos observamos que as assinaturas isotópicas dos sedimentos coletados em Abrolhos apresentaram sinal da foz do rio Doce (pós rompimento da barragem de Fundão) de forma mais marcante entre os meses de março e julho.	C, D
Para os meses de outubro a janeiro, a presença de illita e muscovita nos sedimentos de Abrolhos, indicaram aumento da proporção de minerais terrígenos indicando mudanças das áreas fonte de sedimentos presentes em Abrolhos.	C, D