

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

**Relatório Anual PMBA/Fest**

**RT- 43/ JUN 23**

**RA2022 PMBA/Fest**

Vitória

Junho de 2023

## COORDENAÇÕES

### **Coordenação Geral**

Daniel Rigo (UFES)  
Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro (UFES)  
Fabian Sá (UFES)

### **Conselho Técnico**

Alex Cardoso Bastos (UFES)  
Daniel Rigo (UFES)  
Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)  
Fabian Sá (UFES)  
Jacqueline Albino (UFES)  
Stefano Zorzal de Almeida (UFES)

### **Ambiente Dulcícola**

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

#### **Temas**

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)  
Antônio Sérgio Ferreira Mendonça (UFES)  
Daniel Rigo (UFES)  
Danilo Camêllo (UFES)  
Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)  
Gilberto Fonseca Barroso (UFES)  
Jorge Abdala Dergam dos Santos (UFV)  
Marco Aurélio Caiado (UFES)  
Tomas Hrbek (UFAM)  
Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)  
Valquíria Ferreira Dutra (UFES)  
Vânia Marcia Duarte Pasa (UFMG)

### **Ambiente Marinho**

Stefano Zorzal de Almeida (UFES)

#### **Temas**

Agnaldo Silva Martins (UFES)  
Alex Cardoso Bastos (UFES)  
Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)  
Ana Paula Cazerta Farro (UFES)  
Heitor Evangelista (UERJ)  
Leandro Bugoni (FURG)  
Leila Lourdes Longo (UFRB)  
Luiz Fernando Loureiro Fernandes (UFES)

Maurício Hostim Silva (UFES)  
Renato David Ghisolfi (UFES)  
Renato Rodrigues Neto (UFES)  
Rodrigo Leão de Moura (URFJ)  
Paulo Sergio Salomon (UFRJ)  
Sarah Vargas (UFES)  
Stefano Zorzal de Almeida (UFES)

### **Ambientes Costeiro**

Jacqueline Albino (UFES)

#### **Temas**

Diolina Moura Silva (UFES)  
Jacqueline Albino (UFES)  
Karla Costa (UFES)  
Maria Tereza Carneiro (UFES)  
Mônica Tognella (UFES)

### **Ecotoxicologia**

Adalto Bianchini (FURG)  
Camila de Martinez Gaspar Martins (FURG)  
Yuri Dornelles Zebral (FURG)

### **Escritório de Projetos (EscPro)**

Anna Paula Lage Ribeiro  
Carolina de Andrade Mello  
Caroline De Marchi Pignaton  
Dandara Silva Cabral  
Fernanda Jurka Alves  
Kennedy Gera Nishio  
Lara Gabriela Magioni Santos  
Laura Silveira Vieira Salles  
Luiz Otavio da Cruz de Oliveira Castro  
Monique Franzen Maia  
Patrícia Bourguignon Soares  
Patrícia Oliveira Lacerda  
Petrusca Mello Costa Filha  
Sidnei Vieira  
Tarcila Franco Menandro  
Wanessa da Costa Cruz

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>SÚMÁRIO EXECUTIVO .....</b>	<b>6</b>
1.1	GLOSSÁRIO DO PMBA/FEST.....	20
1.2	LISTA DO MATERIAL SUPLEMENTAR .....	21
<b>2</b>	<b>SÍNTESE DOS AMBIENTES.....</b>	<b>24</b>
2.1	AMBIENTE DULCÍCOLA.....	24
2.1.1	Indicadores .....	24
2.1.2	Destaques .....	26
2.1.3	Contextualização do ambiente .....	27
2.1.4	Distribuição espacial e temporal dos indicadores de impactos .....	30
2.1.5	Síntese gráfica .....	41
2.1.6	Perspectivas e considerações .....	42
2.2	AMBIENTE MARINHO .....	44
2.2.1	Indicadores .....	44
2.2.2	Destaques .....	46
2.2.3	Contextualização do ambiente .....	46
2.2.4	Distribuição espacial e temporal dos indicadores de impactos .....	49
2.2.5	Síntese gráfica .....	63
2.2.6	Perspectivas e considerações .....	64
2.3	AMBIENTE COSTEIRO .....	65
2.3.1	Indicadores .....	65
2.3.2	Destaques .....	66
2.3.3	Contextualização do ambiente .....	67
2.3.4	Distribuição espacial e temporal dos indicadores de impactos .....	71
2.3.5	Síntese gráfica .....	84
2.3.6	Perspectivas e considerações .....	85
<b>3</b>	<b>MATRIZ DE RESULTADOS.....</b>	<b>88</b>

3.1	INTRODUÇÃO .....	88
3.2	METODOLOGIA .....	89
3.2.1	Lista de impactos.....	91
3.2.2	Quantificação da matriz de resultados .....	92
3.2.3	Espacialização dos resultados e definição das áreas impactadas .....	95
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	97
3.3.1	Impactos e suas características.....	97
3.3.2	Espacialização dos impactos .....	112
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	119
4	SÍNTESE INTEGRATIVA .....	121
4.1	INTRODUÇÃO .....	121
4.2	CIENCIOMETRIA (MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA) .....	122
4.2.1	Análise Estatística de Publicações.....	123
4.3	MODELOS CONCEITUAIS .....	129
4.3.1	Modelo conceitual espaço-temporal de dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão 133	
4.4	ANÁLISE DA PAISAGEM E DADOS PRETÉRITOS .....	138
4.4.1	Mudanças na Paisagem .....	139
4.4.2	Sistema Costeiro-Marinho .....	141
4.4.3	Caminhos para a restauração: uma visão de paisagem.....	142
4.5	PROCESSOS E INDICADORES DA QUALIDADE AMBIENTAL .....	143
4.6	VIAS DE DESFECHOS ADVERSOS (VDAS).....	150
4.6.1	Descrição dos modelos conceituais de VDAs.....	150
4.6.2	Quantificação das relações: aplicação de modelos de equações estruturais às VDAs planctônica.....	156
4.7	RELAÇÕES AMBIENTAIS NO NÍVEL DA COMUNIDADE E ECOSSISTEMA .....	162
4.7.1	Threshold Taxa Indicator Analysis - TITAN .....	162



<b>4.7.2</b>	<b>Resposta da biodiversidade às variações físicas, químicas e biológicas nos ambientes.</b>	<b>171</b>
<b>4.8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS .....</b>	<b>179</b>
<b>4.8.1</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>179</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Perspectivas futuras.....</b>	<b>181</b>
<b>5</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>182</b>

## 1 SÚMÁRIO EXECUTIVO

O presente documento apresenta o conteúdo do quarto Relatório Anual (RA2022) do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente (PMBA/Fest), objetivando o acompanhamento da sua sequência estrutural por parte da CTBio. Para fins administrativos, ele é denominado RT-43. O período de amostragem e análise do RA2022 foi definido como sendo entre setembro de 2018 e agosto/setembro de 2022 (amostragens referentes ao período seco de 2022). Porém, é importante ressaltar que as atividades de campo ficaram suspensas (1) entre março e dezembro de 2020, conforme solicitado pela Fundação Renova, tendo em vista a pandemia da COVID-19 no território brasileiro, (2) nos meses de outubro de 2021 e julho de 2022, conforme determinação da Fundação Renova, decorrente da finalização de aditivos ao acordo de cooperação e não renovação dos mesmos a tempo de efetuar tais campanhas. A lacuna de dados de campo existente entre os meses citados, apesar de irreparável, foi acordada e é de conhecimento de todos os envolvidos.

Anteriormente à exposição da estrutura do relatório e como ele foi desenvolvido, apresentaremos, de forma simplificada, a nova Estrutura Analítica de Projeto implantada a partir de agosto de 2022, momento em que foi assinado o 6º aditivo de escopo e prazo do PMBA/Fest com a Fundação Renova, período nomeado, doravante, como Novo Ciclo do PMBA/Fest, com período de monitoramento entre agosto de 2022 e janeiro de 2024. A nova estrutura difere, em parte, da estrutura implementada para o Ano 1 (setembro de 2018 a setembro de 2019) e Período de Transição (outubro de 2019 a julho de 2022).

O 6º aditivo mencionado englobou todo o escopo do PMBA/Fest, exceto Ecotoxicologia. Este, por sua vez, foi englobado no 7º aditivo de escopo e prazo, assinado entre Fest/UFES e Fundação Renova em dezembro de 2022, tendo início de sua vigência em janeiro de 2023.

O Termo de Referência 4 (TR4) foi construído em 2016 distribuindo as frentes de pesquisa em chamados Anexos, porém, ao longo do monitoramento, e visando a integração dos resultados, estes Anexos foram sendo apresentados em conjunto no contexto do ambiente em que se desenvolvia, sendo os Ambientes em questão: dulcícola, marinho e costeiro. Desta forma, para o Novo Ciclo do PMBA/Fest, a organização dos resultados e discussões já se desenvolvem neste formato e cada um dos Anexos e Subprojetos anteriormente citados, agora são chamados de Temas (Projetos Temáticos) em cada um dos ambientes. O quadro abaixo apresenta o arranjo desta evolução, onde as duas primeiras colunas apresentam a organização em Anexos e Subprojetos; já a terceira e quarta evidenciam a nova estrutura implantada para o Novo Ciclo do PMBA/Fest.

Quadro 1: Estrutura Analítica de Projeto do PMBA/Fest para o Ano 1 e Período de Transição, e Novo Ciclo do PMBA/Fest

Estrutura Analítica do PMBA/Fest					
Ano 1 e Período de Transição		Novo Ciclo			
Anexo	Subprojeto	Ambiente	Projetos temáticos (Temas)		
Anexo 1 Ecotoxicologia		Dulcícola	Ecotoxicologia		
Anexo 3 Dulcícola	Modelagem		Bacia Integração		
	Ações na Bacia				
	Monitoramento de fluxos e sedimentos				
	Limnologia		Limnologia		
	Análises Químicas		Minerologia		
	Fitoplâncton		Qualidade de água e sedimentos		
	Zooplâncton		Fitoplâncton		
	Perífiton		Zooplâncton		
	Macrófitas		Perífiton		
Anexo 7 Ictiofauna Dulcícola	Macroinvertebrados		Ictiofauna Dulcícola	Macroinvertebrados	
	Ictioplâncton			Ictioplâncton	
	Ecologia			Ictiofauna Ecologia	
	Genética			Ictiofauna Genética	
Anexo 1 Ecotoxicologia		Costeiro	Ecotoxicologia		
Anexo 4 Praias	Morfodinâmica		Praias	Morfodinâmica	
	Geoquímica			Geoquímica	
	Bentos			Bentos	
Anexo 5 Restinga			Restinga		
Anexo 5 Manguezal			Manguezal		
Anexo 1 Ecotoxicologia		Marinho	Ecotoxicologia		
Anexo 3 Marinho	Modelagem		Modelagem numérica		
	Hidroggeoquímica		Hidroggeoquímica		
	Sedimentologia		Sedimentação Marinha		
	Mapeamento de Habitats				
	Fitoplâncton				
	Zooplâncton		Fitoplâncton		
	Ictioplâncton		Zooplâncton		
	Bentos de fundo inconsolidado		Ictioplâncton		
	Fundos Recifais		Bentos de fundo inconsolidado		
Anexo 7 Ictiofauna Marinha	Ictiofauna estuarina Norte		Ictiofauna Marinha		
	Ictiofauna estuarina Sul				
	Peixes Recifais				
Anexo 6 Megafauna	Tartarugas Marinhas		Tartarugas Marinhas		
	Cetáceos		Cetáceos		
	Aves marinhas		Aves Marinhas		
	Dronemonitoramento e bioacústica		Monitoramento Remoto da Megafauna		
Anexo 8 Sedimentação em Abrolhos			Sedimentação Costeira		

Em termos técnico-científicos, atendendo ao ofício SEI nº 85/2022-CTBio/DIBIO/ICMBio, proposto via ofício FR.2023.0214 (SEI13515133), e aprovado via ofício SEI nº4/2023-CTBio/DIBIO/ICMBio, o novo modelo de relatório estabeleceu uma abordagem ainda mais integrada e focada nos indicadores ambientais resultantes do PMBA/Fest. Desta forma, visando atender à necessidade e relevância da conectividade e interrelações ecológicas entre água, sedimento e biota avaliados pelo monitoramento, e ainda destacar os resultados e informações importantes para responder aos objetivos do monitoramento com redução do volume do relatório, o corpo principal do mesmo se desenvolve a partir (1) da **Síntese do Ambientes**, contemplando a variação espaço-temporal na qualidade ambiental e na biodiversidade e suas tendências nos Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro; (2) **Matriz de Resultados**, representando uma visualização dos resultados identificados por cada um dos ambientes de forma quantitativa, gráfica e visual; e (3) **Síntese Integrativa**, uma nova abordagem desenvolvida e adotada pelo PMBA/Fest a fim de alcançar de forma mais efetiva a integração dos seus resultados, seguindo uma abordagem essencialmente ecossistêmica. Já os **Materiais Suplementares** ao relatório contemplam a apresentação da metodologia e indicadores de cada Tema, histórico de malha e frequência amostrais do PMBA/Fest (estações amostrais e mapas em alta resolução), arquivos de suporte ao entendimento da matriz de resultados (lista de impactos e cálculo de cada Ambiente) e arquivos “*shapefiles*” utilizados na construção do relatório.

A **Síntese dos Ambientes** foi construída visando apresentar a evolução temporal e espacial da qualidade ambiental e da biodiversidade nos Ambientes Dulcícola, Costeiro e Marinho monitorados no âmbito do PMBA/Fest. Cada Ambiente tem seus resultados, principais pontos de atenção e análises apresentados a partir dos estudos desenvolvidos pelos Temas associados, possibilitando assim a uma abordagem detalhada da evolução dos indicadores. A integração entre níveis tróficos e níveis ecológicos, além da integração dentro das matrizes ambientais, é apresentada sempre buscando fazer associações com referência aos critérios de avaliação e, quando possível, reportando ao máximo o histórico temporal de evolução dos indicadores.

Autoria:

**Ambiente Dulcícola**

Dr<sup>a</sup>. Bianca Ramos de Meira

Me. Dannel Brandão Mendes

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (coordenação)

Prof. Dr. Gilberto Fonseca Barroso

Prof. Dr. Jorge Abdala Dergam dos Santos

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Valquiria Ferreira Dutra

### **Ambiente Marinho**

Dr<sup>a</sup>. Marden Seabra Linares

Dr<sup>a</sup>. Renata Caiado Cagnin

Dr. Ronaldo Ruy de Oliveira Filho

Prof. Dr. Stéfano Zorzal de Almeida (coordenação)

Ma. Tayná Rosa Martins Paiva

### **Ambiente Costeiro**

Me. Gean Zanetti

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jacqueline Albino (coordenação)

Dr. Luiz Henrique Sielski Oliveira

Dr<sup>a</sup>. Mariela Mattos da Silva

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Monica Tognella

Prof. Dr. Yuri Dornelles Zebal

Já a **Matriz de Resultados** do RA2022 apresenta sua versão revisada e atualizada, que visa apresentar quali-quantitativamente os principais resultados identificados pelas equipes de pesquisa que executam o PMBA/Fest, como forma complementar, visual e integrativa da avaliação espacial e temporal dos impactos diretos ou indiretos causados pelo rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG). A Matriz de Resultados é uma metodologia totalmente desenvolvida pela equipe do PMBA/Fest a partir da adaptação de uma Matriz de Interação (tipo de matriz muito utilizada em Estudos Preditivos de Impacto Ambiental e Relatórios de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) no Brasil).

Autoria:

Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos

Dr<sup>a</sup>. Anna Paula Lage Ribeiro

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna

Prof. Dr. Fabian Sá

Ma. Fernanda Jurka Alves

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jacqueline Albino

Oceanógrafa Lara Gabriela Magioni Santos

Dr<sup>a</sup>. Laura Silveira Vieira Salles

Prof. Dr. Stéfano Zorzal de Almeida

Dr<sup>a</sup>. Tarcila Franco Menandro

Por fim, a **Síntese Integrativa** é uma abordagem totalmente nova para o PMBA/Fest, apresentada pela primeira vez no RA2022. Foram avaliadas as interações existentes entre os diversos componentes da biodiversidade e os ambientes, bem como seu significado causa-consequência para uma melhor compreensão por parte de gestores e tomadores de decisão. Nessa abordagem, partiu-se das contribuições existentes, a partir da análise de relatórios, bancos de dados e de uma abordagem cienciométrica, para construção de modelos conceituais teóricos e numéricos que incorporam diferentes escalas de processos ecológicos, tendo em vista a conectividade das inter-relações ecológicas entre água, sedimento e a biota. Para o RA2022 foram considerados nas análises integrativas os Ambientes Dulcícola e Marinho. O Ambiente Costeiro, por sua vez, será incorporado na integração para o RA2023.

Autoria:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Beatrice Padovani Ferreira

Dr. Fabio Cavalca Bom

Dr<sup>a</sup>. Gisele Daiane Pinha

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kyssyanne Samihra Santos Oliveira

Prof. Dr. Maikon Di Domenico

Dr<sup>a</sup>. Manuela Santos Santana

Prof. Dr. Nadson Ressayè Simões

Dr. Nelson de Almeida Gouveia

Vale salientar que tanto na Síntese dos Ambientes, quanto na Síntese Integrativa são abordadas, também, perspectivas futuras para o monitoramento, visando subsidiar direta e/ou indiretamente os tomadores de decisão.

Os **Materiais Suplementares**, por sua vez, foram construídos para dar subsídio ao relatório, bem como apresentar de forma mais detalhada a variação espaço-temporal dos indicadores ambientais do PMBA/Fest. Dentre eles são apresentados:

1. Histórico de malha e frequência amostrais implementadas desde setembro de 2018 até setembro de 2022: Evidencia-se, a partir da malha e frequência amostrais estabelecidas no TR4, as alterações aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio do ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, em outubro de 2019 (para o período de transição) e pelas Propostas Técnicas de continuidade do monitoramento, apresentadas a partir do primeiro semestre de 2022 visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

2. Variação espaço-temporal dos indicadores de cada Tema: Estes documentos foram construídos com o objetivo de apresentar a metodologia implementada para o Novo Ciclo do PMBA/Fest e os resultados de cada um dos Temas, pela apresentação exclusiva dos indicadores, atendendo à solicitação ao ofício SEI nº 85/2022-CTBio/DIBIO/ICMBio de representar de forma objetiva e clara os resultados com interpretação e conclusões com análise crítica. Assim, a **metodologia** apresentada contempla o escopo em vigência no momento da entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em 31 de agosto de 2022. Após a descrição da metodologia é apresentada síntese sobre as modificações metodológicas que ocorreram ao longo da evolução do monitoramento a fim de determinar os indicadores. Os **resultados**, por sua vez, são apresentados exclusivamente na forma de indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática de cada um dos Temas, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo de todo o monitoramento. Esta apresentação se dá como apresentação do gráfico/figura/tabela do indicador, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais.
3. Material Suporte para a Síntese Integrativa: São apresentados os arquivos utilizados como embasamento para os modelos de equações estruturais particionados (pSEM) construídos para avaliar as relações entre os meios abióticos e bióticos; além da íntegra dos gráficos construídos a partir da análise de TITAN (Threshold Indicator Taxa Analysis), incluindo todos os resultados, significativos ou não, para as comunidades bióticas e variáveis preditoras em relação a todos os ambientes e setores analisados no RA2022.
4. Planilhas de suporte à Matriz de Resultados: São apresentadas as planilhas de suporte à construção da Matriz de Resultados, contendo a lista de impactos identificados pelos Temas componentes de cada Ambiente; a matriz de cálculo, com a valoração dada aos critérios avaliados nos impactos em cada compartimento; e a matriz de resultados, que é a síntese da avaliação realizada.
5. Shapefiles: Pasta de arquivos “*Shapefiles*” utilizados na representação da malha amostral do PMBA/Fest, além daqueles utilizados nos demais mapas apresentados no RA2022.



A análise técnico-científica do RA2022 foi elaborada com base nos principais indicadores abióticos e bióticos já apresentados nos relatórios anteriores do PMBA/Fest (RRDM, 2019 – RT16 a RT32; RRDM, 2020 – RT35; RRDM, 2020 – RT36; RRDM, 2021 – RT37; RRDM, 2022 – RT39 e FEST, 2023 – RT42). O relatório foi estruturado de tal forma que a narrativa se desenvolvesse separadamente para os Ambientes Dulcícola, Costeiro e Marinho, contemplando os resultados de todos os estudos realizados pelos Temas do PMBA/Fest, em consonância com o previsto no TR4 e Plano de Trabalho para o Novo Ciclo do PMBA/Fest, com suas alterações metodológicas até então aprovadas pela CTBio. Para cada Ambiente, foi utilizada uma abordagem de descrição e análise evolutiva dos principais indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade, buscando, sempre que possível, uma evolução histórica com dados anteriores ao rompimento da Barragem de Fundão, bem como aqueles após o referido evento e anteriores ao início da execução do PMBA/Fest.

Ressalta-se que todas as ferramentas e critérios de análise que subsidiaram a elaboração dos relatórios anteriores do PMBA/Fest e a avaliação de impacto são as mesmas que estão sendo empregadas na elaboração do RA2022. Neste contexto, a comparação das análises espaço-temporais empregadas e avaliativas das condições ambientais e da biodiversidade foram definidas e interpretadas de acordo com os diferentes critérios já adotados anteriormente no âmbito do PMBA/Fest. Assim, foi realizada a comparação dos resultados obtidos no período de coleta do PMBA/Fest com as seguintes referências: **(A)** dados pretéritos pré-rompimento; **(B)** dados pretéritos pós-rompimento da barragem identificados pelo PMBA/Fest, mas anteriores ao PMBA/Fest; **(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 disponíveis na legislação nacional vigente; **(G)** valores orientadores internacionais; e **(H)** comparação entre os resultados obtidos ao longo da execução do PMBA/Fest. Esta última referência foi adicionada no último Relatório Anual (RA2021), visando uma análise comparativa da evolução temporal de todo o conjunto de dados gerados ao longo dos três anos de execução do PMBA/Fest.

Além dos dados pretéritos já considerados no âmbito dos produtos anteriores do PMBA/Fest, foram também incorporados os eventuais novos dados pretéritos levantados, assim como artigos científicos publicados com dados relacionados ao rompimento da Barragem de Fundão e à área afetada por este evento. Foram também passíveis de incorporação para discussão e comparação, mesmo que não em totalidade de malha e frequência amostral, dados oriundos de outros programas e relatórios técnicos que foram disponibilizados para acesso do PMBA/Fest via Fundação Renova.

Importante salientar que o conteúdo do RA2022 é resultante do processamento e análise dos dados obtidos ao longo dos 49 meses de atuação do PMBA/Fest (setembro de 2018 a setembro de 2022). A produção deste importante documento, com reconhecida qualidade técnico-científica, só foi possível através da participação de profissionais altamente capacitados em todas as etapas de execução do PMBA-Fest. No Quadro 2 é apresentada a lista de todos os colaboradores do PMBA/Fest atuantes durante a produção do RA2022 e que participaram do processo de elaboração do presente documento, seja através da execução de atividades de campo e/ou laboratório, contribuindo para a discussão dos resultados e redação do documento, ou ainda atuando nos apoios gerencial, técnico e científico.



Quadro 2: Lista de colaboradores do PMBA/Fest atuantes durante o período de produção do RA2022, agrupados por Temas e Gerências.

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
TEMA - ECOTOXICOLOGIA	
ADALTO BIANCHINI	LEANDRA MARCIA PEDROSO DALMAS
BRENDA OLIVEIRA DE BRITO	LIZIANE CARDOSO MARUBE
CAMILA DE MARTINEZ GASPAR MARTINS	LUANA BARBIERI DE SOUZA
CARLOS EDUARDO DELFINO VIEIRA	LUIZ CELESTINO DALMAS NETO
CIBELE RODRIGUES DOS SANTOS	MARIA EDUARDA MACHADO THIESEN TURNA
DENNIS GUILHERME DA COSTA SILVA	MARIA JULIA NICOLAU
DOUGLAS MARCELINO DA SILVA ROCHA	MARIANA MACHADO DE OLIVEIRA
EDUARDO MEDEIROS DAMASCENO	MATHEUS DE CASTRO VIEIRA
FILIFE BERBETI RANGEL	MAYSA DO VALE OLIVEIRA
HENRIQUE FRAGOSO DOS SANTOS	PATRICIA GOMES COSTA
HUGO EMILIANO DE JESUS	PATRIK SILVA SANTOS
IOLE BEATRIZ MARQUES ORSELLI	PEDRO HENRIQUE FREITAS PEREIRA
IRIS PEREIRA FONSECA	PRISCILA PLESLEY ALVES DA SILVA
JENNIFER DA ROSA GOULART	REGINA COIMBRA ROLA
JOSIANE ARAUJO DA SILVA	TACIANA ONESORGE MIRANDA LOPES
JULIA OLIVEIRA RIBEIRO	TALITA CRISTINA DA SILVA CASTRO
JULIA SACRAMENTO BARBOSA	THAYS DE ANDRADE GUEDES
JULIANA CARRICONDE HERNANDES	VANDA ARTIFON PEREIRA
JULIANA CASTRO MONTEIRO PIROVANI	VITORIA FIAL DO NORTE
JULIANA DA SILVA FONSECA	YURI DORNELLES ZEBRAL
LARISSA MULLER	
TEMA - BENTOS DE FUNDOS INCONSOLIDADOS	
ADREANI ARAUJO DA CONCEICAO	LUCAS VIEIRA DO NASCIMENTO
ADRIANE CRISTINA ARAUJO BRAGA	MARCOS ANTONIO ROCHA HEHR
AISSA LEAL BRINGEL	MARDEN SEABRA LINARES
ALEX BARBOSA DE MORAES	MARIA FERNANDA NASCIMENTO VELAME
ANNIE DA SILVA CASSAMALI	MATEUS REZENDE COELHO
CRISLANE BARBOSA DAS NEVES	RAFAEL BARBOSA LIMA
EMILAYNE VITORIA PIMENTA FERREIRA	RAVIER SEBASTIAO DE CASTRO ROSA
JEISY RAVILA DA SILVA ANDRADE	RENATA DE OLIVEIRA PATRICIO
LEILA DE LOURDES LONGO	STEPHANNY CONCEICAO DA SILVA
LUAN DE OLIVEIRA CERQUEIRA	THIAGO CAZONI
TEMA – FITOPLÂNCTON MARINHO	
ANA REGIA DEPOLI CABRAL DE MACEDO	LUIGE GUSTAVO GERLIEL LOPES DIAS
ARTHUR WEISS DA SILVA LIMA	MARCIO MURILO BARBOZA TENORIO

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
BRENER FREITAS DE ALVARENGA	MYLLENA DA SILVA PEREIRA
CECILIA DE MORAES MARINO	PAULO IIBOSHI HARGREAVES COSTA
GEORGETTE CRISTINA SALVADOR LAZARO	PAULO SERGIO SALOMON
KASSIA DO NASCIMENTO LEMOS	STEFANO ZORZAL DE ALMEIDA
KRYRNA STEPHANNY DE MORAIS FERREIRA	TATIANA VILLALBA VIANA
LIVIA BONETTI VILLELA	
TEMA - FUNDOS RECIFAIS	
ALINE SHIMADA DA CRUZ	JULIANA GALVAO DE CARVALHO ARGENTO
ANA PAULA BARBOSA MOREIRA	LELIS ANTONIO CARLOS JUNIOR
CLARA PAIVA PIRES	LEONARDO TAVARES SALGADO
CLEONICE MARIA CARDOSO LOBATO	MARIA LUISA AGUILAR DE SOUZA LIMA
DILSON SILVESTRE CAJUEIRO FILHO	RODRIGO GOMES BARBOSA DA SILVA
FERNANDO CASTRO CARDOSO	RODRIGO LEAO DE MOURA
GUILHERME MALAGUTTI DE CASTRO	TAYANA DOS SANTOS LOUZADA
IVAN MONCLARO CARNEIRO	
TEMA - HIDROGEOQUÍMICA	
ANDRESSA MEIRELES DAVID	JORGE PINTO DA SILVA FILHO
BETHANIA DAL COL LEHRBACK	KAIQUE DOS SANTOS BENTO
CAROLINE DE CASSIA MATOS HERMOGENES	MATEUS ALVES JESUS
CESAR ALEXANDRO DA SILVA	NATHALIA MACHADO BETZEL
CLARISSA HEIDERIQUI COMERIO	RAYANA ALVARENGA COSTA
CYBELLE MENOLLI LONGHINI	RENATA CAIADO CAGNIN
DIEGO DE ARRUDA XAVIER	RENATO RODRIGUES NETO
EDUARDO SCHETTINI COSTA	RICARDO DA CUNHA BISI JUNIOR
ELISA MILÁN CHAVES DE OLIVEIRA	WEBER ADAO RODRIGUES LUZ JUNIOR
FABIAN SA	WILLIAN DIAS ARAUJO
GABRIELE WANDERLEY FERREIRA	
TEMA – ICTIOPLÂNCTON MARINHO	
ANA CAROLINA FONTOURA VALENTE	MARCIA SALUSTIANO DE CASTRO
ANA CRISTINA TEIXEIRA BONECKER	MARTA CRISTIANE DE CARVALHO QUINTAS
FABIANA TEIXEIRA BONECKER	RAFAEL OLIVEIRA DE FRANÇA
LUIZ MANOEL COSENZA	
TEMA – SEDIMENTAÇÃO MARINHA	
ALEX CARDOSO BASTOS	JORDAN SYLLAS SARAIVA LEITE
ANA CAROLINA RIBEIRO FIESCHI LAVAGNINO	KAREN MARCELLE ROSA DE LIMA
ANA LAURA LOPES PIOL	LAIS DOS SANTOS NEVES
ANITA GOMES RUSCHI	LARISSA MARQUES FREGUETE
ANTONIO RODRIGUES XIMENES NETO	LIVIA RODRIGUES GARCEZ

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
ARTHUR PASCOAL SOARES ALVES	LORENA FERREIRA MONTEIRO
ARTHUR SANT ANA CAVICHINI	MARCOS TADEU D AZEREDO ORLANDO
CAIO VINICIUS GABRIG TURBAY RANGEL	MAYARA DE OLIVEIRA BANDEIRA
ELEN GRAMAS ROMAO	MICHELE SARDINHA DE OLIVEIRA
FERNANDA VEDOATO VIEIRA	PEDRO SMITH MENANDRO
FLAVIA ACYPRESTE ALFREDO GARONCE	POLIANA DANEZIO DE ASSIS
GEANDRÉ CARLOS BONI	VALERIA DA SILVA QUARESMA
TEMA - MODELAGEM NUMÉRICA MARINHA	
DIEGO LUIZ FONSECA	MARIA JULIA VEENINGS
DOMENIQUE JOELLE SILVA	MATHEUS FERNANDES ANDRADE
GABRIELA CORREA BRASILEIRO	RAFAEL AFONSO DO NASCIMENTO REIS
GUSTAVO VAZ DE MELO	RENATO DAVID GHISOLFI
JUCA DAMASIO	RICARDO NOGUEIRA SERVINO
JULIA TAVARES SALVIATO	SABRINA APARECIDA RAMOS DA FONSECA
LUCAS DE OLIVEIRA DA SILVA	SUSANA BEATRIZ VINZON
MARCELO DI LELLO JORDAO	TAYNA ROSA MARTINS PAIVA
MARCOS NICOLAS GALLO	THIAGO CAMPOS CARLOS
TEMA – ZOOPLÂNCTON MARINHO	
BIANCA SALVADOR	LUIZ FERNANDO LOUREIRO FERNANDES
CRISTIANE SCARTON GOMES DE OLIVEIRA	MARESSA DE OLIVEIRA COSTA
GABRIEL HARLEY COSTA SANTOS	PRISCILA TEIXEIRA AMARAL
GUSTAVO MARTINS ROCHA	SERGIO LUIZ COSTA BONECKER
LAURA RODRIGUES DA CONCEICAO	VITOR DE OLIVEIRA CONCEICAO
LUCIANO ALBERTO ELIA JUNIOR	
TEMA - QUALIDADE DA AGUA E SEDIMENTOS DULCÍCOLA	
CAROLINA DO CARMO SOUZA	PAULO JORGE SANCHES BARBEIRA
DANNIEL BRANDAO MENDES	VANYA MARCIA DUARTE PASA
EMANUEL AUGUSTO DE MATOS CRUZ	VIRGINIA SALETE COTTA PEREIRA
MATHEUS FILIPE DE DEUS SILVA	
TEMA – BACIA INTEGRAÇÃO - REFLEXOS DE AÇÕES NA BACIA DO DOCE NOS SISTEMAS AQUÁTICOS CONTINENTAL E MARINHO	
ANTONIO SERGIO FERREIRA MENDONCA	LIVIA LUCHI RABELLO
DANIEL RIGO	LORENA FRASSON LOUREIRO
DIOGO COSTA BUARQUE	MARCO AURELIO COSTA CAIADO
ELINE NAYARA DANTAS DA COSTA	MICAEL TURETA ALMEIDA DOS SANTOS
FELICIDADE PORTO LOBIANCO	MONICA DE SOUZA MENDES
IZABELA TAVARES SPAGNOL	MURILO BRAZZALI RODRIGUES
JOAO GABRIEL SANTOS CUSTODIO	SAMELA PANDOLFI RODRIGUES DA SILVA

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
JULIA BONFANTE	SEBASTIAO FRANCISCO TEIXEIRA
JULIANE AZEREDO FERREIRA	SELENA LOPES CARVALHO
TEMA – FITOPLÂNCTON DULCÍCOLA	
ALESSANDRA DELAZARI BARROSO	LARISSA BASSANI DE OLIVEIRA VIGANOR
AMANDA MARTINS BATISTA	MARIA CAROLINE GAVA
FABRICIO BRONZONI DE OLIVEIRA	PEDRO AURELIO DESTEFANI SOARES
JULIA VIRGINIA LOPES MACHADO	
TEMA – MACRÓFITAS DULCÍCOLAS	
BRENNO GARDIMAN SOSSAI	LUCAS DE ALMEIDA SILVA
FRANCISCO ALVARO ALMEIDA NEPOMUCENO	VALQUIRIA FERREIRA DUTRA
ISABELA DE LIMA PEREIRA	
TEMA – PERIFÍTON DULCÍCOLA	
BIANKA GERHARDT ENDLICH	MATEUS SARDI TRANCOSO
CAIO DE ALMEIDA MAESTRI	MIGUEL ANGELO SCARDUA FILHO
IZABELA CLARA MARQUES BALINHAS	VALERIA DE OLIVEIRA FERNANDES
LUCINEIDE MARIA SANTANA	
TEMA – ZOOPLÂNCTON DULCÍCOLA	
BIANCA RAMOS DE MEIRA	LEIDIANE PEREIRA DINIZ
EDISSA EMI CORTEZ SILVA	RAQUEL XAVIER CALVI
ENEIDA MARIA ESKINAZI SANT ANNA	YASMIN MEIRELES CASTRO
ISADORA ALVARENGA DE ANDRADE	
TEMA – PRAIAS/BENTOS	
AMANDA MOREIRA DEOLINDO	JACQUELINE DE ALMEIDA NEVES
BRUNA ADENALIAN COELHO TEIXEIRA	KARLA GONÇALVES DA COSTA
CAROLYNA MENDES FRACALLOSSI	LARA SCHULTZ RIZZO
EMANUELY EZIDIO DA SILVA	LEONAN RODRIGUES DE SOUZA
GABRIELA SINGULANI DE BRITO	MARIA CLARA GARSCHAGEN DELLAQUA LUZ
GEAN ZANETTI	TATHIANA GUERRA SOBRINHO
ISABELA JABOUR E SILVA	VANESSA SIMÃO DO AMARAL
TEMA - PRAIAS/MORFODINÂMICA	
ALEXANDRE BURINI	JACQUELINE ALBINO
DENISE DE SOUSA PAIVA TAGLIARI	JULYANA CAPRINI FARDIN
DIETER CARL ERNST HEINO MUEHE	LUCAS BERMUDEZ DE CASTRO
GISELI MODOLO VIEIRA MACHADO	LUIZ HENRIQUE SIELSKI DE OLIVEIRA
GUILHERME FELIX SANTOS SILVA	MAITE NODA ZANOTTI
ISABELE CORREIA DOS SANTOS	MATHEUS FRANCA RAMOS
TEMA – PRAIAS/GEOQUÍMICA	
EMA KAROLYANE BARBOSA GIRELI	MAIARA KRAUSE

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
GEISAMANDA PEDRINI BRANDAO ATHAYDE	MARIA TEREZA WEITZEL DIAS CARNEIRO LIMA
HELENA BEZERRA FERRARI	ROMULO SILVEIRA RODRIGUES
JEFFERSON RODRIGUES DE SOUZA	SUELLEN GERONIMO CORDEIRO
LARISSA DIAS RORIZ	TIAGO PEREIRA CUNHA
LUIS FELIPE BAPTISTA RAMPAZZO	
TEMA - MANGUEZAL	
ANA FLAVIA DE MORAES BASTOS	LAIS ALTOE PORTO
ANDREIA BARCELOS PASSOS LIMA GONTIJO	LUISA POEYS DO VALLE
ANTELMO RALPH FALQUETO	MARCELO BARCELLOS DA ROSA
BRENNO NASCIMENTO DE MATTOS	MONICA MARIA PEREIRA TOGNELLA
BRUNNA ROCHA MARTINS	NEILSON VICTORINO DE BRITES JUNIOR
CAMILA PATRICIO DE OLIVEIRA	RAQUEL VIDAL DOS SANTOS LEOPOLDO
DIELLE MEIRE DE SANTANA LOPES	SAMIRA LEITE
EDILSON ROMAIS SCHMILDT	SAULO FURTADO RONCONI VIEIRAS
EDUARDO ALMEIDA FILHO	SAVIA SOARES PASCOALINI
HELIA DEL CARMEN FARIAS ESPINOZA	ULLY DEPOLO BARCELOS
KAREN OTONI DE OLIVEIRA LIMA	VERONICA D ADDAZIO PINHEIRO
TEMA - RESTINGA	
ADRIANO NUNES NESI	MARCOS ANTONIO BACCARIN
ALINE DELON FIRMINO	MARIANA MACHADO ROCHA
AMANDA GASPARINI DE OLIVEIRA	MARIELA MATTOS DA SILVA
ANDREA BITTENCOURT MOURA BACCARIN	NATA CARLOS LIRA MADEIRA
AUXILIADORA OLIVEIRA MARTINS	OBERDAN JOSE PEREIRA
BRUNA SILVA CORREA	OEBER DE FREITAS QUADROS
CLEBERSON DOS SANTOS LOUREIRO DA VICTORI	RODRIGO THEOFILO VALADARES
DIOLINA MOURA SILVA	ROMARIO DE OLIVEIRA SILVA JUNIOR
GEISE DALVI DALCIN	SABRINA GARCIA BROETTO
GISLANE CHAVES OLIVEIRA SILVARES	THAIS ARAUJO DOS SANTOS
GUSTAVO HENRIQUE ALVES SILVA	VANESSA NOGUEIRA SOARES
JULIANA DA SILVA PENHA	VINICIUS HENRIQUES DE CARVALHO
LIVIA DAVEL GOMES	WAGNER LUIZ ARAUJO
MARCELLE LEITE MAINARDI	
TEMA – MONITORAMENTO REMOTO DA MEGAFauna MARINHA	
AGNALDO SILVA MARTINS	JORDANA BORINI FREIRE
AMANDA BARON DI GIACOMO	MARCOS EDUARDO DIAS ROCHA
ANA JULIA OLIVEIRA VIANNA	MARIA EDUARDA FONSECA CORTES
CESAR ROCHA DE MIRANDA XAVIER	NELSON BARCELOS PEREIRA

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
DANIEL GUSTAVO VON SPERLING DE VASCONCEL	THAMIRES BRIDE VENTURA
JOAO BATISTA TEIXEIRA	THIAGO ORION SIMOES AMORIM
JONATHAS DA SILVA BARRETO	
TEMA – CETÁCEOS	
ALEXANDRE DE FREITAS AZEVEDO	JULIANA YWASAKI LIMA
ANA PAULA CAZERTA FARRO DA ROSA	LEONARDO SERAFIM DA SILVEIRA
BARBARA MANHAES MOURA REIS	LETICIA VERSIANI GOMES DA SILVA
DAHIANI NUNES BOSSI	LHARYSSA NUNES CARARA
DRIENNE MESSA FARIA	MYLLA CARLA CESCION FREIRE
GINA NUNES TEIXEIRA	TATIANA LEMOS BISI
HAYDEE ANDRADE CUNHA	VANESSA KUBOYAMA MARQUES DE OLIVEIRA
JOSE LAILSON BRITO JUNIOR	
TEMA – AVES MARINHAS	
BRUNO DE ANDRADE LINHARES	LEONARDO MARQUES FURLANETTO
CYNTHIA CAMPOLINA DE MELLO VIANNA	MAICON PEGORARO DE LARA
GUILHERME TAVARES NUNES	MARCIO AMORIM EFE
GUSTAVO DA ROSA LEAL	MARCIO REPENNING
IGOR DA CUNHA LIMA ACOSTA	OLGA LUCIA HERRERA TRUJILLO
JULIA JACOBY DE SOUZA	TALITA DE ALCANTARA CARNEIRO BACKHAUS
LEANDRO BUGONI	
TEMA – TARTARUGAS MARINHAS	
ALBERTY CLEYTON GASPAR XAVIER	LUANA ALVES DE SOUZA SIMOES
BRENDA FOERSTE	PAULA RODRIGUES LOPES GUIMARAES
JULIANA DE FREITAS JUSTINO	SANDRA LUDWIG
LAIS AMORIM FERREIRA	SARAH MARIA VARGAS
TEMA - ICTIOFAUNA DULCÍCOLA	
AUREO BANHOS DOS SANTOS	NATALIA MARTINS TRAVENZOLI
BRUNO EDESIO DOS SANTOS MELO	PAULA NUNES COELHO
CARLOS EDUARDO FARESIN E SILVA	PEDRO SENNA TAYLOR BITTENCOURT
CIDIMAR ESTEVAM DE ASSIS	PRISCILLA ESCLARSKI
ERICO MACEDO POLO	SANDRA MARCELA HERNANDEZ RANGEL
INGRID DE SOUZA NUNES	SARAH VENTURA CARVALHO
IZENI PIRES FARIAS	SIMONE GOMES DUARTE E MOURA
JORGE ABDALA DERGAM DOS SANTOS	TOMAS HRBEK
KESSIA LEITE DE SOUZA	VALERIA NOGUEIRA MACHADO
LUCAS CAETANO DE BARROS	VICTOR AUGUSTO DE QUEIROZ BATISTA
LUCAS FERRANTE DE FARIA	VINICIUS COMASTRI ARRUDA

LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
LUCAS MARCON	WANDER RIBEIRO FERREIRA
TEMA - ICTIOFAUNA MARINHA	
ALINE QUEIROZ CASTRO	JULIANA MARTINS DE ANDRADE
ANA PAULA MILLANI GUTIERREZ	JULIEN CHIQUEIRI
BRENDA MEDEIROS	KATHIANI VICTOR BASTOS
CARLOS WERNER HACKRADT	KORINA BLUNK DA SILVA
CAROLINA DE BARROS MACHADO DA SILVA	LARISSA RODRIGUES DA SILVA
CAROLYNE PEREIRA RODRIGUES DE SOUZA	LEANDRO PIROVANI DE SANT ANA
CECILI BARROZO MENDES	LORENA ZIVIANI BEVITORIO
CIRO COLODETTI VILAR DE ARAUJO	MARCELO SOETH
EDUARDA XIMENES DANTAS	MARCOS SANTOS BOMFIM
FABIANA CEZAR FELIX HACKRADT	MARIANA ANTUNES DA SILVA
FABIO FERNANDES ROXO	MARIANA NASCIMENTO DA SILVA
FABRICIO DE ANDRADE FREHSE	MARIO VINICIUS LOPES CONDINI
FELIPPE ALEXANDRE LISBOA DE MIRANDA DARO	MATHEUS RYAN SILVA JULIO
FLAVIO TOSCANO SZABLA	MAURICIO HOSTIM SILVA
FRANCIELLE CARDOSO ANDRADE	NATALIA CARVALHO ROOS
GABRIELA BRAZ LIUTH	NATALIA PRISCILA ALVES BEZERRA
GERMANO HENRIQUE COSTA BARRILLI	NIUMAIQUE GONCALVES DA SILVA
GIULIA DA SILVA MARCHIORI	PEDRO MORENO VILLATORO REQUENA
HELDER COELHO GUABIROBA JUNIOR	REBEKA FERREIRA MARTINS
HELEN AUDREY PICHLER	RICARDO ALVES DE OLIVEIRA SOUZA
JEAN CHRISTOPHE JOYEUX	RODRIGO FERREIRA BASTOS
JOICE DE SOUZA SOARES	RONALDO RUY DE OLIVEIRA FILHO
JULIA POHL ALTAFIN	RYAN CARLOS DE ANDRADES
JULIANA BELTRAMIN DE BIASI	THIAGO ELEUTERIO RODRIGUES
TEMA - SEDIMENTAÇÃO COSTEIRA	
CLAUDIO DE MORISSON VALERIANO	LETICIA BASTOS ELLER
EDUARDO DELFINO SODRE	LUCIANA FIGUEIREDO PRADO
ELAINE ALVES DOS SANTOS	MARCUS VINICIUS VAUGHAN JENNINGS LICINIO
HEITOR EVANGELISTA DA SILVA	NEWTON DE MAGALHAES NETO
JOAO RICARDO COUTINHO DE BARCELLOS	PEDRO ADALBERTO RAMOS BIZELLI
LOGÍSTICA	
FERNANDA PERASSOLI	PEDRO DE SOUZA LAINO
JULIANO CEZAR PINTO PAIXAO	WAGNER RIBEIRO BAIÃO
ESCRITÓRIO DE PROJETOS (ESCPRO)	
ACRE FERNANDES DA SILVA	LUIZ VITAL DA SILVA



LISTA DE COLABORADORES DO PMBA/FEST	
ANA CAROLINA ALMEIDA OLIVEIRA CHEIBUB	MARCELO EDUARDO VIEIRA SEGATTO
ARILDO DETEMANN	MARCOS AURELIO BERTUCE
CARLOS GILMAR ZUCOLOTTI JUNIOR	MARCOS VALERIO VIEIRA LYRIO
CARLOS JOSE FRAGA	MICHELLE SEQUINE BOLZAN
CAROLINE DE MARCHI PIGNATON	MURILLO EPIFANIO DE ALMEIDA
CELESTE MARILY PACHECO	PATRICIA BOURGUIGNON SOARES
CRISTIANE SILVEIRA MACHADO	PAULO ROBERTO DA SILVA
DANIELI GRANCIERI DEBONA	PETRUSCA MELLO COSTA FILHA
DAVYD CELANTE SANTOS	RAFAEL PETRI
EDCARLOS FERREIRA BARBOSA	RAYANO ROCHA RIBEIRO
EDILENE SOUZA DA SILVA NEVES	REJANE RODRIGUES MONTEIRO
EUSTAQUIO VINICIUS RIBEIRO DE CASTRO	ROGERIO PETRI
FERNANDO COUTINHO BISSOLI	ROSANGELA SOARES CAMARGO
KENNEDY GERA NISHIO	SABRINA FELIX BERTUANI
LORENZO COSTA QUEIROZ	SIDNEI VIEIRA
LUCIMAR TADEU SCALZER	VALDEMAR LACERDA JUNIOR
LUIS OSCAR RODRIGUES BOBADILHA	WANESSA DA COSTA CRUZ
LUIZ OTAVIO DA CRUZ DE OLIVEIRA CASTRO	
EQUIPE DE AVALIAÇÃO INTEGRADA	
AROLDOS DOS REIS ROCHA JUNIOR	KYSSYANNE SAMIHRA SANTOS OLIVEIRA
BEATRICE PADOVANI FERREIRA	MAIKON DI DOMENICO
BRENO TRAMONTINI STEFFEN	MANUELA SANTOS SANTANA
FABIO CAVALCA BOM	NADSON RESSYE SIMOES DA SILVA
GISELE DAIANE PINHA	NELSON DE ALMEIDA GOUVEIA
ASSESSORIA TÉCNICA	
ANNA PAULA LAGE RIBEIRO	LAURA SILVEIRA VIEIRA SALLES
CAROLINA DE ANDRADE MELLO	MONIQUE FRANZEN MAIA
DANDARA SILVA CABRAL	PATRÍCIA OLIVEIRA LACERDA
FERNANDA JURKA ALVES	TARCILA FRANCO MENANDRO
LARA GABRIELA MAGIONI SANTOS	

## 1.1 GLOSSÁRIO DO PMBA/Fest

Visando uniformizar a aplicação de conceitos e termos comuns utilizados durante a construção dos documentos que compõem o RA2022, principalmente aqueles que são característicos e inerentes ao PMBA/Fest, os termos padronizados e os seus respectivos significados são apresentados abaixo.

1. **Período seco:** compreende o período entre os meses de abril a setembro.



2. **Período chuvoso:** compreende o período entre os meses de outubro a março.
3. **Rompimento da Barragem:** termo utilizado para se referir ao evento que deu origem ao aporte do rejeito de mineração da Barragem de Fundão que atingiu o Rio Doce e a região marinha adjacente.
4. **PMBA/Fest:** sigla referente ao Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I executado pela Rede Rio Doce Mar e a Fundação Espírito-santense de Tecnologia.
5. **Ano 1:** termo utilizado para se referir ao primeiro ano de monitoramento do PMBA/Fest, compreendido pelo período de setembro de 2018 a setembro de 2019.
6. **Ano 2:** termo utilizado para se referir ao segundo ano de monitoramento do PMBA/Fest, compreendido pelo período de outubro de 2019 a setembro de 2020.
7. **Ano 3:** termo utilizado para se referir ao terceiro ano de monitoramento do PMBA/Fest, compreendido pelo período de outubro de 2020 a setembro de 2021.
8. **Ano 4:** termo utilizado para se referir ao quarto ano de monitoramento do PMBA/Fest, compreendido pelo período de outubro de 2021 a setembro de 2022.
9. **Período de Transição:** termo utilizado para se referir ao período entre a finalização do primeiro ano de monitoramento e julho de 2022. Foi caracterizado por um intervalo de tempo em que o PMBA/Fest foi executado com o escopo do Ano 1 ajustado apenas às alterações de malha e frequência amostrais aprovadas pela CTBio através do ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, até início de nova fase do Programa de Monitoramento, chamado aqui de Novo Ciclo do PMBA/Fest.
10. **Novo Ciclo do PMBA/Fest:** termo utilizado para se referir à nova fase do Monitoramento, compreendido pelo período de amostragem entre agosto de 2022 e janeiro de 2024, tendo o escopo balizado a partir das propostas de continuidade do Monitoramento.

## 1.2 LISTA DO MATERIAL SUPLEMENTAR

Em seguida, é apresentada a lista de Materiais Suplementares que acompanham o RA2022 na forma de arquivos de documentos eletrônicos. Estes materiais foram identificados por meio de siglas que compreendem o conteúdo, Ambiente e Tema a que se referem.

No Quadro 3 é apresentada a lista de siglas atribuídas aos Materiais Suplementares, bem como suas respectivas origens conforme a estrutura organizacional do PMBA/Fest:

Quadro 3: Lista de siglas dos Materiais Suplementares referentes ao RA2022 PMBA/Fest.

NOME DO ARQUIVO	ORIGEM DO MATERIAL SUPLEMENTAR
<b>GERAIS</b>	
MS_ Malha Amostral_Ano 1	Malha amostral executada no Ano 1 do PMBA/Fest
MS_ Malha Amostral_Período de Transição	Malha amostral executada no Período de Transição do PMBA/Fest

NOME DO ARQUIVO	ORIGEM DO MATERIAL SUPLEMENTAR
MS_Malha Amostrai_Novo Ciclo	Malha amostral executada no Novo Ciclo do PMBA/Fest
MS_Mapas histórico da malha amostral do PMBA/Fest	Mapas com o histórico de malha amostral do PMBA/Fest
MS_Frequência amostral	Histórico da frequência amostral do PMBA/Fest
<b>AMBIENTE DULCÍCOLA</b>	
MS_AD_Ecotoxicologia	Ecotoxicologia
MS_AD_Bacia Integração	Bacia Integração
MS_AD_Fitoplâncton	Fitoplâncton
MS_AD_Ictiofauna_Ictioplâncton_Macroinvertebrados	Ictiofauna, Ictioplâncton e Macroinvertebrados
MS_AD_Limnologia	Limnologia
MS_AD_Macrófitas	Macrófitas
MS_AD_Mineralogia	Mineralogia
MS_AD_Perifíton	Perifíton
MS_AD_Qualidade de água e sedimento	Qualidade de água e sedimento
MS_AD_Zooplâncton	Zooplâncton
<b>AMBIENTE MARINHO</b>	
MS_AM_Ecotoxicologia	Ecotoxicologia
MS_AM_Aves Marinhas	Aves Marinhas
MS_AM_Bentos de Fundo Inconsolidado	Bentos de Fundo Inconsolidado
MS_AM_Cetáceos	Cetáceos
MS_AM_Fitoplâncton	Fitoplâncton
MS_AM_Fundos Recifais	Fundos Recifais
MS_AM_Hidrogeoquímica	Hidrogeoquímica
MS_AM_Ictiofauna e Carcinofauna	Ictiofauna e Carcinofauna
MS_AM_Ictioplâncton	Ictioplâncton
MS_AM_Modelagem	Modelagem
MS_AM_Monitoramento Megafauna	Monitoramento Remoto da Megafauna
MS_AM_Sedimentação Costeira	Sedimentação Costeira
MS_AM_Sedimentação Marinha	Sedimentação Marinha
MS_AM_Tartarugas	Tartarugas
MS_AM_Zooplâncton	Zooplâncton
<b>AMBIENTE COSTEIRO</b>	
MS_AC_Ecotoxicologia	Ecotoxicologia
MS_AC_Manguezal	Manguezal
MS_AC_Praias	Praias
MS_AC_Restinga	Restinga
<b>MATRIZ DE RESULTADOS</b>	
MS_MATRIZ_AD	Lista de impactos e quantificação da matriz de resultados do Ambiente Dulcícola

NOME DO ARQUIVO	ORIGEM DO MATERIAL SUPLEMENTAR
MS_MATRIZ_AM	Lista de impactos e quantificação da matriz de resultados do Ambiente Marinho
MS_MATRIZ_AC	Lista de impactos e quantificação da matriz de resultados do Ambiente Costeiro
INTEGRAÇÃO	
MS_INTEGRAÇÃO_DULCÍCOLA	Planilha coeficientes_Ambiente Dulcícola
MS_INTEGRAÇÃO_MARINHO	Planilha coeficientes_Ambiente Marinho
MS_INTEGRAÇÃO_TITAN	Análise de TITAN

## 2 SÍNTESE DOS AMBIENTES

### 2.1 AMBIENTE DULCÍCOLA

A Bacia do Rio Doce tem um longo histórico de impactos antrópicos, aos quais se somam, no contexto do século XXI, as modificações impostas pelos cenários climáticos das mudanças globais. O rompimento da Barragem de Fundão em novembro de 2015 representou um impacto de ampla magnitude (agudo), e após quase oito anos, pode ser classificado como um evento de dinamicidade crônica, impulsionado principalmente pelas variações climáticas, hidrológicas e ações humanas. Neste contexto, o monitoramento dos ecossistemas aquáticos do Baixo Rio Doce do PMBA/Fest considera os cenários passados e atuais na busca dos descritores que reflitam, com menor grau de incerteza possível, os impactos aos processos ecológicos estruturais, à biodiversidade e à oferta de bens e serviços ecossistêmicos. Consideramos que a estrutura atual da biocenose e os processos funcionais do ecossistema são derivados de um processo de sucessão, ainda sob influência de eventos crônicos da presença do rejeito, cuja dinâmica e padrões só poderão ser detectados em associação com uma consistente base temporal de observações e ferramentas integrativas. Os resultados apresentados no RA2022 para o ambiente dulcícola são embasados nessas prerrogativas.

#### 2.1.1 Indicadores

Os indicadores selecionados para o monitoramento abrangem diferentes escalas hierárquicas, desde o uso e ocupação da paisagem, marcadores mineralógicos, geoquímicos e limnológicos, até os processos estruturais, interativos e evolutivos, incluindo indicadores moleculares, que possibilitam a descrição dos fenômenos que moldam a biodiversidade aquática do Baixo Rio Doce. É importante destacar que os indicadores aqui utilizados estão em constante processo de avaliação e, à luz de novos dados, resultados e conclusões, eles podem ser alterados, substituídos, ou novos indicadores podem ser sugeridos, sem comprometimento para as descrições apresentadas na presente síntese. É também a partir destes indicadores, e outros resultados principais, que são identificados os impactos diretos e/ou indiretos, causados pelo rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

#### **Abióticos**

**Integração Fluvio-Estuarina:** tendo como fundamento principal de estudo a escala de paisagem, o uso da modelagem e estimativas percentuais de ações na bacia, foram selecionados os indicadores: produção de água por região, vazão e descargas sólidas de sedimentos, e o cumprimento das ações de programas coordenados pela Fundação Renova, incluindo o percentual de material dragado na UHE Risoleta Neves, o repasse financeiro para ações na Bacia do Rio Doce que incluem o esgotamento sanitário, nascentes recuperadas, áreas recuperadas e áreas reflorestadas.

**Mineralogia:** o estudo da identificação e quantificação das fases minerais nos sedimentos, sua gênese e composição mineralógica, além da detecção de compostos metálicos é baseado nos indicadores: composição mineralógica dos sedimentos, suscetibilidade magnética dos sedimentos, fase de oxihidróxidos de ferro dos sedimentos, além da composição mineralógica do material particulado em suspensão.

**Limnologia:** a avaliação das principais características limnológicas dos sistemas lóticos e lênticos tem os seguintes indicadores como balizadores: claridade da água, acidez/alcalinidade da água, estratificação térmica dos ecossistemas lacustres, condição de oxidação/redução da coluna d'água, índice de estado trófico e testemunhos sedimentares em lagos e lagoas.

**Qualidade da Água e Sedimentos:** as análises geoquímicas da água e sedimento são conduzidas tendo como norteadores indicadores de não conformidade NOAA Crônico e Agudo, CONAMA 357, CONAMA 454 para metais, HPAs, fenóis, pesticidas e PCBS como indicadores da qualidade da água a partir da determinação do índice de não conformidade em relação à legislação Nacional e Internacional. Avalia-se também o comportamento temporal por ambiente.

### **Bióticos**

A avaliação dos impactos potenciais da passagem do rejeito sobre a biodiversidade aquática tem sido realizada em vários níveis tróficos representativos da cadeia alimentar, além da abordagem molecular.

#### **Produtores Primários (Perifíton, Fitoplâncton e Macrófitas Aquáticas)**

**Perifíton:** a dinâmica e bioindicação dos produtores primários bentônicos tem sido avaliada através dos indicadores: % diatomáceas eutróficas (espécies com afinidade a ambientes ricos em nutrientes) e % de diatomáceas de baixo perfil, representadas por espécies mais aderidas ao substrato e, portanto, menos sujeitas às forças mecânicas do fluxo da água, sendo ainda sensíveis ao aumento de nutrientes. Analisa-se ainda o % de material inorgânico (cinzas), um indicador do acúmulo de material particulado inorgânico presente na água, que evolui positivamente com a turbidez e % de diatomáceas móveis.

**Fitoplâncton:** a diversidade de espécies e a densidade de cianobactérias são os indicadores que permitem a avaliação da dinâmica e composição dos produtores primários planctônicos nos ambientes estudados.

**Macrófitas Aquáticas:** a estrutura da comunidade de plantas aquáticas é avaliada através dos indicadores riqueza, uniformidade, densidade, dominância e diversidade de espécies.

#### **Consumidores Primários Pelágicos e Consumidores Bentônicos**

**Zooplâncton:** os parâmetros de abundância, riqueza, diversidade de espécies e funcional, biomassa e recrutamento (presença de formas jovens) são os indicadores que avaliam a dinâmica espaço-temporal.

**Ictioplâncton:** a avaliação das respostas dessa comunidade é realizada através dos indicadores distribuição espaço-temporal de ovos e larvas de peixes, da densidade de larvas, da integralidade e viabilidade das larvas juvenis e da distribuição espaço-temporal das larvas e juvenis que apresentam alterações morfológicas incomuns.

**Macroinvertebrados Bentônicos:** o grupo dos consumidores bentônicos e sua resposta frente às alterações dos ambientes aquáticos tem sido estudado com base nos indicadores riqueza, abundância

relativa e densidade de espécies, grupos tróficos funcionais, além da qualidade ambiental, mensurada através da avaliação do habitat físico e da qualidade da água, pelo índice multimétrico bentônico.

### Predadores de Topo

**Ictiofauna Dulcícola:** os estudos compreendem a análise dos seguintes indicadores: riqueza de espécies, diversidade beta, proporção de espécies introduzidas, biomassa proporcional de espécies introduzidas, recrutamento de espécies nativas e introduzidas, proporção sexual de machos e fêmeas, estágio de maturação, relação gonadossomática, evolução espaço-temporal das guildas tróficas e a diversidade itens alimentares consumidos pelas espécies de peixes.

**Genética de Peixes:** na avaliação das alterações moleculares das populações piscívoras são utilizados os marcadores: diversidade genética das espécies nativas, redução populacional das espécies nativas e diversidade filogenética total das espécies nativas e exóticas.

### Ecotoxicologia

**Ecotoxicologia:** na avaliação das diferentes rotas dos contaminantes na biota aquática são analisados os indicadores: **Índice de Bioacumulação** (IBR Bioacumulação), que fornece uma síntese gráfica das concentrações dos diferentes metais mensurados nos organismos; O **Índice de Resposta Biológica** (IBR Marcador) que fornece uma síntese gráfica das respostas biológicas dos diferentes biomarcadores mensurados nos organismos; O **Índice de Toxicidade**, que busca integrar os resultados da avaliação toxicológica das diferentes matrizes ambientais, obtida por meio de ensaios normatizados com organismos bioindicadores de diferentes níveis da cadeia trófica, incluindo microalgas, microcrustáceos e peixes em diferentes estágios de desenvolvimento, além dos **Indicadores Microbianos**, que refletem a abundância relativa dos principais grupos bacterianos relacionadas a presença de metais pesados e a presença de rejeito de mineração, em amostras de água e sedimentos das estações amostrais dulcícolas.

### 2.1.2 Destaques

O monitoramento dos ecossistemas aquáticos continentais realizado ao longo dos quatro anos de execução do PMBA/Fest busca identificar as principais transformações ocorridas na biodiversidade aquática do Baixo Rio Doce após o rompimento da Barragem de Fundão. Entre os resultados obtidos e apresentados no RA2022, destacaram-se:

1. No ambiente dulcícola, a variabilidade pluviométrica sazonal constitui a principal força motriz do transporte de sedimentos e aumento da concentração de contaminantes na calha fluvial. Indícios de enriquecimento severo de **níquel (Ni)** e **arsênio (As)** na Laguna Monsarás (1996 – 2011) e de **As e Fe** na Lagoa do Areal (1845-2019), atestam a evolução histórica da contaminação da Bacia do Rio Doce.
2. Não houve tendência de redução temporal da contaminação por metais associados ao rejeito de minério de Ferro. Altos percentuais do Índice de Não Conformidade (INC) foram detectados na água e sedimento da calha fluvial e sistemas lacustres, especialmente em relação a **Fe total**, **Al total** e **Cu total**. Os sistemas lacustres rasos

- (lagoas) tendem a apresentar maiores concentrações de **Fe dissolvido** e **Al total** na água em relação aos lagos, estando, portanto, mais vulneráveis aos impactos da contaminação crônica.
3. Tendência geral de aumento da riqueza de espécies dos produtores primários base da cadeia trófica (perifíton, fitoplâncton e macrófitas aquáticas). No nível trófico consumidor primário, o zooplâncton apresentou perda de traços funcionais no Rio Doce, enquanto no ictioplâncton anomalias morfológicas foram detectadas, incluindo deformidades e presença de sedimento avermelhado em cavidades internas. Entre os macroinvertebrados bentônicos (consumidores bentônicos), houve dominância de formas indicadoras de impacto (coletores-catadores) nos trechos da calha do Rio Doce;
  4. Tendência de declínio na abundância, riqueza e biomassa para as espécies nativas da ictiofauna dulcícola (predadores de topo da cadeia alimentar aquática), e maior desempenho reprodutivo das espécies introduzidas em relação às espécies nativas. Houve grande redução da diversidade filogenética das espécies nativas, com consequente simplificação da diversidade funcional.
  5. A bioacumulação de metais (especialmente Fe, As, Cd, Cr, Cu, Mn e Pb) ainda se encontra elevada na base da cadeia alimentar aquática (plâncton) em todos os ambientes monitorados, em comparação com dados pretéritos. Houve um aumento temporal na resposta biológica dos organismos planctônicos nos setores Afluente e Rio, com destaque para os biomarcadores lipoperoxidação, um indicador de estresse oxidativo, e metalotioneína, um indicador da presença de metais no organismo. Para camarões, houve um aumento progressivo da resposta biológica dos animais coletados no setor Lagos, sendo que no último período monitorado, o dano de DNA aparece como um efeito inédito e expressivo no âmbito desse monitoramento, tanto no setor Lagos, quanto nos setores Lagoas e Rio. Para peixes, notou-se um aumento gradual da resposta biológica no setor Rio e, de maneira mais sutil, nos setores Lagos e Lagoas, considerando todo o monitoramento (2018 a 2022), com destaque para as metalotioneínas medidas no fígado. Os resultados da microbiologia apontam para uma maior abundância de gêneros bacterianos resistentes a metais, tanto na água quanto no sedimento. Os testes de toxicidade indicam uma redução progressiva da toxicidade da água e sedimento, sendo o sedimento mais tóxico que a água. Numa visão espacial geral, os resultados da ecotoxicologia indicam maior contaminação e efeitos nos setores Rio, Lagos e Lagoas, com ênfase para a região do Baixo Rio Doce.

### 2.1.3 Contextualização do ambiente

O ambiente dulcícola do PMBA/Fest engloba a porção do Baixo Rio Doce, com pontos amostrais localizados em Minas Gerais e majoritariamente no Espírito Santo. No Novo Ciclo de monitoramento, a modificação da malha amostral incluiu como novos sítios amostrais os reservatórios de Mascarenhas e Aimorés, este último localizado na divisa de Minas Gerais e Espírito Santo. A porção do Baixo Rio Doce é receptadora de todo o sistema de drenagem do Alto e Médio Rio Doce, que abarcam cerca de

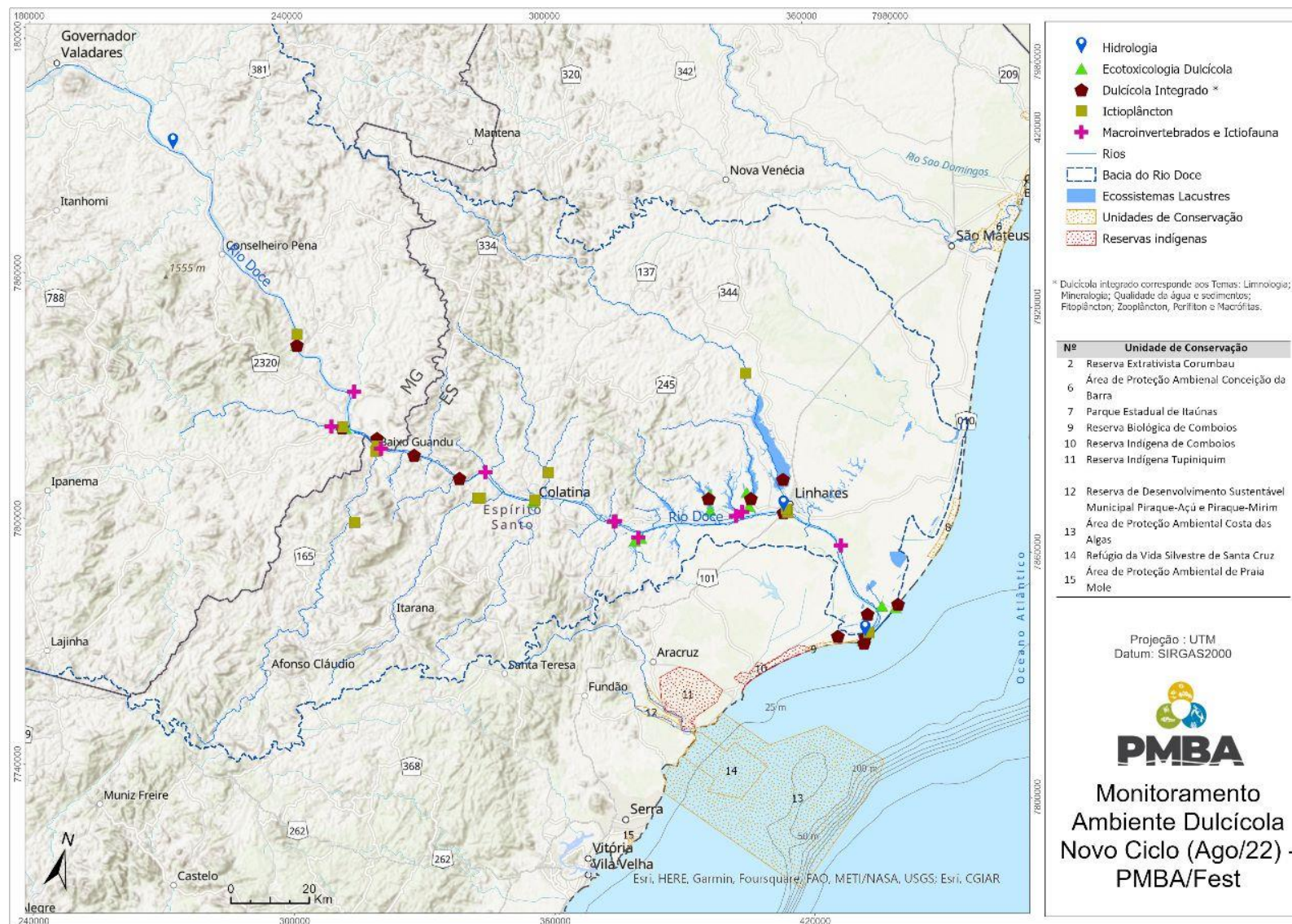


86% da Bacia. No Baixo Rio Doce, o canal fluvial do Rio Doce conecta-se a grandes sub-bacias, como o Manhuaçu, Guandu e Santa Maria do Doce, entre outros. O domínio geomorfológico do Grupo Barreiras abriga um sistema de lagos e lagoas naturais como o Palmas, Juparanã, Nova, Areal e a laguna Monsarás, que podem ser alcançadas pelas águas do canal fluvial durante o período de cheias do Rio Doce.

A área de estudo compreende os reservatórios de Aimorés e Mascarenhas, o canal fluvial do Rio Doce, o Rio Guandu (ponto controle até o Novo Ciclo do PMBA/Fest em 2022), o Rio Manhuaçu (novo ponto controle selecionado a partir do Novo Ciclo do PMBA/Fest em 2022), sistemas fluviais tributários, além de ecossistemas lacustres profundos (lagos) e rasos (lagoas). Os temas analisados no ambiente dulcícola apresentam malhas amostrais específicas, delimitadas de acordo com o objeto de estudo e suas particularidades. Os temas Integração Fluvio-Estuarina, Mineralogia, Qualidade da Água e Sedimentos, Limnologia, Perifíton, Fitoplâncton, Zooplâncton, Macrófitas Aquáticas e Ecotoxicologia estão alinhados com a malha amostral apresentada na Figura 1.



Figura 1: Malha amostral do Ambiente Dulcícola que está em vigência no momento da entrega do relatório.



#### 2.1.4 Distribuição espacial e temporal dos indicadores de impactos

No ambiente dulcícola, os pulsos hidrológicos sazonais são identificados como forçantes fundamentais na dinâmica dos fatores abióticos, estabelecendo uma evolução espaço-temporal perceptível, com reflexos sobre a qualidade da água e a biodiversidade aquática, contemplada desde os constituintes da base da cadeia trófica até os organismos de topo. A dinâmica espaço-temporal dos indicadores de impactos apresenta ainda processos-resposta relacionados ao mosaico da paisagem e das características hidrodinâmicas e morfométricas dos ambientes monitorados: calha fluvial, reservatórios, lagos e lagoas.

Os indicadores vazão e descarga de sedimentos apresentaram amplas variações sazonais, com valores mais elevados detectados nos períodos chuvosos. O período chuvoso do Ano 4 apresentou os maiores valores de vazões média e máxima diárias, e em termos de vazões médias diárias, o período chuvoso do Ano 4 apresentou triplo do obtido no Ano 1, 1,6 vezes o valor do Ano 2 e 1,8 vezes o obtido no Ano 3, para o mesmo período. O mesmo comportamento foi observado nos valores de descargas de sedimentos suspensos e totais, que apresentaram valores superiores no Ano 4, em relação aos demais anos monitorados, para o período chuvoso. Também foram registrados aumento dos teores de **oxihidróxidos de Fe** (marcadores de rejeito de mineração de ferro) na Lagoa Monsarás (estações E25 e E25a) e na calha do Rio Doce (estações E26 e E26-F), refletindo claramente a entrada de rejeitos de mineração de **Fe** via fluvial ou marinha. Em relação aos indicadores **material particulado em suspensão e turbidez (UNT)**, estes foram praticamente uniformes ao longo das estações amostrais da calha do Rio Doce, cujos valores máximos estiveram acima do limite máximo admissível pela Resolução CONAMA N. 357. Em relação à qualidade da água na calha do Rio Doce, o Índice de Estado Trófico (**IET**) apontou condições mesotróficas, com exceção da estação E0 (Itapina), enquadrada como oligotrófica. O IET é uma ferramenta de avaliação da qualidade da água de ecossistemas aquáticos, que possibilita uma descrição da variabilidade espaço-temporal da condição ambiental dos corpos d'água, bem como fornece informações consistentes sobre a influência potencial do uso e ocupação da paisagem e seus impactos sobre os ecossistemas continentais. O avanço da condição mesotrófica da calha fluvial do Rio Doce deve ser acompanhada com atenção e confrontada posteriormente com as ações de melhorias do sistema de tratamento de efluentes domésticos propostas no plano de restauração da bacia, como indicador da efetividade das ações.

A análise dos testemunhos de sedimentos coletados nos lagos e lagoas revelou datação inicial entre 1811 a 1850 e final entre 2019 e 2020. Foi possível detectar a presença de **Fe, Al, Mn, Ba e As** nos testemunhos de sedimentos, com valores, em ordem decrescente de concentrações médias de metais nos testemunhos dos ecossistemas lacustres, na seguinte sequência: para **Al**: E20>E18>E23>E19>E24>E25; para **Fe**: E24>E19>E23>E20>E18>E25; para **Mn**: E23>E20>E24>E19>E18>E25 e para **Ba**: E23>E20>E19>E25>E18>E24. As concentrações máximas de **Fe, Al, Mn e Ba** foram registradas nas estações E24 (Lagoa Areal), E23 (Lagoa Areão) e E20 (Lago Juparanã). As estações E24 e E23 localizam-se na planície costeira das lagoas e sujeitas a intrusão do Rio Doce durante os eventos de cheias (MILLER et al., 2023). O Índice de Enriquecimento (IE) usando o cobalto (Co) como valor de referência da geoquímica da porção superior da crosta terrestre

indicou enriquecimento severo ( $IE > 10$ ) de níquel (**Ni**) e arsênio (**As**) no testemunho da Laguna Monsarás (E25) a partir de 1996 e 2011, e de **As** e **Fe** na Lagoa do Areal (E24) a partir dos anos de 1845 e 2019, respectivamente. Foi observado enriquecimento moderadamente severo ( $IE = 5$  a  $10$ ) para **As** (1998) e **Fe** (2013) no Lago do Limão (E18); **As** (1987), **Fe** (2005) e Pb (2006) no Lago Nova (E19), **As** (1957) no Lago Juparanã (E20); **As** (1888) na Lagoa Areão (E23); e **Fe** (anterior a 1845) na Lagoa Areal (E24). Os resultados da análise dos testemunhos de sedimentos lacustres indicam a evolução histórica do impacto antrópico na Bacia do Rio Doce, com indícios de recrudescimento da concentração de metais no início do século XXI, para vários ecossistemas lacustres.

As condições geoquímicas da água revelaram que existem amplas variações sazonais na concentração de **Fe** e **Al** total na água, mas essas mudanças não reduzem os altos percentuais do Índice de Não Conformidade (INC) observados na calha fluvial e sistemas lacustres, sobretudo nas lagoas. No período chuvoso de outubro/21 a março/22, o INC para **Fe total** em relação ao NOAA crônico foi de 100% para as amostras dos rios Doce e Guandu, 100% para lagoas, e cerca de 11% para os lagos. No período sazonal de seca (abr/22 a set/22), o INC ainda foi elevado, de 61,5 % para o Rio Doce, 83,3% para as lagoas e de 8,9% para lagos. Para o **Al total** na água, no período chuvoso de outubro/21 a março/22, considerando o limite NOAA crônico, os índices de não conformidade foram de 100% para os rios Doce e Guandu e para as lagoas. Em algumas coletas do período chuvoso, os valores de **Al** e **Fe** foram tão altos que extrapolaram as curvas analíticas, demandando diluição das amostras e reanálises. Valores de **Al total** no período chuvoso de outubro/21 a março/22 extrapolaram até os maiores valores registrados pelo IEMA, pós-desastre. Esses resultados indicam a alta vulnerabilidade dos sistemas lacustres rasos (lagoas) na contaminação por rejeitos de minério de ferro ou outros contaminantes. Um metal que vem sendo detectado ao longo do monitoramento do PMBA/Fest e em níveis acima do NOAA, sem variação sazonal significativa, é o **Bário (Ba)**, que tem apresentado valores elevados na calha do Rio Doce, em especial na estação E26 (fz). Nos ecossistemas lacustres, os maiores valores foram detectados no Lago do Limão (E18) e na Lagoa Monsarás (E25a). Destacam-se ainda as altas concentrações de **chumbo (Pb) total** na água nos rios Doce e Guandu durante o período chuvoso de outubro/21 a março/22, com INC de 94,7% e 100%, respectivamente, segundo NOAA crônico. Entre a diversidade de contaminantes registrados nos ambientes, as altas concentrações de **arsênio (As)** e **cromo (Cr) total** em sedimentos de lagos e lagoas durante o período chuvoso (out/21 a mar/22) merecem atenção. As lagoas Areal e Juparanã foram os ambientes com valores superiores aos limites NOAA crônico, podendo ser considerados ambientes extremamente impactados, com grandes riscos à biota aquática. Vale destacar ainda os múltiplos usos associados a esses ecossistemas lacustres (recreação, pesca, cultivo de organismos aquáticos, captação de água), o que exige atenção dos órgãos públicos.

Os **contaminantes orgânicos** também são avaliados no âmbito do PMBA/Fest, relacionados principalmente às atividades antropogênicas da bacia do Rio Doce, sem correlação direta com o rompimento da Barragem de Fundão, mas como sinalizadores do uso e ocupação da bacia. Entre os contaminantes orgânicos, observou-se uma tendência de redução das concentrações dos compostos fenólicos totais e dos hidrocarbonetos alifáticos para rios Guandu, Doce, lagos e lagoas. Entretanto,



valores elevados de **esteróis**, **PCBs (bifenilas policloradas)** e **HPAs (hidrocarboneto poliaromáticos)** acima do NOAA crônico, foram registrados durante o período chuvoso, em todos os ambientes monitorados (Rio Guandu, Rio Doce, lagos e lagoas). Outros contaminantes orgânicos de grande importância e impacto ambiental são os pesticidas, que historicamente são utilizados na bacia do Rio Doce, principalmente em culturas como hortaliças e café. Os teores de **pesticidas totais** aumentaram em todas as estações amostrais, em especial no período seco de abril a setembro de 2022. Os resultados revelam ambientes muito impactados com o uso do pesticida **DDT**, banido no Brasil pela LEI Nº 11.936, DE 14 DE MAIO DE 2009, com índices elevados de não conformidade (> 33,% a 100% das amostras), segundo CONAMA classe 2 e NOAA crônico em lagos, lagoas e rios. A presença desses pesticidas deve ser motivo de atenção.

Na análise dos resultados da biota aquática, consideramos a abordagem da organização trófica, por refletir não apenas a estrutura das comunidades, mas também por pontuar o arranjo básico do funcionamento de ecossistemas com base na funcionalidade e interações.

Em termos biológicos, os produtores primários, organismos-base da cadeia trófica – (perifíton, fitoplâncton e macrófitas aquáticas) – apresentaram tendência geral de aumento da **riqueza de espécies** na calha fluvial do Rio Guandu e Rio Doce, sobretudo nos sistemas lacustres (lagos e lagoas). Para o perifíton, em relação à contribuição das guildas de diatomáceas, foi verificado maiores contribuições médias na densidade de **diatomáceas móveis** em relação às **diatomáceas baixos perfil (BP)** para a maioria dos ambientes (rios, lagos, lagoas), excetuando no lago Juparanã, indicando melhor qualidade ambiental dos sítios amostrais. Na comunidade fitoplancônica os ambientes estudados vêm apresentando, ao longo de todo o monitoramento, padrão relativamente elevado de substituição de espécies, como reflexo da rápida dinâmica de resposta às variações ambientais. A **diversidade taxonômica** aponta para ambientes de médio a alto grau de estresse. A **composição de espécies** das macrófitas coletadas nos reservatórios não diferiu em relação à calha fluvial e sistemas lacustres, ambos com registros de espécies invasoras altamente competitivas. Entre os consumidores primários pelágicos (zooplâncton) foi observada maior variabilidade na **composição de espécies e traços funcionais** nos sistemas lóticos, indicando a perda de traços funcionais no Rio Guandu e no Rio Doce. Ainda na calha do Rio Doce, houve redução da **diversidade funcional** do zooplâncton com aumento da concentração de Fe, Zn e Al durante o período chuvoso. Para o ictioplâncton, outro grupo de consumidores primários pelágicos, o Rio Doce é a principal região de **desova de peixes e deriva** das larvas. Foi observada maior **abundância** de larvas durante o período chuvoso e registro de formas larvais de espécies nativas e introduzidas, com destaque para o Mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*), as Curimbas ou Grumatás do gênero *Prochilodus* e a Piranha-vermelha (*Pygocentrus nattereri*). Aspectos da **viabilidade funcional** do ictioplâncton revelaram 4 tipos de anomalias nas larvas de peixes: (i) RCA rompimento da cavidade abdominal, com 0,1% da densidade total de larvas registradas no estudo até o momento; (ii) SAC sedimento avermelhado aderido ao corpo com ocorrência de 30,3 % da densidade total; (iii) SCI sedimento avermelhado em cavidades internas como boca e intestino, com 0,4% da densidade total e (iv) DC deformidade na região da cabeça com 2,9%. Para o **SAC** e a **DC**, os registros mais abundantes foram anotados sobretudo durante o período chuvoso, confirmando

a influência marcante dos pulsos sazonais em vários processos estruturais dos compartimentos bióticos basais. Entre os consumidores primários bentônicos (macroinvertebrados), menor **riqueza taxonômica** e **abundância** ocorreu no Rio Doce, enquanto maiores valores foram observados nos tributários (P5 (Rio Guandu 1 – porção alta), P6 (Rio Guandu 2 – foz), P7 (Rio Santa Joana – foz), P8 (Rio Santa Maria do Rio Doce), P9 (Rio Pancas), P10 (Rio São José – Montante da Lagoa Juparanã), P11 (Rio São José – Jusante da Lagoa Juparanã) e P12 (Rio Manhuaçu). A espacialização da **abundância** e **riqueza** dos macroinvertebrados pode contribuir para o planejamento futuro de ações de restauração, visando a seleção de áreas prioritárias para conservação. Registra-se ainda dominância de formas indicadoras de impacto (coletores-catadores) dos macroinvertebrados nos trechos da calha do Rio Doce, indicativo da baixa qualidade ambiental do trecho.

Para a ictiofauna – predadores de topo da cadeia alimentar aquática – os resultados indicam que as **espécies introduzidas** apresentam picos de abundância significativamente maiores que as **nativas**, as quais mostram, ao longo dos quatro anos de monitoramento, um declínio em **abundância**, **riqueza** e **biomassa**. Todos esses fatores refletem uma grande vulnerabilidade da comunidade nativa frente às espécies introduzidas. A análise de **diversidade beta taxonômica** da ictiofauna revelou ainda que o desaparecimento de espécies é mais frequente que o incremento, e a contribuição de espécies nativas está mais relacionado a perda de espécies do que ao ganho. Por outro lado, as espécies introduzidas têm maior contribuição no aporte de espécies. Aparentemente, as espécies nativas encontram-se em declínio, como resultado do aumento de espécies predadoras introduzidas. Este padrão foi observado tanto para a calha como para os lagos, o que indica que toda a comunidade de peixes continentais do Baixo Rio Doce caminha para a simplificação. Em relação à **ecologia trófica**, as análises das assembleias de peixes mostraram que a dieta das espécies introduzidas é mais ampla, ou seja, as espécies não nativas consomem mais itens alimentares que as espécies nativas nos ambientes amostrados. Esse resultado pode explicar pelo menos parcialmente, a tendência à redução da abundância das espécies nativas na área amostral durante o monitoramento. As análises de **biologia reprodutiva** indicaram que as populações de peixes introduzidos estão mais equilibradas e mais sujeitas à seleção negativa dependente de frequência do que as espécies nativas nos lagos e Rio Doce (proporção sexual entre machos e fêmeas mais equilibrada em relação às nativas). Além disso, o cálculo do comprimento médio da primeira maturação (L50) permitiu estabelecer o forte recrutamento das espécies introduzidas: na calha, da Tilápia *Oreochromis niloticus* e Mandi-amarelo *Pimelodus maculatus* na calha principal do Rio Doce e nos lagos, dos Tucunarés *Cichla monoculus* e *Cichla kelberi*, do Jacundá *Crenicichla lepidota*, do Mato-Grosso *Hyphessobrycon eques*, do Pacu-CD *Metynnis lippincottianus* e da Piranha-vermelha *Pygocentrus nattereri*. Os estágios de maturação gonadal (EMG) nas espécies nativas e introduzidas, seguindo os seguintes critérios: 1= repouso, 2= maturação, 3= maduro e 4= espermiados para machos e desovados para fêmeas, indicam, pelo menos parcialmente, maior desempenho reprodutivo das espécies introduzidas em relação às espécies nativas na região do Baixo Rio Doce. A **relação gonadossomática (RGS)** de peixes pode refletir a qualidade ambiental, pois está diretamente ligada às reservas de energia disponíveis para reprodução, além de ser associada com maior número e diâmetro de folículos vitelogênicos. No geral, a RGS foi maior nas espécies introduzidas, evidenciando que esses peixes podem apresentar melhor condição

fisiológica e maior desenvolvimento gonadal. Desta forma, as espécies introduzidas confirmam seu desempenho oportunista e tolerante, tendo potencial de ajuste às condições ambientais preponderantes, incluindo plasticidade alimentar e maior potencial reprodutivo do que as espécies nativas.

A perda relativa de **diversidade filogenética** de comunidades de peixes nativos (21%) foi maior na comparação com a comunidade total (nativas + introduzidas; 16%), indicando que as espécies nativas foram as mais impactadas pelo rompimento da barragem. O significado desse resultado é que as espécies nativas, filogeneticamente e ecologicamente mais diferentes, estão desaparecendo, e sendo substituídas pelas espécies introduzidas e consequentemente a diversidade funcional das comunidades está sendo simplificada. Portanto, o aumento na biomassa das espécies introduzidas pode ser um dos fatores que contribuíram para essa perda de diversidade filogenética das espécies nativas, e isso pode ajudar a acelerar o processo de extinção local de algumas delas. Quando comparadas as comunidades de peixes do Alto e do Baixo Rio Doce, observa-se que a diversidade filogenética das assembleias de espécies nativas é 30% maior na região do Alto Rio Doce, em comparação com as do Baixo Rio Doce. A diferença passou a ser de 10% quando as espécies nativas e introduzidas foram consideradas em conjunto. Os resultados da comparação entre o Baixo e o Alto Rio Doce ajudam a reforçar a hipótese de que houve uma contribuição desproporcional das espécies introduzidas nas assembleias de peixes, principalmente do Baixo Rio Doce, as quais estariam iniciando um processo de substituição das espécies nativas daquela região.

Para a **Ecotoxicologia**, cabe destacar que não são apresentados neste documento, as concentrações de metais e As na água e sedimento e as correlações associadas a estes dados, bem como análises espaço-temporais que envolvem dados de bioacumulação de metais e As no músculo do pescado (peixes e camarões) em março de 2022 (período chuvoso) dados de bioacumulação de metais e As na biota (larvas de quironomídeos, plâncton, camarões e peixes) e respostas de biomarcadores, e análise da comunidade microbiana no período seco de setembro a outubro/2022. Tais análises encontravam-se suspensas por ordem da Fundação Renova até fevereiro de 2023. Por outro lado, os ensaios de toxicidade foram executados durante todo o período de monitoramento, devido ao prazo curto de validade das amostras e, portanto, são apresentados aqui até setembro/2022 (período seco). Cabe ressaltar que a partir de março/2022 (período chuvoso), estes ensaios passaram a ser executados por laboratório acreditado.

As análises registraram, no período chuvoso de 2022, os maiores níveis de bioacumulação de metais, com destaque para o As, Fe, Cr e Pb no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) nos setores Rio e Lagoas. Também se nota que os setores Lagos e Lagoas apresentaram os maiores valores de **IBR bioacumulação** quando comparados às campanhas anteriores, sugerindo um efeito sazonal, derivado possivelmente do maior aporte de água do Rio Doce para os ambientes lacustres adjacentes e/ou maior remobilização dos sedimentos durante o último período chuvoso, marcado por alto índice pluviométrico na região monitorada. Ainda, apesar da ausência de um padrão na **bioacumulação de metais** nos organismos-base da cadeia trófica (plâncton), ao longo do monitoramento, cabe destacar que os teores de Fe e outros elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Mn e Pb ainda são encontrados em níveis bastantes

elevados no zooplâncton coletado em todos os setores do ambiente dulcícola, quando comparados aos níveis obtidos para amostras de zooplâncton coletadas em novembro de 2015, na região marinha mais próxima à foz do Rio Doce, antes da chegada da pluma de rejeitos. Elementos como metais e As foram analisados em tecidos de camarões (brânquias e hepatopâncreas) e peixes onívoros e carnívoros (brânquias e fígado). Esses resultados evidenciaram um perfil de contaminação difuso, onde os diferentes elementos estiveram associados a diferentes localidades da malha amostral dulcícola. Com relação à contribuição dos diferentes **biomarcadores de exposição**, é notável o aumento de danos em sítios AP de DNA e a diminuição da atividade da NKA nas brânquias desses crustáceos durante o último período chuvoso. Também se destaca um aumento nos níveis de lipoperoxidação (LPO) no hepatopâncreas dos camarões do setor Lagos nas duas últimas campanhas (período seco de 2021 e período chuvoso de 2022), indicando uma intensificação temporal dos danos oxidativos em crustáceos destes ecossistemas lacustres. As **análises microbiológicas** revelaram importante alteração no perfil da comunidade no período chuvoso de 2022. Para amostras de água de superfície os grupos predominantes foram *Acinetobacter*, *Deinococcus*, hgcl e *Cyanobium* PCC-6307. *Deinococcus* é conhecido por ser um microrganismo extremófilo e suportar condições inóspitas para a maioria dos seres vivos (GUO et al. 2022), enquanto *Acinetobacter* possui múltipla resistência a metais pesados (MÉNDEZ et al. 2017). Estudos anteriores já correlacionam tal gênero com o rompimento da Barragem de Fundão (REIS et al. 2020). Para águas de profundidade o perfil foi mantido de acordo com o já observado em campanhas anteriores, conforme já apresentado em RRDM, 2022 - RT-39B. Em amostras de sedimento destacou-se a presença de *Exiguobacterium* e *Acinetobacter* em elevados níveis em estações da calha principal do Rio Doce, assim como Anaerolineaceae em amostras do setor Lagoas. Esses três grupos microbianos vêm sendo sugeridos como possíveis bioindicadores da presença de metais pesados e rejeitos da Barragem de Fundão. Os ensaios de toxicidade indicam aumento progressivo na toxicidade da água e sedimento amostrados no Rio Guandu e redução progressiva da toxicidade de ambas as matrizes amostradas no estuário do Rio Doce. O período seco de 2022 merece destaque, uma vez que houve aumento da toxicidade da água na calha do Rio Doce em Colatina e da água e sedimento coletados no estuário do rio. A classificação destas matrizes passou de não tóxicas a levemente tóxicas na última campanha amostral. Os períodos chuvosos de 2021 e 2022, foram marcados por chuvas intensas, o que pode ter certa contribuição na redução da carga tóxica do Rio Doce.

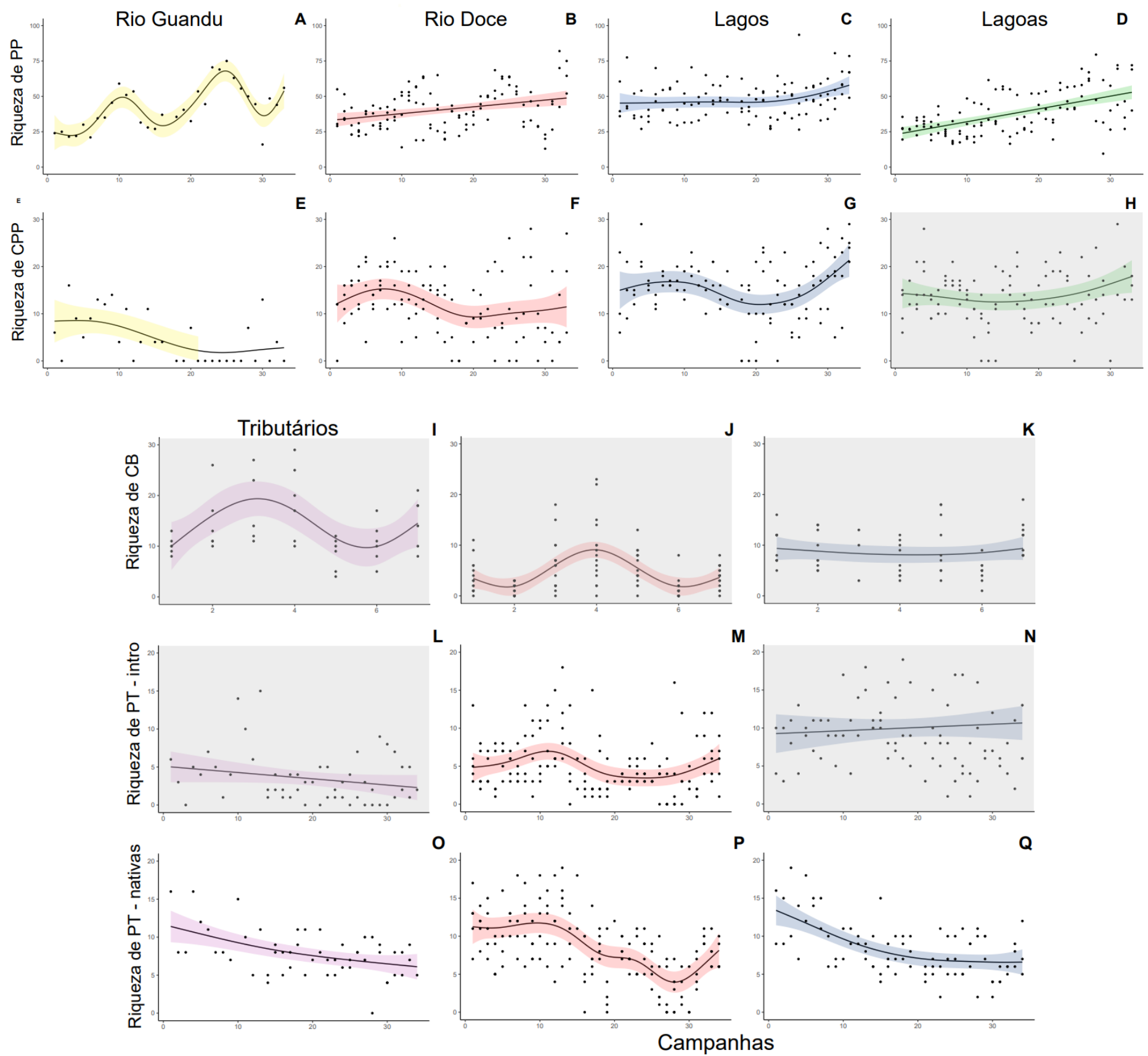
Para complementar a síntese de resultados, foram desenvolvidos, a partir dos dados disponíveis dos indicadores abióticos e bióticos, modelos para avaliação das principais tendências dos componentes tróficos dulcícola, em associação com os mais relevantes descritores limnológicos e geoquímicos do rejeito de minério de ferro, selecionados através da função *Ordistep*, nas análises de redundância (RDA). Além disso, foram utilizados modelos GAMM para analisar as tendências temporais da flutuação de espécies para cada nível trófico. Foi possível detectar que a riqueza dos produtores primários (fitoplâncton, perifíton e macrófitas aquáticas) apresentou aumento ao longo do tempo para todos os tipos de ambientes (rio Guandu  $F= 12,05$ ;  $p<0,001$ ; Rio Doce  $F= 12,65$ ;  $p<0,001$ ; lagos  $F=4,698$ ;  $p= 0,0149$ ; lagoas  $F=50,97$ ;  $p<0,001$ ), indicando que, apesar das grandes flutuações ambientais sazonais, os produtores basais mantiveram uma tendência de enriquecimento de espécies, embora ainda seja

precoce afirmar se o ganho de espécies se traduz em enriquecimento de traços funcionais e aprimoramento do funcionamento ecossistêmico. Os consumidores primários planctônicos (zooplâncton) apresentaram a mesma tendência temporal de aumento de riqueza (rio Guandu  $F=5,099$ ;  $p=0,011$ ; Rio Doce  $F=3,02$ ;  $p=0,014$ ; lagos  $F=5,919$ ;  $p<0,001$ ), com exceção das lagoas, onde não houve variação significativa. Os consumidores bentônicos (macroinvertebrados) não apresentaram resultados significativos, ou seja, não foi observada perda ou ganho de espécies ao longo do tempo, mesmo considerando os habitats de calha fluvial e tributários. Já para os predadores de topo, a ictiofauna de espécies introduzidas apresentou uma leve tendência de ganho de riqueza apenas para o Rio Doce ( $F=4,487$ ;  $p=0,001$ ), enquanto a ictiofauna nativa apresentou perda de riqueza de espécies ao longo do tempo em todos os tipos de ambientes (tributários  $F=10,99$ ;  $p=0,001$ ; Rio Doce  $F=15,28$ ;  $p<0,001$ ; lagos  $F=17,60$ ;  $p<0,001$ ) (

Figura 2. ).

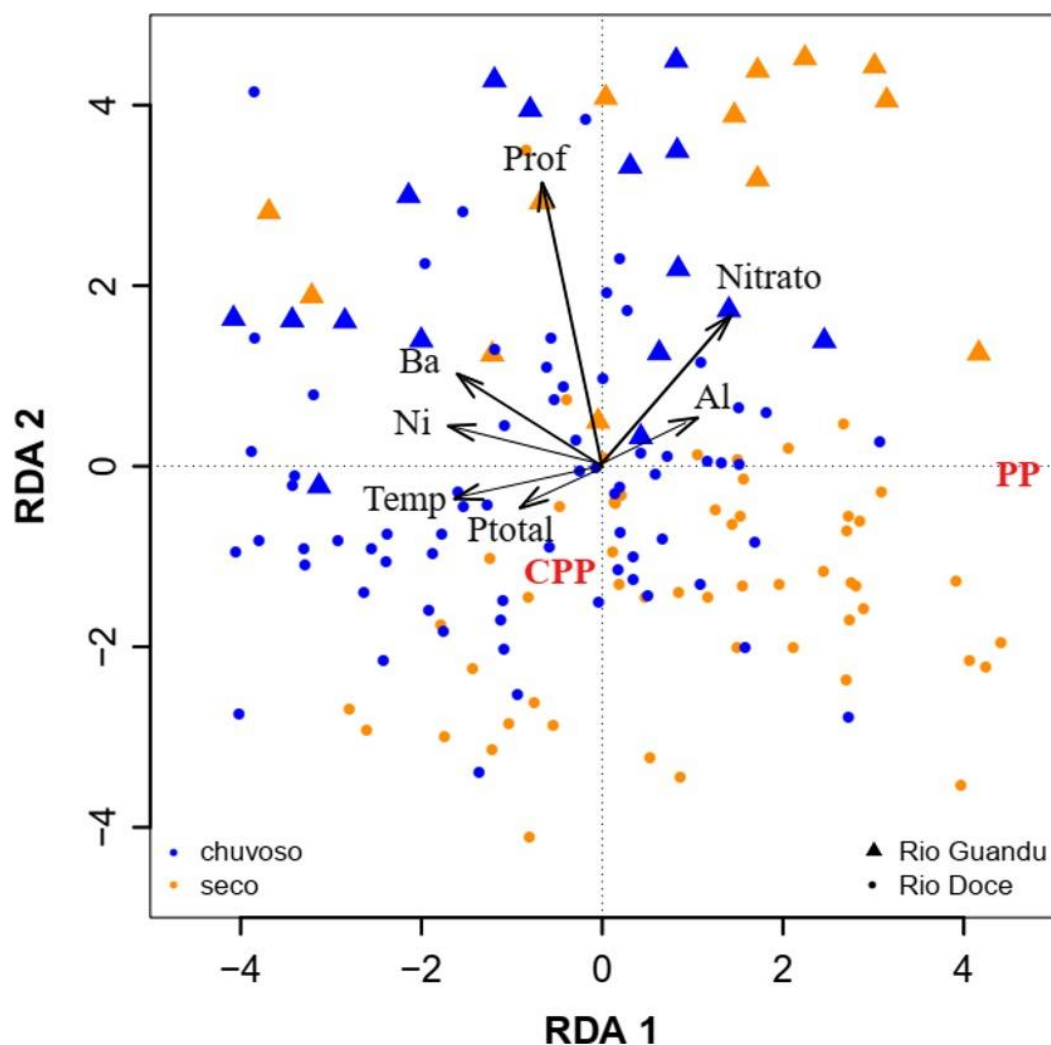


Figura 2. Curvas de suavização obtidas com modelos GAMM, mostrando flutuações temporais na riqueza de espécies nos produtores primários (PP - fitoplâncton, perifíton e macrófitas) (A-D), consumidores primários planctônicos (CPP- zooplâncton) (E-H), consumidores bentônicos (CB - macroinvertebrados) (I-K) e predadores de topo (PT) (ictiofauna introduzida, L-N e ictiofauna nativa, O-Q) ao longo dos 4 anos de monitoramento no baixo Rio Doce, considerando o Rio Guandu, Rio Doce, lagos e lagoas. As linhas sombreadas indicam o intervalo de confiança dos dados  $\pm 95\%$ . Os fundos em cinza representam os modelos que não foram significativos. Amarelo – Rio Guandu; vermelho– Rio Doce; azul – lagos; verde – lagoas e lilás - tributários.



Em busca das relações entre os padrões temporais da riqueza de espécies dos indicadores bióticos basais da cadeia alimentar (produtores primários e consumidor primário planctônico) e os indicadores abióticos selecionados pelo critério de *Ordistep* foi realizada uma análise de redundância (RDA). A análise de ordenação RDA para os consumidores primários pelágicos (ictioplâncton) não foi significativa e por isso não incluída na representação. Foi encontrada uma maior associação entre os metais Al, Ba e Ni à condição sazonal de chuva. A riqueza de produtores primários (PP) e consumidores primários planctônicos (CPP) (zooplâncton) nos ambientes fluviais foi significativa para o eixo 1 ( $p = 0,001$ ) e explicou 34% da variação dos dados, evidenciando uma maior concentração de metais dissolvidos, como Ba, Ni e Al, no período chuvoso, além de maiores valores de profundidade, temperatura e nutrientes (fósforo total e nitrato) nesse mesmo período hidrológico. Houve uma relação inversamente proporcional entre os PP e CPP com a maior abundância de metais, sobretudo no período chuvoso. Os maiores valores de riqueza nos ambientes fluviais ocorreram com as menores concentrações dos contaminantes (Figura 3).

Figura 3: Ordenação da análise de redundância (RDA) entre amostras, variáveis ambientais e riqueza de espécies de PP (produtores primários) e CPP (consumidores primários planctônicos) para os períodos chuvoso e seco nos ambientes lóticos (Rio Guandu e Rio Doce). Temp= temperatura, Ni=níquel, Ba=bário, Prof=profundidade, Al=alumínio, Ptotal=fósforo total.

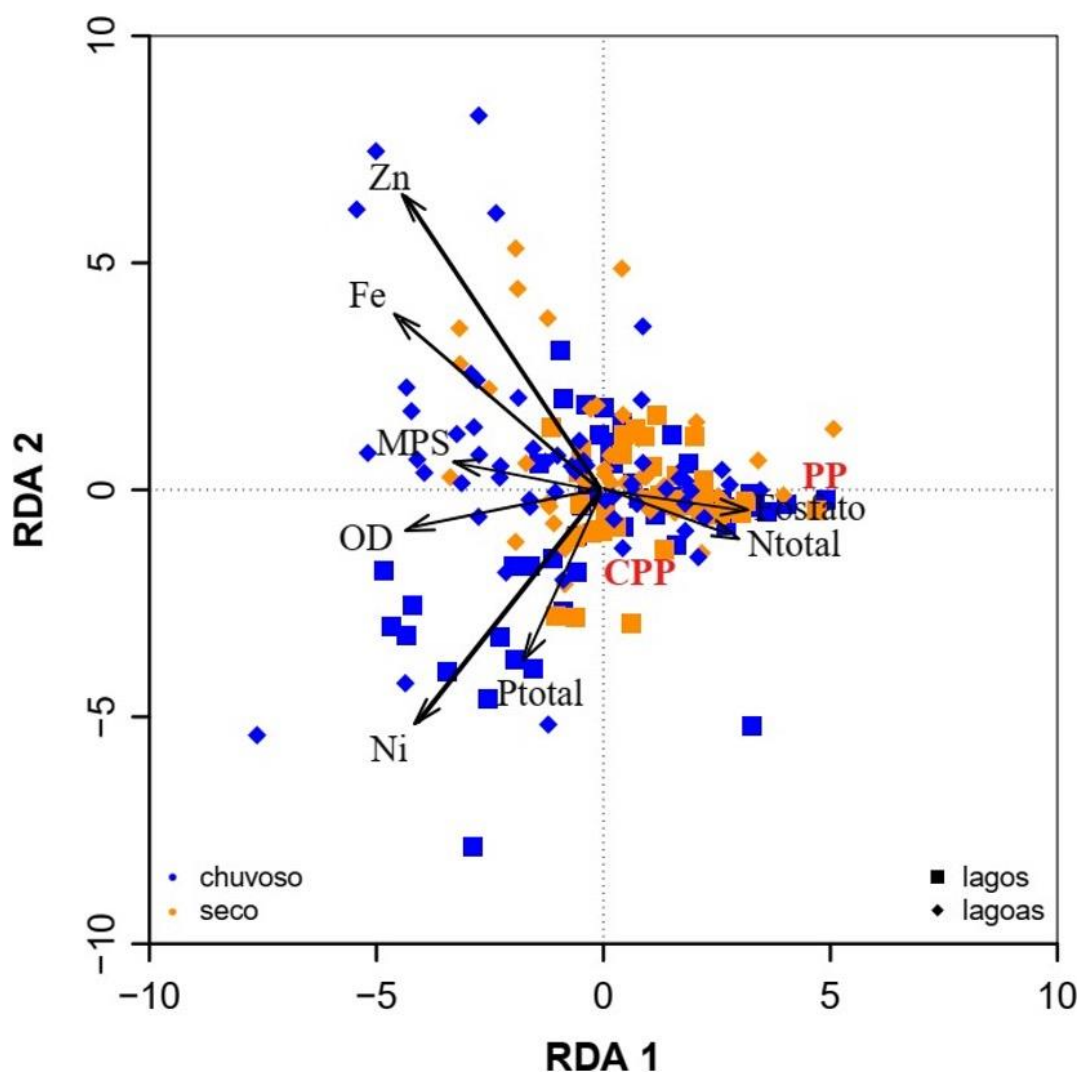


Para os ambientes lênticos (lagos e lagoas), a análise de redundância da riqueza de produtores

primários (PP) e consumidores primários planctônicos (CPP) foi significativa para o eixo 1 ( $p = 0,001$ ) e explicou 22% da variação total dos dados, apontando também para maior concentração de metais dissolvidos no período chuvoso, com valores elevados de Fe, Ni e Zn. Nesse mesmo período também foram observadas grandes concentrações de oxigênio dissolvido (OD), material particulado em suspensão (MPS) e fósforo total (P total). Tanto os PP quanto os CPP apresentaram maiores valores de riqueza no período seco, onde esses metais apresentaram suas menores concentrações. Além disso, os PP estiveram altamente relacionados a elevadas concentrações de fosfato e nitrogênio total durante o período seco (Figura 4:

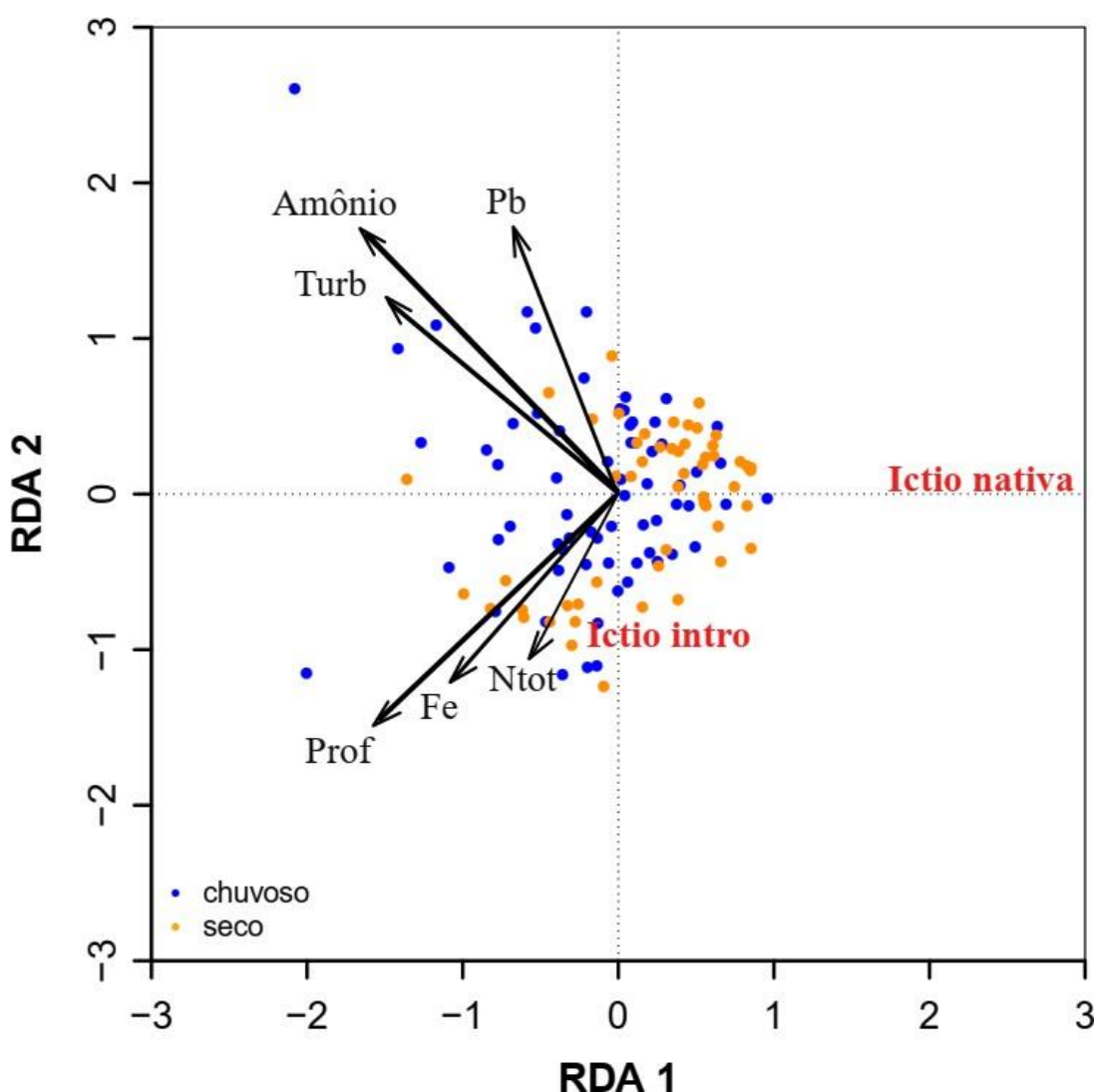
Figura 4: Análise de Redundância (RDA) entre amostras, variáveis ambientais e riqueza de espécies de PP (produtores primários) e CPP (consumidores primários planctônicos) para os períodos chuvoso e seco nos ambientes de lagos e lagoas.

OD=oxigênio dissolvido, Ni=níquel, Ptotal=fósforo total, MPS=material particulado em suspensão, Fe= ferro, Zn=zinco, Ntotal=nitrogênio total.



A análise de ordenação RDA para os consumidores bentônicos (macroinvertebrados) não apresentou resultados significativos. Para os predadores de topo (ictiofauna) a RDA foi realizada apenas para os ambientes fluviais, e explicou 20% da variação dos dados, com apenas o eixo 1 sendo significativo ( $p = 0,001$ ). A análise de ordenação sugeriu uma distinção clara entre os fatores categóricos analisados e também evidenciou maiores concentrações de metais no período chuvoso, com elevadas concentrações de ferro e chumbo, além de altos valores de turbidez, amônio, nitrogênio e profundidade principalmente durante esse período. A riqueza de espécies da ictiofauna introduzida se manteve relacionada a menores valores dessas variáveis e a de espécies nativas se mostrou ainda mais negativamente relacionada a elevados valores dessas variáveis. Os resultados da análise de redundância confirmam o pressuposto que as espécies introduzidas de peixes apresentam características oportunistas, podendo ser mais tolerantes a cenários adversos, tendo potencial de adaptação às condições ambientais mais impactantes (Figura 5).

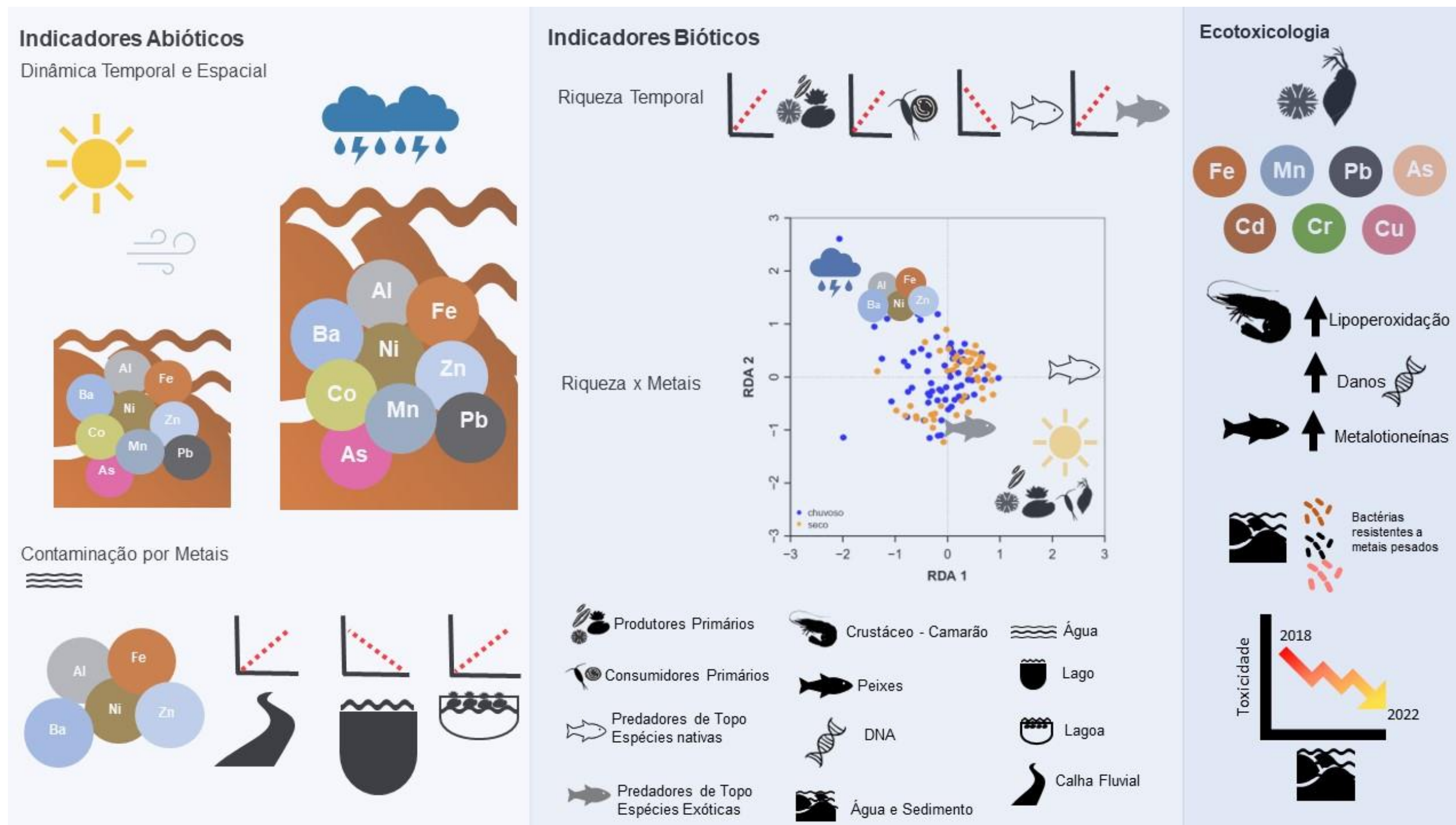
Figura 5: Análise de Redundância (RDA) entre amostras, variáveis ambientais e riqueza de espécies de predadores de topo: ictiofauna introduzida (Ictio intro) e ictiofauna nativa (Ictio nativa) para os períodos chuvoso e seco nos ambientes fluviais. Prof=profundidade, Fe= ferro, Ntot=nitrogênio total, Turb=turbidez, Pb=chumbo.





## 2.1.5 Síntese gráfica

Figura 6: Síntese gráfica dos resultados do Ambiente Dulcícola



### 2.1.6 Perspectivas e considerações

As considerações são necessárias buscando esclarecer as tendências gerais sobre a evolução dos indicadores, dentro do recorte temporal em que são avaliados os impactos no Baixo Rio Doce.

Os dados gerais apontam para algumas tendências cristalinas em termos de impactos nos ecossistemas aquáticos do Rio Doce, especialmente em relação aos elevados índices de não conformidade para metais na água e sedimento, a presença de contaminantes (metálicos e orgânicos) em concentrações acima dos limites de normas nacionais e internacionais, os índices de bioacumulação de metais, que decifram as rotas tróficas que unem os compartimentos bióticos e abióticos dos ecossistemas, além dos danos moleculares verificados em níveis basais e superiores da cadeia alimentar (invertebrados e peixes). As ferramentas analíticas de bioacumulação são imprescindíveis ao monitoramento do Rio Doce, dada a natureza complexa dos contaminantes presentes nas matrizes água e sedimento e seus impactos potenciais para a saúde da biota aquática e humana.

A supressão de espécies nativas de peixes e crescente abundância das espécies introduzidas é um resultado claro de impacto no ambiente, sendo o contexto histórico desse processo de transformação da comunidade piscívora inegavelmente associado ao uso e ocupação da bacia e múltiplas ações antrópicas. Entretanto, há fortes indícios de que as espécies nativas de peixes são muito mais afetadas pela presença de contaminantes, enquanto as espécies introduzidas continuam a colonizar (e dominar) os ambientes alterados. Esse resultado fortalece a concepção que impactos históricos podem ser retroalimentados e potencializados por impactos contemporâneos, tornando-se então, eventos indissociáveis.

Algumas ponderações importantes devem ser feitas sobre a evolução positiva (aumento de riqueza de espécies) dos níveis tróficos basais da cadeia trófica dulcícola (produtores primários e consumidores) que podem indicar sinais de maior disponibilidade de recursos. É esperado que o processo de sucessão de um ambiente impactado seja guiado pela recuperação dos constituintes basais da cadeia trófica. Entretanto, devido à maior plasticidade ecológica dos organismos basais da cadeia alimentar, e os ciclos de vida rápido, o aumento da riqueza de espécies pode também estar associada a espécies mais resistentes. Como esforço futuro sugerimos a inclusão de traços funcionais nas análises dos indicadores bióticos, uma vez que a abordagem funcional tem se revelado uma ferramenta mais robusta na descrição de respostas em comunidades biológicas afetadas por variações abruptas do ambiente.

A evolução do monitoramento traz também a necessidade de alguns ajustes metodológicos, como a inclusão de novos sítios amostrais importantíssimos ao entendimento da dinâmica hidrológica e de materiais e contaminantes. A inclusão dos reservatórios de Aimorés e Mascarenhas na malha amostral, constitui um ajuste metodológico fundamental ao monitoramento, considerando as características de retenção de materiais características destes ecossistemas artificiais. As quatro estações amostrais da calha do Rio Doce no Baixo Rio Doce não abrangem as condições estuarinas da foz, onde a salinidade da água em condições de baixa vazão fluvial pode favorecer processos geoquímicos de adsorção e solubilização de elementos químicos como nutrientes e metais (Bianchi, 2007). Para solucionar isso, a



estação amostral E22 foi reposicionada para área de remanso na foz do Rio Doce visando a avaliação dos processos geoquímicos sob condições estuarinas na calha do Rio Doce. Foi incluída ainda uma estação na região de Resplendor (MG) para avaliação de possíveis influências das represas de Aimorés e Mascarenhas na retenção de MPS, nutrientes e metais para jusante. Seria interessante considerar os dados morfométricos das bacias lacustres, o que demanda o levantamento batimétrico dos Lagos do Limão e Juparanã, além das lagoas Areão, Areal e Monsarás. A morfometria dos Lagos Nova e Palmas está disponível em Gonçalves et al. (2016) e Barroso et al., (2014), respectivamente. Além do levantamento batimétrico seria interessante incluir pelo menos mais duas estações amostrais com escopo amostral simplificado, considerando parâmetros selecionados, ao longo do eixo das bacias lacustres Palmas, Nova, Juparanã e Monsarás. Em relação à frequência amostral foi dada ênfase ao período chuvoso, em função dos resultados obtidos, especialmente devido à correlação da vazão com o MPS, turbidez e  $P_{total}$  e metais, com amostragens mensais, sendo o período seco do ano monitorado em amostragens bimensais.

## 2.2 AMBIENTE MARINHO

Os ambientes marinhos são reconhecidamente ecossistemas sensibilizados, com sua capacidade de resistência e resiliência alterada por ações antrópicas locais, regionais e globais. Eventos de grande magnitude, como o rompimento da Barragem de Fundão, podem perturbar ambientes já sensíveis, como a região costeira do Espírito Santo, em níveis nos quais a recuperação do ambiente se torna mais desafiadora. As mudanças provocadas por esses impactos afetam tanto as condições abióticas, quanto as comunidades bióticas da região, em todos os níveis hierárquicos, desde produtores primários à predadores de topo e decompositores, além de afetar processos ecossistêmicos, com a ciclagem de nutrientes. É importante ressaltar que mudanças nas dinâmicas e estruturas ecológicas de uma região podem afetar os serviços ecossistêmicos. Na região marinha do Espírito Santo, um dos importantes serviços ecossistêmicos é o fornecimento de pescado, atividade que sustenta as comunidades de pescadores e movimenta a economia local. Neste contexto, considerando uma série de indicadores definidos com base na literatura e o poder de avaliação das variáveis analisadas durante os quatro anos de monitoramento do PMBA/Fest, a presente síntese destaca as principais variações espaço-temporais e impactos no ambiente marinho.

### 2.2.1 Indicadores

Os indicadores utilizados na construção da síntese do ambiente marinho abrangem diferentes escalas hierárquicas, desde marcadores mineralógicos e geoquímicos do sedimento e da água, até características biológicas como estrutura genética, fisiologia, populações, comunidades e comportamento dos organismos, de forma a permitir uma descrição integrada da dinâmica e variação da biodiversidade aquática do ambiente marinho afetado pelo rejeito de mineração proveniente da bacia do Rio Doce. Os indicadores foram selecionados com base na experiência da equipe responsável por cada tema, e representam o atual entendimento sobre as melhores variáveis que destacam as informações de relevância para o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, aprimorando a apresentação dos resultados, interpretações e conclusões do monitoramento. É importante destacar que os indicadores aqui utilizados estão em constante processo de avaliação e, à luz de novos dados, resultados e conclusões, eles podem ser alterados, substituídos, ou novos indicadores podem ser sugeridos, sem comprometimento para as descrições apresentadas na presente síntese.

#### **Abióticos**

**Turbidez e Material Particulado em Suspensão (MPS):** A turbidez é um indicador direto da concentração de sedimentos em suspensão que, por sua vez, é um indicador indireto da presença do rejeito oriundo do rompimento da barragem no ambiente. Este indicador pode ser avaliado em escala regional, por meio de imagens de satélite, e podem ser utilizados para o entendimento do efeito causado por variações nas condições meteoceanográficas. O MPS é uma medida direta e local do quanto de material está sendo aportado pelo rio, auxiliando na compreensão dos processos de dispersão do sedimento.

**Assinatura do rejeito:** A razão isotópica entre estrôncio e neodímio, juntamente com as concentrações desses elementos, permitem estabelecer curvas de mistura sedimentar em configurações binárias ou ternárias de forma a inferir as contribuições relativas dos diferentes termos-fonte sedimentares postulados. Desta forma, a análise dos sedimentos armadilhados, quando comparados com o modelo de mistura, permitem avaliar quantitativamente a presença de material decorrente da foz do Rio Doce, cuja assinatura foi previamente determinada.

**Qualidade da Água e Sedimentos:** as variáveis geoquímicas da água e do sedimento são avaliadas a partir da aplicação de índices de qualidade de água para cada matriz, levando em consideração os metais (As, Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V, Zn) e os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (Benzo(a)-anthracene - BaA; Benzo(a)pyrene - BaP; Benzo(b)fluoranteno - BbF; Benzo(k)fluoranteno - BkF; Criseno - Chry; Dibenzo(a,h)anthraceno – DahA), bem como o incremento da água em nutrientes (nitrogênio total, fósforo total, nitrito, nitrato, n-amoniacal, sílica e ortofosfato dissolvidos).

### **Bióticos**

Diferentes níveis tróficos são representados pelos indicadores da biodiversidade aquática que são utilizados no PMBA/Fest.

**Produtores Primários:** nos ambientes marinhos, as algas são os principais produtores primários e base de muitas cadeias tróficas. A avaliação deste grupo é feita com a avaliação da diversidade e saúde do fitoplâncton, especialmente relacionado com a coluna d'água, e com a cobertura de macroalgas, principalmente nos ambientes recifais. Além de funcionarem como bioindicadoras de estressores ambientais, as alterações na estrutura das comunidades de algas podem auxiliar no entendimento de possíveis alterações em outros níveis tróficos, pelo efeito cascata.

**Consumidores Primários Pelágicos e Consumidores Bentônicos:** Os consumidores primários pelágicos avaliados estão relacionados ao plâncton da coluna d'água (zooplâncton e ictioplâncton), sendo avaliadas variáveis relacionadas a diversidade (riqueza de espécies, índices e composição da comunidade) e abundância, além da viabilidade de ovos (apenas para ictioplâncton). No componente bentônico, são avaliados a estrutura da comunidade por meio de sua abundância e diversidade.

**Consumidores de topo de cadeia:** São entendidos como consumidores de topo de cadeia, apesar da grande variabilidade trófica dentro de cada grupo, os peixes, crustáceos (camarões e caranguejos), e a megafauna (tartarugas, cetáceos e aves). Esses grupos são avaliados pela sua diversidade genética, estrutura populacional, indicadores de saúde (doenças, condição corporal, hemogramas), nicho isotópico (indicador de qualidade de recursos alimentares), modificações em padrões de mortalidade (para cetáceos).

### **Ecotoxicologia**

Os indicadores ecotoxicológicos inferem sobre a acumulação de contaminantes e da resposta dos organismos a sua toxicidade. Os índices utilizados como indicadores são o Índice de Bioacumulação (avalia a concentração dos diferentes metais analisados nos organismos), Índice de Resposta Biológica (avalia os marcadores das respostas biológicas nos organismos) e o Índice de Toxicidade (avalia a

toxicidade por meio de bioensaios padronizados). Ainda, indicadores microbianos são utilizados para determinação da presença da presença de metais pesados e rejeito de mineração por meio da abundância relativa de grupos bacterianos específicos.

### **2.2.2 Destaques**

1. De forma geral, considerando as avaliações nos compartimentos água, sedimento e biota, além da toxicidade, o Setor Foz pode ser classificado com o mais impactado, seguido dos Setores Norte e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz. O setor Abrolhos, apesar de indícios da presença do rejeito e de efeitos na biota, é considerado o menos impactado. A descrição dos setores será apresentada no item Contextualização do Ambiente.
2. A ressuspensão do material lamoso depositado no fundo marinho, causado pela diminuição da resistência de mobilidade do sedimento e pelo aumento de energia de ondas, é o principal responsável pelas piores condições ambientais durante o ano (no período seco). Apesar disso, o aporte do Rio Doce, especialmente os eventos hidrológicos mais intensos (período chuvoso), ainda está relacionado com o impacto em diversas comunidades biológicas e na toxicidade do ambiente.
3. Há indicativos da melhora da qualidade da água ao longo do monitoramento do PMBA/Fest, apesar da piora durante os períodos secos. Os padrões sazonais de qualidade da água são semelhantes aos da comunidade produtora primária (fitoplâncton), porém as comunidades em níveis tróficos superiores têm efeitos negativos mais evidentes durante o período chuvoso, podendo indicar um atraso na resposta (por questões de transferência trófica) ou pela biodisponibilidade dos componentes contaminantes em cada período.
4. Grandes animais, como peixes, cetáceos, aves marinhas e tartarugas podem ser considerados altamente impactados, tanto pela diminuição da diversidade genética e saúde, passando por alterações em suas populações e padrões reprodutivos, quanto pela concentração de metais e outros contaminantes nos tecidos.
5. De forma geral, o compartimento sedimento, ao contrário do compartimento água, não apresenta evidências de melhora de sua qualidade ao longo do tempo, refletindo em efeitos negativos constantes ao longo do monitoramento em comunidades bentônicas. A deposição e recirculação do sedimento, além do aporte fluvial de novo material, contribuem para a manutenção das condições observadas.

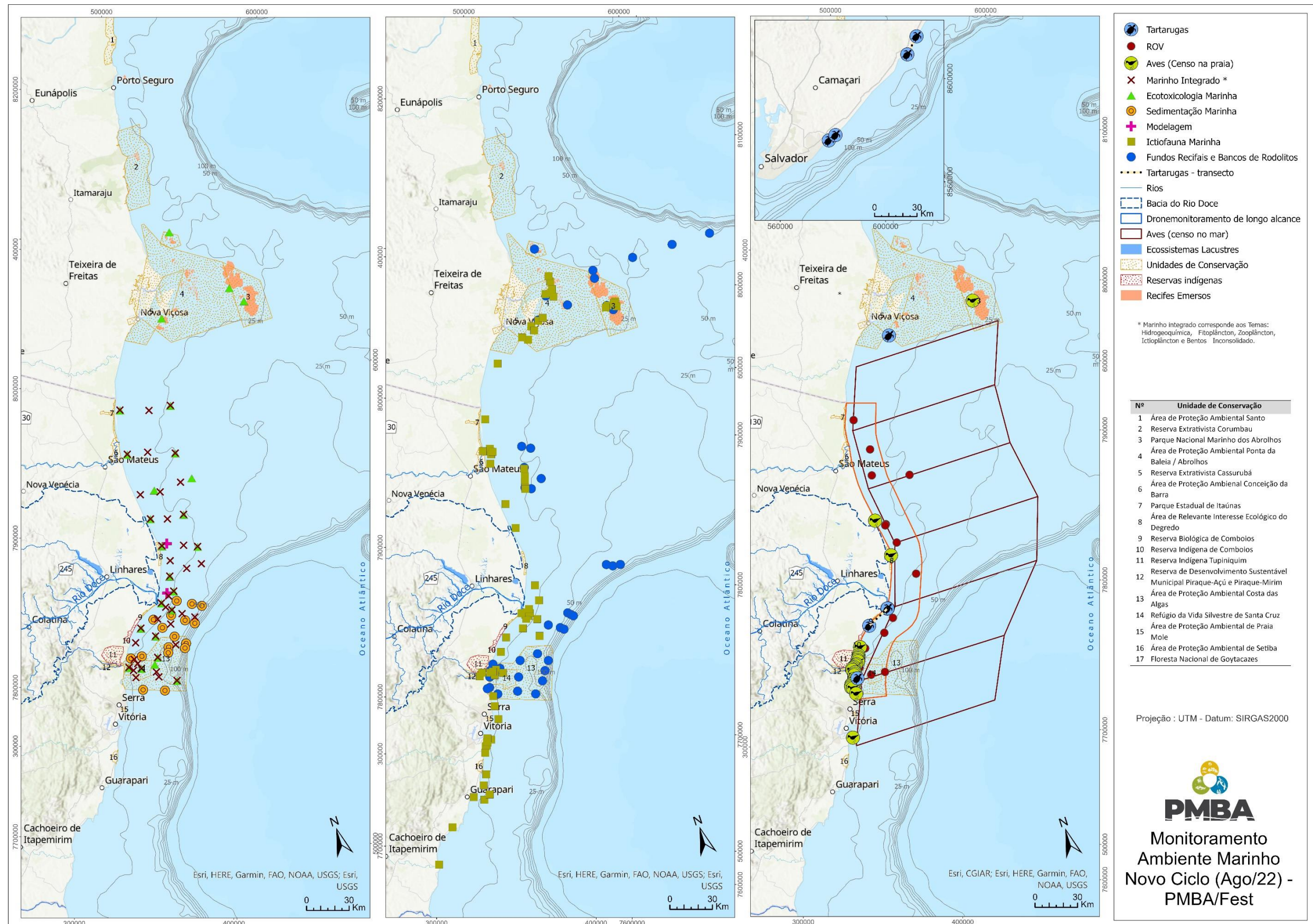
### **2.2.3 Contextualização do ambiente**

O ambiente marinho do PMBA/Fest engloba uma extensa área costeira, desde o Sul do Espírito Santo (Marataízes) até o Sul da Bahia (Caravelas), áreas ao sul e ao norte da Foz do Rio Doce, respectivamente. Os estudos dos temas no PMBA/Fest, contudo, são heterogêneos em termos de extensão e área abrangida. Isto porque há diferenças entre os métodos de estudo dos diferentes organismos e variáveis estudadas, o que reflete em diferentes logísticas de coleta. Os temas com possibilidade de coletas integradas espacialmente e temporalmente foram unificados e definidos setores de coleta, cada qual com suas estações amostrais. Esses setores são (1) Foz (região logo à

frente da foz do Rio Doce e áreas adjacentes ao sul e ao norte); (2) Norte (região que vai desde Degredo, em Linhares/ES, até Itaúnas, em Conceição da Barra/ES); (3) APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (região ao sul da foz do Rio Doce, em Aracruz/ES); e (4) Abrolhos (região do Parque Nacional Marinho de Abrolhos e regiões adjacentes, no Sul da Bahia). De modo a padronizar e integrar os principais resultados, a presente síntese traduziu as regiões de coleta de outros temas que originalmente não tratavam essas regiões conforme os setores apresentados, sempre mantendo a referência da malha amostral original.



Figura 7: Malha amostral do Ambiente Marinho que está em vigência no momento da entrega do relatório.





#### 2.2.4 Distribuição espacial e temporal dos indicadores de impactos

A variabilidade espaço-temporal dos indicadores de impacto propostos pelos Temas do Ambiente Marinho no âmbito do PMBA/Fest vem sendo compreendida a partir do entendimento sobre a dinâmica das forçantes oceânicas e atmosféricas que condicionam o aporte, a dispersão e a sedimentação de materiais particulados e dissolvidos no ambiente marinho ao largo da área impactada pela chegada do rejeito, além do estudo da dinâmica da biodiversidade que ocorre nos ecossistemas marinhos, contemplando desde produtores primários a consumidores de topo de cadeia.

Dentre as diversas forçantes que atuam na região marinha adjacente à foz do Rio Doce, **o papel da vazão fluvial e da energia associada às ondas de gravidade superficiais vem sendo destacado ao longo do PMBA/Fest**, principalmente devido ao seu padrão sazonal. Este padrão é caracterizado por aumento na vazão fluvial nos períodos chuvosos e aumento da energia associada as ondas no período seco. Ao longo dos quatro anos de monitoramento, houve aumento no volume de água aportado na plataforma continental pelo Rio Doce durante os períodos chuvosos (outubro a março), mas com tendência de contaminação constante por metais associados ao rejeito. (ver Síntese do Ambiente Dulcícola). Durante este período, os eventos hidrológicos do Rio Doce nos quais a **vazão fluvial** supera 1.742 m<sup>3</sup>/s, atingindo as condições de Alta Vazão e de Inundação, são os principais momentos em que há acréscimo da descarga sedimentar do rio na região costeira. Durante a estação chuvosa, a pluma do Rio Doce é direcionada preferencialmente para Sul-Sudoeste (S-SO) paralelamente à costa, devido à ocorrência majoritária de ventos Norte-Nordeste (N-NE), correntes S-SO e o gradiente termohalino resultante da ressurgência costeira que se desenvolve na região. Consequentemente, a dispersão desta pluma atuou diretamente no aumento da **turbidez** (tanto na superfície quanto na coluna d'água) e na concentração de **Material Particulado em Suspensão (MPS)**, e na redução da **salinidade superficial** observados no Setor Foz (subsetores Foz Central e Sul) e na APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz ao longo de todo o monitoramento.

O período seco, que ocorre de abril a setembro, é tipicamente caracterizado pela redução da vazão e pelo aumento da frequência da passagem de sistemas transientes. A passagem destes sistemas na região envolve inversões na direção dos ventos (Sul-Sudeste – S-SE) e das correntes (N-NE) que direcionam o aporte fluvial do Rio Doce para o Setor Foz (Central e Norte) e Setor Norte como um fluxo estreito fluindo junto à costa, além de causar o aumento da energia de ondas (altura significativa de ondas superior a 1,5 m), promovendo a ressuspensão de sedimentos do fundo marinho que eleva a turbidez e a concentração de MPS na coluna d'água e no fundo. A concentração de MPS ao longo do PMBA/Fest apresentou uma redução em comparação à fase aguda do impacto (2015 e 2016), porém permaneceu maior do que os valores de referência pré-Rompimento da Barragem e apresentou aumento ao longo dos anos nos Setores Foz e Norte (Itaúnas e Barra Nova) e nas estações rasas da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz. Além disso, foram observados picos de MPS relacionados aos eventos hidrológicos do Rio Doce e de aumento da energia das ondas durante todo o monitoramento.

Uma vez que as correntes de maré apresentam o **transporte residual** para norte (assimetria de maré apresenta-se preferencialmente positiva, favorecendo o domínio das correntes de enchente) e que a deriva litorânea na região ocorre essencialmente de sul para o norte (resultado da frequência direcional das ondas e maiores magnitudes durante os meses de inverno), a captura de sedimentos (tanto os da pluma do Rio Doce quanto os da ressuspensão dos depósitos lamosos da plataforma) por essas correntes costeiras é o processo mais relevante de transporte de sedimentos para as imediações do Banco de Abrolhos. O depósito espacial desse material, contudo, não é homogêneo na região. As análises dos sedimentos armadilhados evidenciaram regionalidades nos padrões de impactos na coluna d'água do Setor Abrolhos. As amostras do Arco Interno, próximas a costa, foram as que mais corresponderam à vazão do Rio Doce, ou seja, quando a vazão aumentou/reduziu, houve um respectivo aumento/redução da contribuição isotópica do Rio Doce nos sedimentos. Por outro lado, no Arco Intermediário houve uma influência mais constante do sinal isotópico do Rio Doce ao longo do monitoramento. No Arco Externo, o sinal isotópico do Rio Doce e os valores de excessos Fe nos sedimentos (em comparação aos testemunhos sedimentares coletados próximos a foz do rio Caravelas anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão) foram, no geral, menores que nos sedimentos dos Arcos Interno e Intermediário. Isto implica em menor aporte de material sedimentar do Rio Doce em regiões mais afastadas da costa no Setor Abrolhos.

Os **indicadores de qualidade da água do ambiente marinho** mostram que o Setor Foz é o que possui a pior qualidade de água dentre os setores, seguido pelos Setores Norte e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e, por fim, o Setor Abrolhos, que se mostrou pouco alterado em relação aos valores de referência utilizados nos cálculos hidrogeoquímicos. Apesar da contaminação ainda ser evidente, os resultados mostraram tendência de melhora das condições da coluna d'água ao longo do tempo em relação às concentrações de nutrientes e metais a partir do Ano 3 do PMBA/Fest. Os padrões sazonais de resposta, contudo, são diferentes de acordo com o indicador utilizado. Foi observada diminuição da qualidade da água em relação à contaminação por **Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs)** ao longo do PMBA/Fest, principalmente nos períodos chuvosos, indicando possível origem da bacia do Rio Doce. Em relação aos nutrientes, é observada a tendência de restabelecimento das **concentrações de nutrientes** a valores similares ao pré-Rompimento da Barragem a partir do Ano 3, com aumento sazonais durante o período Seco. No período seco são registradas as maiores contaminações por **metais** na coluna d'água, sugerindo um retrabalhamento do sedimento na plataforma continental e disponibilização destes elementos para a água. Os metais que tiveram as maiores concentrações detectadas na água foram As, Fe, Cd, Mn, Pb, Ni e Zn. Outro indicador importante na avaliação da qualidade da água são os compostos orgânicos nitrogenados, que estão presentes em floculantes a base de aminas utilizadas em barragens de rejeito. Estes compostos são observados ao longo de todo monitoramento, com concentrações ainda elevadas durante o período seco do Ano 4 (porém em menores quantidades do que os registrados logo após a chegada do rejeito à costa). Apesar de ter sido observado aumento significativo dos compostos orgânicos nitrogenados ao longo do monitoramento, não é possível fazer uma relação direta com o rejeito devido à ausência de dados comparativos pré-Rompimento da Barragem, mas a permanência de níveis elevados destes

compostos ressalta a importância do acompanhamento da sua dinâmica no ambiente marinho em virtude da sua utilização nas atividades de mineração da bacia do Rio Doce.

A tendência avaliada pelos índices de qualidade de água é corroborada pelos **testes de toxicidade** da água, por meio de bioensaios com larvas de ouriço e copépodes. Os resultados dos testes sugerem que o efeito de toxicidade na biota reduziu no Ano 4 e alcançou os níveis mais baixos de todo o monitoramento, tanto para os pontos do Setor Foz quanto para o ponto em Degredo, no Setor Norte. A compreensão dessa resposta em nível biológico, complementar à avaliação do componente abiótico, é importante dada a capacidade de resposta integrativa dos organismos a impactos diretos e indiretos (Karr, 2006), além de ser possível o entendimento dos impactos em diferentes níveis hierárquicos da ecologia (e.g. indivíduo, população, comunidade) e processos relacionados (e.g. produtividade primária). Nota-se, portanto, que os resultados indicam que o efeito tóxico da água do ambiente marinho tende a diminuir nos organismos modelos, ao longo do período do PMBA/Fest, considerando os níveis mais basais de ação dos contaminante (fisiológicos e metabólicos). Respostas semelhantes em nível de populações, comunidades e processos ecológicos são esperadas dadas as relações diretas dos organismos com as condições ambientais e de forma indireta quando tratamos da transferência de matéria e energia pelas teias tróficas (Milyukin & Goncharuk, 2019; Leach et al., 2023). A sincronicidade entre as respostas dos diferentes níveis hierárquicos/tróficos ao aumento ou diminuição dos níveis de contaminantes na água (e também no sedimento), entretanto, pode não ser igual para todos os grupos estudados no PMBA/Fest, uma vez que há diferenças em diversos aspectos, como o ciclo de vida, nível trófico e comportamento. O intervalo de tempo de resposta entre esses grupos não deve ser visto como uma desvantagem, uma vez que é possível avaliar respostas as mudanças ambientais em curto, médio e longo prazo.

O **fitoplâncton** é o principal produtor primário dos ecossistemas aquáticos marinhos, especialmente quando considerado a coluna d'água. A resposta desse grupo é relativamente rápida, comparada com outros grupos de maior tamanho, apresentando padrões de qualidade ambiental similares àqueles mostrados pelos indicadores abióticos da água. Em geral, houve um aumento da **abundância** fitoplanctônica durante os eventos hidrológicos do Rio Doce, e uma diminuição da **diversidade** e da **saúde fisiológica** da comunidade durante os períodos secos, especialmente no Setor Foz, possivelmente relacionados com os aumentos de nutriente e metais nesse período. De fato, nesse setor houve uma resposta evidente (bioacumulação) da comunidade planctônica (considerando tanto o fitoplâncton e quanto o zooplâncton) à exposição aos metais durante o período chuvoso do Ano 4, com os níveis médios de Fe mais elevados registrados em todo o monitoramento. Este período, juntamente com período Chuvoso do Ano 2, foram os momentos com maiores eventos hidrológicos do Rio Doce, sugerindo assim rápida resposta dos organismos de base de cadeia as mudanças das condições ambientais.

O Setor Norte apresentou os maiores valores de **bioacumulação** nesses organismos-base da cadeia trófica no período chuvoso do Ano 4, assim como o Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz que também se destacou neste período, com o aumento dos efeitos biológicos em resposta à exposição aos metais oriundos dos eventos hidrológicos no Rio Doce que antecederam a coleta (março de 2022),

corroborando que esses dois setores estão dentro da área de influência direta do Rio Doce. Apesar desses aumentos pontuais, contaminação considerável do plâncton vem sendo registrada ao longo dos anos do PMBA/Fest. Outros **biomarcadores** da comunidade planctônica reforçam a contaminação crônica do ambiente, com aumento do dano lipídico e concentração de metalotioneínas nesses organismos.

Os padrões observados para a bioacumulação e biomarcadores no plâncton estão, principalmente, em concordância com a resposta da comunidade zooplânctônica. Há indícios de aumento de contaminação deste grupo durante o período chuvoso, para o qual é observado por meio de seus atributos ecológicos uma diminuição na integridade da comunidade. A comunidade fitoplanctônica, por outro lado, está em concordância com as tendências apresentadas para qualidade da água, com evidências de maior contaminação durante o período seco. A resposta da comunidade fitoplanctônica tende a ser mais direta às variações abióticas, pois esta é uma comunidade de produtores primários. A assincronia de resposta entre fitoplâncton e zooplâncton pode ser explicada pela posição trófica do zooplâncton (consumidor do fitoplâncton), que não responde às variações da comunidade fitoplanctônica de forma imediata (Villa et al., 1997). Também pode ser explicado pela fração predominante dos contaminantes (em especial os metais), pois há uma tendência temporal de aumento da fração particulada dos metais, sem que haja diminuição da fração dissolvida. O **metal particulado**, que apresentou aumento ao longo do monitoramento, está mais biodisponível para o zooplâncton, que pode ingerir partículas mais complexas, enquanto o fitoplâncton está mais vulnerável aos contaminantes dissolvidos, que ocorrem em concentrações mais constantes ao longo do PMBA/Fest. Dessa forma, o contaminante e/ou nutriente presente no material particulado que chega ao ambiente marinho estará biodisponível ao fitoplâncton somente após a degradação em moléculas mais simples.

O **zooplâncton** marinho foi caracterizado, durante os períodos chuvosos, pela menor diversidade (Shannon e equitabilidade) e maior prevalência de táxons resistentes a contaminação pelo rejeito (**Índice de Prevalência de Espécies Resistentes - IPI**). Em escala temporal, foi observada tendência de redução dos valores médios de IPI entre os períodos chuvosos ao longo do monitoramento. As comunidades avaliadas durante estes períodos foram associadas às maiores concentrações de metais, com destaque para os elementos Ni, Hg, Cu e Cr, especialmente no setor Foz. Estes resultados estão, como já discutido, em sincronia com os indicadores de bioacumulação no plâncton. O período seco foi caracterizado por melhora nos indicadores ecológicos para o zooplâncton e correlação negativa com os metais (exceto para o As, um importante componente do rejeito). Nos Setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e Norte, os maiores valores de IPI foram registrados nos períodos de baixa vazão do Rio Doce. Assim, em nível de comunidade, o zooplâncton tende a apresentar respostas semelhantes ao fitoplâncton e à qualidade da água em regiões mais afastadas da Foz (provável influência mais relacionada a ressuspensão do que ao aporte do Rio Doce). No Setor Norte foi observada uma tendência de melhora nos indicadores ecológicos do zooplâncton ao longo do monitoramento, enquanto nos outros a alta variabilidade impossibilita estabelecer algum padrão espacial. A análise de contaminação de biomassa (bioacumulação) específica para o zooplâncton mostra que os metais permaneceram substancialmente elevados, independente do setor. Elementos

como As, Cd, Cr, Cu, Hg e Pb, ainda são encontrados em níveis elevados no zooplâncton (acima de resultados pretéritos), mesmo passados quase oito anos do Rompimento da Barragem.

O **ictioplâncton**, que compreende ovos e larvas de peixes, apresentou padrões semelhantes com aqueles observados para o zooplâncton. A maioria dos peixes teleósteos desova entre o final da primavera e início do verão (período chuvoso). Contrariamente ao esperado, é nesse período que as menores **riquezas** e **densidade de ovos** e os maiores **percentuais de viabilidade** foram observados no monitoramento, enquanto há melhora desses indicadores no período seco. Durante as maiores vazões do Rio Doce há o aumento de material continental para a região marinha, com importante dispersão superficial, provocando um aumento da mortalidade dos ovos de peixes. É importante ressaltar que os ovos não viáveis tiveram relação direta com a maior disponibilidade de metais, principalmente Fe, Cr, Mn, Ba e Co.

As densidades de **larvas de peixes** na superfície e na coluna d'água também foram consideradas baixas. Houve diferença entre os setores, entre as campanhas e entre os períodos seco e chuvoso nas amostras coletadas na superfície e na coluna d'água. No geral, as maiores diversidades médias de larvas ocorreram no Setores Abrolhos e Norte, com destaque positivo nos períodos chuvosos. Um indicador de grande relevância ao longo do PMBA/Fest foi a ocorrência de larvas de peixes com **trato digestório destruído**, onde as maiores concentrações dessas larvas ocorreram nos Setores Foz e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, embora tenham sido registradas em toda a malha amostral. Larvas com essas características pertencem a várias famílias, mas deve-se destacar o carangídeo *Chloroscombrus chrysurus* (palombeta) que é uma espécie bioacumuladora de metais. Testes de toxicidade indicaram que o rejeito não causou um aumento significativo na mortalidade das larvas, mas ocasionou **altas taxas de deformidades e danos no DNA** de embriões de peixes, o que compromete a sobrevivência a longo prazo e o sucesso reprodutivo das populações de peixes nas regiões afetadas. As evidências mostram que as fases iniciais do desenvolvimento de peixes, importante ponto de atenção no monitoramento, estão sendo impactadas principalmente pela dinâmica do Rio Doce, sendo especialmente relacionadas com o aumento de metais. É importante a avaliação da integridade deste componente planctônico pois o impacto nesta fase de influenciará a comunidade de peixes mais desenvolvida (pós-larva e adultos).

Em relação as **pós-larvas de peixes**, a biomassa e abundância média foi menor na região estuarina da Foz do Rio Doce (denominada zona de impacto no tema específico) em relação à média dos demais estuários amostrados (Setor Norte - rio São Mateus; Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz – rio Piraquê-Açu), especialmente durante os meses mais quentes (período chuvoso). Entretanto, de forma geral, é possível observar uma melhora nos **indicadores de diversidade** de pós-larva de peixe ao longo do monitoramento, em especial nos Ano 3 e 4. Este resultado deve ser olhado com cautela, uma vez que a tendência da biomassa é ser menor na região de influência direta do Rio Doce. Mesmo que os setores sejam representados por uma melhora nos indicadores de diversidade, a biomassa é um importante indicador que deve ser analisado pois reflete a variação do número de indivíduos considerando o seu tamanho, o que influencia na estrutura das assembleias e na probabilidade de desenvolvimento das pós-larvas para indivíduos adultos. Os setores perturbados podem ser



representados por espécies numericamente abundantes, mas que contribuem pouco para a biomassa (BLANCHARDT et al, 2004; MARIN et al., 2023). Além de descritores da comunidade, foi possível avaliar possível influência do material particulado (incluindo o rejeito) por meio da sua presença, aderida à superfície corpórea do pós-larva. O efeito do particulado fino sobre o recrutamento de espécies marinhas, contudo, somente poderá ser comprovado com o acompanhamento temporal das coortes destas espécies e/ou análises fisiológicas ou histológicas. Os efeitos em longo prazo dessas alterações nos ovos, larvas e pós-larvas de peixes nas populações e assembleias de peixes já podem ser observados em comunidades adultas, considerando que a influência do rejeito de mineração ainda é observada mesmo após mais de sete anos de sua chegada no ambiente marinho. O fato de alterações nos indicadores ainda serem observadas no Ano 4, com indicativos de melhora, nos sugerem que os efeitos nos indivíduos adultos (assim como em suas populações) poderão ser observados em observações futuras.

Os indicadores das **assembleias de peixes estuarinos** (densidade, biomassa e riqueza de espécies) tenderam ao declínio na área interna do Rio Doce (Setor Foz), enquanto não foi observada tendência temporal nas demais áreas (rio São Mateus – Setor Norte - e rio Piraquê-Açú – APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz). A variabilidade da ictiofauna estuarina tem se apresentado complexa na área amostrada pelo PMBA/Fest, sendo no Rio Doce dominada pela ocorrência de uma espécie resiliente, o bagre-guri (*Genidens genidens*). Em relação às **assembleias de peixes recifais**, a área de maior impacto (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) apresentou menores valores de abundância, biomassa, índices de diversidade de espécies raras e comuns, além de uma composição de espécies diferenciada quando comparada com áreas de menor impacto situadas ao norte e sul da foz do Rio Doce (Banco dos Abrolhos/BA – Setor Abrolhos - e Guarapari/ES – Setor Sul, respectivamente). A área de maior impacto apresentou menores valores de abundância para os grupos piscívoro/cefalópode, invertívoro móvel e herbívoros, que compreendem grupos-chave para o ambiente recifal.

Além das mudanças a nível de comunidade, foram observados impactos decorrentes da alimentação dos peixes. Foi constatado que **a amplitude do nicho trófico** do bagre-guri (*G. genidens*) no estuário do Rio Doce é inferior aos estuários indiretamente impactados (Itapemirim – Setor Sul - e rio São Mateus). **A diversidade isotópica** (amplitude de 15N) do carapicu (*Eucinostomus argenteus*) e a **concentração de lipídios** (razão C:N) de seis espécies no estuário do Rio Doce também decresceu ao longo do tempo, desde o período pré-impacto (2015) até 2022. Este é um indicativo de diminuição na diversidade e qualidade de oferta de recursos alimentares para os peixes nessa região. Diminuição esta que pode estar relacionada com a contaminação em níveis tróficos inferiores e possível transferência trófica para níveis tróficos superiores (e.g. cetáceos e aves marinhas).

As modificações ambientais podem causar mudanças no padrão de **comportamento dos peixes**. Os **robalos**, por exemplo, não foram detectados no curso inferior do Rio Doce, indicando uma diminuição na frequência de migração à montante do rio. Os indivíduos apresentaram uma ocorrência restrita em canais profundos ou marginais, principalmente na porção sul do estuário do Rio Doce, não sendo detectados em áreas rasas e assoreadas, sendo negativamente afetados pelo aumento dos níveis de



turbidez. Este padrão de comportamento não é esperado para a espécie, tendo ocorrido ao longo de todo o monitoramento, inclusive no Ano 4.

Mudanças ambientais, que afetam o comportamento e disponibilidade de recursos, podem influenciar nas populações de peixes, inclusive na sua **diversidade genética**. As populações de espécies estuarinas (*Trinectes paulistanus*, *Larimus breviceps* e *Isopisthus parvipinnis*) amostradas no estuário do Rio Doce sofreram alterações em suas frequências alélicas quando comparada aos demais estuários, o que pode ser reflexo da alta mortalidade de indivíduos causando a redução abrupta e instabilidade genética das populações. Essas alterações alélicas relacionadas com a alta mortalidade de indivíduos por gerar um efeito gargalo na população, levando a endogamia e homozigose que pode causar a redução da aptidão geral da população, deixando-a mais vulnerável.

Análises das **concentrações de metais** nos tecidos dos **peixes marinhos** mostraram que a maioria dos metais analisados nas brânquias dos peixes onívoros/herbívoros esteve associada com as estações amostrais da foz do Rio Doce. Por outro lado, os peixes carnívoros apresentaram um padrão de bioacumulação mais difuso, embora a maioria dos metais quantificados em suas brânquias também esteja associada à foz do Rio Doce. Além das brânquias, a acumulação de elementos químicos também ocorre nos **otólitos**, concreções constituídas de carbonato de cálcio, que podem ser utilizados como marcador das condições em que o peixe se desenvolveu. Em indivíduos com idade estimada de mais de quatro anos, os perfis de Mn:Ca e Ba:Ca marcaram a chegada da lama do rejeito no estuário do Rio Doce, enquanto os perfis médios de Elemento:Ca em otólitos do bagre-guri oriundos do Rio Doce apresentaram quatro vezes mais Fe:Ca em comparação aos encontrados nos rios Ipiranga e São Mateus ao longo do tempo. De um modo geral, foram observadas maiores concentrações de Fe, Al, Ba, Cd, Cr, Mn e Pb nos otólitos dos peixes estuarinos do Rio Doce (bagre-guri – *Genidens genides* e robalo – *Centropomus parallelus*).

Além de peixes e outros grupos, constituem organismos de topo de cadeia dentro do PMBA/Fest o grupo chamado **Megafauna**. No contexto do monitoramento, fazem parte as tartarugas, os cetáceos e as aves marinhas. Todos esses são vertebrados superiores, e pela posição na cadeia trófica, estão vulneráveis aos efeitos de contaminantes capazes de bioacumular e/ou biomagnificar na biomassa dos organismos. Além disso, a área de forrageamento e o hábito migratório permitem que eles sejam usados com sentinelas da contaminação em maiores escalas. Para os três grupos estudados foi possível observar influência da passagem (e persistência) do rejeito de mineração e metais relacionados no ambiente marinho, desde alterações no comportamento, saúde, populacional e genético. Estes efeitos podem estar relacionados diretamente com as condições ambientais ou por efeitos de cascata trófica, uma vez que foram observadas alterações nos organismos de níveis tróficos de base.

A reconstrução da história demográfica populacional das **tartarugas** marinhas evidenciou que os grupos que ocorrem na costa do Espírito Santo são historicamente fragilizadas e mais recentemente foram impactadas por um gargalo populacional, que pode ter sido consequência das transformações da paisagem das áreas de desova e alimentação por ações antrópicas ao longo dos anos. Os indivíduos

que utilizam as áreas afetadas pelo rejeito de mineração (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e as praias de Linhares/ES, nos Setores Foz e Norte) foram considerados menos saudáveis, com alterações em **parâmetros bioquímicos e hematológicos** e maior prevalência de **fibropapilomatose, ectoparasitas e lesões oculares**, quando comparadas com as áreas de controle da Bahia. Correlações negativas entre os contaminantes (metais e orgânicos) e os dados de saúde e reprodutivos (período de incubação, sucesso de eclosão, número de ovos não eclodidos e o número de animais vivos nos ninhos) das tartarugas que utilizaram as áreas afetadas sugerem que estes componentes são as possíveis causas da diminuição da **saúde** das tartarugas. Todas as três espécies de tartarugas avaliadas (*Caretta caretta*, *Chelonia mydas*, *Dermochelys coriacea*) foram afetadas. Esses contaminantes, contudo, não afetam apenas os indivíduos adultos. Foram também detectados contaminantes nos **ovos de tartarugas** durante o período de incubação, podendo estar relacionado à transferência do sedimento de praias, e uma tendência de aumento dos níveis de metais pesados (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Zn e Pb) e  $\Sigma$ HPAs nas tartarugas das áreas afetadas no Espírito Santo. De modo geral, houve uma tendência de piora no que diz respeito à saúde e diversidade haplotípica das tartarugas ao longo do tempo, inclusive de haplótipos de linhagens exclusivas do Atlântico Sudoeste.

Dentre os **cetáceos**, a toninha (*Pontoporia blainvillei*) pode ser classificada como vulnerável, especialmente pela **área de alimentação**, que ocorre durante todo o ano com maior frequência na região de Comboios. Contudo, é possível observar a tendência de uso alternado da foz do Rio Doce e Comboios (região do Setor Foz) para alimentação, com aumento do número de registro na Foz a partir do período chuvoso de 2021. A análise da **bioacústica** reforça uma possível fidelidade da população remanescente de toninhas às áreas costeiras ao redor da Foz do Rio Doce, concentrado ao sul desta. Esta região é definida por outros indicadores do PMBA/Fest como a mais impactada, refletindo nas condições de saúde de toninhas (e do boto-cinza, *Sotalia guianensis*), e possivelmente nas suas taxas de encalhe, tornando as populações locais vulneráveis a outras alterações ambientais.

Foram observados encalhes de 13 gêneros ao longo da costa do Espírito Santo ao longo dos quatro anos de monitoramento, sendo que no período chuvoso foram apenas registrados **encalhes** (n = 35) para as duas espécies alvos, sendo a maioria para o boto-cinza. O diagnóstico populacional de encalhe, contudo, é diferente entre boto-cinza e toninhas. Considerando dados do monitoramento e pré-rompimento, foi detectado nos encalhes do boto-cinza predomínio de adultos ao longo das coletas do PMBA/Fest, embora no Ano 1 a maior ocorrência de encalhes tenha sido de filhotes. No período pré-rompimento predominava o encalhe de juvenis na costa monitorada. Os encalhes registrados de toninhas foram principalmente de indivíduos juvenis ao longo de todo monitoramento, com maior percentual de filhotes no pré-PMBA e no Ano 4, sugerindo que ainda possa existir efeito do rejeito sobre a mortalidade de toninhas mais jovens. De forma geral, em ambas as espécies estudadas, a maior parte dos indivíduos encalhados eram machos. Porém, toninhas apresentaram diferenças em duas fases do estudo, sendo observado no pré-rompimento que a razão de machos foi menor que as fêmeas e na fase seguinte, pré-PMBA houve aumento de sete vezes mais encalhes de machos do que as fêmeas.

As mudanças nos padrões de mortalidade (em relação a faixa etária e sexo) pode influenciar na dinâmica populacional e genética desses cetáceos. Tem sido observada a diminuição da **diversidade genética** tanto de boto-cinza quanto de toninha. A diversidade genética do boto-cinza é menor na comparação entre os períodos pré e pós-rompimento, sugerindo uma relação causal com a chegada do rejeito no ambiente marinho. Esta relação é corroborada com a observação de menor diversidade nas regiões mais impactadas pelo rejeito de mineração, que são os Setores Foz e Norte. A diversidade genética das toninhas também é menor. Existe um haplótipo principal em 97% da população. A baixa diversidade genética pode resultar em dificuldades no reestabelecimento de populações na região, aumentando assim a vulnerabilidade daquelas já existentes.

A principal causa da morte desses animais é o emalhe, seguindo de **processos infecciosos**. Estes estão relacionados com o comprometimento da saúde dos indivíduos, que facilitam o desenvolvimento das ações de microrganismos patógenos (e.g. *Streptococcus* e *Candida*) encontrados nos animais examinados. Esses processos infecciosos, assim como os emalhes, aumentam durante o período chuvoso. A fragilidade do sistema imunológico que permite o desenvolvimento de doenças pode estar ligada a contaminantes encontrados em órgãos e tecidos de botos-cinza e toninhas. **Elementos traços** como zinco, cobre, mercúrio, arsênio e cádmio e **compostos orgânicos** como organoclorados, organobromados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos são encontrados em rins, fígado e músculo das duas espécies. Alguns desses resultados (cádmio no rim e ferro no fígado de toninhas) levam em conta o aumento da concentração do contaminante em relação a dados pré-rompimento, além da observação de aumento da concentração de alguns contaminantes em tecidos nos Anos 3 e 4 do monitoramento.

Há uma forte permanência de uso da região do entorno da foz do Rio Doce para alimentação por dezenas de **aves marinhas**, sugerindo que a contaminação da região pelo rejeito de mineração não foi suficiente para indisponibilizar os recursos alimentares. No entanto, esses recursos se tornaram de baixa qualidade ou de baixo valor de fitness, dada suas concentrações de elementos-traço, em especial os não essenciais. Este cenário é ilustrativo do conceito de armadilha ecológica, o que pode levar efeitos deletérios em níveis de população e espécie em médio e longo prazos (NUNES et al., 2022). A estimativa de **nicho isotópico bidimensional** ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$ ), com base em amostras de sangue de *Phaethon aethereus*, indicou uma maior amplitude no Ano 1, diminuição no Ano 3, e um aumento no Ano 4, sugerindo uma diminuição na variedade de presas capturadas no Ano 3 e um retorno ao cenário inicial no Ano 4. Para *Sula leucogaster*, foi observada variação temporal na amplitude do nicho isotópico, inversa à de *P. aethereus*, visto que houve uma tendência temporal de aumento do nicho isotópico, embora com uma severa diminuição na amplitude no Ano 4.

A baixa qualidade de alimento pode refletir as condições de saúde e condições demográficas das aves marinhas. De modo geral, houve um aumento significativo nas concentrações de As e Cd entre os períodos pré e pós-Rompimento da Barragem nas aves marinhas que se reproduzem em Abrolhos, sugerindo um processo de contaminação crônica. O padrão temporal observado ao longo dos anos de monitoramento foi que as elevações das concentrações desses elementos deram-se no período chuvoso. Particularmente no Ano 4, houve um aumento significativo nas concentrações de As, Cd e Pb

no sangue de *P. aethereus* e de Hg nas penas de *S. leucogaster*. A partir de dados fornecidos pelo Parque Nacional Marinho dos Abrolhos e de dados prévios à pandemia, foi possível observar diminuição na população de **adultos reprodutores** de *S. leucogaster*, um baixo sucesso de **eclosão** de *P. aethereus* em Abrolhos, e uma instabilidade na **reprodução** de *Sterna hirundinacea* em termos de fenologia. Estes aspectos, quando impactados podem influenciar o sucesso de desenvolvimento das populações dessas aves.

Dado este panorama geral dos padrões obtidos para os indicadores de impacto da biodiversidade aquática associada à coluna d'água, assim como das forçantes oceanográficas e meteorológicas que caracterizam a dinâmica do ambiente marinho ao largo da área impactada, serão apresentados a seguir os padrões referentes aos indicadores da matriz do sedimento marinho. Tais indicadores demonstram o potencial impacto do rejeito depositado no fundo a partir de análises do sedimento e da macrofauna bentônica sob exposição direta aos contaminantes.

O compartimento **sedimento**, sendo aqui considerado o fundo marinho e seus componentes abióticos e bióticos, possui íntima relação com a coluna d'água, sendo o local de deposição de materiais provenientes da bacia hidrográfica e fonte de contaminantes que podem retornar a coluna d'água por meio de sua ressuspensão. É um compartimento espacialmente heterogêneo, com fundos formados desde substratos inconsolidados até fundos de rodolitos e recifais. A manutenção da qualidade dos sedimentos marinhos é importante tanto para a manutenção da biodiversidade bentônica quanto da qualidade da própria coluna d'água. O indicador da integridade dos habitats de fundos lamosos e arenosos nos Setores Foz e Norte (Degredo e Barra Seca) e habitats da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz apresentaram constantemente a presença do rejeito, medida pelo indicador mineralógico de susceptibilidade magnética (**IMS – Iron Mineralogical Set**), e seu impacto na comunidade bentônica. A presença do rejeito no sedimento superficial foi observada continuamente na porção mais rasa, principalmente até a batimetria de 20 m, com aumento da razão medida do IMS% ao longo do PMBA/Fest. O Setor Foz foi o mais diretamente impactado pelo rejeito e apresentou um mosaico de habitats de fundo lamosos e arenosos, com feições erosivas que indicam o transporte do rejeito em direção offshore, como confirmado pela análise de testemunhos. Estes testemunhos, coletados em 2018 e 2021, indicaram o acúmulo inicial do rejeito no depocentro localizado no Subsetor Foz Sul e seu posterior transporte para o norte. O **acúmulo de rejeito nos testemunhos** mostrou uma tendência geral do aumento do sinal no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, do aumento do índice em alguns testemunhos e de estabilidade em outros no Setor Foz e uma leve tendência de aumento em alguns estratos dos testemunhos no Setor Norte. Por outro lado, não se observou de forma evidente e consistente uma evolução espacial de perda de integridade de habitat recifais ou de rodolitos.

O indicador de **potencial de mobilidade do fundo** mostrou que a densidade do sedimento foi alterada com a chegada do rejeito de acordo com dados pré-Rompimento da Barragem de Fundão. A redução da densidade superficial do sedimento de fundo levou à menor resistência aos processos de ressuspensão e maior suscetibilidade à remobilização. O potencial de mobilidade do sedimento superficial continuou aumentando ao longo dos anos nos Setores Foz e Norte, especialmente no período seco, o que indica a remobilização de um material extremamente fino compatível com o rejeito

na plataforma continental. A menor resistência aos processos de ressuspensão somado ao aumento da energia de ondas são os prováveis fatores que levam a perda da qualidade da coluna d'água no período seco.

O sedimento do ambiente marinho apresentou-se moderadamente impactado ao longo de todo o monitoramento, de acordo com o **índice geoquímico da qualidade do sedimento** (SQG-q) utilizando os metais Ag, As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Hg e Zn, exceto para o Setor Abrolhos, que se encontrou impactado somente no Ano 1. Destaca-se, porém, o **aumento de bactérias** da família Pirellulaceae em corais de todas as estações amostrais do Setor Abrolhos após intensas chuvas que sucederam a campanha de março de 2022, visto que este perfil ainda não havia sido observado tão fortemente nas campanhas anteriores. Esta família já vinha sendo monitorada como forte indicadora de contaminação. Algumas estações do Setor Foz apresentaram valores de SQG-q indicando alto grau de impacto, registrados no período chuvoso do Ano 1, período seco do Ano 1, período chuvoso do Ano 2 e período chuvoso do Ano 3, especificamente determinados pelo aumento nas concentrações de As, Ni, Ag e Hg. Cabe destacar que foram observadas maiores correlações do sedimento marinho com os metais Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, V e Zn presentes no rejeito (análise de amostras provenientes do Complexo de Germano, Sá et al., 2021), sendo estes, portanto, melhores traçadores do impacto. Apesar de apenas alguns elementos possuírem padrões de concentrações definidas por lei para serem testados nos índices, todos os elementos testados conferem um risco ao ecossistema fragilizado pela chegada do rejeito.

De uma forma geral, o Setor Foz detém os maiores valores de concentração de metais no sedimento, seguido das estações ao sul do Setor Norte (Degredo e Barra Seca) e no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz. Um padrão correspondente foi observado pelo **ensaio toxicológico do sedimento**, onde o sedimento variou de "moderadamente tóxico" a "tóxico" ao longo do PMBA/Fest, em especial para as regiões entre Degredo (Setor Norte) e o Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz. Destacou-se, também, a presença de Anaerolineaceae na foz do Rio Doce, que é um membro do **core microbiano** em sedimentos de rejeitos de mineração, assim como Pirellulaceae, que vem sendo indicada como um possível bioindicador da presença de sedimento do Rio Doce na plataforma. Adicionalmente, destaca-se a ocorrência de elevada dominância de Gemmatimonadaceae, que já foi relacionada positivamente com a presença de Cd no meio ambiente, um metal de destaque no rejeito de minério (Sá et al., 2021). Houve ainda similaridade entre os perfis microbianos entre as amostras da foz do Rio Doce e de Abrolhos ao longo do PMBA/Fest.

O **ferro (Fe)**, principal traçador do rejeito, foi avaliado de acordo com a frequência de ocorrência de valores acima dos dados pré-Rompimento da Barragem. As taxas de incremento foram mais representativas para o Setor Abrolhos, em que os níveis de Fe foram até três vezes superiores aos valores de referência nos períodos chuvosos dos Anos 2 e 3 e também no período seco do Ano 3, quando 75% das amostras continham valores de Fe alterados. Nos Setores Foz do Rio Doce e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, o nível máximo de incremento foi de até duas vezes para o período chuvoso do Ano 1. Embora tenha ocorrido um maior incremento de Fe no **sedimento** marinho nos períodos chuvosos, a ressuspensão também contribuiu remobilizando sedimentos contaminados ao



longo da plataforma continental. Houve uma tendência de melhora na contaminação por Fe no Setor Foz a partir do Ano 4. Porém, foi identificada a persistência nos níveis de contaminação nos Setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e em Abrolhos até o Ano 4 do PMBA/Fest. Este aumento de Fe também foi detectado em **corais** do Setor Abrolhos no período chuvoso do Ano 4. A **análise isotópica do sedimento** de Abrolhos sugeriu que o enriquecimento com Fe nesse setor foi mais significativo durante os períodos secos, associados à passagem de sistemas frontais com ventos do quadrante sul, com consequente dispersão de plumas de sedimento na direção Sul-Norte, além da intensificação da deriva litorânea nesses períodos, que ocorre na mesma direção.

Apesar da razão do indicador IMS% ter apresentado aumento ao longo dos anos no PMBA/Fest, houve uma tendência de redução do sinal do rejeito na região marinha, bem como dos valores de Fe. Isso porque esta razão considera uma suíte mineralógica que engloba outros minerais além dos ligados ao Fe, sendo a susceptibilidade magnética mais relevante nesta abordagem e que esteve em um patamar acima dos dados pré-Rompimento da Barragem, porém constante ao longo do PMBA/Fest. Parte da contaminação pode ser causada pela remobilização do sedimento enriquecido em rejeito e seu transporte ao longo da plataforma, incluindo para Unidades de Conservação mais distantes (PARNAM Abrolhos e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz), podendo causar novos ciclos de contaminação mais relevantes que o impacto da vazão na qualidade dos sedimentos do fundo marinho. Este comportamento é observado no Ano 4, quando no período chuvoso os pontos ao norte do Setor Foz e na APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz se mostraram mais impactados em termos **toxicológicos** (sedimento moderadamente tóxico). Porém, no período seco de 2022, o sedimento da foz do Rio Doce e da região de Degredo (Setor Norte) se mostrou ainda mais impactado, apresentando a classificação “tóxica”. É importante destacar que este padrão não exclui o impacto persistente provocado pelo aporte do Rio Doce, apenas sugere que o efeito provocado pela remobilização do rejeito depositado na plataforma pode ocasionalmente ser mais impactante do que a descarga do rio.

Os **HPAs** também são registrados no sedimento marinho, sendo observado o aumento da contaminação ao longo do tempo de monitoramento do PMBA/Fest, principalmente nos períodos chuvosos. Não há distinção entre os períodos secos e chuvosos no Setor Foz, sendo o sedimento deste setor mais contaminado em HPAs, seguido pelos Setores Norte, APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, e por fim, Abrolhos, que foi o setor menos impactado em termos hidrogeoquímicos ao longo do PMBA/Fest. No Ano 4, os níveis de HPAs ainda excedem os dados pré- Rompimento da Barragem.

As **comunidades bentônicas** estão intimamente ligadas com a qualidade do sedimento, respondendo diretamente as alterações e contaminações que ocorrem no compartimento. As variáveis descritoras da comunidade bentônica em substratos inconsolidados indicou tendência de diminuição na qualidade ambiental ao longo do monitoramento. Isso foi evidenciado pelo aumento contínuo da proporção de vestígios de Mollusca, indicando um aumento de **mortalidade** nos habitats bentônicos. Este índice mostrou que especialmente o Setor Foz e a região sul do Setor Norte (Degredo) apresentaram um ambiente mais impactado pelo rejeito, o que foi corroborado pela **riqueza e diversidade** (índice de Shannon-Wiener) da assembleia de Polychaeta, que foram significativamente menores nestas áreas em comparação aos outros setores. Outro padrão importante foi indício de maiores impactos nas zonas



mais rasas (até 20 m de profundidade) quando comparado a zonas mais profundas e distantes da costa. Localmente, a diversidade das comunidades bentônicas diminuiu com o aumento do IMS e da proporção de sedimentos finos, que são sinais de acúmulo do rejeito, e aumentou com a proporção de sedimentos mais grossos, como cascalho (relacionado a habitats de rodolitos e a maiores teores de carbonato de cálcio).

A **macrofauna de crustáceos** (camarões, siris e caranguejos) é outra assembleia com afinidade ao sedimento marinho. A variabilidade da assembleia tem sido definida como complexa na área impactada, mas caracterizada por uma comunidade basal formada por espécies de grande relevância ecológica e interesse comercial, como os camarões sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*) e rosa (*Farfantepenaeus* spp.). Ainda que não tenha sido observada diferença significativa na estrutura das assembleias destes grupos de crustáceos entre o local diretamente impactado (Rio Doce – Setor Foz) e os locais indiretamente impactados (Rio São Mateus – Setor Norte - e Rio Piraquê-Açu – Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz), os menores valores médios para os indicadores (**densidade, biomassa e riqueza de espécies**) têm sido observados na área interna (estuário) do Rio Doce ao longo de todo o monitoramento PMBA/Fest. Para o camarão sete-barbas, apesar de valores moderados, o Rio Doce foi a localidade com menores valores registrados para todos os índices de **diversidade genética**. A rede de haplótipos apresentou halogrupos com formatos de "estrela", indicando uma expansão populacional recente, possivelmente após um evento de gargalo. As análises evidenciaram ainda a presença de **fluxo gênico** entre as localidades, com estruturação genética significativa entre Rio Doce e São Mateus. Apesar da aparente recuperação populacional do camarão sete-barbas após um declínio e perda genética (efeito gargalo), ainda há evidências de contaminação para os camarões (sete-barbas e rosa). De modo geral, as maiores concentrações dos elementos analisados nas brânquias dos camarões marinhos foram mais associadas ao Setor Foz, assim como observado para os peixes, o que pode ser um indicativo de contaminação. O Setor Norte também apresentou uma associação com diversos elementos determinados no hepatopâncreas dos camarões, dando indícios de uma contaminação mais crônica, seguindo da foz do Rio Doce em direção ao Norte.

Nas regiões de **fundo recifais e de rodolitos**, foram encontrados materiais associados ao rompimento em talos de macroalgas ao longo da área de estudo e, também, em algas coralináceas nas adjacências do **Parque Nacional Marinho de Abrolhos** (PARNAM Abrolhos - Setor Abrolhos). Partículas com assinatura similar ao rejeito, associadas a **macroalgas** e em rodolitos, também foram encontradas em toda a região. Com relação aos indicadores bio-ecológicos é possível afirmar que, após o rompimento, houve alteração na cobertura dos recifes do PARNAM Abrolhos e adjacências, com declínio significativo de dois grupos funcionais de corais, **Mussimilias** e **Milleporas**, sendo que o declínio desse último foi agravado pelas anomalias térmicas de 2019. A cobertura por **zoantídeos** aumentou no topo do recife mais próximo a uma área de descarte de dragagens, mostrando que outros estressores antropogênicos atuam em sinergia com aqueles ligados ao rompimento da barragem. Zoantídeos são organismos tolerantes à sedimentação que, quando proliferam, afetam negativamente a cobertura de corais. Apesar das modificações na cobertura e estrutura dos corais indicarem alterações, o IBR bioacumulação em corais e hidrocorais mostrou pouca diferenciação nos níveis de metais ao longo de

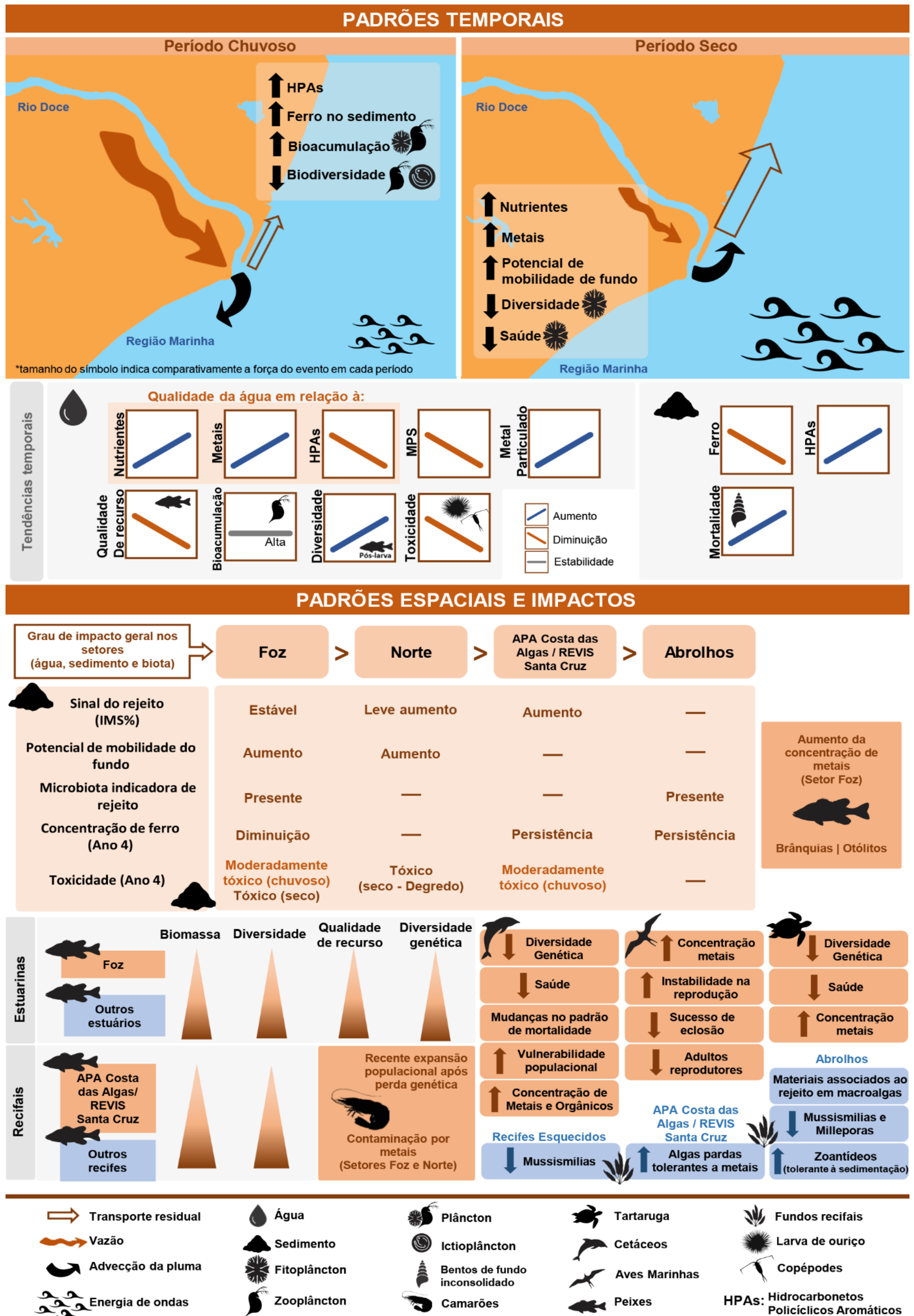
todo o monitoramento, com exceção do período chuvoso Ano 3. Todavia, ao explorarmos os metais de forma individual, é possível observar que durante o período chuvoso do Ano 4, o Fe se destacou como principal metal.

Nos **Recifes Esquecidos**, os mais próximos à foz do Rio Doce, a cobertura de corais do grupo funcional Mussimilias também tendeu a diminuir nos topos dos recifes. Porém, as conclusões sobre a associação entre a variação na cobertura dos Recifes Esquecidos e o rompimento da barragem são menos robustas, uma vez que o monitoramento dessa área foi iniciado três anos após o evento. Para os recifes adjacentes ao litoral da **APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz** é possível afirmar que, após o rompimento, houve alterações nas comunidades bentônicas, com aumento na dominância por **algas pardas** tolerantes a metais e redução na diversidade e cobertura por outros grupos. Esta conclusão também é bastante robusta, visto que contou com dados coletados antes e logo após o rompimento da barragem. No Ano 4 foi observada ligeira tendência de melhora neste indicador.

Não há evidências, até o momento, de alterações relacionadas ao rompimento na estrutura das comunidades que recobrem os **bancos de rodolitos**, corroborando com o índice de integridade de habitat. De maneira complementar, revelamos forte **descontinuidade latitudinal** na estrutura das comunidades associadas aos bancos de rodolitos. Por exemplo, comunidades dos bancos de rodolitos protegidos pela APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz não são equivalentes àquelas nas adjacências de Abrolhos, que permanecem sem proteção específica. Com relação aos processos ecológicos, os resultados mostram que o **assentamento em placas de colonização artificiais** (introduzidas para estimativa de produção  $\text{CaCO}_3$  e a cobertura de organismos) variou significativamente após o rompimento da barragem, com implicações na biomineralização, uma vez que houve aumento na colonização por algas coralináceas incrustantes, organismos mineralizadores típicos de estágios sucessionais iniciais.

## 2.2.5 Síntese gráfica

Figura 8: Síntese gráfica dos resultados do Ambiente Marinho.



### **2.2.6 Perspectivas e considerações**

Os quatro anos de monitoramento do PMBA/Fest mostram que ainda há impacto no ambiente marinho, principalmente na região da Foz do Rio Doce. Esses impactos foram observados, especialmente no Ano 4, em organismos de níveis tróficos mais elevados, que possuem maior complexidade estrutural, populacional e de comunidade, com ciclos de vida mais longos e habitats mais extensos. Ainda, o sedimento é apontado como impactado de forma persistente ao longo do monitoramento, com concentrações de metais e orgânicos acima de limites estabelecidos por normas nacionais e internacionais. Estes contaminantes têm efeito direto na biodiversidade dos organismos bentônicos, como demonstrado na síntese.

Foram também observadas evoluções positivas, nas quais indicadores que mostram a tendência temporal na melhora da qualidade da água, principalmente em relação aos metais e nutrientes. O nível trófico mais basal, o fitoplâncton, parece acompanhar a tendência da qualidade de água. Essa melhora na qualidade da água ao longo do monitoramento não mostra, contudo, que o ambiente está com baixos níveis de contaminante.

Temos então um cenário onde os efeitos do rejeito de mineração no ambiente marinho ainda são evidentes, independente do período do ano, mas que mostra sinais de diminuição. As respostas de recuperação, apesar de sutis, começam a aparecer na água e nos grupos mais basais da cadeia trófica. Contudo, as respostas dos organismos de níveis tróficos superiores devem acontecer em um intervalo de tempo maior, como esperado devido às diferenças morfológicas e reprodutivas. Alguns desses grupos possuem importância socioambiental para região, pela sua importância na economia de comunidades da região. Assim, o acompanhamento das condições abióticas e da biodiversidade na região é extremamente importante, especialmente no sentido de acompanhar a efetividade de programas de recuperação, que serão implementados na bacia do Rio Doce e na região marinha e costeira adjacente à sua foz. O monitoramento, neste sentido, deve ser o mais integrado possível, para permitir conclusões não só a nível dos temas, mas sim de conclusões em níveis ecossistêmicos.

## 2.3 AMBIENTE COSTEIRO

O ambiente costeiro, composto pelos ecossistemas de praia, de manguezal e de restinga, constitui um ambiente dinâmico, complexo e transicional, com influências do sistema marinho, dulcícola e atmosférico. São três ecossistemas que apresentam funcionalidades próprias, mas herdaram a imposição da geomorfologia e dos processos hidrodinâmicos regionais sobre as variáveis abióticas e bióticas. Com diferentes capacidades adaptativas, o sedimento, a flora e a fauna destes ecossistemas apresentam diferentes impactos aos agentes poluentes, e mais precisamente, ao material oriundo do rejeito de minério, que alcançou abruptamente a costa no final de 2015, e que hoje ainda atinge a linha costeira sazonalmente, seja pelo aumento da vazão fluvial, seja pela mobilização do material depositado sobre a antepraia e plataforma continental, mobilizado e trazido para os ecossistemas costeiros pelas ondas, correntes, marés e vento. Desta forma, a presente síntese apresenta os principais resultados alcançados ao longo dos quatro anos de monitoramento, apresentando os indicadores escolhidos, os destaques (highlights), o contexto do ambiente, resultados espaço-temporais e perspectivas e considerações.

### 2.3.1 Indicadores

O monitoramento costeiro ao longo dos quatro anos do monitoramento do PMBA/Fest abordou diferentes aspectos geológicos, físicos, químicos, ecotoxicológicos e ecológicos relacionados aos ecossistemas praias, restingas e manguezais. A incorporação de novas abordagens metodológicas e a análise ininterrupta do conjunto de dados levantados permitem avaliar os impactos da incorporação dos rejeitos de minério. Desta forma, alguns indicadores são propostos na avaliação do presente relatório e, além disso, é importante destacar que os indicadores aqui utilizados estão em constante processo de avaliação e, à luz de novos dados, resultados e conclusões, eles podem ser alterados, substituídos, ou novos indicadores podem ser sugeridos, sem comprometimento para as descrições apresentadas na presente síntese.

#### Praias

A morfodinâmica, a geoquímica e os bentos elegem indicadores que interagem entre esses diferentes temas: o **teor de lama** ao longo dos perfis tem sido correlacionado com as elevadas **concentrações de elementos químicos** associados ao rejeito de minério de ferro. Este material, quando transportado para a praia emersa reduz a permeabilidade do sedimento com consequente alteração na composição e diversidade da fauna bentônica. Desta forma, **os parâmetros da macrofauna** bentônica e **os parâmetros da meiofauna** são avaliados quanto o descrito na literatura para as diferentes características da morfodinâmica praial e quanto as relações dos parâmetros ecológicos e a presença de elementos químicos associados ao rejeito de minério de ferro. Adicionalmente, como impacto indireto, o incremento de lama no sistema praial pode aplainar a topografia da praia (**alteração morfológica da praia**), potencializando os eventos inundacionais e erosivos. O alcance do espraiamento das ondas (*run up*) e o consequente transporte da lama para a praia alta permite o alcance do material do rejeito sobre a restinga e o alcance sobre toda a comunidade bentônica presente na faixa de areia. Já a permanência deste material na praia depende das características



morfodinâmicas, sendo que praias com tendências refletivas apresentam um potencial de auto limpeza maior do que praias mais dissipativas, além de restringirem os eventos em que o espraio máximo das ondas transpõe a berma. Já os indicadores da geoquímica, além da **distribuição de elementos químicos no sedimento** associados ao rejeito de minério de ferro que permite avaliar o nível de poluição do ambiente pelo SQG-q e o risco à biota a partir da frequência de ocorrência das concentrações acima daquelas definidas pelo TEL e PEL, tem-se a **Normalização de elementos Terras Raras em sedimentos** e a **Concentração de elementos químicos em água**. Na água, a distribuição de elementos químicos nas frações total, dissolvidas e particuladas, são comparados ao nível de contaminantes pelo *Pollution Load Index* e pela quantidade de material em suspensão na coluna d'água.

### **Manguezal**

São três indicadores bióticos e um abiótico, sendo esse a descrição da diversidade do **sedimento** das florestas de manguezal e concentração dos metais. Como indicadores bióticos tem-se a **Decapoda** a partir da avaliação sazonal da estrutura populacional das espécies de interesse comercial *Ucides cordatus* e *Cardisoma guanhumi*; a **Flora** estudada a partir da estrutura populacional em escala temporal das florestas de mangue e **Biorremediação** onde são avaliados os atributos fisiológicos e desenvolvimento inicial de plântulas de *Rhizophora mangle* em condições de cultivo *ex situ* e a bioacumulação de metais em plantas *in situ* e *ex situ*.

### **Restinga**

Os parâmetros fotossíntese, estresse oxidativo, produção dos metabólitos primários e reprodução são monitorados para avaliar a **Vitalidade da Vegetação**, aplicada na vegetação herbácea, arbustiva e arbórea. É realizada a análise do descrito na literatura e com aqueles encontrados na série histórica do monitoramento, para as diferentes espécies que compõem as três formações vegetais monitoradas e verifica as alterações nos parâmetros em relação à presença de elementos químicos associados ao rejeito.

### **Ecotoxicologia**

Analisa a condição da água, sedimento e biota por meio de dois índices/abordagens complementares construídos a partir de avaliações nos ambientes de praia e mangue. Os parâmetros avaliados são: **concentração de metais e As em amostras de água, sedimento e biota**, sendo os dados de acumulação na biota integrados no índice **IBR acumulação**, e **respostas biológicas em organismos de diferentes níveis da cadeia trófica, através da avaliação de diferentes biomarcadores**. Os dados de biomarcadores são também integrados no **índice IBR biomarcadores**. Os animais avaliados são aves, caranguejos de praia e de manguezal, e invertebrados de praia.

#### **2.3.2 Destaques**

- No ambiente transicional costeiro, a distribuição espacial da geomorfologia e dos processos oceanográficos atuam sobre os indicadores abióticos e bióticos selecionados para a avaliação

dos impactos decorrentes da contaminação do material do rejeito de mineração nos ecossistemas restinga, manguezal e praias, o que resulta nos maiores impactos nas proximidades da desembocadura do Rio Doce e no litoral norte;

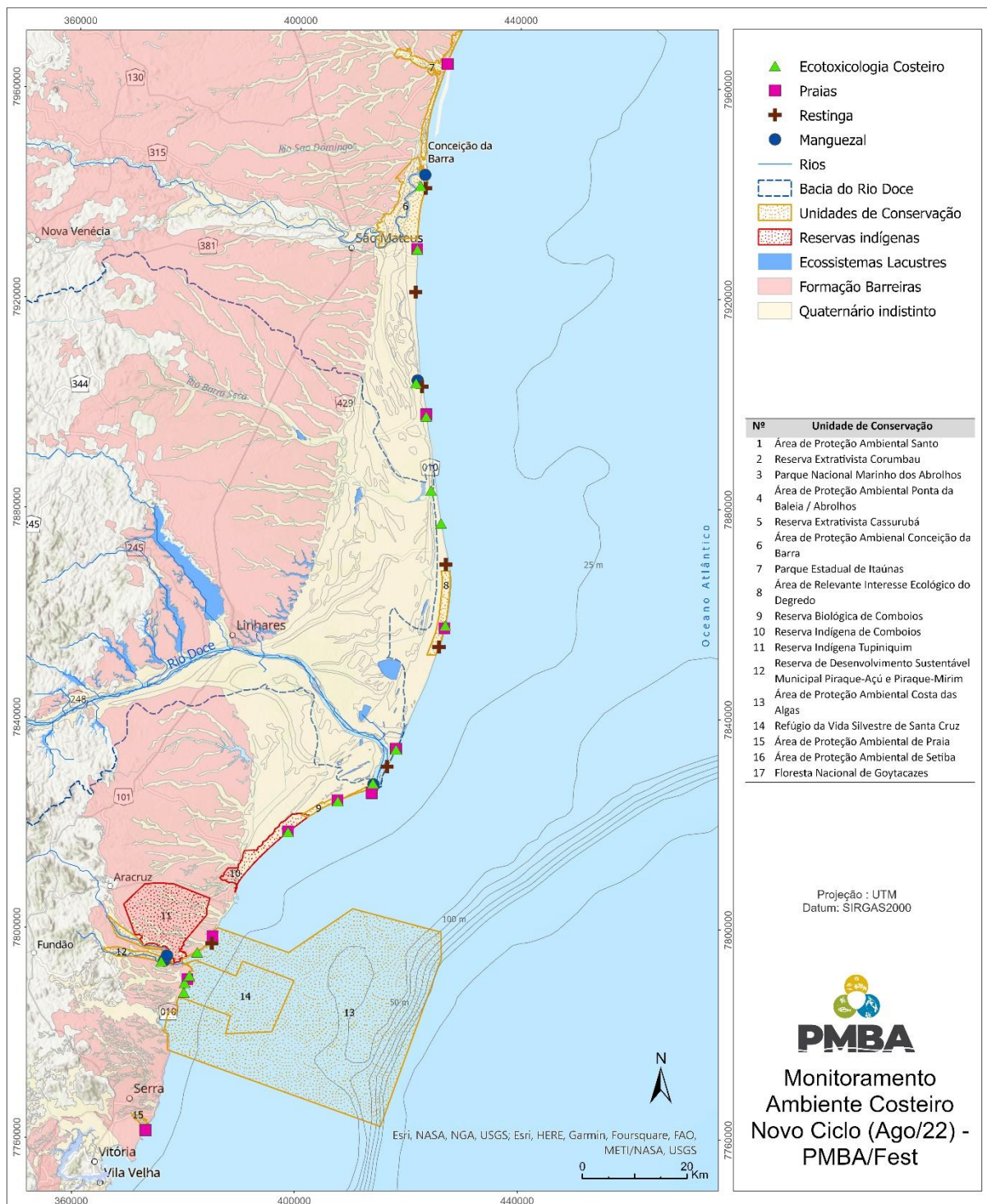
- A deriva litorânea, a mobilidade e deposição da lama sobre a antepraia, e consequentemente dos elementos químicos, e a tipologia das praias determinam os compartimentos e a comunidade bentônica mais impactados e os mais resilientes. Destacam-se impactos sobre os bentos da praia ao norte do Rio Doce em função da concentração de elementos químicos e desequilíbrios ecológicos em função da morfodinâmica praial em praias de maior mobilidade;
- Os impactos sobre os sedimentos e a flora dos manguezais estão sujeitos às oscilações sazonais em função dos maiores aportes fluviais no período chuvoso, já a densidade e tamanho das carapaças dos caranguejos se apresentam impactados e ainda em processos de adaptação em função dos altos teores de elementos químicos no ecossistema. Já o monitoramento do IBR biomarcador indica o aumento de estresse fisiológico nos caranguejos dos estuários na porção do Rio Doce e litoral norte;
- Fatores ambientais como geomorfologia, inundações e composição do sedimento atuam significativamente sobre a contaminação da vegetação das restingas, ocasionando maior recorrência de impactos à vitalidade da vegetação nos períodos chuvosos, comprometendo os aspectos funcionais e reprodutivos. A contaminação do sedimento e vegetação pelo aporte do provável aerossol marinho é observado ao longo de toda a costa e é predominante no período seco;
- Devido às alternâncias entre aportes fluviais do Rio Doce e mobilidade do material do rejeito depositado na antepraia e plataforma continental, os ecossistemas costeiros, exceto por registros pontuais, não apresentam tendência de diminuição do impacto causado pelas altas concentrações de elementos químicos. Destacam-se os impactos sobre a fauna, cujo período de resposta dos indicadores reprodutivos e de desenvolvimento são específicos para cada espécie, e ainda dificultado pela manutenção do aporte fluvial e marinho de elementos químicos ao sistema costeiro. Por outro lado, após o impacto agudo verificado no início do monitoramento, os resultados do IBR obtidos para os anfípodes e isópodes e a contaminação das penas e aves, indicam uma pequena diminuição e posterior estabilização dos contaminantes. (A lacuna de dados deve ser preenchida para elucidar as afirmações).

### **2.3.3 Contextualização do ambiente**

O Ambiente Costeiro é caracterizado pela transição continente-oceano e reflete variações hidráulicas sazonais ocorrentes nos ambientes dulcícola e marinho, recebendo tanto a carga fluvial transportada através da bacia hidrográfica como o material retrabalhado constantemente na antepraia e plataforma continental, tanto por carga de fundo quanto em suspensão. Especialmente, o Ambiente Costeiro imprime as imposições geomorfológicas e sedimentológicas e encontra-se em constante equilíbrio dinâmico como consequência da complexidade morfodinâmica.

A área em estudo compreende a linha de costa situada desde os municípios de Serra (ES) até Caravelas (BA) e as praias, restingas e manguezais, compreendidos nos estudos do PMBA/Fest, estão localizados em um segmento da linha de costa capixaba que abrange distintos setores geomorfológicos da costa, como o dos tabuleiros da Formação Barreiras marcado pela presença de falésias e praias com terraços de abrasão, resultado do recuo erosivo das referidas falésias, bem como as planícies costeiras quaternárias, como é o caso da planície deltaica do Rio Doce. Na morfologia e sedimentologia da antepraia e plataforma continental há distintos setores, que consequentemente atuam sobre os processos oceanográficos e grau de exposição às ondas do litoral (Figura 9).

Figura 9: Malha amostral do Ambiente Costeiro que está em vigência no momento da entrega do relatório, com destaque às distintas unidades geomorfológicas (costa de falésias associadas a Formação Barreiras, em rosa e a planície deltaica do Rio Doce associada às unidades do Quaternário, em amarelo), incluindo malha amostral dos diferentes temas (praia, restinga, manguezal e ecotoxicologia) e localização das unidades de conservação. Estação de Caravelas se encontra ao Sul da Bahia não está representada na figura e foi descontinuada a partir de agosto de 2022.



O litoral da Serra e Aracruz está associado aos terraços de abrasão. A atenuação das ondas ao longo da antepraia reduz a quantidade total de energia que chega à face da praia, favorecendo a formação de perfis praias com maiores inclinações (MUÑOZ-PÉRES et al., 1999). Simultaneamente, os terraços



de abrasão limitam o espaço de acomodação da praia, o que promove a acumulação vertical dos sedimentos junto à costa e a formação de perfis altos e estreitos (ALBINO et al., 2016) com estado morfodinâmico de praias limitadas por barreiras rígidas, com características intermediárias a refletivas, na preamar, e dissipativas, na baixa-mar (SHORT, 2006; ALBINO et al., 2016). Durante eventos de moderada à alta energia, a impermeabilidade dos terraços de abrasão reduz parte da infiltração do espraçamento, o que torna a praia mais propensa ao empilhamento das ondas junto à costa (JACKSON & COOPER, 2009) e alcance sobre a restinga. A restinga encontra-se pouco desenvolvida devido à limitação do desenvolvimento das planícies costeiras pela presença das falésias. Os maiores desenvolvimentos de planícies sedimentares são encontrados nos vales fluviais entalhados sobre os Tabuleiros da Formação Barreiras, no qual destaca-se o estuário do Piraquê-Açu.

Em termos sedimentológicos, o litoral dos terraços de abrasão é composto por sedimentos mistos. Os componentes bioclásticos ( $\text{CaCO}_3$ ) são predominantes e são provenientes da fragmentação de organismos carbonáticos, cujo desenvolvimento é proporcionado pela presença dos terraços de abrasão (ALBINO et al., 2016). Os componentes siliciclásticos podem ter a sua fonte associada à erosão dos tabuleiros da Formação Barreiras, a partir de entalhes fluviais e da ação das ondas sobre as falésias vivas que limitam as praias à retroterra. Mineralogicamente, os terraços são ricos em Fe, Al e ainda se destaca os altos teores de As, elemento associado aos teores de  $\text{CaCO}_3$ .

Ao longo da evolução do compartimento da planície deltaica do Rio Doce há evidências morfoestratigráficas que destacam a atuação da deriva litorânea de sedimentos, da carga e descarga fluvial e das variações do nível do mar na sua evolução (DOMINGUEZ et al., 1981; DOMINGUEZ et al., 1983; MARTIN et al., 1996; MARTIN et al., 1997). Como resultado da frequência direcional das ondas e de outros ajustes morfodinâmicos, o sentido preferencial da deriva é de sul para norte. As alternâncias na direção das ondas incidentes ao longo da costa durante a evolução e nas últimas décadas do Rio Doce foi corroborada pela modelagem numérica realizada por Bittencourt et al. (2007) e Oliveira et al. (2015).

A diversidade geomorfológica ao longo do litoral do ES, e ainda, os processos costeiros atuantes na variação espacial do transporte e deposição do rejeito de minério ao longo da costa atuam sobre as variáveis abióticas e bióticas de cada ecossistema abordado e permitiram a compartimentação do litoral conforme a seguir:

- **Compartimento A:** compreende os Municípios da Serra e Aracruz. Caracterizado pelas falésias, terraços de abrasão e pouco desenvolvimento de planície costeiras e praias. Essas se encontram estreitas e altas. Destacam-se aqui os estuários do Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim e a APA Costa das Algas. Areias carbonáticas e enriquecimento local de Ferro, Alumínio e Arsênio (SOUZA et al, 2020). Aporte do Rio Doce e consequentemente do rejeito de minério é eventual, e transportado por material fino em suspensão (pluma). Os terraços constituem uma barreira para o transporte de sedimentos de fundo.
- **Compartimento B:** compreende a planície sul do Rio Doce com alto desenvolvimento das planícies e restingas e das praias. No sentido sul, a partir da desembocadura, há o



engrossamento das areias (ALBINO & SUGUIO, 2010), as areias médias a grossas próximas ao Rio Doce são substituídas por areias muito grossas rumo a Barra do Riacho. Areias grossas limitam a deposição da fração fina e consequentemente do rejeito de minério. Neste compartimento, se destaca o estuário do rio Riacho, rio que recebe afluentes que cortam a planície deltaica do Rio Doce e os tabuleiros da Formação Barreiras.

- **Compartimento B':** sub-compartimento, adotado pelo tema Praias e representado pelas praias de REBio Comboios, Regência e Povoação. Está associado à influência direta destas estações praias da carga e descarga do Rio Doce.
- **Compartimento C:** planície norte do Rio Doce, com alto desenvolvimento das planícies costeiras, restingas e praias. Compreende as praias de Degredo, Pontal do Ipiranga, Barra Nova, Guriri e Itaúnas e os estuários de Barra Nova, Urussuquara e São Mateus. A margem norte do Rio Doce exhibe grãos siliciclásticos com menor arredondamento e grau de seleção, quando comparados com a margem sul, corroborando o aporte fluvial recente para norte, levados pela deriva litorânea, havendo o afinamento dos grãos rumo a Guriri (ALBINO & SUGUIO, 2010). A plataforma continental é uma extensão do Banco de Abrolhos e apresenta baixa declividade, favorecendo a deposição de sedimentos.

#### 2.3.4 Distribuição espacial e temporal dos indicadores de impactos

O estuário de Caravelas (BA) não foi agrupado nesses compartimentos, já que se encontra em outro Estado e associado a uma bacia hidrográfica que recorta uma área grande e, desta forma, a sedimentação e hidrodinâmica estão sujeitas às particularidades naturais, climáticas e antropogênicas regionais. Por exemplo, ao longo do monitoramento, a alta salinidade estuário, principalmente no período seco, impacta os parâmetros na flora e da fauna, associada a concentração dos teores dos elementos químicos analisados causando aumento do estresse oxidativo. Também no período seco, há a tendência de recuperação da melhoria do índice de conservação de energia ( $PI_{Total}$ ). A atividade fotossintética e a fecundidade se mostram constantes entre os períodos reprodutivos avaliados, ao longo do monitoramento, independentemente do tamanho da fêmea (ANCOVA,  $F_{(2,26)} = 0.43$ ,  $p = 0.65$ ). Na continuidade do monitoramento do PMBA/Fest (a partir de agosto de 2022), o estuário de Caravelas foi excluído por apresentar outras influências ambientais que não permitem análises com a contribuição do rejeito de minério, além de não apresentar agrupamentos com os demais estuários.

No litoral do Espírito Santo, ao longo dos quatro anos do monitoramento, foi possível verificar que na plataforma continental e nas praias adjacentes à desembocadura do Rio Doce (Compartimentos B' e C) ocorreu o enriquecimento das concentrações de alguns elementos químicos provenientes do aporte do rejeito de mineração. Fica ainda evidenciado que o aporte, proveniente da carga do Rio Doce, e a distribuição do material lamoso ao longo da região costeira, fração onde predomina a concentração dos elementos químicos, são subordinados às oscilações dos padrões hidrológicos e meteoroclimatológicos. Períodos chuvosos representam maior aporte lamoso pelo rio e eventos inundacionais do sedimento da restinga.

Nos períodos secos, há maior probabilidade de eventos de maior energia das ondas, e consequentemente mobilização e transporte do material pelas ondas e correntes costeiras para a praia e manguezal. Assim, é provável que o material oriundo do rompimento da barragem, que se encontra depositado ao longo da bacia e na plataforma, esteja recorrentemente se distribuindo ao longo da costa. Considera-se ainda que, os altos índices pluviométricos causem parcial inundação nos estuários e nos cordões arenosos da planície costeira do Rio Doce, pela subida do lençol freático raso, e incrementa os elementos químicos no sedimento dos ambientes costeiros. Ainda, no período seco se destaca a intensificação dos ventos e transporte do aerossol marinho para as folhas e sedimento da restinga. As respostas da Restinga, na extensão de suas três formações vegetais (herbácea, arbustiva e arbórea), à contaminação pelo rejeito de mineração depende da disponibilidade dos elementos químicos que potencialmente alcançaram sua vegetação, e está sujeita a fatores como eventos de inundação, exposição ao aerossol marinho, precipitação, aumento de descarga fluvial e remobilização marinha (DU & HESP, 2020).

Por outro lado, a vegetação de restinga encontra-se bem desenvolvida sobre os cordões litorâneos nesses Compartimentos (B' e C), o que reflete no inventário florístico. O Compartimento A possui restinga pouco desenvolvida em função de sua proximidade à Formação Barreiras (ALBINO et al., 2006), apresentando 78 espécies dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) Costa das Algas. Já no compartimento B, que inclui as estações amostrais da Reserva Biológica (REBio) de Comboios (E7) e Cacimbas (E6), foram listadas 344 espécies abrangendo 72% da riqueza encontrada em todas as estações amostrais, sendo 81 espécies exclusivas e quatro espécies endêmicas do Espírito Santo. Ao norte da costa monitorada, o Compartimento C constitui o setor com mais estações avaliadas, contendo 62% da riqueza obtida em todas as estações, das quais, 194 espécies ocorrem na APA de Conceição da Barra, correspondendo a 41% de todas as estações amostrais, sendo 29 espécies exclusivas desta unidade. Quando submetidos a uma análise de agrupamento, a riqueza acompanhou a compartimentação proposta pelo monitoramento.

### **Compartimentos C e B': os mais impactados**

Os Compartimentos B' e C, devido à proximidade da foz e do sentido preferencial da deriva longitudinal, são os que recebem e depositam os maiores teores de lama e de contaminantes na antepraia e, em menor quantidade, na praia emersa.

### **Compartimento C**

Os resultados indicam que o Compartimento C tem se apresentado como a região da malha amostral mais severamente impactada pelo aporte do Rio Doce, onde maiores concentrações dos elementos químicos (Al, Ba, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e V) são encontrados na isóbata de 10 metros, juntamente com os maiores teores de lama litoclástica. Os parâmetros ecológicos da macrofauna e meiofauna bentônica apresentam relações negativas com o aumento de As, Al, Ba, Fe e Pb na antepraia. Além disso, a riqueza da macrofauna e a densidade de copépodos, que são organismos mais sensíveis, vem reduzindo com o tempo. Por outro lado, há uma tendência de aumento da densidade de Nematoda,

que interfere na densidade total da meiofauna. Neste caso, é importante reforçar a característica tolerante de diferentes gêneros da nematofauna.

Desta forma, com base nos indicadores morfodinâmicos, geoquímicos e da fauna bentônica pré-estabelecidos, o ambiente praial permanece indicando impacto nas praias próximos à foz e ao norte da desembocadura do Rio Doce (Compartimentos B' e C). Os indicadores ecológicos da fauna bentônica continuam apresentando relações com elementos químicos potencialmente tóxicos associados aos rejeitos de minério de ferro (Fe, Al, Mn, As, Ba, Ni) que estão em maiores concentrações nesses compartimentos. No Compartimento C, por exemplo, a densidade da macrofauna e a diversidade de *Shannon-Wiener* da meiofauna vem reduzindo ao longo do tempo, além de ocorrer a instabilidade na densidade de diversos grupos chaves. Destaca-se ainda que, a contaminação por elementos químicos nos sedimentos praias, representada pelos altos níveis de As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Zn e Pb, foi transferida para os ovos de tartarugas durante o período de incubação nas praias do Compartimento C, como também nos Compartimentos B' e A.

Na avaliação temporal, os maiores índices de contaminação e maiores impactos do rejeito sobre a comunidade bentônica de praia e no sedimento dos manguezais estão associados ao compartimento C. Os teores de lama na antepraia se mantêm alto durante todo o período de monitoramento, atingindo maiores teores de lama durante períodos chuvosos, na profundidade de 10 m, quando também se observa as maiores concentrações de elementos químicos, tais como Al, Ba, Cr, Fe, Ni e Pb, possivelmente relacionados à alta vazão do Rio Doce neste período. Considerando a série histórica e o índice de contaminação (*SQG-q sediment quality guidelines quotient*) observa-se que não há a tendência nem de recuperação ou agravamento das praias, pois sazonalmente se alternam os valores altos e médios e as praias se apresentam como moderadamente contaminadas. Para Al, As, Ba, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e V os valores de concentração passam os limites de TEL e AET. As concentrações em janeiro/2022 foram ligeiramente menores em relação à campanha de julho/2021, porém ainda muito altas, o que indica que as praias desse setor ainda estão impactadas. Os parâmetros ecológicos da macrofauna são afetados pelo aumento de Fe, Ba e Pb e da meiofauna por Al, Fe, As e teor de lama, sem distinção entre as diferentes profundidades das isóbatas. Para as praias emersas, o monitoramento vem mostrando uma tendência de redução da densidade da macrofauna nesse compartimento e ao longo das campanhas, assim como a redução da diversidade de *Shannon-Wiener* e equitabilidade de *Pielou* da meiofauna. No entanto, ambos parâmetros têm relações negativas com o Al, que está presente em maior quantidade nesse compartimento. Sendo assim, no Compartimento C os parâmetros da macrofauna das praias emersas continuam com valores reduzidos onde deveriam ser altos, como previsto na literatura para praias com características mais dissipativas.

Com relação às alterações morfológicas, as praias do Compartimento C, nota-se uma tendência erosiva clara na praia de Degredo (N2) durante todo o período de monitoramento, independente do período chuvoso ou seco, com o recuo da linha de costa em aproximadamente 20m. Nesse local, onde se tem registrado dados pré-rompimento, ainda é verificada a instabilidade dos valores dos parâmetros ecológicos da fauna bentônica. O restante das praias desse Compartimento apresenta variações

morfológicas ao longo de todo perfil desde a antepraia rasa até à base da duna frontal, porém insuficientes para causar a desestabilização da duna frontal e recuos significantes na linha de costa.

Assim, este compartimento mantém estabilidade morfológica com registros de recuo da base da face praial mais frequentes no período chuvoso (verão) nas praias de Pontal do Ipiranga (N3) e Barra Nova (N4), tornando-se morfológicamente mais estáveis ainda em direção ao norte, praias de Guriri (N5) e Itaúnas (N6). A transposição da berma pelo espraçamento apresenta frequência média de ocorrência de 25% ao longo do monitoramento. Em janeiro/2022 apenas as praias de Degredo (N2) e de Pontal do Ipiranga (N3) apresentaram eventos de transposição da berma. De todo modo, este Compartimento merece mais atenção, pois a menor inclinação do perfil das praias e a presença de lama e areia fina na antepraia, favorecem a permanência e distribuição transversal dos elementos químicos, desde a antepraia onde as concentrações são mais altas, até a praia, restingas e ao longo dos manguezais.

Mesmo associada a cordões litorâneos mais estáveis, é no Compartimento C que se observa a redução dos valores de importância de espécies típicas da restinga da região à barlavento. Esse cenário incluiu quatro espécies estoloníferas com características de desenvolvimento semelhantes à *Panicum racemosum* e uma espécie subarbustiva ameaçada de extinção (*Scaevola plumieri*), frequentemente encontrada no topo da duna frontal e à sotavento. Apesar desta última não apresentar caule estolonífero, a literatura indica que a espécie tolera soterramento e consequente brotamento de seus ramos apicais, intensificados principalmente no período chuvoso (PETER, 2000). No entanto, os dados indicam que o crescimento da espécie não alcançou os valores de importância obtidos durante o período chuvoso do Ano 1, mesmo sob condições brevemente satisfatórias (RRDM, 2022). As informações obtidas para a comunidade herbácea indicaram melhora pontual (em Aldeia do Coco-E3) na taxa de cobertura da vegetação sobre as dunas dentro do Compartimento C, mas com valores inferiores na APA de Conceição da Barra e em Barra Nova (E4). Desta forma, os dados corroboram a estabilidade morfológica atual desse Compartimento e a inexistência de desmoronamentos pontuais da duna frontal que permitissem o alcance das ondas nos trechos mais estabilizados, outrora documentado neste Compartimento, pela desestruturação da duna semifixa onde desenvolve-se *Mitracarpus eichlerii* (uma espécie ameaçada de extinção).

Houve também alterações na sincronia reprodutiva, concentradas na comunidade herbácea da APA de Conceição da Barra (E1), com menor capacidade reprodutiva da vegetação no Ano 1, com possíveis comprometimentos dos processos reprodutivos das áreas monitoradas. Estas respostas biológicas responderam à presença de elementos minerais no ambiente e na vegetação, apresentando relação significativa com as concentrações foliares de Mn, As e Pb, e sedimentares de Zn. Por outro lado, os dados atuais indicaram melhora sobre a intensidade da frutificação e disponibilidade de flores, destoando dos resultados dos anos anteriores. As análises da água da antepraia, incluída no novo ciclo de monitoramento, na maioria das estações amostrais do ambiente costeiro, apresentaram concentrações acima do nível crônico estabelecido pela *British Columbia Water Quality Guidelines* (NOAA - BUCHMAN 2008), indicando uma condição de poluição. Alguns elementos contidos na fração dissolvida da água coletada na isóbata de 5m das praias monitoradas são encontrados em concentrações muito equivalentes ao que é quantificado no particulado depositado sobre as folhas das

plantas herbáceas, em Cacimbas (E6) e Degredo (E10) (transição Compartimento C e B'), como é o caso do As e do Mn. À medida que a vegetação adentra o continente, nas formações arbustivas e arbóreas, essa abundância diminui, como esperado. Desta forma, a exposição das plantas ao aerossol marinho pode favorecer a adesão dos elementos na superfície das folhas, possibilitando a penetração no mesófilo foliar através de fissuras cuticulares e dos estômatos (MAUN, 2009), bem como, via absorção radicular. Observa-se no sedimento o aumento na concentração desses elementos, aprisionados por componentes da matriz, como a matéria orgânica e estando disponíveis às plantas por tempo prolongado.

A textura da vegetação é outro fator que afeta a captura dos elementos minerais, especificamente em termos do que chega à vegetação via aerossol marinho (MAUN, 2009). No caso das espécies herbáceas, essa captura aumenta à medida que se tornam mais rugosas. Essa rugosidade é notada através do índice de diversidade de Shannon, cujos valores mais altos estão neste Compartimento, onde as taxas de contaminantes do material depositado sobre a vegetação foram elevadas (RRDM, 2022). Maiores concentrações de elementos químicos observados na vegetação das formações herbáceas e arbustivas localizadas ao norte do Rio Doce são, portanto, decorrentes das particularidades da distribuição da vegetação. Nas plantas destas formações, uma clara distinção sazonal de produtividade primária é observada para os períodos chuvosos, associados aos aumentos na concentração de metabólitos do sistema antioxidante. Na comunidade arbórea, o comprometimento fotossintético pode ser observado, especialmente no Ano 4. Dentre as formações, as espécies arbustivas e arbóreas apresentaram menor vitalidade da vegetação, especialmente as espécies arbustivas. Particularidades entre as formações vegetais podem ser potencializadas pelas diferenças na composição dos sedimentos sob as comunidades mais próximas à praia, como a escassez no conteúdo de matéria orgânica, baixa retenção de água, alta suscetibilidade à radiação luminosa e a eventos adversos nas praias, como a deterioração de dunas frontais provocadas por eventos de inundação e maré cheia (RODRIGUES et al., 2016; SOUZA, 2016).

O aporte de elementos químicos via aerossol marinho, suas concentrações no sedimento e bioacumulação no tecido vegetal tiveram reflexo direto na resposta da **Vitalidade da vegetação** da Restinga, indicador selecionado por integrar as categorias biológicas de resposta das suas comunidades, Produtividade primária, Metabolismo primário, Estresse oxidativo e Reprodução, em razão das oscilações no aporte de elementos que chegam à costa via Rio Doce e pela contribuição marinha. Como a alta toxicidade de elementos pode causar comprometimentos na produtividade primária e estresse oxidativo (FOY et al. 1978, BECANA et al. 1998), efeitos sobre o sucesso reprodutivo podem ser esperados (KUKI et al. 2008).

Associada à granulometria desse Compartimento, a predominância de sedimentos de granulometria mais fina no substrato dos manguezais de Urussuquara, Barra Nova e São Mateus favorece a permanência dos elementos químicos sobre o sedimento e nas folhas da *Rhizophora mangle*. Destaca-se a maior concentração de Mn, principalmente nos períodos secos, associada à maior intensidade dos ventos e possibilidade de transporte por aerossol, o que reduz o desempenho fotossintético causando a menor assimilação de carbono e ainda, maior estresse oxidativo. Por outro lado, o indicador ecológico



de biorremediação, por meio da análise do fator de bioacumulação nas folhas de *R. mangle* e *Laguncularia racemosa*, identifica as plantas do manguezal como capazes de armazenar diversos contaminantes presentes no rejeito da mineração e registrados nos sedimentos e coluna d'água do ambiente costeiro, destacando-se o Mn, Cu, Zn e Pb, com menor acumulação para o Fe. A geomorfologia do estuário de Urussuquara, menos desenvolvido, pode atuar sobre os processos hidráulicos e geoquímicos e estar associada à alternância sazonal dos valores de densidade de *Ucides cordatus*. Os metais persistentes nos sedimentos ao longo da série temporal, marcadamente Cr, Mn e Zn, estão associados as áreas com os menores tamanhos médios desta espécie. Sob o ponto de vista socioeconômico, a persistência dos metais e recorrentes contaminações em função das vazões do Rio Doce induzindo redução no tamanho de carapaça requer cuidado na gestão e manejo deste recurso econômico.

### Compartimento B'

A lama na antepraia do Compartimento B' apresenta maiores variações nos teores pela influência direta da vazão do Rio Doce. Os teores máximos de lama e elementos químicos estão associados à períodos chuvosos ou eventos de alta energia de onda. O aumento significativo da vazão fluvial (período chuvoso) traz sedimentos mais mal selecionados e elementos químicos, enquanto os eventos de alta energia podem contribuir para mobilização do sedimento lamoso para antepraia. O índice de contaminação das praias (SQG-q) na isóbata de 5 metros (mais mobilizada) tem se qualificado no limiar entre não contaminado e moderadamente impactado, e na isóbata de 10 metros, sistematicamente, as praias se apresentam como moderadamente contaminadas. Os parâmetros ecológicos da macrofauna são afetados pelo aumento de Fe, Ba e Pb e da meiofauna, por Al, Fe, As e teor de lama, sem distinção entre as diferentes profundidades das isóbatas.

A grande disponibilidade de sedimentos no sistema permite manter a alta mobilidade morfológica das praias. Eventos de transposição de ondas sobre a berma não são comumente registrados no período chuvoso, devido às ondas de mar calmo, mas podem estar presentes no período seco, quando as ondas são mais altas. A estação REBio de Comboios (S6) que vinha apresentando recuo da face praial até dezembro/2019, se recuperou na campanha de fevereiro/2022 com avanço de aproximadamente 50m em relação a campanha inicial, mostrando assim certa estabilidade morfológica. Mas as praias de Regência (S7) e Povoação (N1) vem apresentando ao longo do monitoramento uma tendência geral erosiva, com recuo da linha de costa na ordem de 50m, apesar da progradação registrada de aproximadamente 100 m da face praial desde janeiro/2021 em Povoação (N1), sem, contudo, associar ao período chuvoso ou seco.

As restingas próximas à foz do Rio Doce e litoral norte se constituem as de maior recorrência de impactos à vegetação, por estarem mais sujeitas ao regime de vazão do rio e assim mais sujeitas ao impacto ambiental em função de eventos de inundação ou outras variações climáticas e morfodinâmicas, que impactem tanto a Bacia do Rio Doce como a zona costeira. Assim, a menor Vitalidade de espécies arbustivas e arbóreas e redução no valor de importância, tanto a norte quanto a sul da desembocadura, sugerem que, mesmo afastadas da linha da costa, a combinação de fatores

edafoclimáticos e o aporte a região costeira pode levar a condições desfavoráveis aos aspectos funcionais e reprodutivos da vegetação da restinga. Contudo, houve sincronia entre floração e frutificação no período chuvoso em Comboios, e para Cacimbas, os dados atuais indicaram tendência de melhora. Destaca-se o predomínio de frutos anemocóricos nas herbáceas, com pico de dispersão durante o período seco. A redução nas concentrações de elementos químicos em Cacimbas, deve ter relação com a redução da contaminação do sedimento desde o período seco do Ano 3, principalmente para a vegetação herbácea. A restinga desta estação apresenta características transicionais entre os compartimentos da região costeira, conforme corroborado pela avaliação florística da área e vem apontando resultados desfavoráveis para seu perfil fotossintético. A tendência a maiores depósitos de elementos químicos trazidos pelo aerossol tem sido observada na vegetação para herbáceas quanto arbustivas, potencialmente decorrente das particularidades da distribuição da vegetação. Uma possível influência pode ser o aumento da vazão do Rio Doce, em virtude dos altos índices pluviométricos no Ano 4, que superou os períodos chuvosos dos anos anteriores. Em contrapartida, em Cacimbas (E6), a redução nas concentrações de elementos químicos provenientes do spray, pode ter relação direta com a redução da contaminação do sedimento, desde o período seco do Ano 3, principalmente para a vegetação herbácea. Resultados como estes mostram a importância da análise da ação do aerossol marinho como uma das principais vias para a compreensão do processo de distribuição, deposição e acúmulos dos elementos químicos na vegetação e no sedimento da restinga, sejam eles contaminantes ou não (WINTON et al., 2016; DU & HESP, 2020).

Ainda sobre a comunidade herbácea da restinga, se observa a redução dos valores de importância de *Panicum racemosum* e *Blutaparon portulacoides*, encontradas à barlavento das dunas. Ambas adotam estratégias de desenvolvimento distintas. A primeira é eficiente na fixação de dunas vivas (COSTA et al. 1984), com perda de cobertura esperada em função do processo abrasivo das ondas, mas posterior colonização sob condições envolvendo menor energia e, a segunda, é uma espécie anual, formadora de “dunas de sombra”, conforme descrito por Maun (2009), que tem seu desenvolvimento relacionado com dunas incipientes (HESP, 2002), desenvolvidas a partir do acúmulo de sedimentos na praia e frequentes neste Compartimento. Apesar da literatura indicar alterações esperadas nos valores de importância nesta comunidade (e.g. PEREIRA et al., 1992, THOMAZ e MONTEIRO, 1993), houve a tendência de redução ao longo do monitoramento. Contudo os fatores envolvidos ainda não compreendidos estão atuando sobre a comunidade, principalmente sob a perspectiva de melhora não alcançada dentro do Ano 3, quando houve diminuição dos parâmetros meteoceanográficos e menor erosão praial (RRDM, 2022).

A análise dos elementos químicos indica o aumento das concentrações de As, Cr, Mn, Pb, e Al nos tecidos foliares, também dos mesmos nos elementos no sedimento, possivelmente em função da contribuição do aerossol no aumento, e nos índices de poluição do ecossistema Restinga. Para os sedimentos, o Índice Integrado de Poluição (IPI) evidenciou que há uma tendência global de diminuição da poluição, contudo com ainda excesso em As, Co e Mn, e pontualmente Pb, Cu, Cd, Cr, Zn e Ni, em relação à valores norteadores pré-rompimento, quando analisada a porcentagem acima da referência (PEAR) (EIA-Nutripetro - PSG, 2013). O período chuvoso do último ano (Ano 4) foi caracterizado por

aumento nos níveis de elementos nas estações próximas à Foz, quando comparado ao mesmo período no ano anterior. Para a vegetação, as contribuições significativas de elementos presentes na água do mar e trazidos pelo aerossol marinho foram associadas a acúmulos de Mn, As, Cr, Fe, V, Zn e Al nos tecidos foliares. Dentre estes, a vitalidade da vegetação da restinga teve estreita relação com a bioacumulação de elementos nos tecidos foliares das plantas monitoradas, principalmente expressos pelo Fator de bioacumulação (BAF) para Mn e Zn, os quais apresentaram correlações significativas com os teores de metais na folha e no sedimento, e com as variáveis das categorias de resposta biológicas da vegetação da restinga.

Assim como para os aspectos de produtividade primária, o estresse oxidativo da vegetação apresenta estreita relação com as variações foliares e bioacúmulos de Mn. Vale destacar que o elemento manganês permanece em excesso em todas as estações e formações avaliadas, e devido à sua relação com as variações biológicas avaliadas, se destaca como metal de grande impacto na flora. Somados a isso, menores índices de desempenho fotossintético e fotossíntese líquida nos períodos chuvosos estiveram associados a aumento de metabólitos primários responsivos a metais, como As, Pb, Cu e Zn. Tais respostas do dano oxidativo podem ser vistas como chave para a análise de plantas com potencial bioacumulador, já que uma espécie bio ou hiperacumuladora precisa ter características específicas em relação às elevadas taxas de absorção de metais, sistema radicular mais eficiente na translocação de nutrientes e um maior potencial de captura e retenção de elementos na parte aérea (RASCIO, 2011).

No Compartimento B', as concentrações dos elementos químicos são semelhantemente altas aos estuários do Compartimento C.

Para a espécie estudada na foz do Rio Doce *Talipariti pernambucense*, a assimilação de carbono manteve tendência de redução ao longo de todo monitoramento a partir do período chuvoso 2019/2020 e os menores valores de assimilação foram registrados nos períodos secos dos anos de 2021 e 2022. Estes dados correspondem ao período de aumento na concentração de Fe, Mn e Cu nas folhas de *T. pernambucense* (período chuvoso 21/22). Melhoria no índice de conservação de energia ( $PI_{Total}$ ) foi observada no período seco, que registrou o maior valor de  $PI_{Total}$  em 2022. *Talipariti pernambucense*, no Rio Doce, exibiu melhor desempenho fotossintético nos períodos chuvosos 2018/2019 e 2021/2022, em contrapartida os períodos secos 2021 e 2022 tiveram menor desempenho fisiológico associado ao acúmulo de metais (Fe, Mn e Cu) no tecido foliar. O chumbo afeta a vegetação (*T. pernambucensis*) e organismos no Rio Doce, e a *R. mangle*, avaliada em todos os compartimentos, também vem sendo impactada.

Elevadas concentrações de chumbo foliar em *T. pernambucensis* e no sedimento do Rio Doce foram registrados, bem como nos tecidos dos caranguejos coletados neste estuário, corroborando a estreita relação entre os indivíduos, sedimento e folhas, sendo a alimentação uma das diferentes fontes para contaminação destes organismos (PINHEIRO et al., 2012). Outra hipótese são os indícios da captura dos indivíduos adultos influenciando diretamente na densidade de adultos. Também houve redução significativa no Compartimento C, em Urussuquara, passando de 2.3 indivíduos/m<sup>2</sup> para 0.8

indivíduo/m<sup>2</sup> nos períodos chuvoso 2018/2019 e seco 2022, respectivamente. O declínio populacional observado nesta área pode ser reflexo do fechamento da foz do rio Ipiranga em 2019/2020, influenciando os processos de recrutamento e ocupação de novos habitats.

O caranguejo de mangue tem se mostrado um ótimo indicador do impacto por elementos químicos, sobre o tamanho das carapaças e densidade, mas principalmente nos estuários do compartimento C e B', representado pelo Rio Doce. A densidade de *Cardisoma guanhumi* foi inferior ou próxima a 1 indivíduo/m<sup>2</sup> em todos os períodos e estuários, exceto em Urussuquara. Ressalta-se que o perfil do habitat dessa espécie é mais homogêneo em relação ao de *U. cordatus*. Houve declínio significativo na foz do Rio Doce, onde ressalta-se o impacto direto da pluma de rejeitos sobre o habitat da espécie e os compartimentos biótico e abiótico, passando de 1.5 indivíduo/m<sup>2</sup> (período chuvoso 2018/2019) para 0.7 indivíduo/m<sup>2</sup> (período seco 2022). Apesar do ingresso de juvenis no período seco, baixa densidade foi observada nos últimos períodos amostrados. Duas hipóteses podem ser discutidas neste contexto, a elevada concentração de metais nos diferentes compartimentos (biota e sedimento), ao considerar que os resultados da análise dos metais em *C. guanhumi* na foz do Rio Doce mostraram maiores concentrações a partir do período chuvoso 2019, e que a contaminação destes organismos foi claramente mais intensa na região da foz do Rio Doce (RRDM, 2022, RT-39C, Anexo 1 Ecotoxicologia) refletindo diretamente na estrutura (frequência de jovens e adultos, recrutamento de novas cortes de indivíduos e a transição para as maiores classes de tamanho) e dinâmica (ingresso e mortalidade) da população. A média abaixo do tamanho comercial (indivíduos com largura do cefalotórax  $\geq$  mm 60 mm) em todos os períodos foi verificada. O tamanho médio foi positivamente correlacionado com a concentração de metais no sedimento (Al, Co, Cr, Cu, Fe, Pb, V e Zn) e nas folhas (Zn e Mn), demonstrando que indivíduos maiores ocorrem em bosques com as maiores concentrações de metais e juvenis em áreas com as menores concentrações. As informações geradas a partir desses resultados fornecem uma visão importante, na esfera econômica e social, sobre os compartimentos B' e C, permitindo identificar que o estoque comercial de *U. cordatus* está comprometido e que os parâmetros avaliados em escala temporal são relevantes para verificar a vulnerabilidade da espécie, especialmente os indivíduos nas maiores classes etárias, frente aos riscos da concentração de metais no compartimento biótico (flora) e abiótico (sedimento) em longo prazo. Os resultados das análises ecotoxicológicas mostraram que o IBR biomarcador indicou aumento de estresse fisiológico nos caranguejos dos estuários situados no compartimento B' e C durante o período chuvoso. Destaca-se o aumento nos teores teciduais de Mn, Cd, Cu, além do Fe na última campanha chuvosa. Os maiores níveis de lipoperoxidação nas brânquias de caranguejos nas últimas campanhas indicam que este órgão é o mais prejudicado pela exposição aos metais, visto que o mesmo se encontra em contato direto com a água.

Os caranguejos maria-farinha apontaram também um aumento considerável nos níveis teciduais de metais e, vale destacar, que este aumento foi observado nos três Compartimentos, sendo no C, observados os teores mais elevados.

### **Compartimento B: o mais resiliente**

Nos Compartimentos B e B' as praias apresentam estado morfodinâmico tipicamente refletivo com perfis elevados de areia grossa, o que restringe os eventos em que o *run-up* transpõe a berma e expulsa naturalmente os elementos químicos, que se encontram com as menores concentrações, tanto na região emersa quanto na submersa do perfil. As praias do Compartimento B permaneceram com os teores de lama próximos a zero ao longo de todo o período de monitoramento, mesmo quando há maior contribuição de sedimentos terrígenos, ou seja, alta vazão do Rio Doce nas campanhas chuvosas.

Em relação às alterações morfológicas, os perfis destas praias mantiveram-se dinamicamente estáveis durante todo o monitoramento, apesar da mobilidade comumente registrada entre a berma e a antepraia rasa, devido ao alto grau de exposição às ondas, o que favorece a remoção de frações granulométricas finas. Este é um trecho considerado, portanto, mais resiliente do ponto de vista morfodinâmico aos prováveis impactos associados à contaminação por elementos químicos, pois apresenta maior potencial de autolimpeza. Por isso, a comunidade bentônica desse compartimento apresenta menor evidência de impacto ao rejeito de minério e maior adaptação aos estresses naturais atuantes, onde a ausência dos contaminantes favorece o recrutamento e permanência dos organismos da macrofauna bentônica.

Como consequência da presença de frações granulométricas maiores de sedimento, o manguezal de Barra do Riacho, que possui a mais baixa composição de granulometria fina e maiores de cascalho e areia, quando comparado aos demais estuários, apresenta as concentrações relativamente mais baixas de elementos químicos ao longo do monitoramento, ainda que área tenha forte conexão com a bacia hidrográfica do Rio Doce. No entanto, no período chuvoso 2020/2021, Barra do Riacho apresentou as maiores concentrações para ferro, alumínio e vanádio, que pode ser reflexo da alta vazão na Bacia do Rio Doce e dos processos inundacionais em novembro de 2020. Essa situação é responsável pela baixa densidade dos caranguejos, em função do longo período em que os bosques de mangue ficaram submersos decorrentes da elevada precipitação ocorrida na região e cheia do Rio Doce, refletindo diretamente no tempo de exposição das populações na coluna d'água.

### **Compartimento A: influência geológica**

O compartimento A, que em função de suas características morfodinâmicas possui baixa mobilidade do sedimento, pode ser caracterizado como um sistema de baixa energia e possivelmente baixa resiliência quanto a aspectos de poluição. As praias mantêm estabilidade morfológica devido à presença dos terraços de abrasão, com flutuações no perfil restrita à face da praial e deslocamentos em relação ao NMM inferiores a 15m ao longo do monitoramento. Estas praias, decorrente da baixa declividade e presença do substrato laterítico na antepraia, o que dificulta a infiltração da água, apresentam elevado potencial de inundação, com ocorrências de transposição da berma, pelo espraiamento onda, superiores a 90%.

Os teores de lama na praia emersa do Compartimento A são praticamente inexistentes (0 a 0,5%) e na antepraia variam de 0 a 25,6%, contudo, o sedimento é composto majoritariamente por material



carbonático ( $T_{\text{médio CaCO}_3} = 63,3\%$ ), com área fonte local. Contudo, sob condições de ventos e ondas de nordeste com alta duração, a pluma do Rio Doce, associados aos elementos químicos do rejeito de minério, pode transpor as barreiras dos terraços e alcançar as praias, restingas e estuários, por um pequeno intervalo de tempo, o que pode permitir sua dissipação ao longo do tempo.

Desta forma, associada ao aporte terrígeno, os elementos químicos dos sedimentos das praias do compartimento A são os que apresentam maiores concentração na região emersa, com destaque para As, Hg, Mn, Ni e V. A concentração dos elementos químicos, de maneira geral, tem apresentado baixa variabilidade ao longo do monitoramento o que indica que não há uma tendência de recuperação das praias considerando a variabilidade dos resultados na série histórica. Para uma avaliação espaço-temporal dos elementos químicos, foi utilizado o índice SQG-q, (LONGHINI et al., 2022). O compartimento A, independente da feição coletada transversalmente ao perfil, vem se apresentando como moderadamente contaminado ao longo do monitoramento. Esse comportamento ressalta a influência das características geográficas e morfodinâmicas sobre a composição química das praias. Por outro lado, apesar de não serem os elementos químicos de maiores concentrações, os parâmetros ecológicos da macrofauna são afetados pelo aumento de Fe, Ba e Pb e da meiofauna por Al, Fe, As e teor de lama, sem distinção entre as diferentes profundidades das isóbatas.

Os elementos como As e Mn ainda se apresentam em excesso no sedimento das restingas apresentando teores acima dos valores pré-rompimento. Nestas restingas, caracterizadas pela formação herbácea pouco desenvolvida e com o contato da formação arbustiva com a água do mar, o material resultante do rompimento da Barragem de Fundão pode alcançar as praias (estreitas nesta região da costa) e restingas por transporte em suspensão e sob condições de ondas de nordeste. Entretanto, estas variações podem estar relacionadas à composição natural do sedimento desta região, muito distinta das demais áreas estudadas e fortemente influenciada pela Formação Barreiras e as características geológicas existentes ao longo da bacia. As contribuições para a elevação dos IPI nos períodos chuvosos estiveram relacionadas à Mn, Pb, Ni, As, V e Al. Por outro lado, os níveis de poluição dos períodos secos apresentaram maiores contribuições dos elementos As, Mn, V, Ni e Pb, sendo o período seco Ano 4 caracterizado por sinais de melhora da poluição quando comparado ao Ano 3, mostrando redução dos níveis de poluição extremamente altos para níveis altos.

Acúmulos de elementos químicos como Mn, As e Pb nos tecidos foliares contribuíram de forma recorrente para as reduções na eficiência do aproveitamento da luz e no ganho de carbono das comunidades de restingas neste compartimento, assim como em restingas localizadas nos Compartimentos B' e B (Cacimbas e REBio Comboios), acarretando no comprometimento do metabolismo primário e aumento do estresse oxidativo ao longo de toda a costa monitorada e podem estar relacionados a estratégias de atenuação de possíveis impactos adversos do aumento da bioacumulação nas plantas. Por outro lado, a intensidade de floração foi acompanhada pela mesma intensidade de produção de frutos, indicando que os eventos de polinização abióticos e bióticos ocorreram naturalmente neste setor. Picos de floração na comunidade herbácea ocorrem principalmente entre as espécies presentes em pequenos trechos estabilizados e menos afetados pelas inundações da praia e hidrodinâmica das ondas. A intensidade de frutificação da comunidade arbustiva

acompanhou a proporção de floração e superou na arbórea, em virtude do desenvolvimento tardio de frutos secos de espécies trepadeiras, que preferencialmente dispersam de seus frutos durante o período seco.

Também influenciado pela geomorfologia e sedimentologia local, o ecossistema manguezal do Compartimento A diferencia-se dos demais por apresentar sedimentos com elevadas concentrações de  $\text{CaCO}_3$ , decorrentes da maior influência marinha, e ricos em matéria orgânica. Ao longo do monitoramento, as folhas permanecem associadas à maior assimilação de carbono e maior concentração de metais no tecido foliar (Fe, Zn e Cu). No período chuvoso, a maior assimilação de carbono foi associada à concentração de Zn, Fe e Pb no tecido foliar. Houve correlação positiva entre os metais e alguns parâmetros fisiológicos que podem indicar atuação positiva destes metais, sugerindo que para o aparato fotossintético, esses elementos químicos tornam-se tóxicos apenas quando em altas concentrações. No novo ciclo do PMBA/Fest ficou acordado que *T. pernambucense* seria avaliada em outros locais, assim foi selecionado novas áreas de monitoramento da espécie nos estuários do rio Piraquê-Açu a vegetação do Piraquê-Açu, que apresenta melhor desempenho fisiológico.

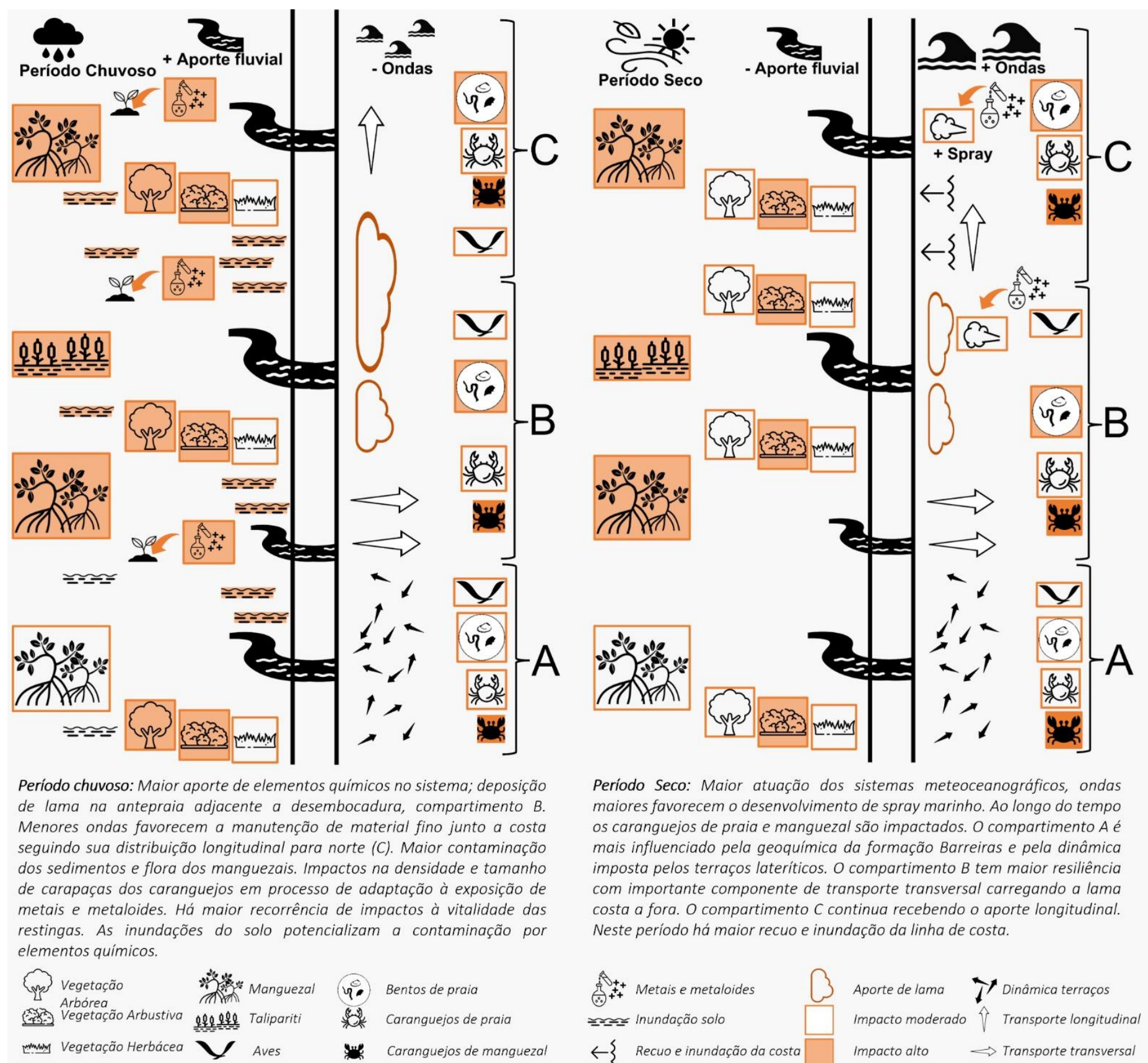
Os parâmetros estruturais dos caranguejos (densidade e tamanho médio da carapaça) se mantêm uniformes ao considerar os períodos de abrangência do PMBA/Fest, nos quais as médias de tamanho ficam próximas a faixa etária dos adultos ( $\text{LC} > 45 \text{ mm}$ ) a partir do Ano 3, mas inferiores aos dados pretéritos existentes. É importante elucidar que os indivíduos nas maiores classes de tamanho foram registrados em bosques que apresentaram maior concentração de chumbo (Pb) no sedimento nos estuários do Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim. Ressalta-se que o Pb é um elemento não essencial, não possuindo função biológica (DUARTE et al., 2020) e causam danos irreversíveis a biota local (COSTA et al., 2018). Duarte et al. (2017) encontraram correlação significativa entre a concentração deste metal na água e nas folhas de *R. mangle* com o impacto genotóxico em *U. cordatus*. Correlações significativas negativas também foram verificadas entre a concentração de Pb foliar e o tamanho dos indivíduos nas populações no Piraquê-Açu ao considerar toda a abrangência temporal do PMBA/Fest. Os resultados do IBR bioacumulação indicam um aumento nos níveis de metais nos tecidos destes animais ao longo do monitoramento, destacando-se principalmente o aumento dos teores teciduais de As, Fe, Hg e Zn, sendo o As e Hg muito abundantes nos sedimentos das praias. De maneira similar, os resultados do IBR bioacumulação em caranguejos maria-farinha das praias apontaram um aumento considerável nos níveis teciduais de metais nos organismos ao longo do monitoramento, como observado principalmente para os elementos Cr e Fe.

Complementando os dados da ecotoxicologia, os resultados do IBR obtidos para os outros invertebrados (anfípodes e isópodes) coletados nas praias apontaram, de maneira geral, pouca variação e tendência de estabilidade dos níveis dos elementos químicos nestes organismos entre os diferentes Compartimentos, ao longo do monitoramento após o impacto agudo da campanha de setembro de 2018. Por outro lado, os maiores níveis de Hg em invertebrados de praia e nos outros organismos costeiros durante os períodos chuvosos sugere o maior aporte deste elemento para os ambientes costeiros sob altos índices pluviométricos. Em relação ao monitoramento das aves, os níveis de compostos orgânicos no sangue não apresentam padrão temporal evidente de contaminação, uma

vez que as diferentes classes de contaminantes orgânicos estiveram associadas a compartimentos diferentes ao longo das seis campanhas realizadas, o que pode ser reflexo da grande capacidade de deslocamento e uso de habitats por estes animais, entre os diferentes ecossistemas costeiros. Com relação aos resultados das quantificações de elementos químicos em amostras (penas e sangue), o IBR bioacumulação também indica a diminuição temporal nos níveis nestes organismos, tal qual observado nos organismos de praia.

### 2.3.5 Síntese gráfica

Figura 10: Síntese gráfica dos processos e respostas sazonais dentro do Ambiente Costeiro.





### 2.3.6 Perspectivas e considerações

Praia - Os indicadores morfodinâmicos parecem até o momento satisfatórios, contudo, a variável declividade da face da praia e antepraia original, ou seja, antes da chegada do rejeito de lama no litoral, é uma informação ausente ou imprecisa, o que pode dificultar a avaliação de uma possível tendência de aplainamento do perfil topográfico por conta da presença de lama no sistema praial. O monitoramento da linha de costa, com apresentação dos dados no próximo relatório pode auxiliar nessa análise.

A análise composicional exclusivamente da lama pode ser feita pode identificar a procedência terrígena ou marinha da lama. Para isto é necessário refazer análises de composição de algumas amostras da antepraia das campanhas anteriores. Como a expectativa de continuidade e de aprimoramento do monitoramento, seria adequado concluir o mapeamento da lama de fundo com uma malha amostral refinada na antepraia até o limite com a plataforma continental interna (20 m de profundidade) na região do polígono desenhado na frente da foz do Rio Doce. Com a mesma importância, registra-se aqui a necessidade de imagens aéreas atuais, obtidas por meio de *drone*, para a avaliação da mobilidade da linha de costa e da declividade da face praial de detalhe. Os indicadores da fauna bentônica se apresentam em discordância da literatura mundial para praias arenosas e revelam relações negativas com a presença de elementos químicos característicos do rejeito, mostrando-se até o presente momento satisfatórios para o monitoramento. No entanto, os poliquetas intersticiais (*Saccocirrus pussicus* e *Hesionura variodentata*), possuem preferências por grãos mais grossos e não estão respondendo aos impactos do rejeito. Desta forma sugerimos excluir a análise destes organismos do escopo. Com a tendência de diminuição nos valores dos parâmetros da fauna bentônica no compartimento C e a instabilidade nos dados coletados na estação amostral Degredo (N2), a continuidade do monitoramento se faz necessária para o entendimento da resiliência da fauna bentônica neste compartimento e como este se dará ao longo do tempo.

Restinga - Além do monitoramento *in situ*, outra ferramenta para a definição de estratégias de reparação tem sido a análise *ex situ* de espécies em cultivo protegido. A maioria das espécies da Restinga são de crescimento lento, mas as análises preliminares já permitiram distinguir dentre as herbáceas *Blutaparon portulacoides*, *Canavalia rosea*, *Ipomoea imperati*, *Ipomoea pes-caprae*, dentre aquelas coletadas durante o período seco, como de porcentagem maior de estacas mortas quando comparado ao que foi coletado no período chuvoso, tendo *B. portulacoides* a mortalidade mais alta e *I. pes-caprae* com baixo índice de mortalidade nos dois períodos. Esta última apresentou maiores valores para os parâmetros de crescimento vegetativo no período chuvoso. Esses resultados mostram que os fatores extrínsecos como a sazonalidade podem afetar as condições fisiológicas endógenas e fornecem subsídios às futuras propostas de recuperação.

Resultados importantes também têm sido observados quanto ao brotamento de uma espécie listada como “vulnerável” na lista de espécies da flora silvestre ameaçada de extinção no Espírito Santo, *Jacquinia armillaris*. O viés de recuperação baseado em metodologias de brotamento e enraizamento



de estacas configura-se como importante estratégia metodológica para a superação de dificuldades de propagação por sementes, permitindo a participação das comunidades do entorno das áreas afetadas nos processos de recuperação do ecossistema.

Além dessas análises estão em desenvolvimento os ensaios buscando identificar o potencial uso de microrganismos promotores de crescimento vegetal nas áreas costeiras. Resultados preliminares já destacam o potencial de colonização e a maior capacidade da microbiota associada ao sistema radicular das espécies da formação herbácea como promotora de crescimento. Além disso, as espécies desta formação demonstraram maior capacidade de solubilização de fosfatos e de produção de quitinases, em comparação às arbustivas e arbóreas.

Esses ensaios buscam não somente identificar as possíveis linhagens de interesse em plantas bioacumuladoras, que poderão auxiliar sua aplicação em uma fase futura de recuperação da Restinga, como também identificar por meio de ferramentas moleculares, genes que expressem habilidades de interesse. A partir dessa perspectiva, serão analisados genes de produção de reguladores de crescimento (principalmente auxinas), fixação de nitrogênio e produção de ACC deaminases (envolvidas nos processos de germinação e crescimento radicular).

Outras metodologias em teste têm visado aplicar o uso de bioensaios para a determinação do efeito dose-resposta a partir de extratos solubilizados do sedimento na avaliação de danos aos sistemas biológicos/bioquímicos e moleculares, com a obtenção, dentre outros, de índices de germinação e crescimento radicular e análises quebras simples na cadeia de DNA, a partir desses extratos.

Manguezal - Os resultados do monitoramento dos manguezais descrevem a resiliência da floresta em amenizar os efeitos tóxicos dos metais sobre o sistema costeiro, funcionando com sumidouros de tensores químicos. Por outro lado, os estudos realizados com a vegetação durante o monitoramento indicam capacidade de biorremediação, entretanto, isto ocorre às expensas do desempenho fotossintético, aspecto que em longo prazo pode comprometer com a produtividade primária (D'ÁDAZZIO et al. 2023) e trazer sérias consequências sobre a cadeia alimentar costeira. Neste aspecto, nas florestas de mangue foi identificado o impacto do rejeito de mineração sobre a estrutura populacional das espécies de caranguejos de interesse social e econômico: *U. cordatus* e *C. guanhumii*. O monitoramento populacional do caranguejo uçá nos estuários do litoral norte capixaba identificaram danos imediatos causados pela presença dos metais associados aos rejeitos no ciclo larval. Este diagnóstico é feito com base nas lacunas observadas relativas ao ingresso nas cortes correspondentes aos anos de 2016 e 2017, quando se analisa a estrutura populacional em longo prazo e comparadas aos dados pretéritos para os rios São Mateus e Piraquê (SPINASSÉ e TOGNELLA, 2020). Este impacto, associado à contaminação in situ, isto é, nas florestas de manguezal tem descrito redução no tamanho médio populacional (LIMA et al. 2023). A ausência de dados pretéritos para ao guaiaum dificulta esta interpretação, entretanto, como o ciclo de vida da espécie também está associado ao ambiente costeiro e que a maior população da espécie (em termos de densidade) ocorria no Rio Doce, assume-se que os mesmos danos ocorreram sobre estas populações.

Desta forma, há necessidade de continuidade no monitoramento destes estuários uma vez que se identificam impactos sobre a flora e fauna específica dos manguezais. Estudos de diversidade genética para as espécies vegetais e dos caranguejos estão sendo conduzidos no sentido de avaliar a capacidade de resposta em longo prazo destes recursos e, conseqüentemente, do ecossistema manguezal como um todo. Entretanto, estes estudos devem ser ampliados nos próximos anos para contribuir de forma efetiva com os processos de mitigação do dano, uma vez que a biorremediação foi identificada (D'ÁDDAZIO et al. 2023). A contaminação recorrente dos estuários, por meio da vazão do Rio Doce, associados aos demais tensores existentes, aqueles em andamento (aumento da temperatura ambiental e outros processos relacionados às mudanças climáticas), bem como, as políticas públicas estaduais projetadas para a zona costeira capixaba podem vir a agravar a qualidade ambiental dos manguezais neste litoral.

Ecotoxicologia - A discussão apresentada neste relatório foi baseada a partir de resultados alcançados ao longo do monitoramento (setembro/2018 – setembro/outubro 2022) na área ambiental I, dando enfoque aos resultados obtidos durante a coletas de março de 2022 (Campanha 7, período chuvoso) e, quando permitido pelo conjunto de dados, pelos perfis espaciais e/ou temporais. Porém, este relatório não apresenta as concentrações de metais e As na água e sedimento e as correlações espaço-temporais associadas a estes dados, tampouco os resultados de bioacumulação e respostas de biomarcadores na biota para o período seco de 2022. Tais análises encontravam-se suspensas até fevereiro de 2023 por ordem da Fundação Renova. Apesar disto, estas avaliações estão agora liberadas e em andamento, e os resultados gerados serão apresentados e discutidos em relatórios futuros.

### 3 MATRIZ DE RESULTADOS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Em atividade desde junho de 2018, o Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I é executado pela Fundação Espírito-santense de Tecnologia (PMBA/Fest), no âmbito do TERMO DE REFERÊNCIA 4 e inclui o monitoramento de parâmetros/indicadores abióticos e bióticos, sempre com o objetivo de entender as alterações espaciais e temporais na qualidade e na biodiversidade dos Ambientes Dulcícola (porção capixaba do rio Doce), Marinho e Costeiro.

Para tanto, o conceito de impacto utilizado pelo PMBA/Fest é aquele definido no Artigo 1º da Resolução n.º 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Conforme esta legislação, **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 do conceito é que são produzidas alterações no meio ambiente induzidas pela ação humana ou em decorrência das suas atividades, afetando assim a biodiversidade, os recursos naturais e os serviços ecossistêmicos. Tais alterações geram uma ameaça à saúde, segurança e atividades sociais e econômicas e são, sob o ponto de vista ambiental, insustentáveis.

Tendo em vista a dimensão de seu escopo, a apresentação dos principais resultados pelo PMBA/Fest sempre foi um desafio. Em dezembro de 2020, o PMBA/Fest propôs a construção de uma Matriz de Resultados, construída a partir da adaptação de uma Matriz de Interação (LEOPOLD et al 1971), como forma complementar e integrativa de apresentar a avaliação espacial e temporal dos impactos diretos ou indiretos causados pelo rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG), de forma a facilitar a compreensão dos resultados do PMBA/Fest, contribuindo, assim, para o completo atendimento do Termo de Referência 4 (TR4). A construção de Matriz de Interação é amplamente utilizada em Estudos de Impacto Ambiental e Relatórios de Impacto Ambiental (EIA-RIMA) no Brasil.

Apesar do conceito inicialmente baseado na Matriz de Interação proposta por Leopold et al (1971), o produto alcançado pelo PMBA/Fest se diferencia em muitos pontos de seu modelo original e utiliza ainda outros métodos e análises em sua construção. Diferentemente de uma matriz de impacto, que é um modelo de previsão que leva à indicação de ações que subsidiarão as atividades e ações visando monitorar e mitigar os impactos que ainda poderão ser causados por um empreendimento, o conceito aplicado na presente Matriz de Resultados volta-se à apresentação e análise do conjunto de impactos, observados como resultados dos anos de execução do PMBA/Fest, após o evento causador, ou seja, após o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.

A cada ano a Matriz de Resultados PMBA/Fest se consolida e aumenta sua credibilidade com a inclusão de novos dados e contínuo aperfeiçoamento de todas as etapas de sua construção, reforçando o caráter acumulativo de resultados ao longo do monitoramento. Em 2021, por exemplo, sua estrutura de critérios foi revista de forma a considerar apontamentos pertinentes realizados pelo Instituto Ekos

(EKOS, 2021), na forma de *peer review*, quanto às considerações desta consultora da Fundação Renova durante o processo de avaliação da primeira versão da Matriz de Resultados referente ao Relatório Anual de 2020 (RRDM, 2020). Da mesma forma, para a atualização da Matriz de Resultados do Ano 4 do monitoramento (dados até o período seco de 2022), também foram consideradas sugestões de melhorias metodológicas identificadas durante workshops internos ao PMBA/Fest.

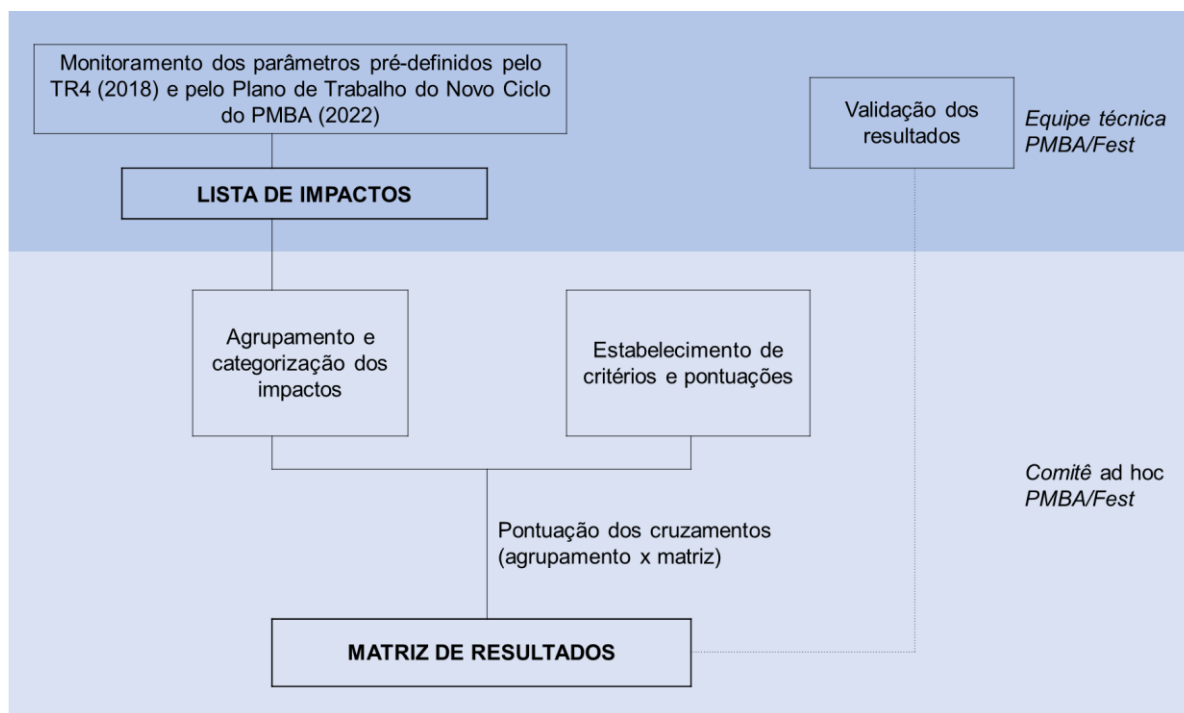
Dessa forma, o objetivo da presente Matriz de Resultados é avaliar, a partir das contribuições dos pesquisadores que conduziram os estudos específicos do PMBA/Fest, os impactos que ocorreram ou que ainda ocorrem em diferentes compartimentos (abiótico e biótico) e que afetaram ou ainda afetam os diferentes níveis tróficos das cadeias alimentares dos ecossistemas estudados. Cabe destacar que o uso de matrizes de interação, como a apresentada neste relatório, permite apresentar de forma clara e sistematizada os principais resultados do PMBA/Fest, de modo que todas as instituições interessadas e a sociedade possam usufruir dos resultados obtidos a partir do trabalho realizado.

### 3.2 METODOLOGIA

A metodologia de avaliação dos impactos ambientais do PMBA/Fest tem como base a Matriz de Leopold (LEOPOLD et al, 1971) com as devidas adaptações para o enquadramento da mesma no escopo do PMBA/Fest. A Matriz de Resultados PMBA/Fest é construída a partir de dados adquiridos após a ocorrência de impacto agudo e durante a ação do impacto crônico associado ao rompimento da Barragem de Fundão, diferente da matriz originalmente proposta por Leopold e colaboradores, que é preditiva, ou seja, é feita para uma situação hipotética, antes do evento de perturbação no meio. A Matriz de Resultados do PMBA/Fest também leva em consideração um número maior de atributos/critérios baseados tanto em matrizes de interação (LEOPOLD et al, 1971; GLASSON et al. 2005), quanto na experiência dos pesquisadores envolvidos durante a execução do PMBA/Fest.

O processo de construção da Matriz de Resultados PMBA/Fest (Figura 11) se inicia a partir de uma lista de impactos pré-definida, construída com base na resposta de parâmetros e indicadores monitorados ao longo dos quatro anos do PMBA/Fest – 2018 a 2022. As listas de impactos produzidas pelas equipes técnicas são então compiladas e o comitê *ad hoc* realiza o agrupamento dos impactos de acordo com sua natureza e não mais de acordo com o tema estudado. A partir de tais agrupamentos, cada compartimento impactado é pontuado em critérios pré-estabelecidos, de acordo com suas características descritas. Os cruzamentos entre as linhas e colunas (agrupamento de impactos x compartimento atingido) são pontuados, resultando em um valor e uma classificação que expressam o produto da Matriz de Resultados. O resultado passa por revisão e verificação das equipes técnicas e então a Matriz de Resultados chega ao seu formato final.

Figura 11: Fluxograma das principais etapas e produtos (linhas em **negrito**) do processo de construção da Matriz de Resultados do PMBA/Fest e de seus responsáveis.



Os coordenadores dos temas que compõem o PMBA/Fest participam ativamente do processo de construção da Matriz de Resultados. A relação de professores e pesquisadores e demais colaboradores envolvidos nos projetos técnico-científicos que fazem parte do PMBA/Fest e que, consequentemente, contribuíram ativamente na elaboração da lista de impactos, está sendo apresentada no Sumário Executivo que compõe o RA2022.

A pontuação da Matriz de Resultado do Relatório Anual de 2022 (PMBA/Fest), com base nos critérios pré-estabelecidos, foi realizada por um grupo *ad hoc* de professores/pesquisadores/profissionais com grande experiência em suas respectivas áreas de atuação, sendo eles:

- Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (<http://lattes.cnpq.br/3676657135006759>)
- Fabian Sá (<http://lattes.cnpq.br/9329106914297651>)
- Jacqueline Albino (<http://lattes.cnpq.br/1609264897582182>)
- Stéfano Zorzal de Almeida (<http://lattes.cnpq.br/3680096174839424>)
- Alex Cardoso Bastos (<http://lattes.cnpq.br/2951081353357019>)
- Tarcila Franco Menandro (<http://lattes.cnpq.br/6958042160031234>)
- Anna Paula Lage Ribeiro (<http://lattes.cnpq.br/5167753888907372>)
- Laura Silveira Vieira Salles (<http://lattes.cnpq.br/7435312200966903>)
- Lara Gabriela Magioni Santos (<http://lattes.cnpq.br/3429478247044392>)



- Fernanda Jurka Alves (<http://lattes.cnpq.br/5852047153249788>)

### 3.2.1 Lista de impactos

A lista de impactos ou alterações observadas é produzida pelos pesquisadores de cada tema constituinte do PMBA/Fest a partir dos parâmetros/indicadores monitorados no âmbito do seu trabalho, a partir da sistematização de suas análises e interpretações.

Para este fim, e buscando dar robustez às análises executadas e suas relações com possíveis alterações ou impactos observados, foram estabelecidas referências básicas, desde o primeiro relatório apresentado em 2019, a partir das quais as alterações ou impactos puderam ser caracterizados. A definição das referências 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 impactado, e se a biodiversidade apresenta alguma resposta biológica/ecológica em diferentes níveis tróficos, a depender do critério avaliado.

As referências foram definidas conforme o conjunto de dados e informações utilizadas pelos pesquisadores, considerando a comparação entre resultados obtidos pelo PMBA/Fest e: **(A)** dados pretéritos ao rompimento da barragem de Fundão; **(B)** dados posteriores ao rompimento da barragem de Fundão identificados na área de atuação do projeto, mas anteriores ao início da atuação do PMBA/Fest; **(C)** em forma de análise espacial entre estações amostrais impactadas e não impactadas; **(D)** a correlação direta com a presença de elementos químicos característicos do rejeito (Fe, Al, Mn, Ba, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn) **(E)** dados disponíveis na literatura científica; **(F)** valores orientadores da legislação nacional vigente; e **(G)** valores orientadores internacionais. Além destes, a partir do Relatório Anual de 2021, foi estipulado o critério **(H)**, que considera a comparação entre os resultados obtidos ao longo da execução do PMBA/Fest, visando a abordagem de análise temporal de todo o conjunto de dados gerados ao longo dos anos de execução do referido programa de monitoramento.

Além da identificação dos impactos observados, a lista elaborada pelas equipes técnicas do PMBA/Fest detalha as informações sobre o nível ecológico de organização atingido (meio abiótico, indivíduo, população, comunidade ou ecossistema), o compartimento ambiental (água, sedimento ou biota) avaliado, a relação do impacto com o rompimento da barragem de Fundão (direta, indireta ou sem relação definida ainda), bem como sua abrangência espacial (estações amostrais ou setores) e abrangência temporal (de acordo com a periodicidade em que o impacto é observado).

A relação com o rompimento da barragem de Fundão foi estabelecida após uma avaliação técnica cuidadosa, realizada pelos coordenadores responsáveis pelas análises executadas no âmbito do PMBA/Fest. As avaliações consideraram uma relação direta quando é possível afirmar que o impacto é decorrente diretamente da passagem do material oriundo do rompimento da barragem ou está associado à presença do rejeito no ambiente. A relação indireta foi estabelecida quando não é possível afirmar que o impacto foi influenciado diretamente pela passagem do material oriundo do rompimento da barragem ou pela presença do rejeito no ambiente, mas sim de forma secundária/indireta ou quando é parte de uma cadeia de reações. Por sua vez, quando não é possível afirmar que o impacto é

decorrente da passagem do material oriundo do rompimento da barragem ou não está associado à presença do rejeito no ambiente, foi estabelecido que o impacto não possui ainda uma relação definida.

Os impactos listados foram então organizados em agrupamentos pelo comitê *ad hoc* do PMBA/Fest através de discussões interdisciplinares. Essa metodologia permite que as informações sejam analisadas de acordo com os agrupamentos, de modo a sistematizar os impactos observados, baseando-se em palavras-chaves semelhantes, por sua vez identificadas na descrição dos impactos. Embora a lista de impactos seja diferente para cada ambiente, os agrupamentos de impactos identificados pelo PMBA/Fest são organizados em categorias, que englobam temas transversais e permitem uma comparação e avaliação entre os Ambientes.

### 3.2.2 Quantificação da matriz de resultados

A Matriz de Resultados do Relatório Anual 2022 (PMBA/Fest) é uma matriz de interação e funciona como uma listagem de controle bidimensional, dispondo ao longo de seus eixos vertical e horizontal, respectivamente, os agrupamentos de impactos organizados em categorias e os compartimentos ambientais que foram afetados, sejam eles abióticos ou bióticos.

Os compartimentos ambientais foram estabelecidos de acordo com as matrizes identificadas na lista de impactos e variaram entre os três Ambientes, de acordo com as especificidades dos resultados de cada um deles.

Os agrupamentos de impactos podem ser observados para diferentes compartimentos. A quantificação da matriz é realizada para cada interseção entre linhas (agrupamentos de impactos) e colunas (compartimentos ambientais afetados). Para isso, cada cruzamento é pontuado pelo comitê *ad hoc* do PMBA/Fest de acordo com as características descritas para os impactos e com base em critérios preestabelecidos.

Os Critérios foram estabelecidos desde a Matriz de Resultados de 2020 (RRDM, 2020), são eles: Caráter, Definição, Relação com o Rompimento, Abrangência Espacial, Nível Ambiental/Trófico, Duração e Reversibilidade. A exceção foi o critério de Relação com o Rompimento, criado a partir do Relatório Anual de 2021 (RRDM, 2022). Para cada um destes critérios, foi determinado um valor à sua classificação, referente ao impacto, da seguinte forma:

**Caráter** – 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.

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

- Alta (3): o impacto se baseia em referências que utilizam dados pretéritos coletados na região do impacto ou que possuem correlação com os principais metais encontrados no rejeito da barragem, ou seja, A, B e/ou D;
- Média (2): o impacto se baseia em referências de controle propostas por organizações especializadas, ou seja, F e/ou G;
- Baixa (1): o impacto se baseia em referências que utilizam dados equivalentes para comparação ou que foram coletados após 3 anos do rompimento da barragem, ou seja, C, E e/ou H.

**Relação com o Rompimento** – é atribuída pelos pesquisadores do PMBA/Fest com base no conjunto de dados adquiridos e da experiência que se tem sobre o comportamento no ambiente e composição do material oriundo do rompimento da barragem:

- Relação Direta (3): quando é possível afirmar que o impacto é decorrente diretamente da passagem do material ou está associado à presença do rejeito no ambiente;
- Relação Indireta (2): quando não é possível afirmar que o impacto foi influenciado diretamente pela passagem do material ou pela presença do rejeito no ambiente, mas sim de forma secundária/indireta ou quando é parte de uma cadeia de reações;
- Sem Relação Definida Ainda (1): quando o impacto é observado, mas não é possível afirmar que o mesmo seja decorrente da passagem do material ou esteja associado à presença do rejeito no ambiente.

**Abrangência Espacial** – está relacionada à distribuição espacial do impacto. Nota-se que a área completa analisada pelo PMBA/Fest foi dividida em setores/compartimentos formados por um conjunto de estações amostrais:

- Regional (3): verificado em mais de 1 setor estudado;
- Local (2): verificado em 1 setor estudado;
- Pontual (1): verificado em uma única estação amostral.

**Nível Ambiental/Trófico** – associação do impacto aos níveis da cadeia trófica:

- Grande (3): alcançou níveis superiores da cadeia trófica (caranguejos, peixes, aves e megafauna);
- Média (2): alcançou a base da cadeia trófica (vegetação, corais, plâncton e bentos);
- Baixa (1): o efeito foi restrito ao respectivo compartimento abiótico (água e sedimento).

**Duração** - corresponde ao tempo de permanência do impacto na área em que este se manifesta:

- Permanente (3): é sempre verificado, independente do período ou das condições existentes quando o monitoramento foi realizado;
- Recorrente (2): verificado em períodos sazonais, por exemplo, período chuvoso ou período seco;
- Transitório (1): observados em períodos com início e fim bem definidos, por exemplo, associados a eventos meteorológicos específicos.

**Reversibilidade** – 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 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.

A pontuação das informações da lista de impactos com base nos critérios foi realizada adotando uma postura conservativa sempre que fosse necessária alguma ponderação. Para a quantificação da Definição, por exemplo, quando mais de uma referência era atribuída ao impacto, foi considerado sempre o nível mais alto de referência, tendo em vista que os níveis mais baixos corroboram o resultado observado.

Após a pontuação de cada Critério, era realizado o cálculo final para cada interseção (agrupamento de impacto x compartimento afetado), segundo a equação:

$$\text{Pontuação Total} = Ca * [(Def * RR) + Ab + Nat + D + R]$$

Onde: Ca, Def, RR, Ab, Nat, D e R são, respectivamente, os critérios: Caráter, Definição, Relação com Rompimento, Abrangência Espacial, Nível Ambiental/Trófico, Duração e Reversibilidade.

A atribuição de um peso ao Critério Definição foi uma estratégia adotada tendo em vista a relevância da origem dos impactos observados para os quais pode-se fazer associação direta ou indireta com o rompimento da barragem. Dessa forma, o critério Definição é ponderado de acordo com sua relação com o rompimento (critério RR: Direto, Indireto ou Sem Relação Definida Ainda) (Quadro 4).

Quadro 4: Sumarização das informações quanto aos Critérios utilizados para quantificar o cruzamento dos agrupamentos de impactos com compartimentos abióticos e bióticos nos Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro.

CRITÉRIOS	VALOR MÁXIMO	VALOR INTERMEDIÁRIO	VALOR MÍNIMO
<b>Caráter (Ca)</b>	Negativo (-1)	Nulo (0)	Positivo (1)
<b>Definição (Def)</b>	Alta (3)	Média (2)	Baixa (1)
<b>Relação com o Rompimento (RR)</b>	Direta (3)	Indireta (2)	Sem relação definida (1)
<b>Abrangência Espacial (Ab)</b>	Regional (3)	Local (2)	Pontual (1)
<b>Nível Ambiental/Trófico (Nat)</b>	Grande (3)	Média (2)	Baixa (1)
<b>Duração (D)</b>	Permanente (3)	Recorrente (2)	Transitório (1)
<b>Reversibilidade (R)</b>	Irreversível (3)	Parcialmente Reversível (2)	Reversível (1)

As células da totalização que possuem o símbolo “-” representam que o impacto não se aplica ao escopo de análise do PMBA/Fest ou que o impacto não foi avaliado para aquele compartimento. E aquelas com valor zero, advindas da avaliação do critério Caráter como nulo (0), configuram a não identificação de relação entre os fatores associados, ou seja, o impacto pode ser interpretado como nulo. Já de acordo com o intervalo de valores possíveis no cálculo final dos Critérios e considerando os impactos efetivamente avaliados possuem todos Caráter negativo (-1), foi possível estabelecer faixas de valores para classificação dos impactos em Baixo, Médio, Alto e Crítico (Quadro 5).

Quadro 5: Faixa de valores das classificações com base no intervalo máximo de valores do somatório dos critérios.

Faixa de valores	Classificação
-5 a -8	Baixo
-9 a -12	Médio
-13 a -16	Alto
-17 a -21	Crítico

### 3.2.3 Espacialização dos resultados e definição das áreas impactadas

As estações amostrais analisadas nos três ambientes estão distribuídas espacialmente em setores/compartimentos que englobam áreas que apresentam características semelhantes, sejam elas geológicas, geográficas, dinâmicas ou mesmo físicas. A setorização das áreas amostradas permite também a identificação de áreas críticas que possivelmente podem orientar propostas de ações de restauração/recuperação em áreas prioritárias.

Para o Ambiente Dulcícola, os setores são:



- (1) Reservatório: compreende o trecho amostrado do rio Doce mais a oeste até o reservatório da usina hidrelétrica de Mascarenhas, tendo em vista que esta representa o último filtro fluvial do tipo reservatório para o material transportado pelo rio Doce em direção ao oceano;
- (2) Calha do Rio Doce: trecho do rio Doce a jusante do reservatório de mascarenhas até o limite do distrito de Povoação, Linhares. Este setor possui influência da ocupação de dois grandes pólos urbanos, Colatina e Linhares;
- (3) Foz do Rio Doce: trecho final do rio Doce até o deságue no oceano, possui proximidade com influência da intrusão salina;
- (4) Afluentes: compreende os rios que deságuam na calha do rio Doce;
- (5) Lagos: são ecossistemas lacustres profundos ( $Z_{\text{méd}} > 3,0 \text{ m}$ ) com propensão para estratificação térmica, química e hidrobiológica. No PMBA/Fest, os lagos analisados são: Nova, Juparanã, Palmas, Limão e Óleo;
- (6) Lagoas: compreende sistemas lacustres rasos ( $Z_{\text{méd}} < 3\text{m}$ ) com propensão à mistura da coluna d'água. No PMBA/Fest, as lagoas analisadas são: Areão, Areal, Monsarás e Cacimbas.

O Ambiente Marinho está representado pelos setores:

- (1) Sul: região marinha de Guarapari e Vitória (ES);
- (2) APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz: estações amostrais localizadas na área das unidades de conservação na região marinha de Aracruz (ES);
- (3) Foz do Rio Doce: compreendendo desde estações amostrais próximas a desembocadura do rio até estações em regiões adjacentes ao sul e ao norte, além de estações em região *offshore*;
- (4) Norte: compreendendo desde Degredo a Itaúnas (ES);
- (5) Abrolhos: estações amostrais no próprio arquipélago e em áreas ao sul, na região de Mucuri/BA.

Já o Ambiente Costeiro está organizado nos setores:

- (1) Compartimento A: compreende as praias Mole, Formosa e Putiri, caracterizado pelo litoral de terraços de abrasão da Formação Barreiras;
- (2) Compartimento B: compreende as praias da planície sul do rio Doce representado pelas praias Barra do Riacho e Terra Indígena e as mais próximas a desembocadura ao norte são agrupadas em B' e são representados pelas praias da Rebio Comboios, Regência e Povoação;
- (3) Compartimento C: representado pelas praias de Degredo, Pontal do Ipiranga, Barra Nova, Guriri e Itaúnas.

Para espacialização dos agrupamentos de impactos foi adotada uma abordagem conservativa em que os todos setores/estações para os quais os impactos foram descritos encontram-se representados na abrangência espacial do agrupamento. Dessa forma, os mapas apresentam, para cada setor, os compartimentos abióticos e bióticos (representados por símbolos) e os agrupamentos de impactos (representados por números).

É importante ressaltar que a localização do símbolo no mapa não representa as coordenadas geográficas das estações amostrais, mas representam apenas o Setor/Compartimento onde os impactos foram observados.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma análise aderente à estrutura organizacional e operacional do PMBA/Fest, foram desenvolvidas uma Matriz de Resultados para cada ambiente monitorado: Dulcícola, Marinho e Costeiro. A matriz gerada para cada ambiente representa 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, considerando as especificidades de cada um dos ambientes, para que pudesse ser feita uma comparação entre eles, foi realizada uma análise qualitativa, ou seja, foi avaliado o comportamento dos valores (por exemplo, tendências de aumento ou diminuição) e não o valor propriamente dito.

Os resultados das análises realizadas para a elaboração do presente documento foram expressos sob a forma de gráficos, reunindo as informações de todos os Ambientes, bem como na forma estratificada para cada um dos Ambientes analisados.

#### 3.3.1 Impactos e suas características

A lista inicial elaborada por todas as equipes de pesquisa que executam o PMBA/Fest apresentou 295 impactos, sendo 96 impactos no Ambiente Dulcícola, 130 impactos no Ambiente Marinho e 69 impactos no Ambiente Costeiro (as listas de impactos compiladas por Ambiente são apresentadas nos Materiais Suplementares: MS\_MATRIZ\_AD, MS\_MATRIZ\_AM e MS\_MATRIZ\_AC, respectivamente). A avaliação quanto à semelhança entre os impactos observados permitiu a consolidação dos mesmos em 24 agrupamentos, os quais foram organizados em sete categorias (Tabela 1). As categorias identificadas para as Matrizes de Resultados do PMBA/Fest foram: Sedimentologia, Química, Ecotoxicologia, Ecologia, Genética, Saúde e Comportamento. Todas estas categorias foram identificadas nos três Ambientes avaliados, com exceção da categoria Comportamento, a qual está restrita aos peixes estuarinos e à megafauna e, portanto, foi identificada somente no Ambiente Marinho.

Tabela 1: Categorias e respectivos Agrupamentos de impactos observados na construção da Matriz de Resultados do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA/Fest), considerando-se os Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro.

<b>Categoria</b>	<b>Agrupamento de Impactos</b>	<b>Caracterização</b>
Sedimentologia	Alterações na composição sedimentológica <sup>D, M</sup>	Mudanças granulométricas, mineralógicas e alterações em marcadores isotópicos
	Alterações nas características físicas da praia <sup>C</sup>	Alteração na morfologia da praia, erosão
	Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez <sup>D, M</sup>	Observações de plumas, quantificação por filtragem e pesagem e medição por equipamentos
	Aumento do potencial de mobilização do fundo <sup>M</sup>	Alteração nas características físicas do sedimento facilitando a mobilização e transporte
Química	Alterações na concentração de nutrientes <sup>D, M</sup>	Alteração nos valores pretéritos ou médios de nutrientes em água
	Contaminação por compostos orgânicos <sup>D, M</sup>	Valores elevados de contaminantes orgânicos em água, sedimento e biota
	Contaminação por metais e metaloides <sup>D, C, M</sup>	Valores elevados nas concentrações de metais e Arsênio, principalmente aqueles característicos do rejeito
Ecotoxicologia	Alterações nos níveis de toxicidade <sup>D, M</sup>	Resultados a partir de ensaios ecotoxicológicos
	Aumento nos valores de índice de resposta biológica <sup>D, C, M</sup>	Impactos observados através de cálculo de índice - IBR biomarcador
Ecologia	Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica <sup>M</sup>	Mudanças na dieta e comportamento alimentar da biota
	Alterações na estrutura de comunidade <sup>D, C, M</sup>	Mudanças observadas em métricas e índices ecológicos
	Alterações na estrutura de população <sup>D, C, M</sup>	Impactos observados para um mesmo grupo de espécies em determinada região
	Alterações nos parâmetros reprodutivos <sup>C, M</sup>	Distúrbios observados nas etapas e estágios reprodutivos
	Aumento da vulnerabilidade ambiental <sup>M</sup>	Medido a partir do potencial de alteração do impacto em relação aos diversos habitats e seus usos
	Aumento na abundância de táxons indicadores de impacto <sup>D, M</sup>	Presença ou aumento da abundância de organismos reconhecidos como indicadores de impacto
	Variabilidade da diversidade funcional <sup>D</sup>	Alterações na diversidade funcional e traços funcionais
Genética	Alterações da diversidade e estrutura genética <sup>C, M</sup>	Diminuição na diversidade genética, alterações do fluxo gênico e detecção de gargalo populacional
	Redução da diversidade filogenética <sup>D</sup>	Redução da diversidade filogenética
Saúde	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia <sup>D, C, M</sup>	Impactos que comprometem a saúde ou sobrevivência dos organismos
	Danos morfológicos e celulares <sup>D, M</sup>	Deformações ou comprometimento da integridade física de organismos
	Doenças e presença de agentes infecciosos <sup>M</sup>	Observação de doenças ou presença de vírus e bactérias
	Mortalidade de organismos <sup>M</sup>	Aumento da mortalidade de organismos associadas ao período do rompimento da barragem
Comportamento	Alterações do uso do habitat <sup>M</sup>	Mudança na área de vida, ocorrência e áreas de alimentação devido a alterações no habitat
	Alterações nas taxas de encalhe <sup>M</sup>	Aumento nas taxas e alterações sazonais de encalhes de cetáceos

<sup>D</sup> Impactos observados no Ambiente Dulcícola

<sup>M</sup> Impactos observados no Ambiente Marinho

<sup>C</sup> Impactos observados no Ambiente Costeiro..

Os impactos foram identificados para os compartimentos abióticos (Água e Sedimento) e bióticos (Macrófitas, Perifíton, Macroalgas, Vegetação de restinga, Vegetação de Manguezal, Microbiota, Plâncton, Fitoplâncton, Zooplâncton, Ictioplâncton, Bentos - macrofauna, meiofauna, fundos consolidados e fundos inconsolidados, Macroinvertebrados, Caranguejo de Manguezal, Crustáceos de praia, Peixes, Tartarugas, Cetáceos e Aves).

O compartimento “Água” apresenta resultado para os Ambientes Dulcícola e Marinho e a matriz “Sedimento” aparece para os três ambientes, embora o Ambiente Costeiro analise separadamente as matrizes sedimento de acordo com a sua origem de coleta (praia, restinga e manguezal), por representarem regiões com características ambientais muito diversas. Da mesma forma, os compartimentos de “Vegetação”, exclusivos deste ambiente, são separados em Restinga e Manguezal. Em muitos casos a equivalência das matrizes não é possível entre os ambientes, por exemplo, o ambiente Dulcícola analisa “Macrófitas” enquanto o ambiente Marinho estuda “Macroalgas”. Ainda no ambiente Dulcícola a matriz “Perifíton” aparece com exclusividade. O compartimento “Microbiota” (analisados apenas do ponto de vista de bioindicadores), “Fitoplâncton”, “Zooplâncton” e “Ictioplâncton”, foram estudados para os ambientes Dulcícola e Marinho (sendo o último apenas a partir de dezembro de 2020 para o ambiente Dulcícola). A separação do compartimento “Plâncton” se deve a análises exclusivas de ecotoxicologia, feitas para o conjunto de organismos planctônicos como um todo.

Os organismos bentônicos, por sofrerem grande influência das características do sedimento de fundo e, por consequência, serem importantes indicadores de alterações associadas a ele, foram analisados de forma mais detalhada como compartimentos ambientais afetados. No ambiente Dulcícola o compartimento se chama “Macroinvertebrados” e é representado por espécies de caracóis e moluscos, vermes aquáticos, caracóis, moluscos, lagostins, sanguessugas, larvas de libélulas, efêmeras e mosquitos. No ambiente Costeiro os compartimentos são “Bentos: macrofauna” e “Bentos: meiofauna”, para praias, que correspondem aos grupos anfípodas, isópodas, poliquetas, platelmintos, nematódeos, nemertinos e copepodas. Já as análises de ecotoxicologia neste ambiente são feitas em anfípodas, isópodea *Excirolana sp.* e no caranguejo *Ocypode quadrata* e agrupadas no compartimento “Crustáceos de Praia”. Ainda no ambiente Costeiro, para o manguezal, foi analisado o compartimento “Caranguejo de Manguezal”. Já para o ambiente Marinho, os compartimentos foram definidos considerando dois habitats com características muito distintas, “Bentos de fundo inconsolidado” (areia e lama) e “Bentos de fundo consolidado” (bancos de rodólitos e recifes de corais). O compartimento “Peixes” foi analisado para os ambientes Dulcícola e Marinho, entretanto, para no ambiente Marinho este compartimento inclui as análises realizadas tanto para peixes estuarinos quanto para peixes recifais. Os compartimentos referentes à megafauna (“Tartarugas”, “Cetáceos” e “Aves”) foram alocados na matriz do Ambiente Marinho tendo em vista a grande influência deste no ciclo de vida destes organismos.

Os resultados são apresentados visando uma análise entre Ambientes, seja para comparação entre os critérios, os agrupamentos ou as categorias dos impactos observados. O número total de interações (agrupamento de impacto x compartimento impactado) obtido para os três Ambientes foi de 113

impactos negativos e 47 impactos nulos. As matrizes de interação, com a pontuação para cada critério em cruzamento/interação, para os Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro estão disponíveis nos Materiais Suplementares MS\_MATRIZ\_AD, MS\_MATRIZ\_AM e MS\_MATRIZ\_AC, respectivamente.

É importante destacar que as células preenchidas com um traço (-) na Matriz de Resultado, indicam que o impacto não se aplica àquele compartimento ou não houve monitoramento previsto no termo de referência (TR4) e no Novo Ciclo do PMBA/Fest. Por exemplo, a resposta biológica à contaminação não se aplica ao compartimento abiótico ou ainda a contaminação por metais e metaloide não foi prevista para perifíton. Dessa forma, as células vazias podem sugerir a existência de indicadores potenciais de impacto que não foram contemplados no TR4 e no Novo Ciclo do PMBA/Fest e que poderiam contribuir na compreensão da estrutura, composição e função ecossistêmica. Portanto, os resultados aqui apresentados podem, de certa forma, servir como subsídio/orientação para revisões do escopo do Projeto.

A seguir são apresentados os respectivos totais da quantificação das matrizes para o Ambiente Dulcícola (Figura 12), Ambiente Marinho (Figura 13) e Ambiente Costeiro (Figura 14), indicando ainda o número de cruzamentos entre linhas e colunas, ou seja, a distribuição de cada impacto listado nos diferentes compartimentos abióticos e bióticos.

A Matriz de Resultados do Ambiente Dulcícola (Figura 12), indica que os impactos mais frequentes no compartimento abiótico foram observados na matriz Água, enquanto compartimentos bióticos o grupo com maior número de impactos foi o de peixes, seguido por macroinvertebrados. Em destaque, os impactos com valores críticos (pontuação de -17 a -21) para o Ambiente Dulcícola foram observados na categoria Sedimentologia, Química, Ecologia e Genética. Na categoria Sedimentologia, o impacto de maior valor foi o de Alterações na composição sedimentológica. Na categoria Química, os maiores valores foram expressos pela Contaminação por metais e metaloides na água, plâncton, macroinvertebrados e peixes. Este fato indica a persistência dos impactos dessa natureza em todos os níveis tróficos, ao longo dos 4 anos de monitoramento. Na categoria Ecologia, a microbiota e os peixes também apresentaram valores críticos com relação ao Aumento na abundância de táxons indicadores de impacto e na Alteração da estrutura de população, respectivamente. O valor máximo da Matriz Dulcícola foi obtido na categoria Genética para os peixes no impacto de Alterações da diversidade e estrutura genética, um fato possivelmente relacionado com a perda de interconectividade ao longo da calha do Rio Doce e da potencialidade da natureza dos impactos genéticos como parcialmente irreversíveis.

Os impactos considerados de níveis altos (pontuação entre -13 a -16) estão distribuídos na Matriz do Ambiente Dulcícola, nas categorias Sedimentologia, Química e Ecologia. O impacto Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez na água na categoria Sedimentologia e o impacto de Contaminação por metais e metaloides no sedimento na categoria Química apresentaram os maiores valores. Na mesma escala de valores, foram observados os impactos de Alteração na estrutura de comunidade para os grupos biológicos representados pelo fitoplâncton e perifíton, no impacto Aumento da abundância de táxons indicadores de impacto para macrófitas e no impacto



Variabilidade da diversidade funcional para zooplâncton, ambos da categoria Ecologia. Os resultados para os compartimentos biológicos podem refletir o avanço de espécies invasoras e introduzidas na bacia do Rio Doce em detrimento das espécies nativas.

Impactos de nível médio (pontuação entre -9 a -12) ocorreram na categoria Química para os impactos Variação da concentração de nutrientes e Contaminação por metais e metaloides, ambos em água. Por sua vez, a categoria Ecotoxicologia identificou dois impactos deste nível: Alteração nos níveis de toxicidade nos compartimentos abióticos (água e sedimento) e Aumento nos valores de resposta biológica nos grupos plâncton, macroinvertebrados e peixes. Na categoria Ecologia os impactos foram Alterações na estrutura de comunidade para macrófitas, zooplâncton, e Aumento na abundância de táxons indicadores de impacto para fitoplâncton, e para macroinvertebrados e peixes para ambos os impactos. Na categoria Genética foi observado o nível alto para Redução da diversidade filogenética para peixes. Por fim, a categoria Saúde apresentou resultados apenas nesta faixa de valores para os impactos Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia e Danos morfológicos e celulares, ambos para ictioplâncton.

Figura 12: Matriz de Resultados para o Ambiente Dulcícola. Número de interações (linha x coluna) com análise dos impactos, descartando-se os impactos nulos (n = 31).

CATEGORIA	AGRUPAMENTO DE IMPACTOS	Abiótico		Biótico							
		Água	Sedimento	Macrófitas	Micobiota	Plâncton	Fitoplâncton	Zooplâncton	Ictioplâncton	Perifiton	Macroinvertebrados
Sedimentologia	Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez	-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alterações na composição sedimentológica	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-
Química	Alterações na concentração de nutrientes	-10	0	-	-	-	-	-	-	-	-
	Contaminação por metais e metaloides	-17	-16	-	-	-18	-	-	-	-18	-19
	Contaminação por compostos orgânicos	-9	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-	-	-9	-	-	-	-11	-12
	Alterações nos níveis de toxicidade	-10	-12	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecologia	Alterações na estrutura de população	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-19
	Alterações na estrutura de comunidade	-	-	-11	0	-	-15	-11	0	-14	-11
	Aumento na abundância de táxons indicadores de impacto	-	-	-15	-18	-	-12	0	0	0	-11
	Variabilidade da diversidade funcional	-	-	-	-	-	-	-15	-	-	-
Genética	Alterações da diversidade e estrutura genética	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-20
	Redução da diversidade filogenética	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-13
Saúde	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia	-	-	0	-	-	0	0	-12	0	0
	Danos morfológicos e celulares	-	-	0	-	-	0	0	-11	0	0

<b>Legenda:</b>	
-	Não se aplica / não realizado no PMBA/Fest-RRDM
0	Impacto nulo
-5 a -8	Baixo
-9 a -12	Médio
-13 a -16	Alto
-17 a -21	Crítico

No Ambiente Marinho, os compartimentos abióticos (água e sedimento) foram considerados impactados em três categorias: Sedimentologia, Química e Ecotoxicologia. No compartimento biótico, à exceção da categoria Sedimentologia devido a sua natureza, foram observados impactos em todas as categorias, incluindo a categoria Comportamento, exclusiva deste ambiente. Dentre os impactos observados, apenas dois foram considerados baixos, relacionado a Danos morfológicos e celulares (Saúde) em peixes, e Aumento nos valores de índice de resposta biológica (Ecotoxicologia) para bentos de fundo inconsolidado. Os demais impactos observados foram considerados médios, altos ou críticos.

A Matriz de Resultados do Ambiente Marinho (Figura 13) apresentou impactos com níveis críticos (-17 a -21) em quase todas as categorias analisadas (Sedimentologia, Química, Ecologia, Genética e Saúde), à exceção da Ecotoxicologia e Comportamento. O compartimento sedimento apresentou valores críticos de impacto para Alterações na composição sedimentológica (Sedimentologia) e Contaminação por metais e metaloides (Química). Em relação ao componente biótico, os impactos que mais afetaram os compartimentos foram a Contaminação por metais e metaloides (Química) e Alterações na estrutura de comunidade (Ecologia). O primeiro desses impactos em nível crítico, relacionado aos metais, foi observado em diferentes níveis tróficos (plâncton, zooplâncton, bentos de fundos inconsolidados, peixes, tartarugas e aves), enquanto o segundo dos impactos atuou de modo crítico em todos os organismos de base de cadeia (macroalgas, fitoplâncton, zooplâncton, ictioplâncton, bentos de fundo inconsolidado e bentos de fundo consolidado). Além disso, foram observados Alterações nos parâmetros reprodutivos, para ictioplâncton, e Aumento na abundância dos táxons indicadores de impacto, para microbiota. O único impacto de Genética, Alterações da diversidade e estrutura genética, foi crítico para cetáceos. Por fim, a categoria Saúde, apresentou valores críticos para os impactos Danos morfológicos e celulares, para ictioplâncton, Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia, para fitoplâncton, bentos de fundo consolidado e tartarugas, mortalidade de organismos, para bentos de fundo inconsolidado, e doenças e presença de agentes infecciosos, para tartarugas.

Os impactos de valores altos (-13 a -16) foram observados em todas as categorias, com exceção de Ecotoxicologia. Para a categoria Sedimentologia foram o Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez (compartimento água) e o Aumento do potencial de mobilização do fundo (compartimento sedimento). Na categoria Química com relação à Alterações na concentração de nutrientes no compartimento água, Contaminação por compostos orgânicos e metais e metaloides nos compartimentos sedimento e cetáceos, e Contaminação por compostos orgânicos nestes três compartimentos citados. Na categoria Ecologia os impactos considerados altos são referentes à Alterações nos parâmetros reprodutivos em tartarugas, Alterações do nicho isotópico e diversidade em peixes e Aumento de táxons indicadores de impacto em bentos de fundo inconsolidado. Alterações da diversidade e estrutura genética (Genética) foi classificado como alto para tartarugas e aves. Os impactos de Saúde e Comportamento considerados de alto impacto são foram observados no compartimento cetáceos, sendo: Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia, Mortalidade de organismos e Alterações nas taxas de encalhe.

Finalmente, impactos de nível médio (-9 a -12) no Ambiente Marinho foram observados em todas as categorias, com exceção à Sedimentologia. Na categoria Química, os impactos classificados como médio foram a Contaminação por metais e metaloides em bentos de fundo inconsolidado e Contaminação por compostos orgânicos em tartarugas. Já os impactos de Ecotoxicologia foram médios para o compartimento abiótico (Alterações nos níveis de toxicidade) e biótico para plâncton, bentos de fundo inconsolidado e peixes (Aumento nos valores de índice de resposta biológica). Na categoria Ecologia os impactos classificados como médios foram Alterações na estrutura de comunidade para peixes, Alterações nos parâmetros reprodutivos e Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica para aves, Aumento da abundância de táxons indicadores de impacto para o zooplâncton e Aumento da vulnerabilidade ambiental para cetáceos, este último sendo um novo agrupamento apresentado na presente matriz. O impacto considerado médio na categoria Genética foi Alterações da diversidade e estrutura genética, para bentos de fundo inconsolidado e para peixes. Na categoria Saúde os impactos considerados médios foram Danos morfológicos e celulares em macroalgas e cetáceos, Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia para peixes e Doenças e presença de agentes infecciosos para cetáceos e aves. A categoria Comportamento apresentou valores médios para Alterações do uso do habitat observados tanto para peixes e quanto para aves.

Figura 13: Matriz de Resultados para o Ambiente Marinho. Número de cruzamentos (linha x coluna) com análise dos impactos, descartando-se os impactos nulos (n = 63).

AMBIENTE MARINHO														
CATEGORIA	AGRUPAMENTO DE IMPACTOS	Abiótico		Biótico										
		Água	Sedimento	Macroalgas	Microbiota	Plâncton	Fitoplâncton	Zooplâncton	Ictioplâncton	Bentos de fundo inconsolidado	Bentos de fundo consolidado	Peixes	Tartarugas	Cetáceos
Sedimentologia	Alterações na composição sedimentológica	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aumento do potencial de mobilização do fundo	-	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Química	Alterações na concentração de nutrientes	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Contaminação por metais e metaloide	-16	-17	0	-	-17	-	-18	-	-18	-9	-19	-19	-16
	Contaminação por compostos orgânicos	-16	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-11	-14	0
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-	-	-11	-	-	-	-12	-8	-10	-	-
	Alterações nos níveis de toxicidade	-10	-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecologia	Alterações na estrutura de população	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-11	0	-12
	Alterações na estrutura de comunidade	-	-	-17	0	-	-18	-17	-17	-18	-18	-12	0	0
	Alterações nos parâmetros reprodutivos	-	-	-	-	-	-	-	-17	-	-	-	-16	-12
	Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-15	-	-10
	Aumento na abundância de táxons indicadores de impacto	-	-	-	-17	-	0	-11	0	-16	0	0	-	-
	Aumento da vulnerabilidade ambiental	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-12	-
Genética	Alterações da diversidade e estrutura genética	-	-	-	-	-	-	-	-	-9	-	-12	-14	-17
Saúde	Danos morfológicos e celulares	-	-	-12	-	-	0	0	-18	0	0	-8	0	-11
	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia	-	-	0	-	-	-17	0	0	0	-18	-12	-18	-16
	Mortalidade de organismos	-	-	-	-	-	-	-	-	-18	-	-	-16	-
	Doenças e presença de agentes infecciosos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-19	-12	-10
Comportamento	Alterações do Uso do Habitat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-12	0	0
	Alterações nas taxas de encalhe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-16	-

Legenda:	
-	Não se aplica / não realizado no PMBA/Fest
0	Impacto nulo
-5 a -8	Baixo
-9 a -12	Médio
-13 a -16	Alto
-17 a -21	Crítico

A Matriz de Resultados para o Ambiente Costeiro (Figura 14) apresenta impactos nas categorias Sedimentologia, Química, Ecotoxicologia, Ecologia e Saúde. Os impactos químicos no compartimento abiótico foram identificados nos sedimentos, em função da deposição e concentração do material fino contaminado. No que se refere aos compartimentos bióticos, os caranguejos do manguezal se apresentaram como sendo os grupos mais impactados, seguidos das comunidades bentônicas de praias, que sofrem impactos derivados na dinâmica e sedimentação da praia. De maneira geral, no Ambiente Costeiro, os impactos abióticos e bióticos classificaram-se como altos e críticos.

Os impactos com valores críticos (-17 a -21) para o Ambiente Costeiro foram observados nas categorias Sedimentologia, Química e Ecologia das Praias e Manguezal, sendo que a pontuação máxima alcançada na Matriz de Resultados foi de -17. Em Sedimentologia foi detectado o impacto Alterações nas características físicas da praia, que contribuíram para valores críticos negativos da ecologia da comunidade bentônica (macro e meiofauna). das praias. Na categoria Química, o impacto Contaminação por metais e metaloides apresentou os maiores valores para o sedimento e caranguejo de manguezal, reforçando assim a importância deste grupo de organismos como indicadores de contaminação no Ambiente Costeiro.

Os impactos de valores altos (-13 a -16) foram os mais observados no Ambiente Costeiro, identificados para as categorias Química, Ecologia e Saúde. Na categoria Química, o impacto Contaminação por metais e metaloides apresentou níveis altos para os compartimentos sedimento de praia e restinga e vegetação de restinga e manguezal. Na categoria Ecologia, os caranguejos dos manguezais apresentam níveis altos em todos os impactos estudados: Alterações na estrutura de população e da comunidade e Alteração nos parâmetros reprodutivos. O mesmo para a Ecologia da Vegetação de Restinga, excluída a estrutura da população não monitorada. O impacto de Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia na categoria Saúde, foram altos para a vegetação de restinga e manguezal.

Impactos de nível médio (-9 a -12) foram observados na categoria Química, os quais foram representados pela contaminação por metais e metaloides em crustáceos de praias, e na categoria Ecotoxicologia, pelo Aumento nos valores de resposta biológica em caranguejo de manguezal.

Impacto de nível baixo (-5 a -8) foi verificado somente na categoria Ecotoxicologia em crustáceos de praia.



Figura 14: Matriz de Resultados para o Ambiente Costeiro. Número de cruzamentos (linha x coluna) com análise dos impactos, descartando-se os impactos nulos (n = 19).

AMBIENTE COSTEIRO									
CATEGORIA	AGRUPAMENTO DE IMPACTOS	Abiótico			Biótico				
		Sedimento de Praia	Sedimento Restinga	Sedimento de Manguezal	Vegetação de Restinga	Vegetação de Manguezal	Bentos: macrofauna	Bentos: meiofauna	Crustáceos de Praia
Sedimentologia	Alterações nas características físicas da praia	-17	-	-	-	-	-	-	-
Química	Contaminação por metais e metalóides	-14	-14	-17	-15	-15	-	-	-10
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-	-	-	-	-	-8
Ecologia	Alterações na estrutura de população	-	-	-	-	-	-	-	-15
	Alterações na estrutura de comunidade	-	-	-	-14	0	-17	-17	-14
	Alterações nos parâmetros reprodutivos	-	-	-	-14	0	-	-	-13
Saúde	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia	-	-	-	-15	-15	-	-	-

Legenda:	
-	Não se aplica / não realizado no PMBA/Fest-RRDM
0	Impacto nulo
-5 a -8	Baixo
-9 a -12	Médio
-13 a -16	Alto
-17 a -21	Crítico

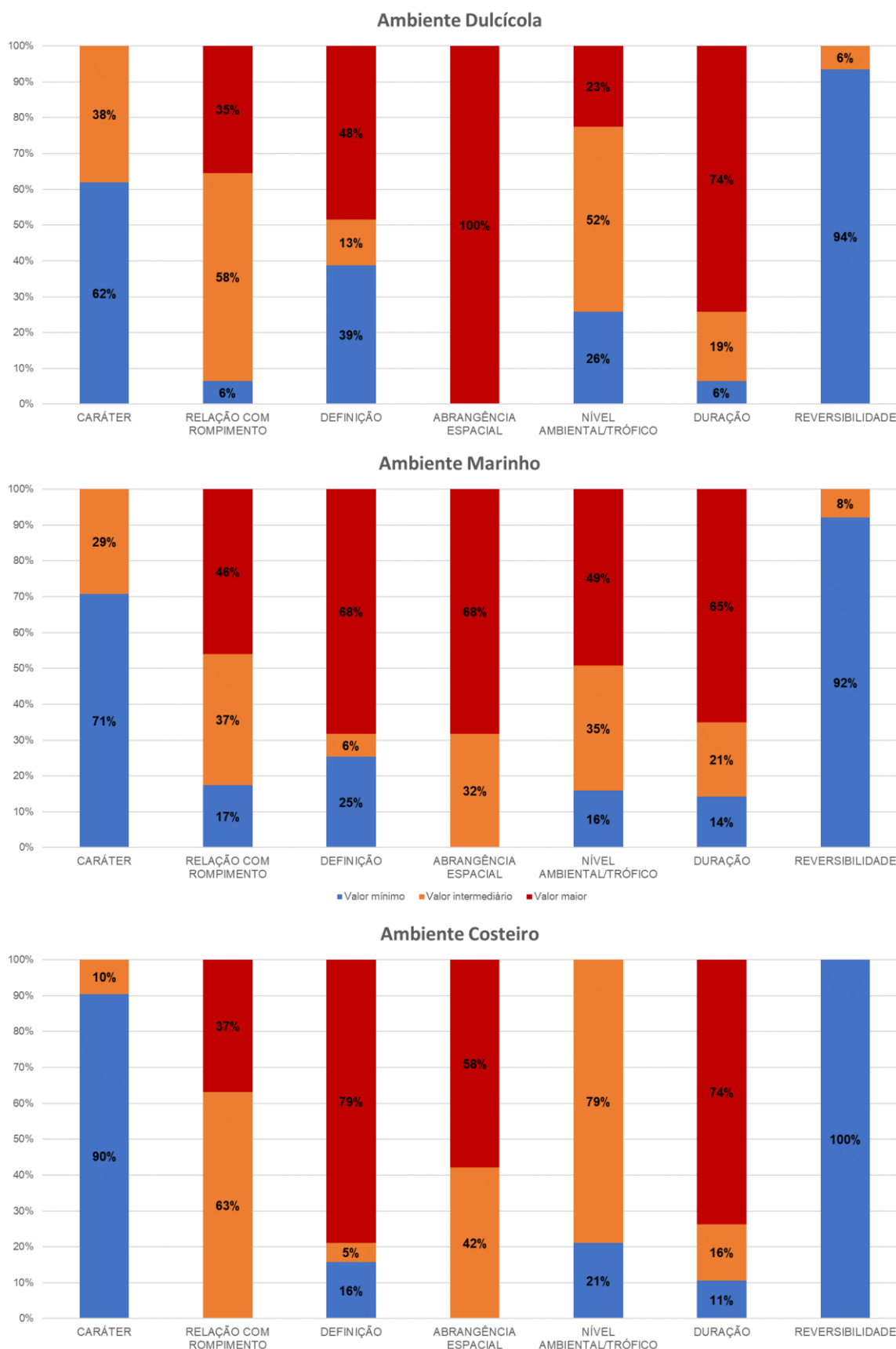
O quantitativo total de impactos considerados na matriz correspondem ao somatório dos impactos classificados no critério **Caráter** com pontuação negativa (-1) ou nula (0), conforme pode ser verificado na primeira coluna dos gráficos da Figura 15. A Matriz de Resultados do PMBA/Fest tal qual foi planejada não considera a análise de efeitos positivos (+1), tendo em vista sua natureza de avaliação após o evento de distúrbio, no caso, o rompimento da barragem de Fundão. A maior parte dos valores observados quanto ao Caráter foram negativos (menor pontuação) nos três ambientes. O maior percentual de impactos considerados como efeito direto do rejeito, de acordo com o critério **Relação com o Rompimento**, foi observado no Ambiente Marinho (46%), seguido do Ambiente Costeiro (37%) e Dulcícola (35%). O aumento do percentual de efeitos diretos e diminuição dos impactos sem relação definida, em relação ao RA2021 (RRDM, 2022), pode ser um indicativo de avanço na compreensão dos efeitos do rejeito nos ecossistemas Dulcícola, Marinho e Costeiro estudados no PMBA/Fest, ou ainda uma resposta da evolução do ecossistema ao impacto agudo oriundo da passagem do rejeito em 2015. Sob essa mesma ótica, esses fatos podem subsidiar o aumento do percentual de **Definição** alta para o Ambiente Costeiro em relação ao RA2021. Os padrões se mantiveram similares para os outros dois ambientes, sendo o Ambiente Marinho com maior destaque, especialmente devido à maior disponibilidade de dados pretéritos.

A maioria dos impactos, em todos os ambientes, ocorreu em uma **Abrangência Espacial** regional, indicando o alcance do efeito do rejeito nos ambientes estudados. Para todos os Ambientes, em relação ao **Nível Ambiental/trófico**, verificou-se a predominância dos impactos registrados no compartimento

biótico, sendo o topo de cadeia o mais impactado no Ambiente Marinho (49%). Ressalta-se que o impacto no topo de cadeia recebe maior peso nas análises pois é, por muitas vezes, reflexo do que ocorre nos níveis tróficos inferiores, inclusive respondendo às mudanças no ambiente abiótico. Estes impactos tendem a ter a **Duração** classificada como permanente em sua maior parte, significando que podem ser observados independente do período analisado.

No que concerne o critério **Reversibilidade**, denota-se que a maioria deles (com exceção aos impactos genéticos) apresentam a possibilidade de serem revertidos ao longo do tempo, desde que sejam adotadas medidas adequadas de mitigação, reparação e conservação das condições abióticas e bióticas dos ecossistemas afetados, visando a obtenção de condições semelhantes ou melhores àquelas observadas no período pré-rompimento da Barragem de Fundão.

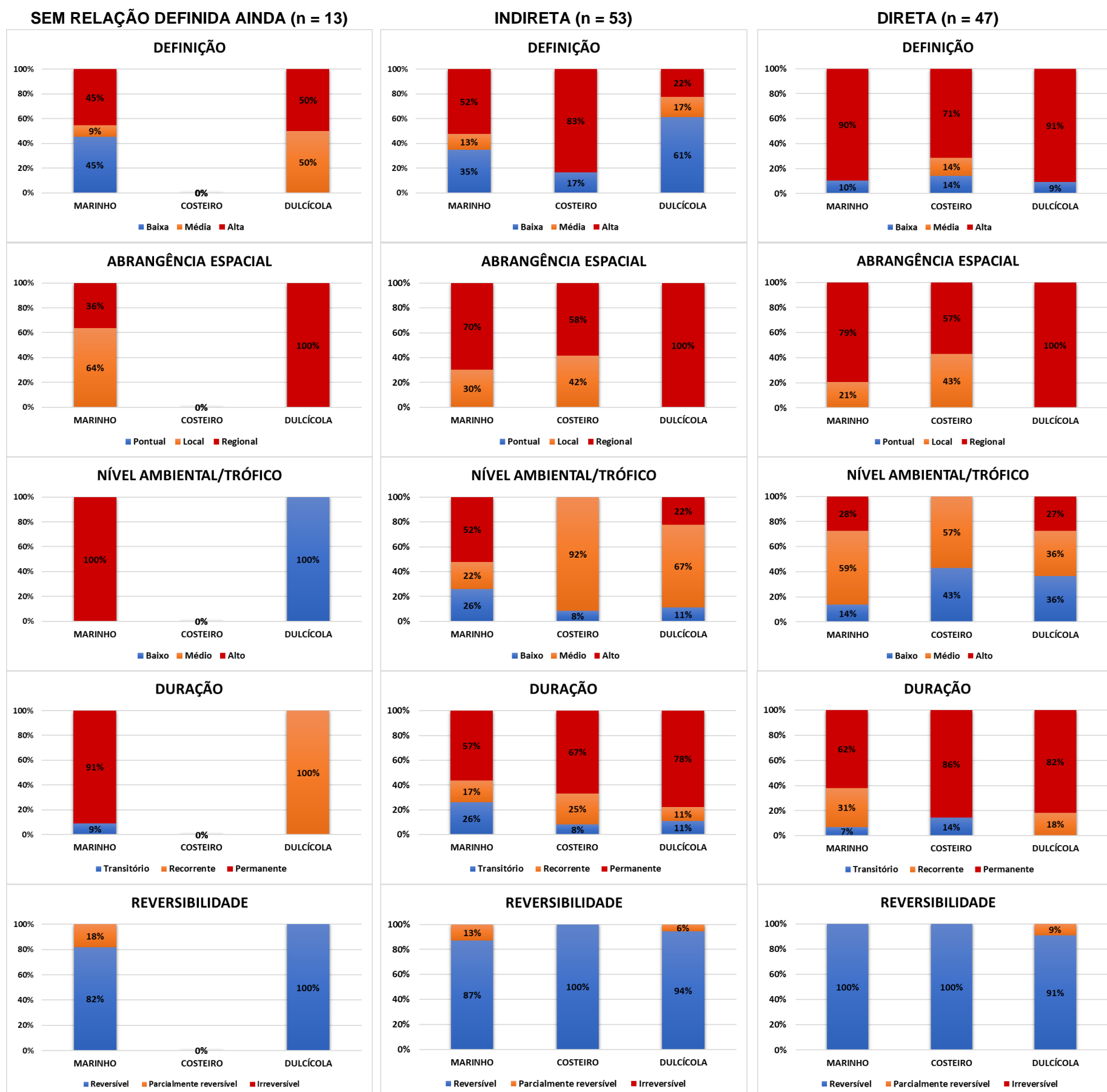
Figura 15: Distribuição da pontuação por critérios para a quantificação dos impactos da Matriz de Resultados dos Ambientes Dulcícola (n=50), Marinho (n=89) e Costeiro (n=21).



Considerando a importância do estabelecimento de umnexo causal entre os impactos observados e sua relação com o rompimento da Barragem de Fundão, a metodologia adotada para a construção da Matriz de Resultados gerada no âmbito do PMBA/Fest permitiu a classificação destes impactos utilizando-se do critério Relação com o Rompimento da referida barragem (Figura 16).

Nesta seleção pode-se verificar que a maior parte dos impactos mostra relação indireta ( $n = 53$ ) ou direta ( $n = 47$ ). De forma geral, para a relação indireta com o rompimento, os critérios que mais influenciam em valores indicativos de maiores impactos são a Definição, especialmente para o Ambiente Costeiro, a Abrangência espacial, indicando que os efeitos indiretos ocorrem em escala regional, e a Duração do efeito de forma permanente. Para os efeitos diretos, os padrões são similares, entretanto, o impacto no Nível ambiental/trófico tende a ser mais frequentemente relacionado com o compartimento abiótico, especialmente nos Ambientes Costeiro e Dulcícola.

Figura 16: Gráficos representando a distribuição dos impactos por Ambiente de acordo com o critério Relação com Rompimento.





Visando ainda complementar as informações e fornecer mais subsídios para a tomada de decisão, os resultados obtidos a partir das Matrizes de Resultados geradas no âmbito do PMBA/Fest também foram agrupados e analisados considerando-se estritamente os impactos considerados Críticos (pontuação final entre -17 e -21), para cada ambiente em particular. Os resultados obtidos a partir desta análise encontram-se detalhados na Figura 17.

Os critérios de Relação com o Rompimento, Definição e Duração foram majoritariamente considerados como Direta, Alta e Permanente, respectivamente, nos três ambientes. Em relação à Abrangência espacial, os impactos nos Ambientes Marinho e Dulcícola foram, em grande parte (total no Dulcícola), considerados regionais, abrangendo mais de um setor. No Ambiente Costeiro, entretanto, a maior parte dos impactos foram considerados locais, implicando em impactos pontuados nas classes maiores de outros critérios. O Ambiente Costeiro foi percentualmente aquele com mais impactos no Nível ambiental/trófico abiótico (40%), seguido do ambiente dulcícola. Não foram observados impactos para topo de cadeia no Ambiente Costeiro pois não há nenhum grupo deste nível sendo estudado neste ambiente.

Figura 17: Gráficos representando a distribuição dos impactos por Ambiente para aqueles impactos classificados na ponderação total como Críticos (faixa de -21 a -17) (n = 36).



### 3.3.2 Espacialização dos impactos

A partir da matriz de resultados gerada no âmbito do PMBA/Fest, as possibilidades de espacialização dos resultados são diversas. Cabe, portanto, ao pesquisador, analista ou gestor selecionar os elementos caracterizadores dos impactos, como categorias, compartimentos e/ou áreas de interesse com interface ao problema analisado.

Nesta seção enfatizamos a geração de mapas temáticos que mostram a interação entre os agrupamentos de impactos e compartimentos abióticos e bióticos. A representação do componente biótico foi realizada pela classificação simplificada dos compartimentos de acordo com sua posição na cadeia trófica (base de cadeia ou topo de cadeia). O passo seguinte na análise foi avaliar a distribuição espacial dos impactos nos diferentes compartimentos estudados, através das informações contidas nas respectivas Listas de Impactos.

Os mapas apresentados no presente relatório para os Ambientes Dulcícola (Figura 18), Marinho (Figura 19) e Costeiro (Figura 20), foram divididos de acordo com o grau de impacto (Crítico, Alto e Médio), não sendo mapeado os impactos classificados como de Baixo grau. A representação gráfica em cada um dos setores mostra, além do grau de severidade do impacto, quais foram os impactos relacionados (números ao lado dos símbolos do compartimento nas mandalas). Por exemplo, no Ambiente Dulcícola, em quase todos os setores, exceto o Setor Reservatório, os Peixes foram classificados como criticamente impactados em relação à contaminação por metais e metaloides (impacto de número 4 na Figura 18). De forma similar, o Plâncton e o compartimento Água foram considerados criticamente impactados pelo mesmo fator e nas mesmas regiões. Por fim, esses mesmos setores são classificados com grau de impacto crítico no que se refere ao aumento da abundância de organismos indicadores de impacto na Microbiota. Alguns compartimentos ficaram restritos a alguns graus de impactos, por exemplo, o impacto no Perifíton foi somente de grau Alto, em sua estrutura de comunidade, enquanto o Ictioplâncton (analisados apenas nos ambientes lóticos e nas represas) apresentou impactos de grau Médio, relacionados com alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia e danos morfológicos e celulares.

No Ambiente Marinho, a maior parte dos compartimentos foram classificados, para pelo menos um impacto, como grau Crítico, especialmente nos Setores Foz, Norte e APA/Revis. O único não classificado como crítico foi o compartimento Água. Contudo, este compartimento foi identificado como Alto em relação a concentração de nutrientes, aumento da concentração de material particulado e turbidez, contaminação por compostos orgânicos e contaminação por metais e metaloides, nos Setores Foz, Norte e APA/Revis. Os impactos nos organismos de base da cadeia foram classificados principalmente como grau Crítico, especialmente nos Setores Foz, Norte e APA/Revis. Pode-se ressaltar nestes setores a matriz de Bentos de fundo inconsolidados, com impactos relacionados a contaminação por metais e metaloides, alteração na estrutura de comunidade e mortalidade de organismos. Quanto aos compartimentos topo de cadeia, foram observados impactos nos três níveis apresentados. Destacam-se os impactos nas Tartarugas nos setores Foz e APA/Revis, relacionados com contaminação por metais e metaloides e doenças e agentes infecciosos em grau Crítico, e os impactos em Cetáceos com grau Alto, relacionados com cinco impactos nos Setores Foz, Norte e APA/Revis.

O Ambiente Costeiro, diferente do Dulcícola e Marinho, não possui monitoramento de organismos classificados como topo de cadeia. Em todos os Setores, o Sedimento de Manguezal foi classificado, quanto a contaminação por metais e metaloides, como Crítico. Enquanto o Sedimento de Restinga foi classificado no mesmo impacto como Alto, para os Setores A, B e C. Por último o Sedimento de Praia foi criticamente impactado em relação às alterações das características físicas da praia. Em relação à biota, o Caranguejo de Manguezal se destaca por apresentar impactos de grau Alto, em todas os Setores, relacionados a alterações na estrutura de populações, e no Setor C, relacionado com mudanças nos parâmetros reprodutivos, e B, relacionado com alterações na estrutura de comunidades. Além disso, o Caranguejo de Manguezal, nos Setores B e C foram classificados como impacto médio em relação ao aumento dos índices de respostas biológica.



Figura 18: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Dulcícola de acordo com a pontuação alcançada pela Matriz de Resultados -PMBA/Fest 2022.

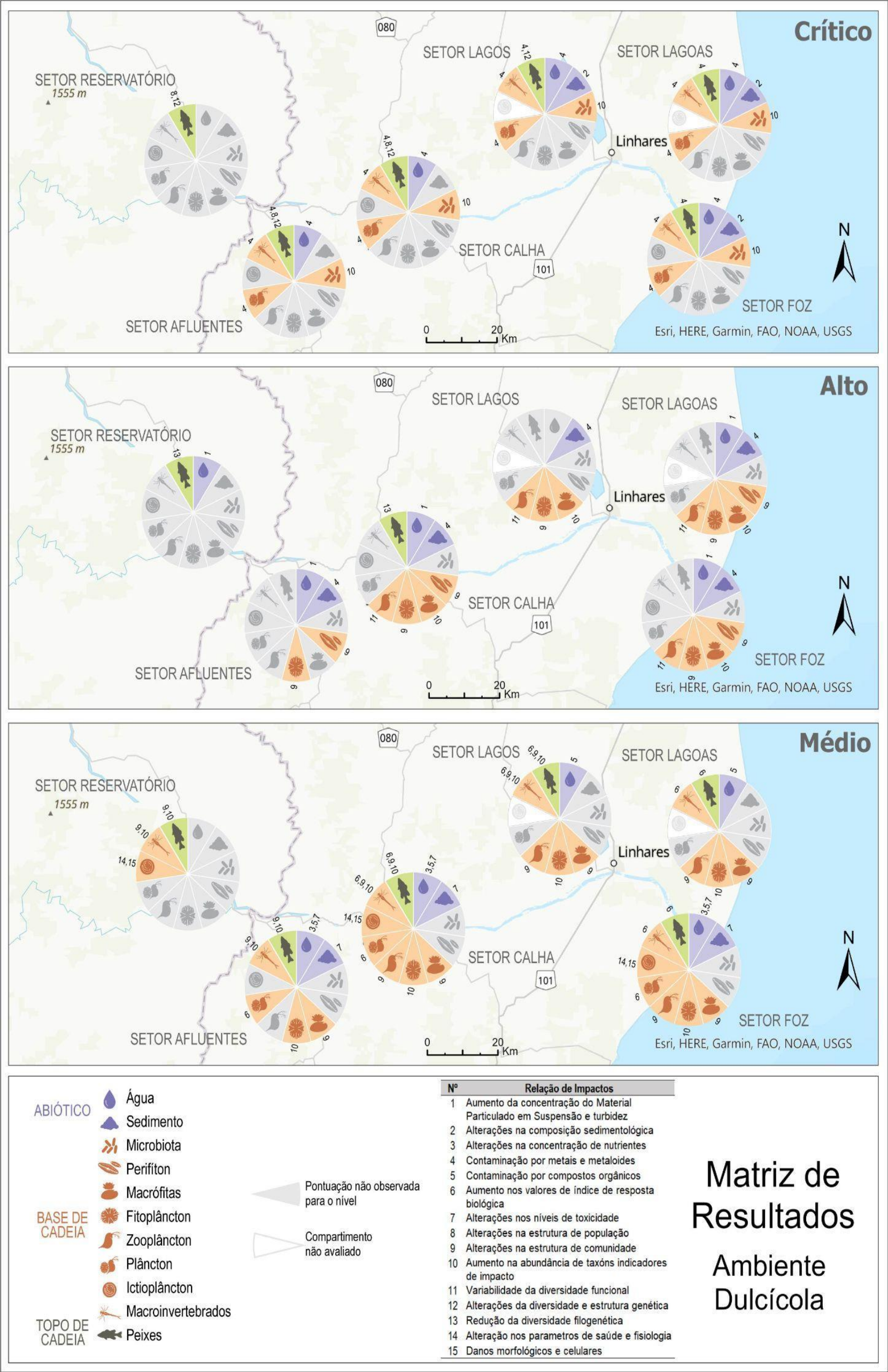




Figura 19: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Marinho de acordo com a pontuação alcançada pela Matriz de Resultados -PMBA/Fest 2022.

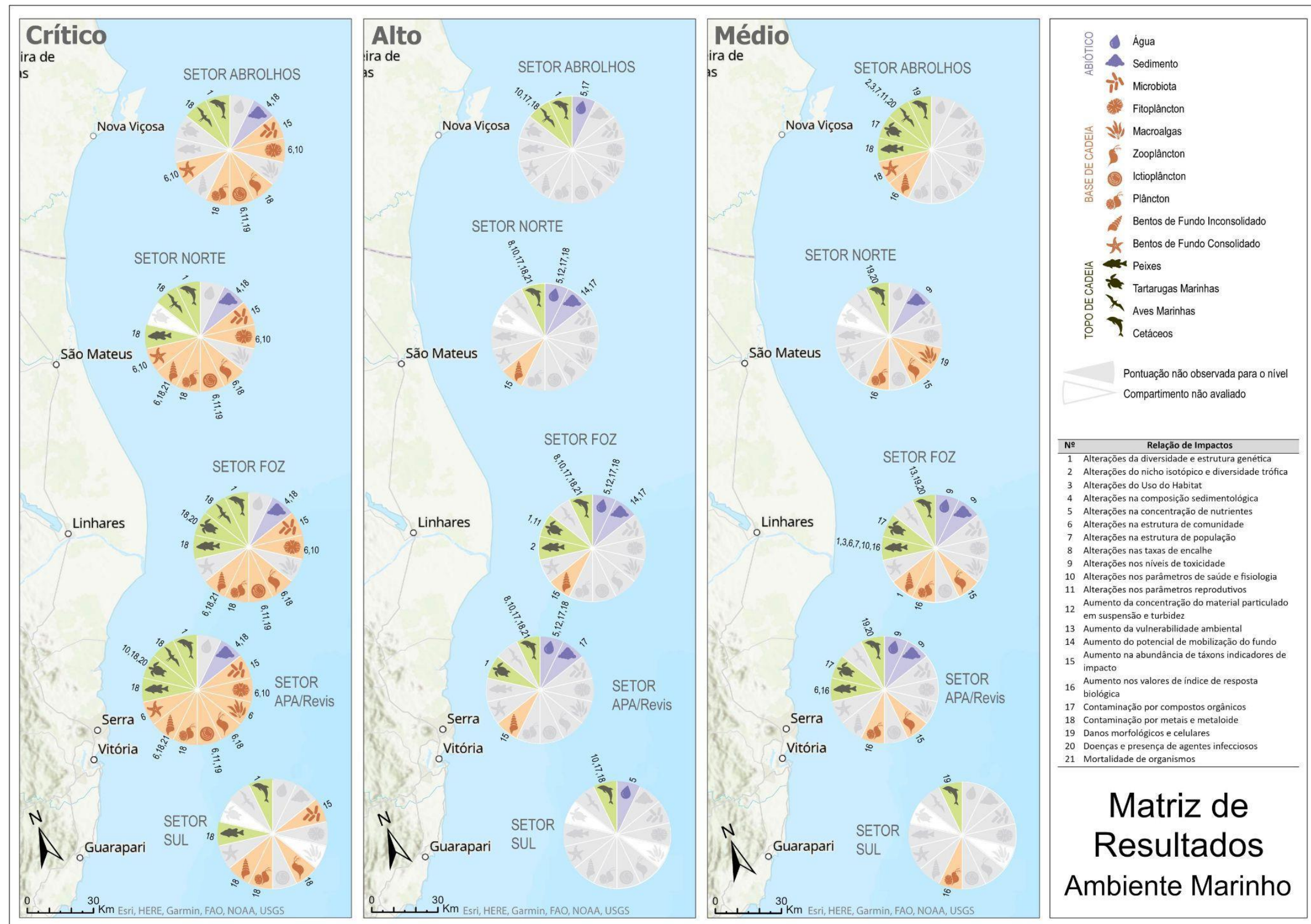
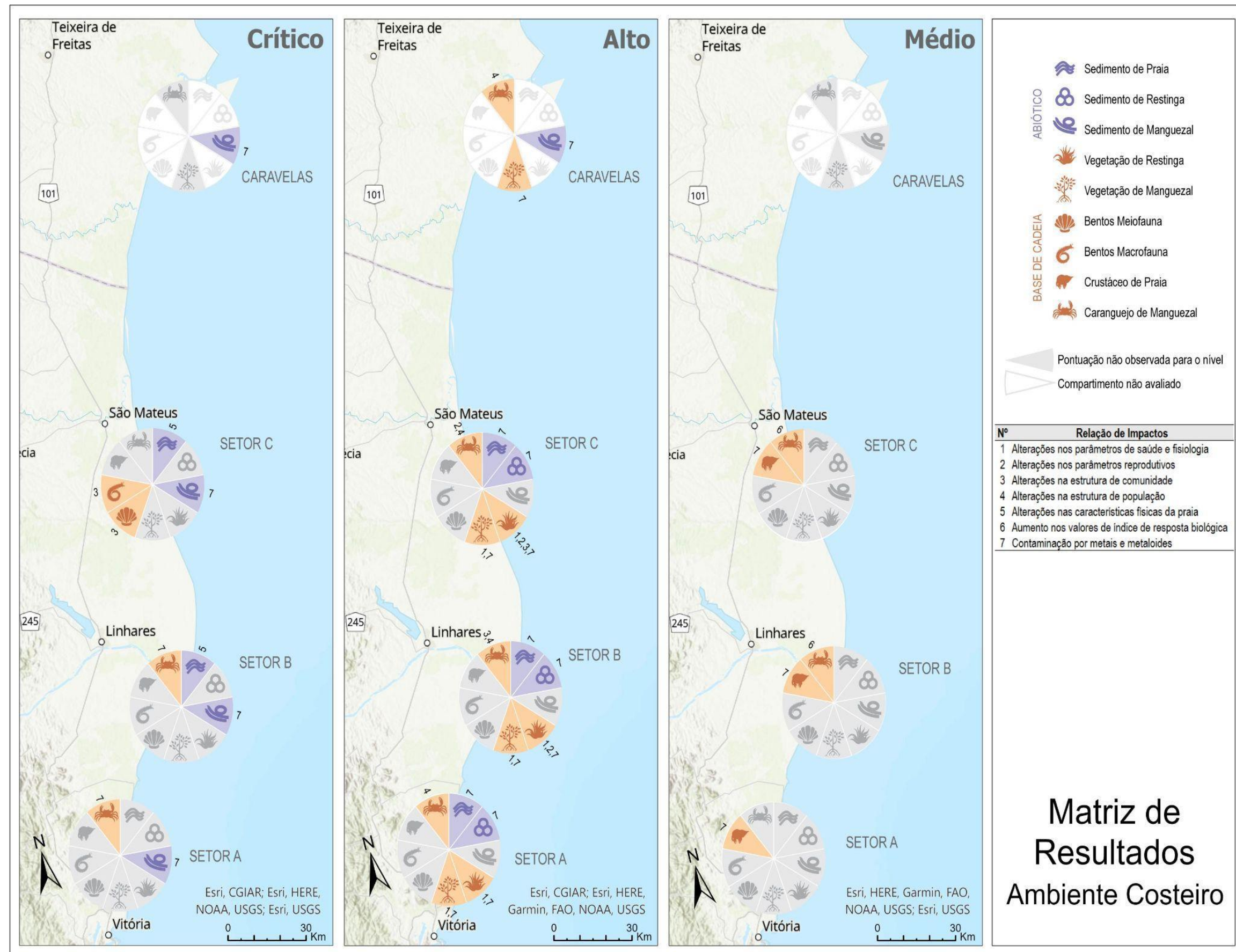




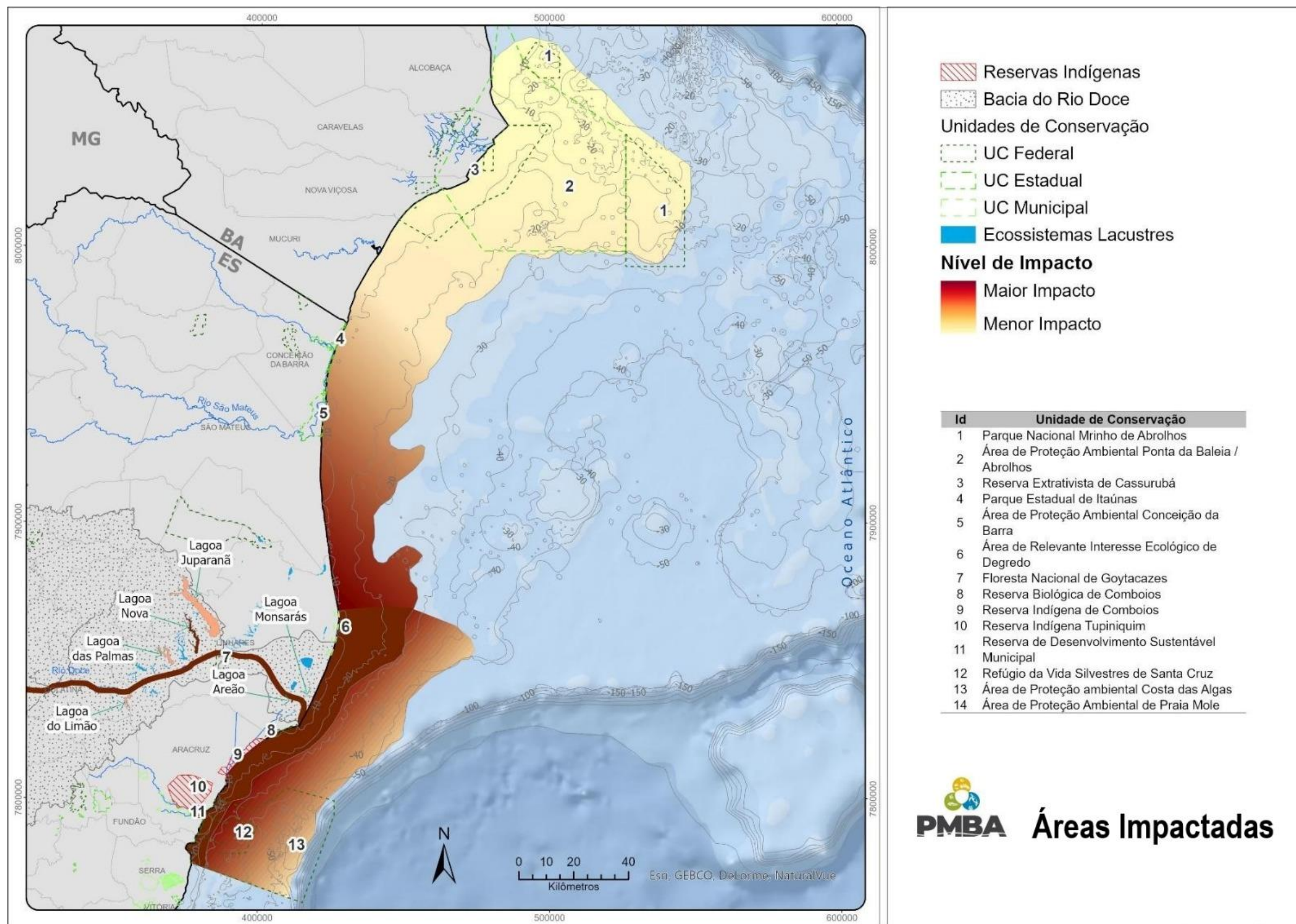
Figura 20: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Costeiro de acordo com a pontuação alcançada pela Matriz de Resultados -PMBA/Fest 2022.



Avaliando a macro distribuição dos casos de impactos nos mapas apresentados acima, com o conhecimento específico da distribuição deles e tendo em vista a localização das estações amostrais, foi possível, de forma sistemática, identificar as áreas impactadas pelo rompimento da Barragem de Fundão, bem como estabelecer seus possíveis limites espaciais (Figura 21). Neste contexto, cabe ressaltar que a delimitação explanada se manteve de acordo com o informado nas versões anteriores da Matriz de Resultados. Também, destaca-se que a distribuição das estações do PMBA/Fest com base no TR4 e no Plano de Trabalho do Novo Ciclo do Projeto, segue um padrão de amostragem baseado em critérios ambientais, tais 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 amostral regularmente distribuída no espaço, ou seja, baseada em uma escala espacial pré-definida que possibilite uma interpolação para efetiva regionalização dos resultados. Assim, a representação de uma área dá-se pelo conjunto de estações componentes que estão representando algum critério ambiental.



Figura 21: Mapa de identificação de áreas impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão no âmbito do PMBA/Fest.



Assim, o mapa de áreas impactadas gerado não está limitando ou quantificando o impacto em maior ou menor grau de importância ou magnitude, mas sim apontando para as áreas gerais onde os impactos foram reconhecidos e definidos. O gradiente de energia da alteração ambiental geralmente varia em função da distância da fonte do impacto. Neste caso, o Rio Doce é a fonte carreadora do impacto, logo, o Ambiente Dulcícola responde às alterações naturais e antrópicas que ocorrem na bacia hidrográfica. Neste sentido, o Rio Doce está definido como área impactada pelo rompimento da Barragem de Fundão, como ficou claramente demonstrado na Matriz de Resultados obtida para o Ambiente Dulcícola. O conjunto de alterações observadas nos organismos do Rio Doce sugere que a passagem do rejeito de minério impactou uma condição de habitat já bastante comprometido por impactos contemporâneos, cuja condição foi drasticamente ainda mais alterada em função da passagem do rejeito na calha do rio. No caso dos Ambientes Marinho e Costeiro, também existe o reflexo do que acontece na bacia hidrográfica como um todo. Porém, neste caso, a foz do Rio Doce, em Regência, é considerada a região inicial e de maior impacto, a partir do qual o gradiente de atenuação dos impactos poderia ser medido, já que existe uma tendência de que haja uma diminuição da energia do impacto direto nas áreas mais distantes à foz do Rio Doce. Por fim, cabe ressaltar que, como demonstrado no presente relatório, os impactos foram reconhecidos, medidos, classificados e apresentados, considerando-se os critérios previamente estabelecidos e devidamente justificados.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O PMBA/Fest reuniu, ao longo dos últimos quatro anos de execução, uma série de evidências de impactos causados pela passagem e permanência do rejeito de mineração e elementos a ele associados, permitindo o entendimento dos efeitos espaciais e temporais nas matrizes abióticas e bióticas na área de estudo (Bacia do Baixo Rio Doce e região marinhas adjacente – Área Ambiental I). A Matriz de Resultados resumiu de forma sistemática esses impactos em cada um dos ambientes estudados: Dulcícola, Marinho e Costeiro.

Os resultados indicam que tanto as matrizes abióticas quanto bióticas foram impactadas, em níveis que variaram de baixo a crítico. A maioria dos impactos nos Ambientes foi classificado com relação direta ou indireta com o rompimento da Barragem de Fundão, afetando o ambiente quanto a Sedimentologia, Química, Ecotoxicologia, Ecologia, Genética, Saúde e Comportamento. Quase metade dos impactos no ambiente Dulcícola foram identificados com base em dados coletados previamente ao impacto ou possuem correlação com metais associados ao rejeito, enquanto nos Ambientes Marinho e Costeiro esse valor extrapola os 65%. Ainda, a maioria dos impactos foram detectados em escala regional, abrangendo dois ou mais setores da área de estudo.

O manejo e gerenciamento da área afetada, assim como as ações de recuperação, podem ser amplamente favorecidos a partir dos resultados aqui apresentados. A discriminação espacial dos resultados I, apresentados em mapas, indicando os graus de impactos em cada setor, e em qual compartimento os impactos estão atuando permite a definição de ações de restauração ou mitigação do impacto de forma mais pontual e, por vezes, mais efetiva. Ainda, é possível definir os

compartimentos e setores chave para acompanhamento dos resultados da recuperação. Outro ponto de interesse é a possibilidade de intervenção nos impactos em níveis tróficos/ambientais específicos. Uma vez que é esperado que as respostas mais rápidas às ações realizadas na bacia e no ambiente costeiro com fins de reparação/recuperação/mitigação ocorra nos níveis tróficos mais basais, os resultados da Matriz de Resultados podem servir como balizamento de como, quando, onde, e em qual nível tróficos as ações deverão atuar.

Por fim, observa-se que o impacto ainda persiste na região estudada pelo PMBA/Fest, com evidências mostrando que mesmo os níveis ambientais mais básicos ainda estão sob o efeito das mudanças ambientais. A manutenção do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática poderá registrar em longo prazo a permanência ou redução do impacto crônico, documentando as tendências futuras das condições ambientais e da biodiversidade nos ecossistemas, assim como monitorar a eficiência das ações de recuperação ambiental implementadas na bacia do Rio Doce e região costeira e marinha afetada.



## 4 SÍNTESE INTEGRATIVA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste relatório anual são apresentados os avanços teóricos e analíticos da síntese integrativa (conforme Plano de trabalho, modelo e objetivos sugeridos pelo Ofício SEI 85/2022-CTBio/DIBIO/ICMBio). Adicionalmente, as interações existentes entre os diversos componentes da biodiversidade e os ambientes foram aprimoradas, bem como seu significado causa-consequência para uma melhor compreensão por parte de gestores e tomadores de decisão. Nessa abordagem, partiu-se das contribuições existentes, a partir da análise de relatórios, bancos de dados e de uma abordagem cienciométrica, para construção de modelos conceituais teóricos e numéricos que incorporam diferentes escalas de processos ecológicos tendo em vista a conectividade das inter-relações ecológicas entre água, sedimento e a biota. Dessa forma, a estratégia inicial se deu a partir de uma análise exploratória dos dados provenientes do monitoramento ambiental realizado pelo PMBA/Fest em diversas frentes. Isto é, buscou-se compreender as relações e variabilidades de diversos parâmetros bióticos e abióticos com o propósito de refinar os modelos conceituais e determinar, de forma acurada, as abordagens metodológicas que permitam relacionar, de forma integrada, os mecanismos de causa e efeito entre os ambientes dulcícola e marinho, partindo tanto de uma visão de escala macro quanto micro. Dessa forma, foi dada ênfase às discussões integradas dos diversos componentes dos ecossistemas aquáticos, com os temas, suas matrizes de dados entre outubro de 2018 e setembro de 2022 e os resultados provenientes do monitoramento da região impactada pela presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão. Vale salientar que o ambiente costeiro não foi considerado nas análises integrativas apresentadas neste relatório, e que a integração com este ambiente será apresentada no RA2023.

Para a apresentação dos resultados deste relatório considerou-se cada uma das metas estabelecidas e descritas no Plano de Trabalho, de forma que o modelo espaço-temporal de dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (porção capixaba) e na região marinha e costeira adjacente (Meta 1) foi apresentado nas seções 4.3, 4.4 e 4.5; a construção e integração conceitual teórica e numérica dos processos ecossistêmicos observados nas paisagens da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e região marinha e costeira adjacente (Meta 2), seções 4.3, 4.5, 4.6, 4.7; a determinação da cadeia de impactos nos ambientes marinho, costeiro e dulcícola com construção de Modelos de Estresse Ambiental (Meta 3), seções 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7; Construção do Modelo de Estresse Ambiental (Meta 4), seções 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7.

Assim, são apresentados os resultados relacionados aos produtos: a) Modelos Conceituais Ecossistêmicos; b) Modelos Ecossistêmicos numéricos e relacionais; e c) Síntese dos Modelos conceituais e relacionais. Esses três produtos principais foram desenvolvidos nas seções: (4.2) Mapeamento Sistemático da Literatura, (4.3) Modelos Conceituais, (4.4) Análise da Paisagem e dados pretéritos, (4.5) Processos e indicadores da qualidade ambiental, (4.6) Vias de desfechos Adversos (VDAs), (4.7) Relações ambientais no nível da comunidade e ecossistemas. Espera-se, com esse desenvolvimento das seções, auxiliar o entendimento de uma narrativa conceitual de causalidade, obtendo respostas integradas a partir de conceitos ecológicos, e especialmente na construção de uma

sequência analítica reproduzível. Nas seções (4.2) e (4.4), são apresentados os processos e conceitos em escalas temporais e espaciais mais amplas, os quais também alimentaram conceitualmente e analiticamente as demais seções. Os modelos conceituais (4.3) de cada ambiente foram então usados como direcionador conceitual dos indicadores de qualidade ambiental (4.5), as vias de desfecho adverso no nível de indivíduo (4.6) e as relações ambientais de efeito nas comunidades e ecossistemas (4.7). De modo geral, a construção dessa narrativa de modelos, conceitos e processos ecológicos integráveis, propõe uma síntese analítica do monitoramento. Assim, identifica-se quais variáveis preditoras de cada tema devem, ou podem, ser consideradas para rastrear os contaminantes associados ao material oriundo do rompimento e por fim indicar seu efeito nas variáveis respostas dos indicadores da biodiversidade.

Nesse sentido, é proposta uma síntese integrativa que busca compreender os resultados integrados, ou integração de dados. Sendo assim, teve-se como objetivo desenvolver uma narrativa racional e relacional de causalidade, cientificamente referenciada, e estatisticamente robusta, para poder associar processos entre ambientes dulcícola, marinho e costeiro (ainda em construção e que será mais detalhada/incluída no relatório de 2023); entre compartimentos de água e sedimento, entre dados abióticos e bióticos e por meio dos compartimentos biológicos que expressam a biodiversidade aquática. Evidentemente, se conhece muitos desses processos, mas cada ambiente, local, setor ou campanha possui particularidades únicas que não são triviais. Especialmente, para uma melhor compreensão dos efeitos dos metais associados ao rompimento da barragem no ecossistema, possibilitando inferências e predições, é preciso combinar perspectivas em diferentes níveis de complexidade biológica: toxicidade individual, toxicidade de comunidade, e de maneira assertiva informar como uma substância química pode afetar a diversidade, abundância e função ecológica, e como a modelagem ecológica pode prever efeitos no ecossistema inteiro (SCHNEEWEISS et al., 2022).

Mesmo que alguns resultados ainda sejam preliminares ou parciais, buscou-se otimizar a organização e integração dos resultados bióticos e abióticos. A síntese visa ser complementar aos resultados alcançados pelos demais temas no âmbito do PMBA/Fest, demonstrando por meio de relações que vão do macro ao micro, a robustez do programa de monitoramento em seu presente estado. A partir dessa síntese complementar, será possível avançar ainda mais, uma vez que potenciais lacunas serão detectadas. Dessa maneira, as seções 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentadas em linguagem técnica-científica, enquanto na seção 4.8 de Considerações Finais e Perspectivas Futuras é apresentado um sumário com linguagem mais concisa e acessível dos principais resultados integrados.

#### 4.2 CIENCIOMETRIA (MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA)

A análise cienciométrica está sendo realizada com os seguintes propósitos: 1) mapear e avaliar o avanço do conhecimento global e regional no campo do rompimento de barragem de rejeitos que alcançaram a zona costeira/oceânica ao longo da história; 2) dar suporte ao modelo conceitual integrado (sistemas dulcícola, costeiro e marinho), permitindo a integração e análise dos dados de uma forma que incorpore todos os processos envolvidos entre os sistemas de forma sinérgica; 3) analisar as lacunas do conhecimento sobre as consequências de rompimentos de barragem de rejeitos que

alcançaram o mar; 4) levantar os métodos de análises ao longo do tempo e analisar a integração entre áreas do conhecimento; e 5) propor recomendações relevantes que visem a prevenção, mitigação e recuperação em caso de rompimento da barragem de rejeitos.

Nessa análise, pesquisou-se nos bancos de dados da Web of Science e Scopus publicações relacionadas aos impactos causados pelo rompimento de barragem de rejeitos de minérios que chegaram ao oceano entre os anos de 1970 e 2023, usando as seguintes combinações de palavras-chave: ((TS=( "mining tailing\*" OR "tailing\*" OR "mine tailing\* dam" OR "mine tailing" OR "iron ore tailing" )) AND TS=("accident" OR "rupture" OR "spill" OR "failure" OR "disaster")) AND TS=("marine" OR "coast\*" OR "sea" OR "ocean\*" OR "estuary" OR "freshwater" OR "river" OR "environment\*"). Essa pesquisa identificou 710 artigos. Após a triagem inicial de títulos e resumos, apenas 66% desse total foi utilizado para essa análise inicial, pelo fato de muitos artigos fugirem ao tema. Após isso, aplicou-se uma combinação de métodos qualitativos e quantitativos que serão apresentados no decorrer desta seção do relatório com o objetivo de sumarizar os principais pontos listados acima. Vale observar que, numa primeira abordagem, os termos costeiro e marinho não foram especificados o que resultou num número muito maior de referências (cerca de 3000) já que o número da ocorrência envolvendo barragens de rejeitos localizadas em áreas isoladas da costa e do mar é bem maior, principalmente na China, país líder de publicações referentes ao tema de forma geral.

#### 4.2.1 Análise Estatística de Publicações

Por meio da análise das séries temporais do número de publicações totais e por instituições, nota-se que o processo geral de desenvolvimento e o progresso da pesquisa no campo de pesquisa dos impactos causados pelo rompimento de barragens de rejeito de minério que chega ao oceano podem ser compreendidos em três grandes fases (Figura 22).

Na fase 1, entre 1970 e 1997, a pesquisa sobre a temática ainda estava em estágio lento e inicial, com um número médio de publicações relativamente menor em relação aos outros anos, representando 3,4% das publicações. A pesquisa nesta fase foi baseada principalmente na teoria básica acerca do rompimento de barragem de rejeitos, coleta e análise de dados de sedimento, água, peixes e alguns experimentos de restauração do sistema.

Por outro lado, a fase 2, entre 1998 e 2015, foi uma fase intermediária, ocorrendo um aumento das publicações impulsionadas principalmente pelo acidente ocorrido em Aznalcóllar na Espanha em 1998 (Figura 22a). Essa fase concentrou 39% das publicações totais, sendo a Universidade de Granada a principal instituição que liderou essas pesquisas (Figura 22b). As pesquisas nestas fases foram baseadas principalmente na investigação dos impactos nos ambientes continentais e oceânicos. Os métodos utilizados foram, predominantemente, análises estatísticas de amostras coletadas em campo. Entretanto, durante essa fase, iniciativas metodológicas robustas para integrar os impactos ao longo dos diferentes ambientes de forma sinérgica não foram desenvolvidas ou exploradas.

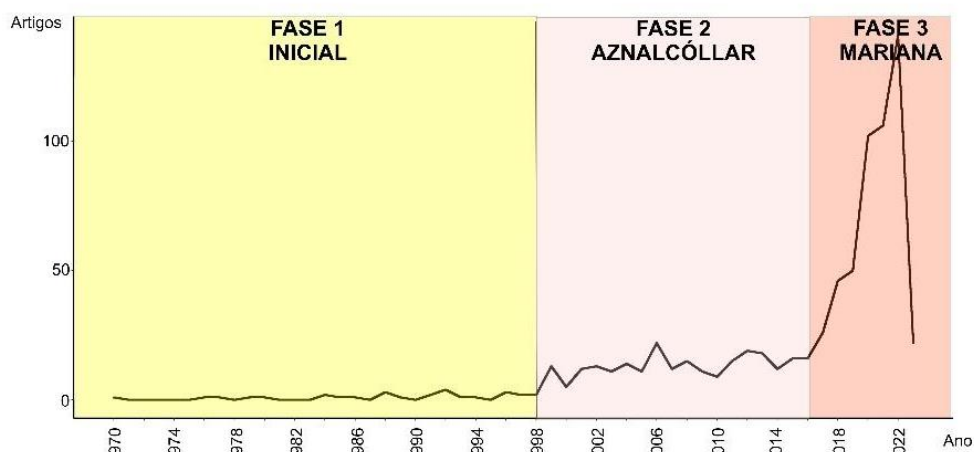
Por fim, a fase 3, entre 2016 e 2023, configurou-se como uma fase de desenvolvimento rápido das pesquisas sobre a temática, motivada principalmente pelo rompimento da Barragem de Fundão em

Mariana em novembro de 2015. A maior parte das publicações concentra-se nesse período (69,8% das publicações totais). As instituições brasileiras começaram a figurar entre as principais instituições do mundo a pesquisar sobre essa temática, em especial a Universidade Federal do Espírito Santo (Figura 22b), produção motivada principalmente pelo desenvolvimento do PMBA/Fest. As pesquisas nessa fase incorporam, além de análises estatísticas de dados de campo, experimentos em laboratórios, técnicas de modelagem numérica oceânica, modelagem hidrológica, uso de dados de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. Muitos dos trabalhos, além da compreensão dos impactos, buscaram investigar possíveis estratégias de reparação e mitigação em todos os ambientes. Nesse período já se percebe iniciativas, ainda que de forma inicial, de integrar os diferentes ambientes para uma compreensão sinérgica dos principais efeitos e impactos.

Em relação ao foco dos estudos por ambiente ao longo do tempo, constatou-se que a maior parte dos trabalhos se concentraram nos ambientes dulcícola (70%), marinho (14%) e costeiro (5%), respectivamente, com alguns trabalhos (11%) integrando pelo menos 2 ambientes. Poucos tentaram estabelecer uma conexão Dulcícola-Costeiro-Marinho. Considerando apenas o Brasil, esta divisão se altera para: ambiente dulcícola (59%), marinho (23%) e costeiro (11%), respectivamente, com alguns trabalhos (7%) integrando pelo menos 2 ambientes. Este resultado destaca a expressividade da contribuição brasileira sobre os impactos no meio marinho.

Figura 22: a) Evolução temporal das publicações globais relacionadas ao rompimento de barragens que chegaram aos ambientes costeiro e marinho; b) Evolução temporal das 6 principais instituições ao longo do tempo; c) Porcentagens de estudos por ambiente a nível global e apenas no Brasil.

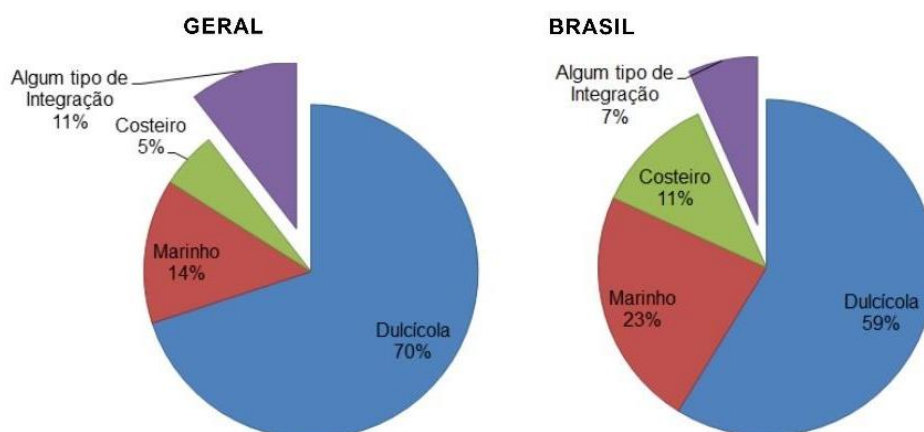
a) **Produção Científica Anual**



b) **Produção Científica Anual por**



c) **Estudos por Ambientes**

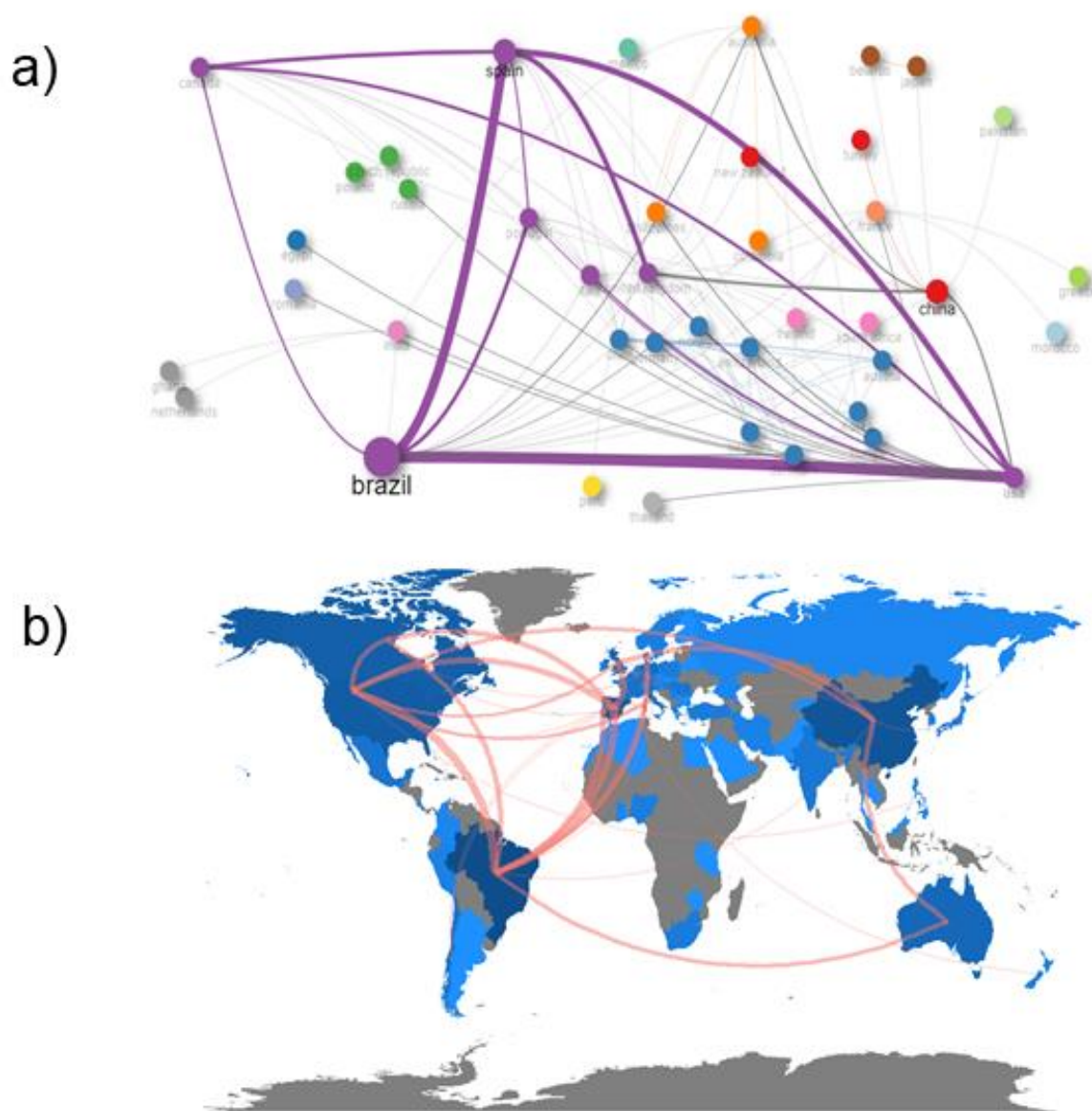


A Figura 23a mostra a rede de cooperação de países na pesquisa de rompimentos de barragens de rejeitos que alcançaram o mar. Esta análise indica que foram estabelecidas diversas redes de cooperação, tendo como polos principais o Brasil, Canadá, Espanha e EUA. A espessura das linhas



entre os pontos indica a força e frequência da cooperação. Neste sentido, as instituições brasileiras possuem as instituições dos EUA e Espanha como as principais colaboradoras. Além disso, percebem-se colaborações do Brasil com diversos países do mundo (Figura 23b). Isso demonstra que o Brasil não se isolou em relação ao desenvolvimento da pesquisa e buscou países com alto grau de desenvolvimento tecnológico e experiência nesse tipo de estudo para fundamentar e aperfeiçoar as suas pesquisas e avanços.

Figura 23: a) indica as redes de colaboração entre os principais países. O tamanho de cada ponto indica o número de publicações em cada país ou região. Quanto maior o ponto, mais publicações são feitas no país ou região. A conexão entre eles representa a relação de cooperação entre os países quanto mais espessa for a linha que liga os pontos, mais frequente será a cooperação e vice-versa. As cores dos pontos indicam grupos de co-citações, ou seja, países com cores parecidas possuem co-citações parecidas. b) Indica o mapa de cooperação entre os países. A cor em cinza indica ausência de publicação sobre o tema, azul mais claro indica poucas publicações e azul mais escuro maior número de publicações. As setas em vermelho mostram as colaborações entre os países.



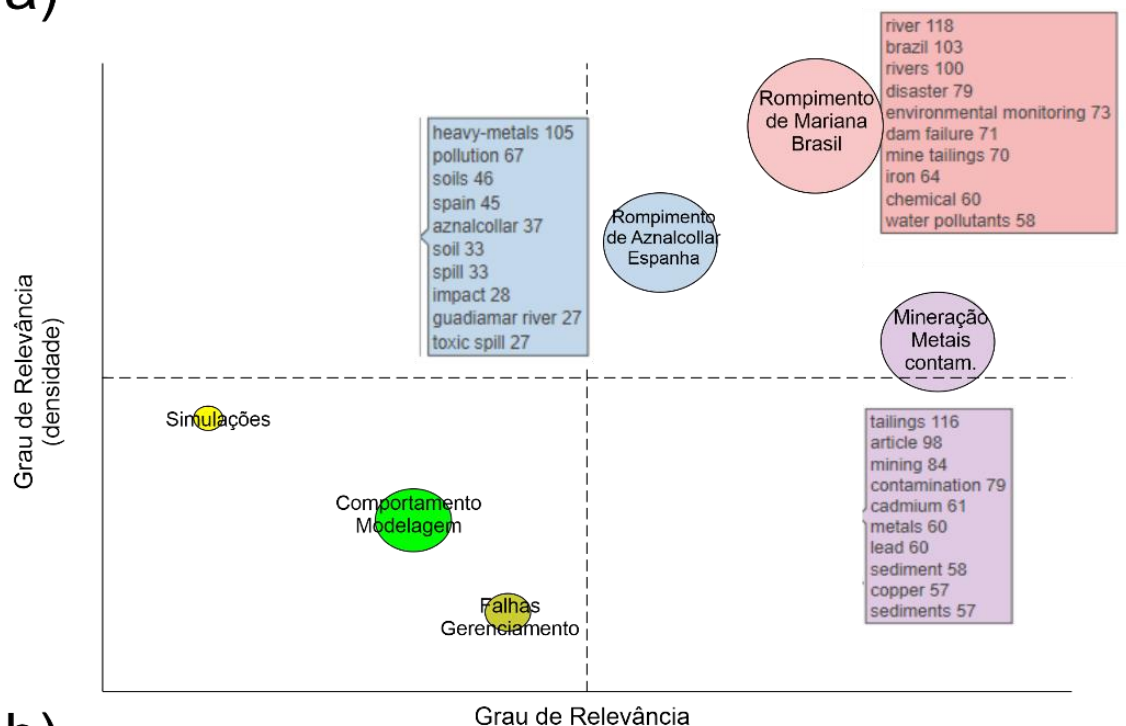
As análises mostram que no cenário atual o Brasil e a Espanha são os países que possuem as pesquisas mais extensas para esse tema, totalizando mais de 40% da produção científica. As principais revistas escolhidas para a publicação desses trabalhos, foram de acordo com o número de publicações a *Science Of The Total Environment* (14%) e *Environmental Science And Pollution Research* (0,5%). Em relação à produção científica que reporta o evento no Brasil, esta correspondeu a 278 artigos publicados em 109 periódicos diferentes, sendo que 70% destes se concentraram em 10 revistas, todas de alto impacto.

Para avaliar os principais tópicos de pesquisa e as suas relações internas dentro do campo acadêmico e compreender as fronteiras de pesquisas entre diversas frentes de estudos, realizou-se a análise de co-ocorrência de palavras-chave. Consideram-se aqui as fronteiras como combinações conceituais de tópicos de pesquisa, bem como tendências teóricas e novos tópicos que estão se tornando mais significativos. A análise da co-ocorrência de palavras-chave mais frequentes identificou 6 temas de estudos (Figura 24a), sendo três temas os principais motores de pesquisa (quadrante superior direito). Assim, um primeiro tema está associado ao rompimento da Barragem de Fundão, com as associações de estudos que envolvem monitoramento ambiental, análises químicas, rios e poluentes na água; o segundo relacionado ao rompimento de Aznalcóllar, associado a palavras solos, derramamento tóxico, nível do rio e metais pesados; e o terceiro associado a estudos englobando mineração, metais e contaminação, classificado pelas palavras: sedimentos, cobre, metais, cádmio e contaminação. Identificou-se também dois temas emergentes, um relacionado a análise de simulações e outro que engloba as palavras comportamental, gerenciamento e modelos (quadrante inferior esquerdo da Figura 24a).

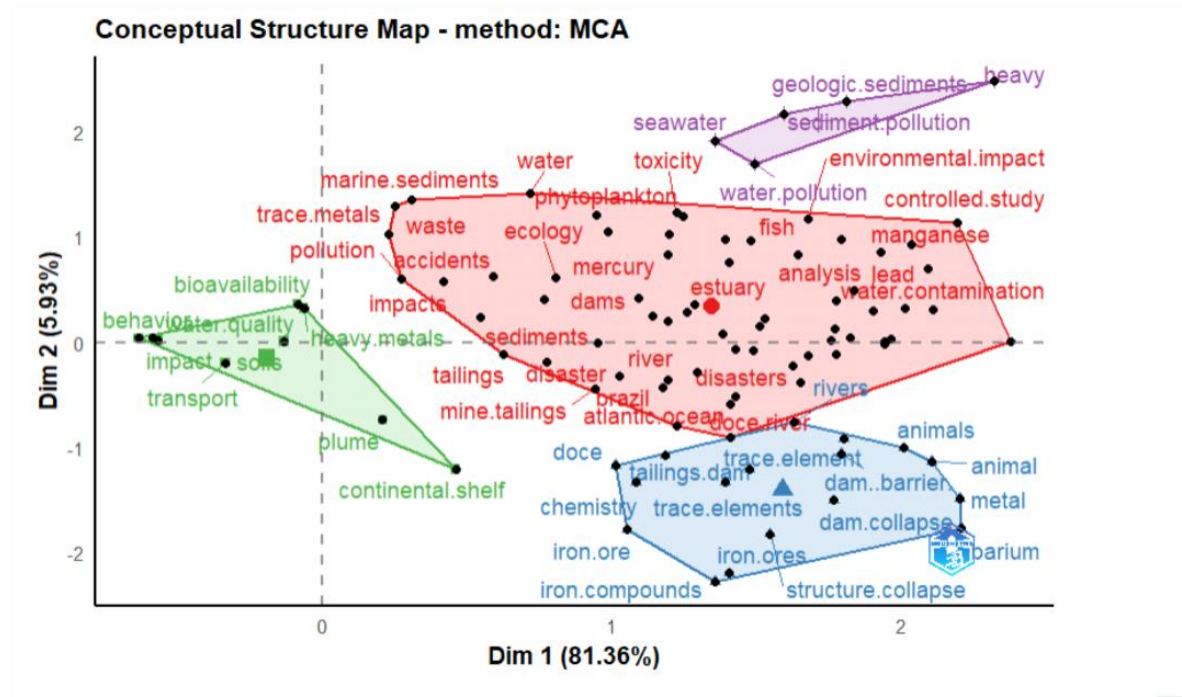
Foi também realizada a Análise de Correspondência Múltipla (MCA) sobre as principais palavras-chave no ambiente costeiro e marinho (Figura 24b). Através desta análise é possível verificar 4 grupos bem determinados que expressam conceitos comuns: um relacionado a estudos geológicos associados à poluição de sedimentos e metais pesados (grupo roxo); outro relacionado a áreas costeiras, plataforma continental, transporte pluma (grupo verde); um relacionado principalmente a aspectos químicos (grupo azul) e finalmente um último, relacionado a estudos mais abrangentes ligados às questões ecológicas (grupo vermelho).

Figura 24: a) Análise de co-ocorrência de palavras-chave; As cores são ilustrativas e indicam os temas identificados com as palavra-chave mais frequentes. b) Análise de MCA com as palavras chave mais encontradas para o ambiente costeiro marinho. As cores indicam os clusters (cada cor um grupo) identificados na análise.

a)



b)



### 4.3 MODELOS CONCEITUAIS

Com base no entendimento do funcionamento deste “metaecossistema”, a partir dos dados e dos resultados do PMBA/Fest, os modelos conceituais foram construídos com o objetivo inicial de organizar as informações disponíveis e compreender as relações entre os diversos temas do programa. O delineamento preliminar das relações entre os temas está em conformidade com as metas 3 e 4 do plano de integração de dados (Avaliação Integrada da Biodiversidade Aquática do Baixo Rio Doce, e Área Costeira e Marinha), bem como os itens 1c, 1d, 1g do Ofício SEI 85/2022-CTBio/DIBIO/ICMBio.

A partir dos últimos resultados do PMBA/Fest – incluindo aqueles publicados em revistas indexadas – compreende-se que, pelo seu potencial de alterar ciclos biogeoquímicos e a dispersão de elementos essenciais e contaminantes, o material proveniente do rompimento da Barragem de Fundão afetou direta e indiretamente os ambiente dulcícola, costeiro e marinho. Os efeitos foram observados em diferentes compartimentos (sedimento, coluna d’água e biota) e em diferentes níveis de organização biológica (RRDM, 2022 - RT- 39B; 39C; 39D). Portanto, antecedendo qualquer esforço analítico, tornou-se necessário organizar as informações dos temas separadamente para cada ambiente. Assim, a complexidade dos processos inerentes aos ambientes marinho e dulcícola, e as relações resposta-preditor específicas aos temas, podem ser compreendidas e acompanhadas de um ambiente para o outro.

Na Figura 25, o modelo conceitual do ambiente dulcícola aponta para a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão. A variabilidade espaço - temporal da chuva, o uso e ocupação da Bacia Hidrográfica, as atividades de recuperação e restauração, incluindo a dragagem nas áreas que ainda apresentam a deposição de rejeito (exemplo: a Usina Hidrelétrica de Risoleta Neves), influenciam a descarga hídrica, o fluxo de sedimentos (RRDM, 2022 - RT-39B) e, conseqüentemente, a distribuição dos contaminantes pelos diferentes compartimentos fluviais.

Análises limnológicas, de qualidade da água e sedimento e mineralógicas, detectam a presença de metais e contaminantes, associados direta ou indiretamente ao material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, na coluna d’água e sedimento. Parâmetros físico-químicos influenciam nas variações de concentrações dos metais e outros contaminantes na água superficial, de fundo e no sedimento. Por exemplo, material particulado em suspensão (MPS), pH e matéria orgânica dissolvida modulam a biodisponibilidade de metais, afetando suas concentrações na coluna d’água e no sedimento e seu tempo de residência (RRDM, 2022 - RT-39B). Portanto, o conjunto de informações gerado a partir da análise integrada dos temas Limnologia, Qualidade da Água e Sedimento e Mineralogia, permite entender a distribuição e disponibilidade dos contaminantes e, assim, os possíveis efeitos adversos em populações e comunidade, i.e., desfechos adversos de interesse regulatório (e.g., desestruturação da comunidade, declínio populacional, perda de diversidade genética).

Na Figura 26, o modelo conceitual do ambiente marinho aponta a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão. Os dados coletados e gerados pelos temas Uso e Ocupação de Solos, Qualidade da Água e Sedimentos e Mineralogia, auxiliam o entendimento do aporte fluvial e o rastreamento do material associado ao rompimento. Assim a variabilidade hidrológica da bacia, a qual é

sensível às variações no uso e ocupação do solo e do clima, controlam a vazão e, consequentemente, influenciam a frequência e intensidade do aporte fluvial de sedimentos. Por outro lado, as condições meteoceanográficas determinam a distribuição dos contaminantes nos diferentes compartimentos, podendo ressuspender material presumidamente inerte e disponibilizando-o para os organismos (RRDM, 2022 - RT-39D).

Os dados que caracterizam as forçantes hidro - meteoceanográficas contribuem para o entendimento e previsão da dispersão dos contaminantes sobre a coluna d'água e sedimento. Os dados hidrogeoquímicos detectam a presença de diferentes contaminantes pela água de superfície, de fundo e no sedimento, indicando como os parâmetros físico-químicos podem influenciar as concentrações desses contaminantes nos diferentes compartimentos. Os dados sedimentológicos e mineralógicos além de contribuir para o entendimento do padrão de deposição, ressuspensão e transporte do material aportado pelo Rio Doce, podem ser utilizados para rastrear o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão (RRDM, 2022 - RT-39D). Esses dados dão suporte para compreender os efeitos adversos de interesse regulatório observados nos diversos grupos biológicos, como perda da diversidade genética, declínio populacional e desestruturação das comunidades. Assim como no ambiente dulcícola, os efeitos observados nas populações de diferentes grupos taxonômicos são mediados por vias internas de exposição e efeito, i.e., vias de desfecho adverso. Esse conceito pretende integrar os dados ecotoxicológicos em diferentes níveis de organização biológica – de células a indivíduo – e está detalhado na seção 4.6 do presente relatório.



Figura 25: Modelo conceitual do ambiente dulcícola apontando as principais relações resposta-preditor com base nos dados disponíveis e apresentados pelos grupos. Caixas-seta amarelas indicam os nomes dos temas e abaixo, nas caixas laranjas, as principais variáveis que podem ser preditoras ou resposta das variáveis dos demais temas. Caixas vermelhas indicam os desfechos adversos de interesse regulatório específicos aos temas fitoplâncton, zooplâncton, ictioplâncton, perifíton e macrófitas, ictiofauna e macroinvertebrados bentônicos. Setas pontilhadas indicam relações entre variáveis preditoras abióticas com os desfechos adversos podem ser mediadas por vias internas de efeito (i.e., vias de desfecho adverso, VDAs), enquanto setas contínuas relações diretas resposta-preditor. No canto inferior esquerdo, encontra-se uma legenda das abreviações e das relações representadas por diferentes setas.

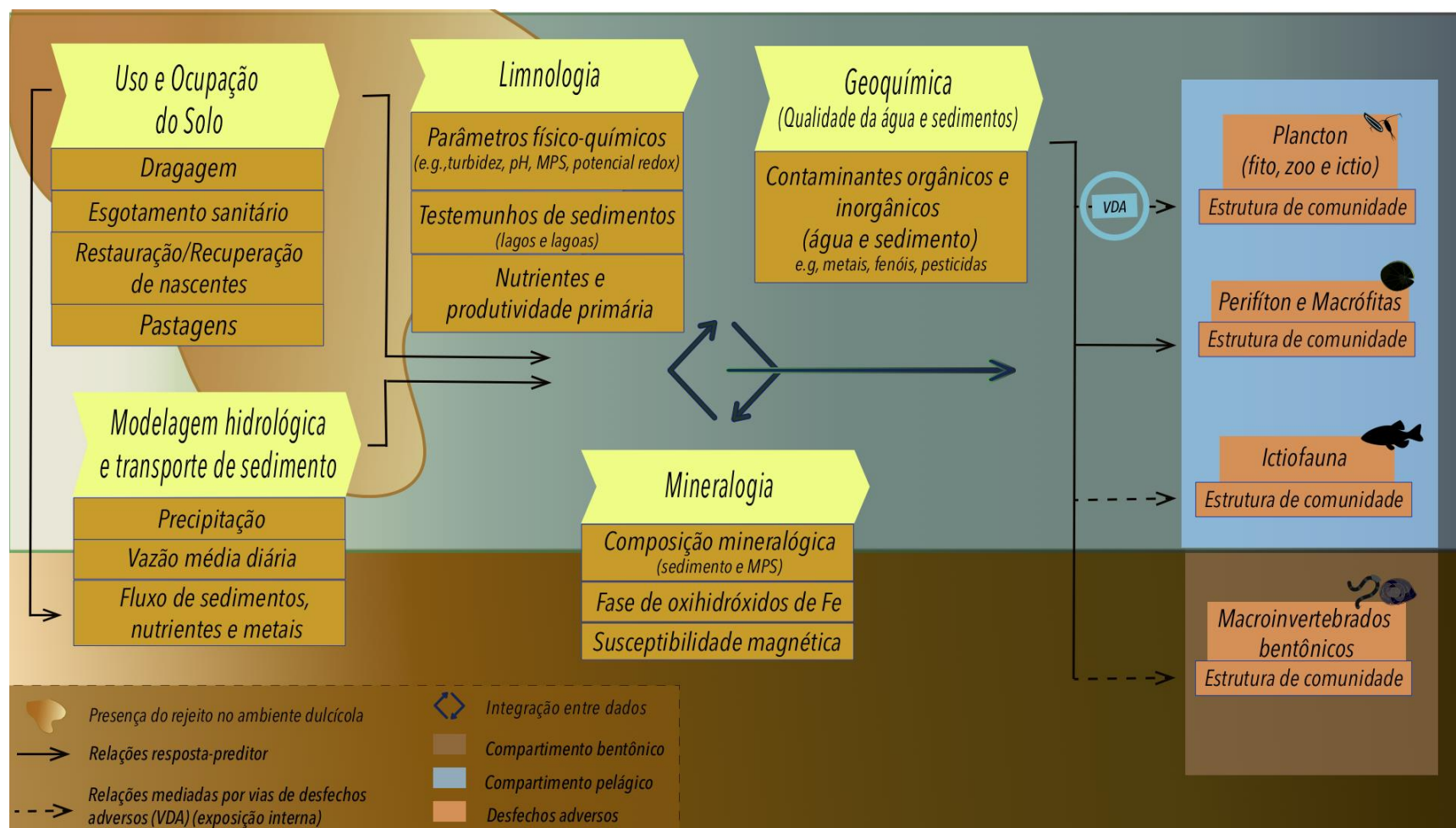
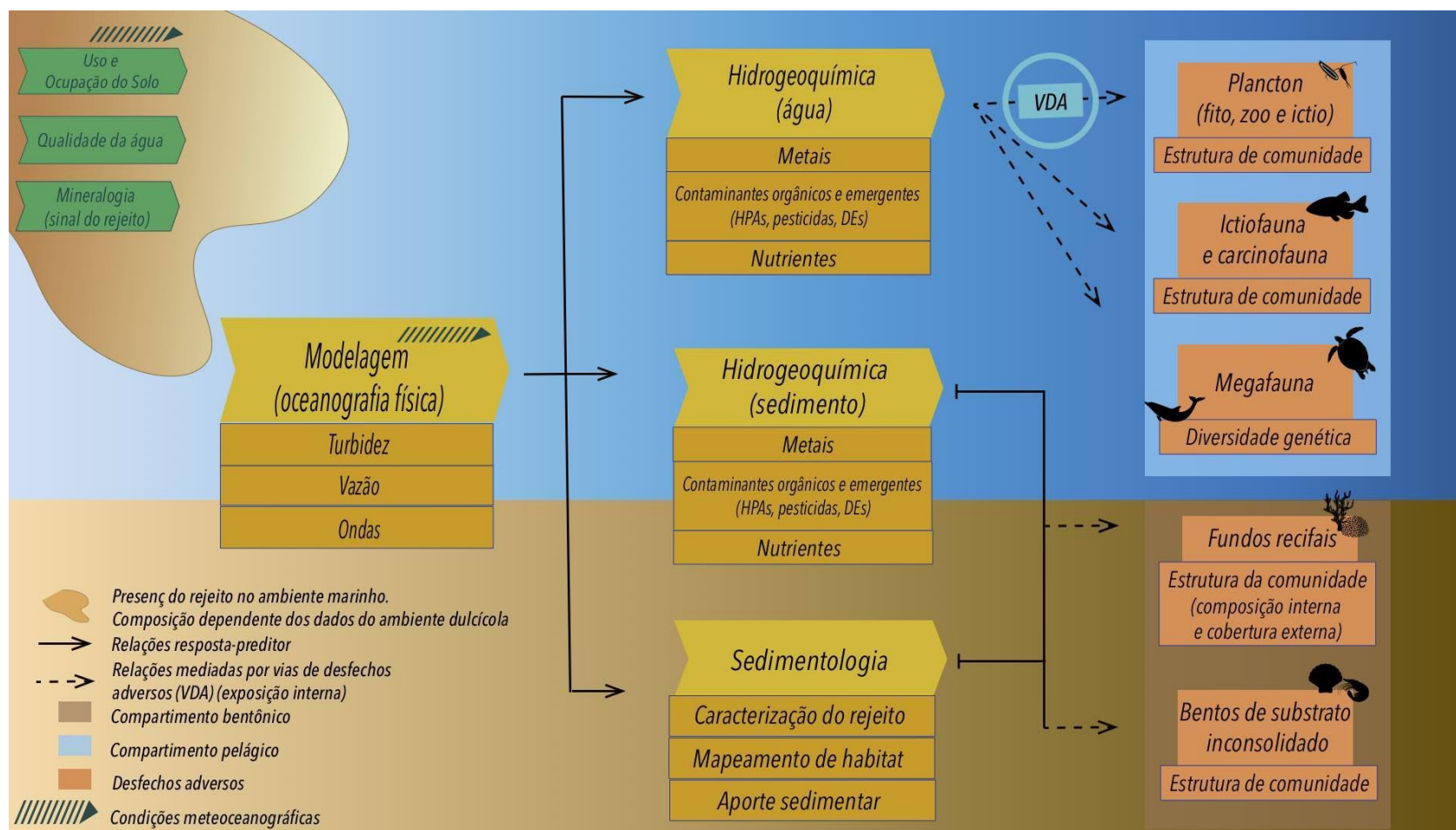


Figura 26: Modelo conceitual do ambiente marinho apontando as principais relações resposta-preditor com base nos dados disponíveis e apresentados pelos grupos. Setas verdes no canto superior esquerdo, indicam a influência do Uso e Ocupação dos Solos, da Qualidade da água e sedimento e mineralogia (indicadores do ambiente dulcícola) no ambiente marinho. Seta tracejada no canto superior indica a influência das condições meteoceanográficas na chegada e distribuição de material no ambiente marinho. Caixas-seta amarelas representam os nomes dos temas e abaixo, nas caixas laranjas, as principais variáveis que podem ser preditoras ou resposta das variáveis dos demais temas. Caixas vermelhas indicam os desfechos adversos de interesse regulatório específicos aos temas fitoplâncton, zooplâncton, ictioplâncton, ictiofauna, megafauna, fundos recifais e bentos de substrato inconsolidado. Setas pontilhadas indicam relações entre variáveis.



#### 4.3.1 Modelo conceitual espaço-temporal de dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão

Um primeiro modelo conceitual espaço-temporal de dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão no sedimento de fundo foi apresentado para o Ambiente Marinho no Relatório Anual de 2019 (RRDM, 2019). A elaboração desse modelo foi feita através da aplicação de critérios geoquímicos e mineralógicos. O modelo conceitual espaço-temporal de dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão dentro da Bacia do Rio Doce (porção capixaba) e na região marinha e costeira adjacente apresentado no RA2022 é resultado do aprofundamento do conhecimento sobre o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, bem como sobre seu comportamento nos Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro ao longo dos 4 anos do PMBA/Fest. Destaca-se que no RA2022 o modelo conceitual espaço-temporal de dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão contempla os Ambientes Dulcícola e Marinho. A integração com o Ambiente Costeiro será apresentada no RA2023.

O rompimento da Barragem de Fundão resultou no lançamento de aproximadamente 44 Mm<sup>3</sup> de rejeito de minério nos vales fluviais à jusante, dos quais cerca de 31,6 Mm<sup>3</sup> de rejeito de minério se depositaram entre a Barragem de Fundão e a usina hidrelétrica de Candonga, enquanto o remanescente fluiu na forma de cargas suspensas mais finas entre a barragem de Candonga e Oceano Atlântico (RENOVA, 2016). Durante o seu deslocamento, o material da Barragem de Fundão alterou drasticamente a paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, devastando grandes porções de floresta do bioma Mata Atlântica e deixando grandes áreas de vertentes e planícies com o solo totalmente exposto (Nota técnica CT-GRSA 10/2018). Desta forma, o rompimento da Barragem de Fundão além de aportar um grande volume de rejeito de minério de ferro nos vales fluviais, resultou na geração de um grande fluxo de lama e detritos caracterizado pela elevada concentração de sedimento em suspensão (CPRM, 2015; BASTOS et al., 2017; QUARESMA et al., 2020), e pela alta concentração de metais e outros contaminantes. Esses contaminantes estavam associados tanto ao rejeito oriundo da Barragem de Fundão como ao solo que estava depositado ao longo das calhas e das planícies de inundação dos sistemas fluviais (GOMES et al., 2017; HATJE et al. 2017, BASTOS et al., 2017, QUARESMA et al., 2021, SÁ et al., 2021), e que foi remobilizado durante o deslocamento do fluxo de lama e detritos. Posto isso, o modelo aqui apresentado avalia a dispersão espaço-temporal do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, composto pelo rejeito da barragem, pelo solo remobilizado e pelos contaminantes presentes nesse solo. Os estudos realizados após o rompimento da Barragem de Fundão mostraram que a deposição e a dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão podem ser avaliadas a partir das características sedimentológicas, geoquímicas e mineralógicas desse material.

Do ponto de vista sedimentológico, o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão é caracterizado por areia fina à média, silte e argila (SILVA et al. 2016; FIGUEIREDO et al., 2020; QUARESMA et al., 2020, 2021). Logo após o rompimento da barragem foi encontrado um aumento da proporção de sedimentos com granulometria mais fina entre as estações de Cachoeira dos Óculos e Baixo Guandu, indicando que houve uma sedimentação da fração mais grossa ao longo da calha do

Rio Doce. Nas proximidades da usina hidrelétrica de Candonga (MG), FIGUEIREDO et al. (2020) caracterizaram o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão com um diâmetro médio de 55  $\mu\text{m}$ , de forma que 90% das partículas analisadas tinham diâmetro inferior a 123  $\mu\text{m}$ . Além disso, os autores identificaram dois grupos principais: um com diâmetro em torno de 100  $\mu\text{m}$  e outro com diâmetro próximo a 15  $\mu\text{m}$ . GOMES et al. (2017) detectaram uma redução do tamanho, com predominância geral de frações de lama no dia da chegada do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão na porção interna da Foz do Rio Doce. A alteração na granulometria do sedimento de fundo nessa região também foi identificada por SÁ et al. (2021), que encontraram que o tamanho do grão do sedimento mudou de areia muito grossa para areia fina quando o material oriundo do rompimento atingiu o estuário do Rio Doce. Já na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce, QUARESMA et al. (2020) observaram um aumento no teor de argila em 60%, o que resultou na redução do tamanho mediano do grão de 7  $\mu\text{m}$  para 2  $\mu\text{m}$ . Além disso, os autores concluíram que o rompimento da Barragem de Fundão durante um período extremamente seco levou à formação de uma suspensão de elevada concentração, alterando, pelo menos em um curto prazo, os processos sedimentares ao longo da plataforma interna (CPRM, 2015)

Do ponto de vista geoquímico, os estudos têm encontrado uma elevada concentração de metais no material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão (BASTOS et al., 2017; GOMES et al., 2017; HATJE et al., 2017; LONGHINI et al., 2020; RICHARD et al., 2020; QUARESMA et al., 2021; SÁ et al., 2021). Para os Rios Gualaxo do Norte, do Carmo, e Doce, avaliando amostras coletadas entre novembro de 2015 e setembro de 2017, RICHARD et al. (2020) encontraram que as alterações nas concentrações das formas totais e dissolvidas de Fe, Al, Mn foram mais pronunciadas imediatamente após a chegada do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, embora tendências de aumento nas concentrações tenham sido observadas durante a estação chuvosa dos anos seguintes, sendo essa tendência mais pronunciada nas áreas próximas à Barragem de Fundão. Na porção interna da Foz do Rio Doce, SÁ et al. (2021) encontraram que o aumento nas concentrações de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, V e Zn foi marcante tanto na fase aguda (dias subsequentes à chegada do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão), quanto na fase crônica (3 meses até 1 ano após o rompimento). Segundo os autores, as mudanças nas concentrações de metais na fase aguda ocorreram principalmente nas frações dissolvida, particulada e total na água, enquanto que na fase crônica o aumento da concentração de metais no sedimento mostrou a ocorrência de novos aportes e de seu acúmulo ao longo do tempo. BASTOS et al. (2017) destacaram que a chegada do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão na região marinha da Foz do Rio Doce resultou no aumento das concentrações dos elementos Al, Fe, Mn, Ba, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e V. Também para a região marinha adjacente à Foz do Rio Doce, QUARESMA et al. (2021), encontraram logo após a chegada do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, um aumento nas concentrações de Zn, Pb, Ni, Cr, Cu e Fe no sedimento. Além disso, os autores também destacam o aumento na concentração desses metais na região da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz.

A partir das características mineralógicas, o rejeito depositado da Barragem de Fundão tem sido caracterizado por um conjunto de fases minerais contendo ferro (FIGUEIREDO et al., 2020; ORLANDO



et al., 2020): hematita, goethita, grenalita-T, maghemita e magnetita. ORLANDO et al. (2020) nomearam esse conjunto por *Iron Mineralogical Set – IMS*, e identificaram que o mesmo é um marcador da presença do rejeito da Barragem de Fundão. Além disso, ORLANDO et al. (2020) compararam a medida da susceptibilidade magnética ac ( $\chi_{ac}$ ) de amostras coletadas na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce antes do rompimento da barragem, amostras coletadas nas proximidades da Barragem de Fundão, e de amostras coletadas na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce após do rompimento da barragem, e mostraram que além do aumento das fases mineralógicas que caracterizam o rejeito da Barragem de Fundão, a medida da susceptibilidade magnética pode ser utilizada como um marcador para indicar a presença do sinal do rejeito. A indicação da presença do sinal do rejeito da Barragem de Fundão em sedimentos tem sido estabelecida no Ambiente Marinho ao longo dos 4 anos do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I quando ocorre um aumento de 20% (1,2 vezes) da medida da susceptibilidade magnética em relação ao valor de referência, como explicado em ORLANDO et al. (2020).

Desta forma, a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão na área monitorada no PMBA/Fest pode ser feita a partir: (a) do aumento do teor da fração lamosa no sedimento dos Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro, visto que à jusante de Candonga a maior parte do material remanescente fluiu na forma de cargas suspensas mais finas; (b) do aumento da concentração de metais na água e no sedimento, com destaque para As, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Al, Co, Cu, Fe, e V na água, e para Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, V e Zn no sedimento; (c) e do aumento das fases mineralógicas que compõem o *IMS* no sedimento, que pode ser detectado a partir da análise da composição mineralógica e a partir da medida de susceptibilidade magnética. Para o RA2022, o modelo conceitual de dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão foi construído a partir da identificação do aumento das fases mineralógicas que compõem o *IMS* no sedimento de fundo: a partir da análise da composição mineralógica no Ambiente Dulcícola; e a partir do aumento da medida de susceptibilidade magnética no Ambiente Marinho (razão *IMS* maior que 1,2 indicando a presença do Sinal do Rejeito da Barragem de Fundão). Nesses ambientes, o teor da fração lamosa no sedimento e a concentração de metais na água e no sedimento serão utilizados em conjunto com a composição mineralógica para entender a dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, bem como a sua influência na alteração da qualidade da água e do sedimento, e no impacto da biodiversidade. Para o Ambiente Costeiro, como será apresentado no RA2023, o modelo de dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão avaliará somente o teor da fração lamosa e a concentração de metais na água e no sedimento, visto que nesse ambiente não é avaliada a mineralogia da fração lamosa. É importante destacar que como será mostrado a seguir, os resultados obtidos por estudos prévios ao PMBA/Fest, bem como ao longo do PMBA/Fest mostram que as áreas preferenciais de deposição do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão também são as áreas cuja qualidade de água e sedimento é a mais alterada e onde também se observa o maior impacto na biodiversidade.

A análise integrada da mineralogia nos Ambientes Dulcícola e Marinho mostra que o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão tem o mesmo padrão de distribuição espacial da fração lamosa



do sedimento fluvial produzido pela bacia, de forma que na porção capixaba da Bacia Hidrográfica do Rio Doce o material tem-se depositado principalmente na região interna da Foz do Rio Doce (Material Suplementar MS\_AD\_Mineralogia). Nessa região, SÁ et al. (2021) observou o acúmulo do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão. Ao longo da calha do Rio Doce, a descarga hídrica do rio não permite a formação de depósitos de lama (principal fração que fluiu à jusante de Candonga – MG, após o rompimento da Barragem de Fundão), e desta forma, o sedimento fluvial é caracterizado principalmente por areia e cascalho, o que explica a baixa contribuição (menos de 10%) dos minerais característicos do material oriundo da Barragem de Fundão. Já nas lagoas e na porção interna da Foz do Rio Doce, a menor energia hidrodinâmica permite o acúmulo não só do sedimento lamoso natural da bacia, mas também do material oriundo da Barragem de Fundão. Entretanto, os resultados do Tema Mineralogia – Ambiente Dulcícola (Material Suplementar MS\_AD\_Mineralogia) mostram uma baixa porcentagem de oxihidróxidos de Fe nesses ambientes, com exceção da lagoa Areal, na qual os altos teores de goethita foram associados a processos autogênicos.

No Ambiente Marinho, a análise da razão *IMS* mostra que o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão tem sido encontrado nas regiões já identificadas como trajetórias preferenciais de dispersão do material aportado pelo Rio Doce em estudos anteriores (Material Suplementar MS\_AM\_Sedimentação Marinha). As Figuras 26, 28, 32, 34 e 35 do Material Suplementar MS\_AM\_Sedimentação Marinha mostram que assim como o sedimento lamoso aportado pelo Rio Doce, a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão tem sido encontrada principalmente na porção rasa (até 30 m) dos Setores da Foz do Rio Doce, e na porção rasa dos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (até 36 m) e Norte (até 20 m). A partir da Figura 32, é possível observar que na porção rasa dos setores da Foz do Rio Doce há um aumento da porcentagem de ocorrência da presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão em direção à norte, de forma que enquanto no setor Foz Sul, a presença é observada em média 48,3% das campanhas, no setor Foz Central a presença é observada em média 82,1% das campanhas e no setor Foz Norte a presença é observada em média 83,8%. Em relação à porção rasa do Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, a porcentagem de ocorrência é em média de 29,2%. Na porção profunda do Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, somente duas estações apresentaram a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão (CA 04 e CA 06 – Figura 34 do Material Suplementar MS\_AM\_Sedimentação Marinha). Já na porção rasa (até 20m) do Setor Norte, tem sido encontrada uma tendência de redução da porcentagem de ocorrência da presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão em direção à norte (Figura 28 do Material Suplementar MS\_AM\_Sedimentação Marinha). Enquanto na porção rasa da região de Degredo a presença foi observada em 100% das campanhas, em Barra Seca, Barra Nova, Conceição da Barra e Itaúnas, a presença foi observada em 62,5%, 16,7%, 25% e 8,3% das campanhas, respectivamente. No Setor Abrolhos, somente a estação que fica em Mucuri (Figura 26 do Material Suplementar MS\_AM\_Sedimentação Marinha; profundidade da estação: 24 m) apresentou a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, e somente na Campanha de Janeiro de 2022.

Como mencionado anteriormente, o padrão de deposição e dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão no Ambiente Marinho corresponde às trajetórias preferenciais de deposição do material aportado pelo Rio Doce em estudos anteriores (BASTOS et al., 2015; QUARESMA et al., 2015; BOURGUINHON et al., 2018; VIEIRA et al., 2019; QUARESMA et al., 2021). Segundo QUARESMA et al. (2015), ao sul da Foz do Rio Doce, o sedimento de fundo até 30 m é dominado pela fração lamosa depositada pelo aporte do Rio Doce, enquanto nas porções central e norte o sedimento é caracterizado por areia e lama, sendo estas reconhecidas como uma zona de *bypass* de sedimentos ressuspensos durante eventos de alta energia. OLIVEIRA (2018) mostrou que embora as condições meteoceanográficas tipicamente observadas durante eventos de cheia na Bacia do Rio Doce favorecem a deposição de sedimento em águas rasas, radialmente ao sul da foz, eventos energéticos oriundos da passagem de Sistemas Transientes controlam a dispersão de sedimento na região da Foz do Rio Doce. Estes eventos redistribuem o sedimento aportado pelo Rio Doce para norte ao longo das porções interna e média da plataforma continental. A trajetória de transporte de sedimento preferencial para norte, bem como o aumento da concentração de metais no sedimento nesta direção também foi encontrada por QUARESMA et al. (2021), logo após o rompimento da Barragem de Fundão. A tendência de aumento na concentração de metais no sedimento para norte, ao longo do ano que se seguiu após o rompimento da Barragem de Fundão, também foi encontrada por BASTOS et al. (2017).

Ao longo do PMBA/Fest, a análise integrada das condições hidro-meteoceanográficas, dos padrões de distribuição do Material Particulado em Suspensão e do sedimento de fundo, e da distribuição da concentração de metais no sedimento mostra que o transporte do material aportado pelo Rio Doce em direção aos setores Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz ocorre principalmente durante ventos de norte e nordeste, os quais favorecem correntes para sul, sudeste e sudoeste; e que o transporte do material aportado pelo Rio Doce para os Setores Foz Norte e Norte ocorre, principalmente, durante ventos do quadrante sul (RRDM, 2021). Além disso, os resultados da deriva litorânea nos setores da Foz do Rio Doce e Norte mostram que a direção resultante da deriva litorânea nesses setores é para norte (RRDM, 2021). Ou seja, além dos eventos mais energéticos derivados da passagem de Sistemas Transientes na região resultarem no transporte preferencial para norte ao longo da plataforma continental, a deriva litorânea também resulta no transporte preferencial para norte junto à costa.

Portanto, a análise integrada das condições hidro-meteoceanográficas e dos parâmetros que caracterizam o material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão, tanto a partir de resultados de estudos prévios, como a partir dos resultados obtidos ao longo do PMBA/Fest mostra que no Ambiente Dulcícola, esse material se deposita preferencialmente na porção interna da Foz do Rio Doce. Já no Ambiente marinho, a análise mostra que as áreas preferenciais de deposição do material são determinadas pela circulação e hidrodinâmica da plataforma. Enquanto as condições meteoceanográficas típicas explicam a presença do material oriundo da Barragem de Fundão nas porções rasas dos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Foz Sul e Foz Central, a resultante de transporte para norte, derivada das condições meteoceanográficas mais energéticas, explica a

maior presença desse material nos setores Foz Norte e Norte (com destaque para as regiões de Degredo e Barra Seca).

Numa perspectiva temporal, desde que as condições hidro-meteoceanográficas controlam a deposição e a dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão nos Ambientes Dulcícola e Marinho, é esperada uma maior deposição desse material na porção interna do Rio Doce, bem como um maior aporte para o Ambiente Marinho durante e após eventos de cheia na Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Esses eventos têm sido climatologicamente observados durante o período chuvoso, que vai de outubro a março (OLIVEIRA & QUARESMA, 2017; RRDM, 2021). Em relação à dispersão no ambiente marinho, como mencionado anteriormente, esta depende das condições meteoceanográficas durante os eventos. Aqui é importante destacar que tais condições podem variar ano a ano em decorrência da variabilidade climática natural, e, portanto, influenciar na deposição e na dispersão do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão.

#### 4.4 ANÁLISE DA PAISAGEM E DADOS PRETÉRITOS

Soluções baseadas na natureza, como reabilitação e a restauração da terra, são uma estratégia fundamental para recuperar os bens e serviços que os ecossistemas oferecem. Enquanto soluções para o solo têm como objetivo melhorar a saúde e as funções, as soluções de paisagem se concentram principalmente no conceito de conectividade (KEESSTRA et al., 2018). Em áreas impactadas por poluentes e danificadas estruturalmente, como é o caso da região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão, controlar a conectividade hídrica da paisagem, reduzindo erosão e controlando escoamento, pode promover uma melhoria de estado e reduzir os impactos, especialmente em condições mais extremas. Mudanças climáticas acentuam a intensidade de eventos naturais, aumentando a intensidade e frequência de ocorrência dos pulsos de vazão e aporte de sedimentos, o que provocará tanto aumento destes impactos quanto a expansão da área total de ecossistemas sensíveis em risco.

Resultados do PMBA/Fest demonstram que processos agudos e crônicos se alternam na dinâmica de distribuição do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão (RRDM, 2022 - RT - 39B; 39C; 39D). Modelagens de cenários futuros integrando hidrologia, circulação costeira e mapeamento sensibilidades biológicas previram que a intensidade dos impactos diminuirá com o tempo, mas que a área total de ecossistemas sensíveis em risco será ampliada (MAGRIS et al. 2019). No entanto, não foi feito ainda um acoplamento entre os resultados obtidos pelo PMBA/Fest e estes modelos, de modo a confirmar suas previsões.

As análises apresentadas neste relatório representam um esforço demonstrativo do sensoriamento remoto possível, rumo à análise de tendências de uso e cobertura do solo e de padrões vigentes de fluxo e conectividade, visando a compreensão das tendências da paisagem e trajetória dos sedimentos na costa.

Nesta abordagem, apresentamos a) uma análise temporal de uso e cobertura do solo a fim de determinar as áreas de maior mudança temporal e b) uma análise de dados de material particulado em

suspensão na região costeira e marinha para verificar se existem padrões diferentes nos sinais médios espaciais antes e depois do rompimento.

Etapas futuras devem incluir a obtenção de mais informações e desenvolvimento de uma proposta para guiar o desenvolvimento de modelos, e a partir destes determinar as áreas e ações prioritárias para restauração bem como o monitoramento de sua efetividade.

#### **4.4.1 Mudanças na Paisagem**

Avaliar os padrões e tendências do uso e cobertura do solo, antes e depois do rompimento da Barragem de Fundão, é crucial para identificar variações nos mecanismos e impactos que integram o continente ao ambiente costeiro e marinho. Assim, o objetivo desta linha de análise é compreender as mudanças na paisagem, bem como sua relação com transporte de água e sedimentos, e os consequentes impactos sobre o ecossistema. Este conhecimento é de extrema importância tanto para avaliar os efeitos do rompimento como dar suporte a futuras tomadas de decisão para iniciativas de recuperação, restauração e até de monitoramento.

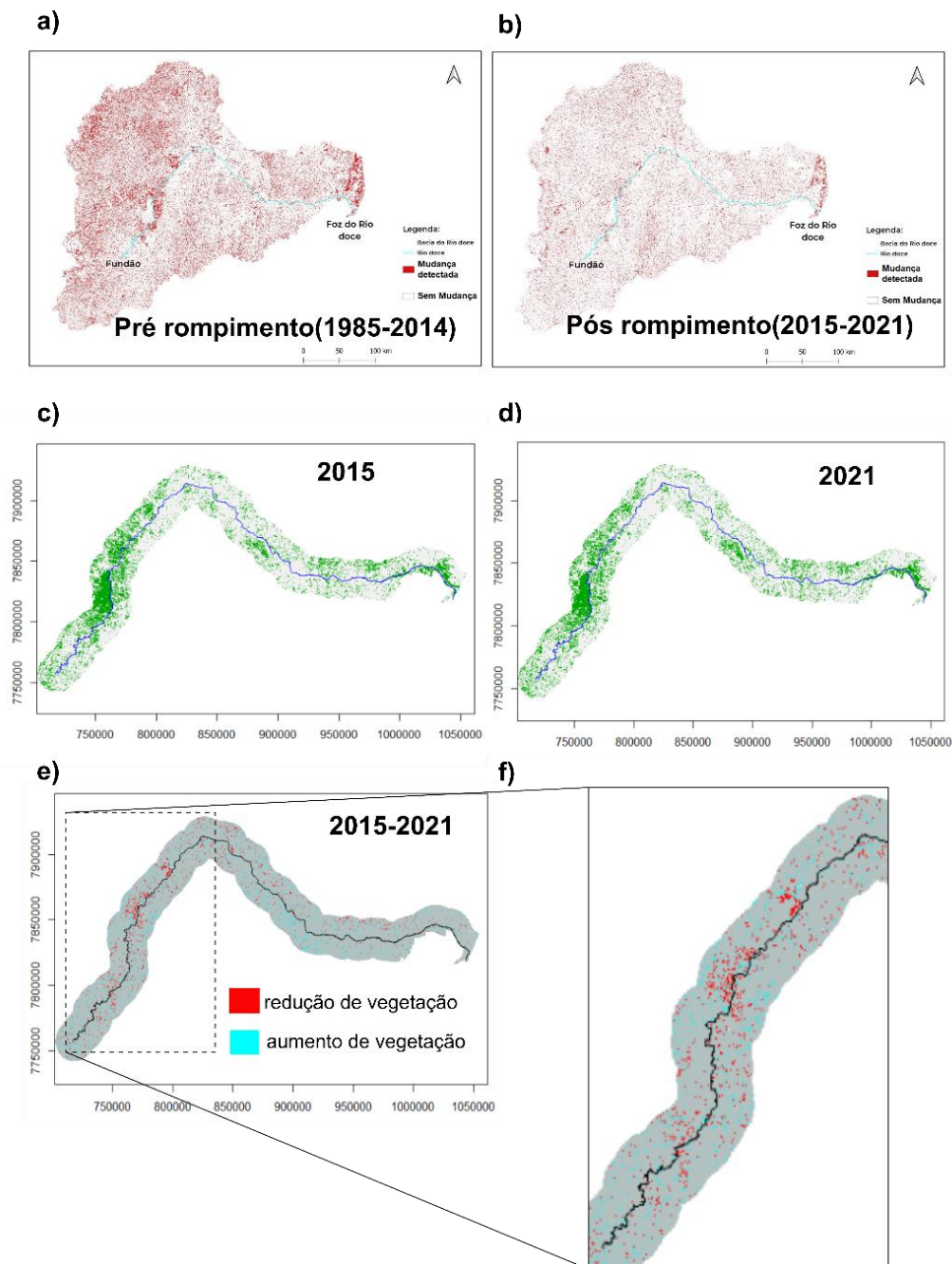
Nesse sentido, foi conduzida uma análise preliminar a partir de dados de uso e cobertura do solo disponíveis através do projeto Mapbiomas entre 1985 e 2021. O objetivo inicial foi identificar espacialmente o somatório das mudanças no uso e cobertura do solo antes e depois da ruptura da Barragem de Fundão. Uma faixa próxima à rede de drenagem, com largura de 15 km foi selecionada, tendo em vista sua forte influência na quantidade e qualidade das águas.

As Figura 27a e Figura 27b mostram o resultado da análise de áreas de mudança de uso e cobertura do solo, destacadas em cor vermelha. Fica evidente que a bacia hidrográfica já havia sofrido um processo de forte mudança no uso e cobertura do solo nos trinta anos precedentes ao rompimento, entre os anos de 1985 e 2014, principalmente na porção oeste (Figura 27a). Nos sete anos após o rompimento, entre 2015 e 2021, mudanças passaram a ser detectadas em toda a bacia, com destaque para a porção leste. Nas áreas próximas aos rios, nota-se uma maior cobertura vegetal entre a região de Fundão e Governador Valadares tanto para 2015 quanto para 2021 (Figura 27c e Figura 27d). Entretanto entre 2015 e 2021, detectou-se uma redução de 44146.17 hectares principalmente na área de entre Fundão e Governador Valadares (Figura 27e e Figura 27f) e um aumento de 3973.155 hectares principalmente na porção sul do Rio Doce entre Governador Valadares e Aimorés. Apesar da diferença entre o aumento e redução na vegetação não ser expressiva, nota-se uma mudança espacial na paisagem que pode influenciar os processos de conectividade e variabilidade hídrica.

Nesse sentido, para entender os processos integrados e identificar melhores medidas de mitigação e recuperação devemos entender de forma sinérgica as mudanças na paisagem, variabilidade hidrológica, mudanças climáticas e seus efeitos no aporte continental para o oceano. Nesse sentido, a avaliação espaço temporal de variáveis meteoceanográficas (por ex.: produtividade primária, turbidez, material em suspensão) e sua relação com a variabilidade hidrológica da bacia do Rio Doce permitirá estabelecer relações e identificar quais mecanismos dentro da bacia influenciam o ambiente costeiro e marinho, permitindo uma compreensão em macro escala dos processos integrados.

Figura 27: a) Detecção de mudanças no uso e cobertura do solo entre 1985 e 2014(a) e de 2015 a 2021(b) (pontos vermelhos).

Nas c) e d) são apresentadas as coberturas de vegetação próximas ao Rio Doce (buffer de 15km) para 2015 e 2021, respectivamente. e) apresenta os pontos de aumento (azul) e redução (vermelho) da vegetação de 2015 a 2021 com a recorte para a área de maior perda (f).



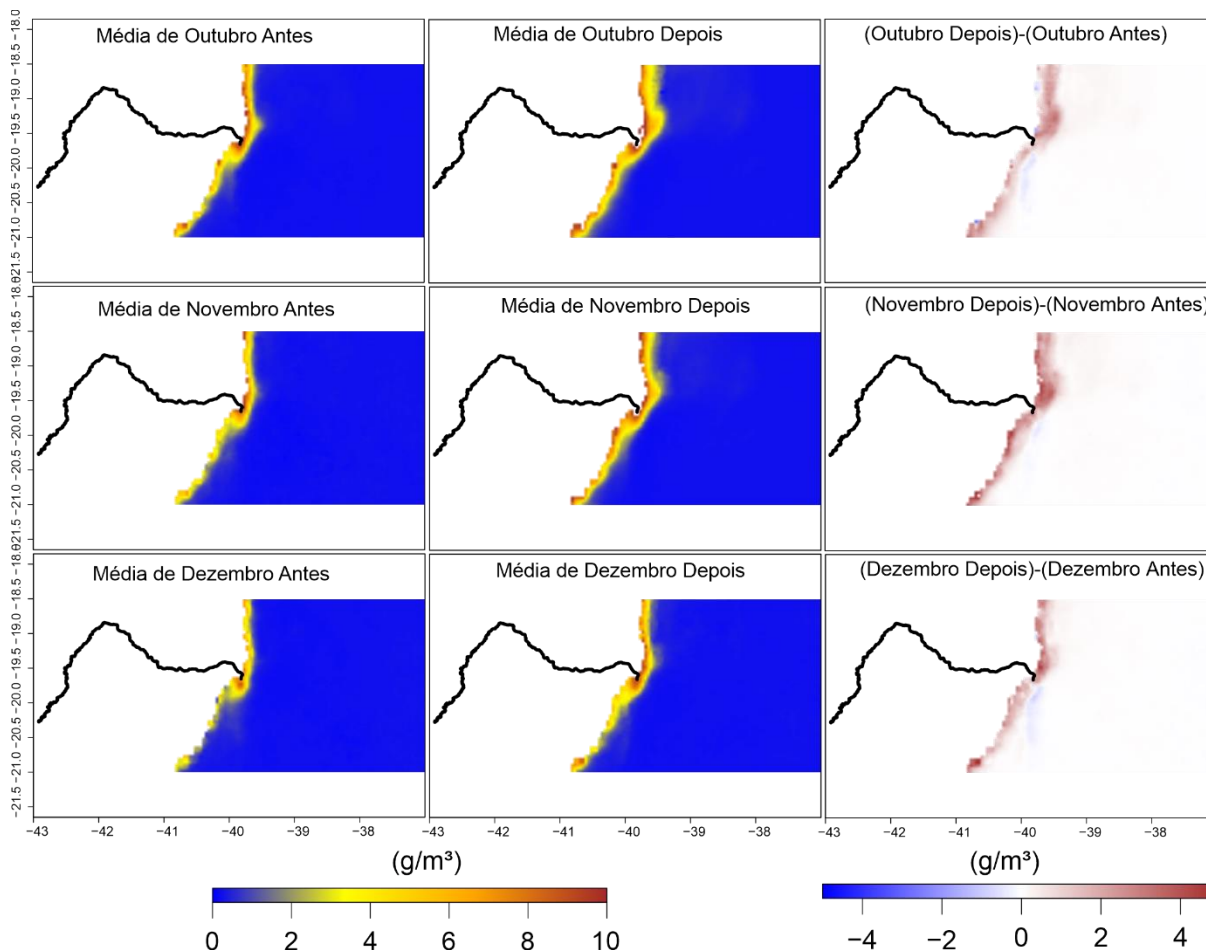


#### 4.4.2 Sistema Costeiro-Marinho

Neste relatório, foram avaliadas as variações espaço-temporais das concentrações do material particulado em suspensão, uma vez que esta é uma variável intimamente relacionada ao rompimento da Barragem de Fundão e também um indicador de estado importante, com potencial de impactar o ecossistema marinho e costeiro. Para isso, uma série temporal mensal de imagens de reflectância de superfície em 667 nm foi obtida do sensor MODIS a bordo do satélite Aqua entre 2003 e 2021 (totalizando 240 imagens). A partir dessas imagens aplicamos o modelo para estimar material particulado em suspensão proposto e validado por NECHAD et al. (2010), o qual possui bom desempenho em diversos tipos de ambientes (por exemplo COIMBRA et al., 2019; GANGLOFF et al., 2017; CAO et al., 2017).

A Figura 28 apresenta as médias de material particulado em suspensão ( $\text{g/m}^3$ ) para os meses chuvosos de Outubro, Novembro e Dezembro, obtidas para o período antes (Janeiro de 2003 a Outubro de 2015) e depois (Dezembro de 2015 a Dezembro de 2022) do rompimento. Além disso, foi computada a diferença entre o padrão médio de depois e antes. Dessa forma, essa figura mostra que existe um aumento na expressão espacial e nas concentrações médias depois do rompimento (terceira coluna da Figura 28). Essa mudança das concentrações de material particulado e em suspensão se dão tanto ao longo do escoamento da Corrente do Brasil (sul-sudoeste) quanto para norte-nordeste, provavelmente relacionado ao sinal de frentes frias de sul que invertem o fluxo das correntes (RRDM, 2019; RRDM 2022; LEMOS et al., 2022; COPPETEC, 2019). Isso sugere que o rompimento pode estar causando um efeito prolongado e possíveis consequências ao ambiente. Entretanto, mais análises serão conduzidas com outras variáveis oceanográficas com o propósito de avaliar temporalmente e estabelecer uma conexão com o ambiente dulcícola.

Figura 28: Coluna 1, mapas das concentrações médias de material particulado em suspensão ( $\text{g/m}^3$ ) antes do rompimento (2003-2015). Coluna 2, mapas das concentrações médias de material particulado em suspensão ( $\text{g/m}^3$ ) depois do rompimento (2015-2022). E coluna 3, mapas das diferenças entre depois e antes do rompimento. Note que os mapas da primeira linha fazem referência ao mês de Outubro, os da segunda a Novembro e os da terceira a Dezembro. A linha preta representa o Rio Doce.



#### 4.4.3 Caminhos para a restauração: uma visão de paisagem

O rompimento da Barragem do Fundão é um evento de máximas proporções por ter atingido ambientes terrestres, dulcícolas, costeiros e marinhos, incluindo áreas de grande fragilidade e complexa reparação. Esses sistemas estão conectados pela topografia e hidrologia da região, que sofrem interferências da terra, água e ar e dos seres vivos que a habitam e que compõem os ecossistemas. Modelos hidrológicos baseados em dados gerados pelo PMBA/Fest podem ser um caminho eficiente para simular e prever o comportamento da água em paisagens e marinhas, incluindo áreas que foram afetadas por atividades humanas. Ao usar modelos hidrológicos para informar os esforços de restauração, é possível identificar as intervenções mais eficientes para restaurar a terra e as paisagens marinhas afetadas. Através destes modelos é possível também monitorar o sucesso dos esforços de restauração ao longo do tempo, comparando as mudanças previstas e reais na hidrologia. Além disso, os modelos hidrodinâmicos, que simulam o movimento da água em oceanos, estuários e rios, podem

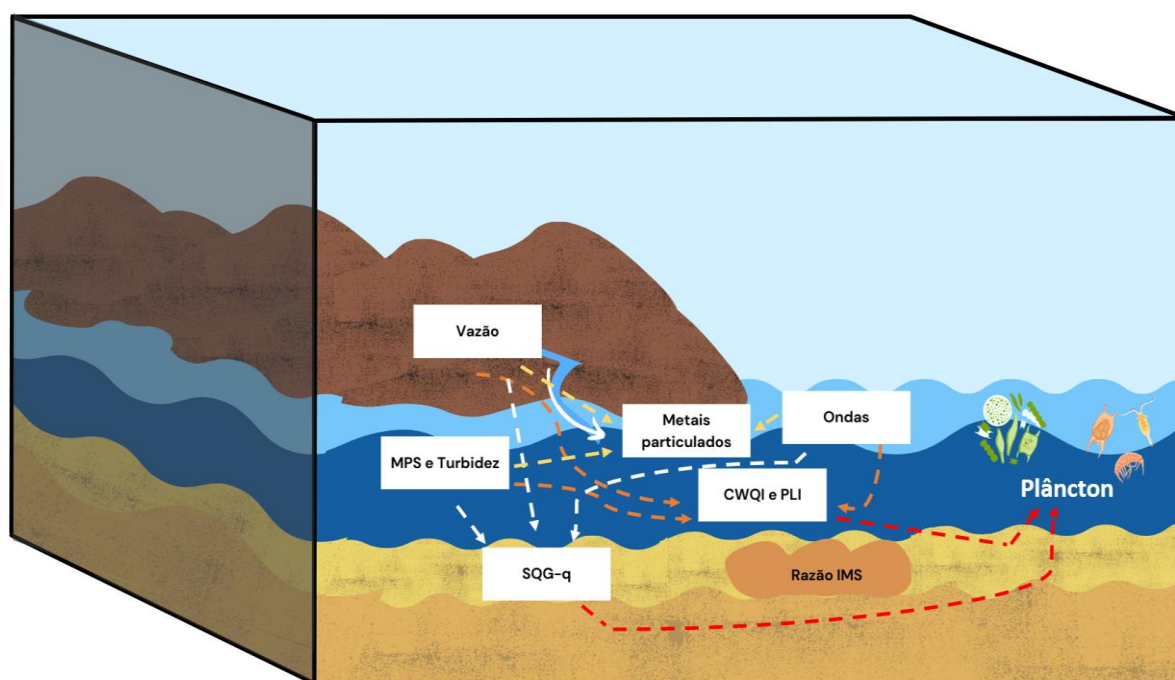
ser acoplados aos modelos hidrológicos para entender os padrões de conectividade nas paisagens marítimas impactadas.

#### 4.5 PROCESSOS E INDICADORES DA QUALIDADE AMBIENTAL

Como identificado acima, o monitoramento das alterações na qualidade da água e do sedimento, bem como os impactos nos organismos aquáticos, desde os níveis de indivíduos até comunidade, é essencial para a verificação dos possíveis danos ocasionados pelo rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 2015. Para isso, se torna importante avaliar quatro importantes vias físico-químicas e sedimentológicas de alterações nos ecossistemas: (1) processos hidrometeoceanográficos, caracterizados e identificados pelos dados de vazão, ondas, material particulado em suspensão (MPS) e turbidez, que sozinhos ou em conjunto podem influenciar nos índices biológicos; (2) a qualidade do ambiente, que pode ser estabelecida através de índices de qualidade de água e sedimento (tais como CWQI, PLI e SQG-q), os quais avaliam as concentrações de metais, metaloides, nutrientes e compostos orgânicos presentes nas matrizes ambientais e sua razão com valores pré-estabelecidos nas legislações globais e nacionais; e (3) metais em sua forma particulada, que não são considerados nos índices supracitados mas que podem acarretar em alterações nas comunidades aquáticas por processos biológicos, tais como bioacumulação, biomagnificação e ecotoxicológicos; e (4) a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão nos distintos setores de cada ambiente, a qual pode ser avaliada através do aumento relativo do *IMS*, como descrito na seção 4.3.1 (Materiais Suplementares MS\_AD\_Mineralogia e MS\_AM\_Sedimentação Marinha).

Estudos já comprovaram que algumas dessas vias ocasionam alterações ambientais e bióticas nos distintos ambientes (SÁ et al., 2021; QUARESMA et al., 2021; BONECKER et al., 2022; CAGNIN et al., 2022; ROCHA et al., 2022). Porém o objetivo principal dessa seção é avaliar de forma integrada a conjunção de todos estes fatores, os quais podem ser analisados para auxiliar no entendimento espaço-temporal dos três ambientes impactados pelo rompimento, possibilitando assim uma análise mais robusta das respostas das comunidades aquáticas. A Figura 29 representa a construção de um modelo teórico-analítico para os ambientes dulcícola e marinho, mostrando os processos hidrometeoceanográficos que atuam nesses ambientes e como podem influenciar os índices de qualidade da coluna d'água e também do sedimento, que por sua vez tem potencial de alterar o meio biótico, aqui exemplificado pelas comunidades fitoplanctônica e zooplanctônica.

Figura 29: Modelo conceitual dos processos hidro-meteoceanográficos (vazão, ondas) que atuam sobre os ambientes impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão e suas possíveis influências sobre o material particulado em suspensão, a turbidez, os índices de qualidade ambiental – coluna d’água (CWQI e PLI) e sedimento (SQG-q) – e consequentemente sobre as comunidades aquáticas (fitoplâncton e zooplâncton). A razão IMS também é um importante fator a ser considerado neste modelo pois através dela é possível verificar a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão nos distintos setores monitorados e deste modo caracterizar a dispersão do material proveniente do rompimento da Barragem de Fundão, como descrito anteriormente.



Essas vias foram analisadas inicialmente para os ambientes dulcícola e marinho. Os dados de vazão e de altura significativa de ondas coletados durante o monitoramento foram escolhidos para representar os processos que podem acarretar em alterações nos ambientes aquáticos, tanto do ponto de vista espacial quanto temporal (OLIVEIRA, 2018; OLIVEIRA E QUARESMA, 2017; OLIVEIRA et al., 2021; QUARESMA et al., 2021; LEMOS et al., 2022). De modo geral, foi possível identificar que a vazão do Rio Doce tem relação inversa com a altura significativa de onda e também com a turbidez (Figura 30a). Esse resultado evidencia analiticamente o padrão climatológico de aporte fluvial e a ocorrência de eventos energéticos observados na área monitorada no PMBA/Fest (OLIVEIRA, 2018; OLIVEIRA E QUARESMA, 2017; OLIVEIRA et al., 2021; LEMOS et al., 2022; NOGUEIRA et al., 2015): período chuvoso e menor energia de onda ocorrendo climatologicamente de outubro a março, enquanto o período seco e de maior energia de onda é observado, climatologicamente, de abril a setembro. Destaca-se que apesar de esse ser o padrão climatológico para a região, a co-ocorrência de eventos de cheia na Bacia do Rio Doce e condições de tempestade na área marinha adjacente à Foz do Rio Doce tem sido observada tanto por estudos anteriores (OLIVEIRA, 2018), como ao longo do período de monitoramento do PMBA/Fest (Campanha de dezembro de 2018 dos Temas que compõem o Marinho Integrado). Já avaliando a relação entre a altura significativa de ondas e a turbidez, os resultados mostram que estas têm relação direta (Figura 30a), mostrando que a turbidez no ambiente

marinho é majoritariamente controlada pela ação das ondas. A influência das ondas na qualidade da água também é evidenciada a partir da relação destas com o MPS, visto que embora a concentração de MPS superficial e no meio da coluna d'água tenha relação direta (porém fracamente - Figura 30a) com a vazão do Rio Doce, a concentração de MPS de fundo tem relação direta (Figura 30a) com a altura significativa de ondas e também com a turbidez, mostrando que tais relações podem atuar de forma aditiva sobre a biodiversidade.

A fim de avaliar as possíveis relações entre estes processos hidro-meteoceanográficos e a resposta do plâncton, foi fundamental identificar a qualidade das matrizes ambientais e como elas se relacionam com estes processos. Deste modo, os índices de qualidade de água e sedimento do ambiente marinho foram avaliados para caracterizar a variabilidade espaço-temporal do estado do ambiente, levando-se em consideração os valores de metais, metaloides, nutrientes e compostos orgânicos nos 4 anos de coletas e em seus distintos setores. Para o ambiente dulcícola não foram realizados estes índices devido ao baixo número amostral de cada setor do Rio Doce, então as concentrações de metais e metaloides foram consideradas de forma separada para a avaliação deste ambiente em particular.

De modo geral, é perceptível uma melhora na qualidade da coluna d'água do ambiente marinho ao longo do monitoramento - mesmo que não estatisticamente significativo - tanto utilizando como parâmetro o CWQI, que leva em consideração metais em sua forma total e também dissolvida, quanto para o PLI, que considera somente os metais dissolvidos na água. Essa melhora ocorreu tanto para os setores próximos à foz do Rio Doce quanto para os demais setores marinhos adjacentes (APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Norte e Abrolhos). Em termos temporais, foi possível identificar uma piora na qualidade da água durante o período seco de 2019 – caracterizando o ambiente como marginal (CWQI) e poluído (PLI), o que indica ameaça frequente – sobretudo nos setores mais próximos à Foz do Rio Doce, como também identificado por LONGHINI et al. (2022). Após esse período, o ambiente marinho esteve caracterizado como razoável e/ou bom (CWQI) e não-poluído (PLI) para todos os setores. O índice de qualidade do sedimento (SQG-q), por sua vez, apresentou tendências significativas de melhora para o ambiente marinho para os setores próximos à foz (Foz Sul, Foz Central e Foz Norte) e também no Norte, porém os resultados ainda demonstram que o sedimento está classificado predominantemente como moderadamente impactado durante todo o monitoramento. Além disso, a depender do período do ano e setor avaliado, é possível verificar que os valores deste índice ainda são similares ao início do monitoramento, possivelmente relacionados aos processos de remobilização e/ou decantação do material, ocasionados pelos processos meteoceanográficos listados acima (QUARESMA et al., 2021). Para verificar a existência de tendência monotônica nas séries temporais dos dados ambientais e climáticos, o teste de tendência de Mann-Kendall foi utilizado (MANN, 1945); KENDALL, 1975). Tendências significativas são consideradas quando o *p*-valor foi menor que 0,05.

Como mencionado, para além dos índices de qualidade de água e sedimento, é importante avaliar também os metais em sua forma particulada, uma vez que são importantes do ponto de vista biológico (FERNANDEZ-SEVERINI et al., 2013; LIU et al., 2022) e não são considerados nos índices supracitados. Para o ambiente marinho foi possível identificar uma tendência significativa de aumento das concentrações ao longo do monitoramento, sobretudo para os metais Fe, Al, Mn e Ba, os quais



apresentaram tendência significativa de aumento nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Foz Sul, Foz Central, Foz Norte e Norte. Destaca-se que nesses setores outros metais em sua forma particulada apresentaram tendência significativa de aumento: APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (Zn), Foz Sul (V, Ni, Cu, As, Cd, Pb, Cr, Zn, Hg), Foz Central (V, Ni, As, Cd, Pb, Cr, Zn, Hg), Foz Norte (V, Co, Ni, As, Cd, Pb, Cr, Zn, Hg) e Norte (V, As, Cr). Já para o ambiente dulcícola, foi possível identificar tendências de aumento - mesmo não havendo significância estatística - para Al, Fe, Ba e Mn particulados, sobretudo devido a elevadas concentrações identificadas no período chuvoso entre o final de 2021 e início de 2022. Para identificar as forças responsáveis por essa tendência, testes de tendência foram aplicados ao aporte fluvial (vazão e carga de sedimento em suspensão) e à altura significativa, e somente a última apresentou tendência significativa de aumento. Desta forma, a tendência de aumento observada para os metais particulados na água do ambiente marinho é causada pelo aumento da energia das ondas ao longo do período analisado. Desta forma, os resultados evidenciam que além das fontes, é fundamental entender os processos hidro-meteoceanográficos para determinar o estado da qualidade da água e o impacto dos contaminantes na biota.

Cabe ressaltar ainda que o resultado dos metais particulados no ambiente dulcícola está fortemente relacionado ao aumento da vazão do Rio Doce, sendo observados os maiores valores nas campanhas durante ou após eventos de cheia na Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Do mesmo modo, os valores de Fe e Al dissolvidos deste ambiente se relacionam positivamente com os padrões de vazão. Entretanto, os principais metais dissolvidos presentes no ambiente dulcícola (Al, Ba, Cu, Fe, V e Zn) não se correlacionam significativamente com os metais dissolvidos utilizados para o índice PLI no ambiente marinho (Fe, Co, Cu e Hg) no setor Foz Central. Isso demonstra que outros fatores além do aporte destes metais pelo Rio Doce são importantes para determinar as concentrações no ambiente marinho, tais como as características mineralógicas do sedimento e as propriedades físico-químicas da água e dos sedimentos, que poderão influenciar na troca água - sedimento de fundo e no comportamento de metais nos distintos ambientes, como identificado por MIRANDA et al. (2021). A partir disso, foram avaliadas através de correlações de Spearman a relação entre os processos hidro-meteoceanográficos com os parâmetros que avaliam a qualidade da água e do sedimento (índices de qualidade de água e sedimento, e metais particulados), e também com índices biológicos do fito (abundância, diversidade, equabilidade, biomassa e clorofila ativa) e do zooplâncton (abundância, diversidade, equabilidade, riqueza e IPI). Esses grupos de organismos foram escolhidos por serem os níveis tróficos iniciais. O impacto sobre outros níveis tróficos é apresentado na seção 4.7 (Relações ambientais no nível da comunidade e ecossistema).

Avaliando-se somente os processos hidro-meteoceanográficos e suas relações com os índices, foi observado que o MPS e a turbidez se relacionam negativamente com o PLI, ou seja, quanto maior a concentração de partículas suspensas na água, menores serão as concentrações de metais dissolvidos (Figura 30a). Do mesmo modo, as ondas se correlacionam negativamente com o PLI, mostrando o mesmo padrão descrito anteriormente. Cabe salientar novamente que esse índice somente leva em consideração quatro metais em sua forma dissolvida (Fe, Co, Cu e Hg), uma vez que estes são os únicos que possuem valores de referência nas legislações brasileiras e mundiais. Deste modo, essas

relações entre o MPS, turbidez e ondas com o PLI devem ser avaliados com parcimônia, pois apesar do ambiente ser classificado como não-poluído pela verificação destes 4 metais, as concentrações de outros metais (dissolvidos e/ou particulados) podem influenciar no estado de qualidade ambiental da coluna d'água, e na biota.

O CWQI (metais em sua forma total ou dissolvida), por outro lado, se correlacionou positivamente com o MPS de fundo e geral e também com a turbidez (Figura 30a). Um aumento destes parâmetros está relacionado com uma maior energia hidrodinâmica na região marinha e consequentemente podem acarretar em menores concentrações dos metais em sua forma total e dissolvidos, levando a uma melhora na qualidade da coluna d'água (considerando o índice CWQI). Porém, como mencionado anteriormente, os metais particulados não são avaliados nesses índices por falta de valores de referência na legislação, mesmo tendo influência sobre a qualidade da água e do sedimento. Ademais, os metais em suas distintas formas podem ser incorporados pelos organismos em processos biogeoquímicos, acarretando em diminuição das concentrações na coluna d'água.

Observando-se os resultados do índice de qualidade no sedimento (SQG-q), identificou-se que há relação inversa com a altura significativa de ondas, evidenciando que o aumento da altura significativa acarreta em uma melhora na qualidade do sedimento em decorrência da ressuspensão do material depositado (RRDM, 2019 – RT-19K; OLIVEIRA et al., 2021; LONGHINI et al., 2022). A turbidez, do mesmo modo, também se relaciona negativamente com os valores do SQG-q, o que corrobora o papel do processo de ressuspensão do material depositado na qualidade do sedimento (COIMBRA et al., 2019). Avaliou-se também as possíveis relações entre a razão do *IMS* - valores acima de 1,2 evidenciam a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão nos distintos setores - e os processos meteoceanográficos. As concentrações de MPS, altura significativa de ondas e turbidez se relacionam positivamente com essa razão, evidenciando o papel das condições meteoceanográficas na dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão, como apresentado na seção 4.3.1. A análise dos dados sedimentológicos e mineralógicos mostra que esse material se deposita nas regiões caracterizadas pelos maiores teores de lama, e portanto, com maior susceptibilidade à ressuspensão (Material Suplementar MS\_AM\_Sedimentação Marinha) durante momentos de maior energia das ondas, o que resulta em maiores concentrações de MPS na coluna d'água.

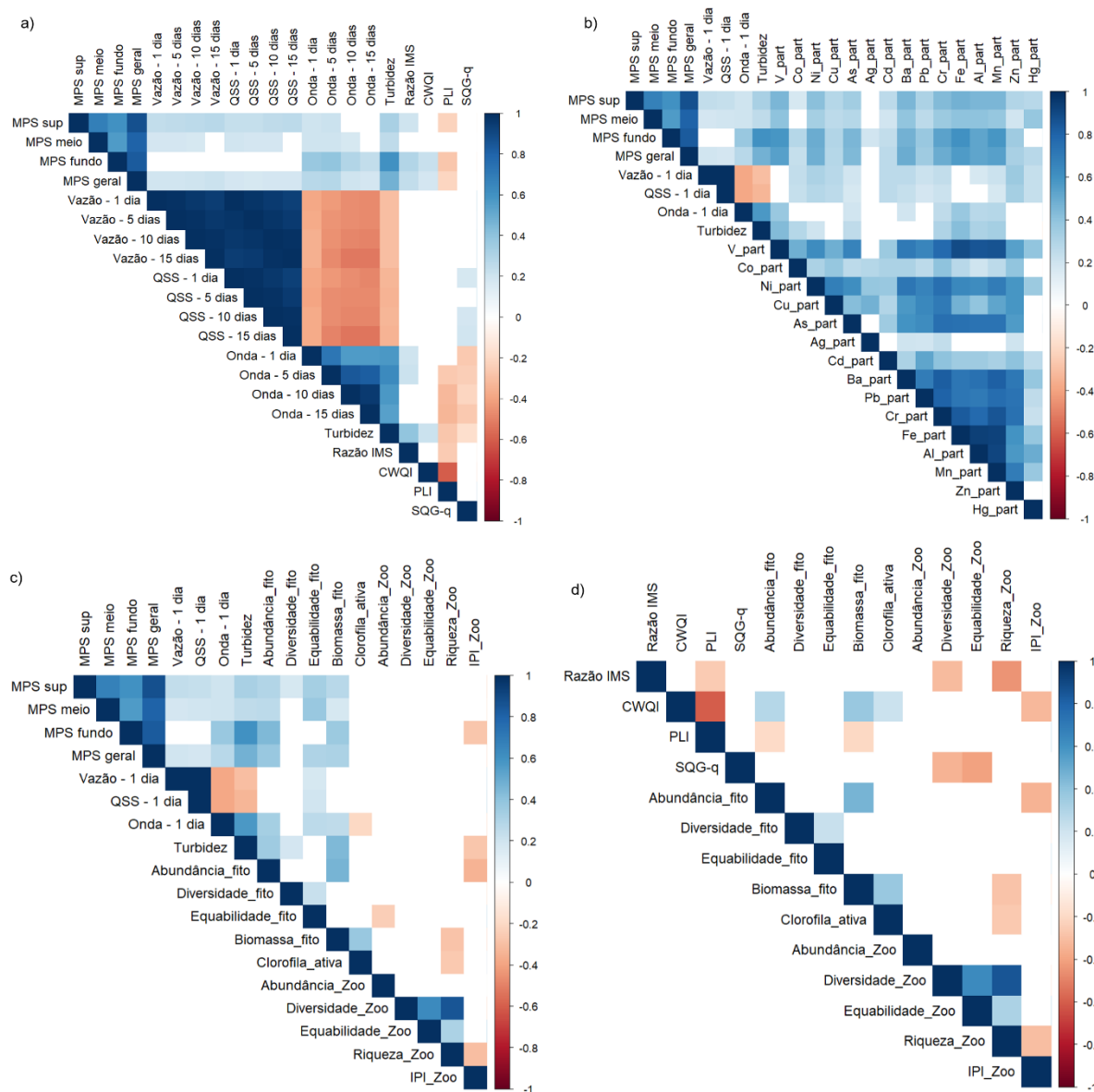
Como mencionado anteriormente, os metais em sua forma particulada foram avaliados de forma separada, uma vez que não é possível utilizá-los para os cálculos dos índices de água. Foi possível identificar que o MPS, sobretudo próximo ao fundo, se correlaciona positivamente com a maioria dos metais particulados avaliados, com exceção do Hg (Figura 30b). Esse resultado evidencia que os processos de ressuspensão do sedimento mostrados acima também irão influenciar nas concentrações de metais particulados na coluna d'água. Os valores de vazão, altura significativa de ondas e turbidez também se correlacionam positivamente com alguns dos metais particulados (Figura 30b), porém mais fracamente. Destaca-se que, de modo geral, os metais particulados que se correlacionam mais fortemente com a vazão, a altura significativa de ondas, a turbidez, e sobretudo o MPS, foram V, Fe, Al

e Mn, principais metais provenientes do rompimento da Barragem de Fundão (HATJE et al., 2017; LONGHINI et al., 2020; QUARESMA et al., 2021; SÁ et al., 2021).

Em relação à influência dos processos hidro-meteoceanográficos e do estado da qualidade da água sobre os índices biológicos, foi possível identificar que o MPS está positivamente relacionado com os índices do fitoplâncton (abundância, diversidade, equabilidade, biomassa); a vazão apenas se correlaciona positivamente - porém fracamente - com a equabilidade fitoplanctônica; a altura significativa de onda com também com a equabilidade mas também com a biomassa; e a turbidez se correlaciona mais fortemente - de forma positiva - com a biomassa do fitoplâncton (Figura 30c). Por outro lado, a análise utilizando os valores médios de vazão e altura significativa de ondas para o dia de coleta não se relacionam de forma significativa com os índices do zooplâncton, mostrando as alterações nesta comunidade são resultado de condições hidro-meteoceanográficas prévias aos dias de coleta, como descrito no Material Suplementar MS\_AM\_Zooplâncton.

Por fim, foi possível identificar as relações diretas e inversas significativas entre alguns dos índices de qualidade de água e sedimento, e também da razão IMS com os índices biológicos das comunidades fito e zooplanctônica. Em relação aos índices do fitoplâncton, observou-se correlações mais fortes entre a abundância e a biomassa com o CWQI (positiva) e PLI (negativa) (Figura 30d), evidenciando que uma melhor qualidade de água acarreta em um número maior de organismos no ambiente e consequente aumento na biomassa desta comunidade. Já para os índices do zooplâncton foi encontrado que a razão IMS se relaciona negativamente com a diversidade e riqueza, evidenciando que a presença do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão influencia negativamente essa comunidade. De forma similar, os valores de SQG-q se relacionam negativamente com a diversidade e equabilidade da comunidade zooplanctônica. Isso demonstra mais uma vez que a melhora na qualidade do sedimento está relacionada à ressuspensão do material previamente decantado e que os metais retornam para a coluna d'água, ficando biodisponíveis para os distintos grupos e influenciam negativamente na comunidade (Figura 30d). Por outro lado, uma melhora na qualidade da coluna d'água, evidenciada pelos maiores valores de CWQI, leva a menores valores de IPI, ou seja, não há dominância das espécies mais resistentes frente às condições de maiores concentrações do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão.

Figura 30: Gráficos de correlação de Spearman entre os principais processos hidro-meteoceanográficos, índices de qualidade de água e sedimento, razão IMS, metais em sua forma particulada e índices biológicos das comunidades fitoplanctônicas e zooplanctônicas. Correlações positivas significativas entre os parâmetros avaliados são mostrados na cor azul, enquanto correlações negativas significativas estão indicadas pela cor vermelha. As intensidades das cores são proporcionais aos coeficientes de correlação. No lado direito de cada correlograma são mostrados os valores dos coeficientes de correlação e as cores correspondentes. Cada gráfico representa: (a) correlações entre processos hidro-meteoceanográficos (MPS, Vazão, QSS, Altura significativa de ondas e Turbidez) e os índices de qualidade de água (CWQI e PLI), sedimento (SQG-q) e a razão IMS; (b) correlações entre processos hidro-meteoceanográficos (MPS, Vazão, QSS, Altura significativa de ondas e Turbidez) e os metais particulados (V, Co, Ni, Cu, As, Ag, Cd, Ba, Pb, Cr, Fe, Al, Mn, Zn e Hg); (c) correlações entre processos hidro-meteoceanográficos (MPS, Vazão, QSS, Altura significativa de ondas e Turbidez) e os índices do fitoplâncton (abundância, diversidade, equabilidade, biomassa e clorofila ativa) e zooplâncton (abundância, diversidade, equabilidade, riqueza e IPI); e (d) correlações entre os índices de qualidade de água (CWQI e PLI), sedimento (SQG-q) e a razão IMS com os índices do fitoplâncton (abundância, diversidade, equabilidade, biomassa e clorofila ativa) e zooplâncton (abundância, diversidade, equabilidade, riqueza e IPI).



Cabe ressaltar que para os resultados demonstrados acima não foi considerada a separação entre setores do Ambiente Marinho. Ao se avaliar cada setor em separado, há elevada variabilidade entre os resultados, tanto para os processos meteoceanográficos quanto para as suas relações com os índices de qualidade ambiental e também biológicos. Do mesmo modo, foram selecionados setores do Rio Doce para a avaliação do ambiente dulcícola (Estações Linhares e Montante Regência). Assim, os próximos passos da avaliação da integração de processos meteoceanográficos com índices ambientais e biológicos será a adição dos demais setores do ambiente dulcícola e também o ambiente costeiro como um todo, além da verificação espacial de forma setorizada, possibilitando deste modo o entendimento claro e robusto de todo o estado de alterações ambientais que ocorreram devido ao rompimento da Barragem de Fundão e como isso se alterou ao longo dos anos de monitoramento, indicando possíveis áreas de maior impacto, as quais devem ser priorizadas em etapas de preservação.

#### 4.6 VIAS DE DESFECHOS ADVERSOS (VDAs)

##### 4.6.1 Descrição dos modelos conceituais de VDAs

Vias de desfecho adversos são construções conceituais desenvolvidas para apoiar a avaliação de risco. Elas descrevem uma sequência de eventos biológicos, que se relacionam a partir da exposição a um estressor ambiental até um efeito adverso específico de interesse regulatório, em um organismo ou população (ANKLEY & EDWARDS, 2018). Diagramas são utilizados para representar as relações entre os eventos que podem ser causais, mecanicistas, inferenciais ou baseadas em correlação, e abrangem diferentes níveis de organização biológica (i.e., de moléculas e células a órgãos e indivíduos em uma população). As vias podem tomar muitas formas e dependem fortemente da fonte de informações utilizadas para gerá-las e do contexto para o qual estão sendo desenvolvidas. Sua aplicação permite uma compreensão mais completa das relações subjacentes aos efeitos adversos de diferentes tipos de contaminação, fornecendo uma base crítica para o uso de abordagens preditivas em avaliação de risco ecológico (ANKLEY et al., 2010; VAN DER OOST et al., 2020).

A implementação da estrutura conceitual das VDAs em programas de monitoramento ambiental ajuda a conectar a exposição ambiental à saúde dos organismos, permitindo que os riscos ambientais sejam avaliados de forma significativa (CARUSI et al., 2018). Os dados do monitoramento podem ser interpretados e organizados em termos de efeitos adversos específicos, não apenas em níveis de exposição. Isso é importante porque a relação entre exposição e efeito pode variar dependendo da espécie e de fatores extrínsecos (e.g., condições ambientais) e intrínsecos (e.g., sexo e idade do animal). Portanto, a implementação de VDAs pode ajudar a identificar etapas biológicas mais afetadas pelos contaminantes e, assim, detectar a susceptibilidade dos organismos. Consequentemente, a construção de VDAs contribui para uma melhor seleção de indicadores para programas de monitoramento ambiental e permite intervenções mais eficazes para proteger a saúde dos ecossistemas.

No âmbito do PMBA/Fest, a implementação das VDAs auxilia na organização dos efeitos da contaminação associada diretamente e indiretamente ao rompimento da barragem. Considerando sua multidisciplinaridade e complexidade, o programa de monitoramento exige a implementação de



estruturas conceituais que melhorem a precisão da avaliação de risco, bem como auxiliem na tomada de decisão regulatória. A construção de VDAs potenciais com base nos dados disponíveis do PMBA/Fest permite identificar e organizar os eventos relevantes das espécies indicadoras nos diferentes ambientes monitorados. Portanto, é possível rastrear as relações comuns aos ambientes dulcícola, costeiro e marinho, que podem ser quantificadas e apresentadas em uma métrica integrativa e conceitualmente robusta. Adicionalmente, a combinação das VDAs às análises de paisagem (seção 4.4), processos e indicadores da qualidade ambiental (seção 4.5) e análises das relações a nível de comunidade e ecossistema (seção 4.7), fornece uma integração de dados multi-escala, capaz de apresentar os efeitos dos contaminantes na saúde dos organismos e nas populações.

Os modelos conceituais das VDAs apresentadas no presente relatório foram construídos para plâncton, peixes e tartaruga marinha. O objetivo é apresentar vias que podem ser biologicamente plausíveis, compatíveis com os dados gerados pelos PMBA/Fest e, na medida do possível, abrangentes para os ambientes dulcícola, costeiro e marinho e seus setores. A construção das vias, e sua posterior quantificação, estão alinhadas às metas da proposta da equipe integração ao que concerne determinação da cadeia de impactos nos diferentes ambientes (*Meta 3*) e identificação de relações causa-efeito a partir de um modelo de estresse ambiental (*Meta 4*) (Avaliação Integrada da Biodiversidade Aquática do Baixo Rio Doce, e Área Costeira e Marinha). Vale ressaltar que as vias são pontos de partida para quantificação subsequente das relações. As sequências apresentadas serão validadas e atualizadas conforme o avanço analítico, ou seja, os modelos são dinâmicos e as relações podem ser específicas aos ambientes e aos diferentes setores amostrados.

As vias podem seguir por diferentes caminhos até o desfecho adverso de interesse regulatório, porém a sequência de eventos-chaves foi identificada a partir dos dados e resultados disponíveis do monitoramento e embasada na literatura. A plausibilidade de cada uma das vias construídas e apresentadas no presente relatório foi verificada na literatura e bases de conhecimento (<https://aopwiki.org/>). Para além de compreender a relação entre cada evento-chave, vale destacar o aumento no número e complexidade das relações em vias de níveis tróficos superiores. As vias partem das diferentes fontes de exposição às quais um organismo ou população estão sujeitos. Isso inclui a exposição a contaminantes presentes na água e no sedimento, bem como rotas de exposição relacionadas aos hábitos de vida e fontes de alimento. Nas Figura 31 e Figura 32, as diferentes fontes de exposição estão representadas em setas amarelas e a proveniência dos dados está subscrita (e.g., hidrogeoquímica ou ecotoxicologia). Uma vez expostos a metais e outros contaminantes (direta ou indiretamente associados ao rompimento da barragem), um evento molecular é iniciado, desencadeando eventos-chave subsequentes que podem levar ao desfecho adverso de interesse regulatório.

Na Figura 32, o principal evento molecular inicial associado a presença de metais é a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) (MARQUES et al., 2022; YANG et al., 2022), o que leva a um aumento do estresse oxidativo representado por uma alteração das defesas antioxidantes (i.e., metalotioneína, catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD)) e consequente dano oxidativo em lipídios, proteínas e DNA (i.e., lipoperoxidação (LPO), carbonilação proteica (PCO), sítios apurínicos

ou apirimidínicos (sítios AP), micronúcleo). O evento molecular inicial pode ocorrer após bioacumulação nos indivíduos, porém após a absorção, as interações moleculares entre metais e componentes celulares podem gerar EROs independentemente da bioacumulação e, assim, provocar dano oxidativo (SUN et al., 2022).

Sobretudo, o custo energético associado aos efeitos adversos trazidos por essas interações (i.e., indicados nos peixes por alterações nos biomarcadores lactato desidrogenase (LDH) e malato desidrogenase (MDH)), repercute ecologicamente em níveis superiores de organização (GROH et al., 2015; VAN DER OOST et al., 2020). Sendo assim, a persistência de uma alta demanda metabólica e consequentes danos poderão ter efeitos no crescimento, comportamento e estratégias de vida dos organismos. Para o plâncton, o custo metabólico trazido pelos metais pode reduzir o crescimento, aumentar a susceptibilidade de espécies e, consequentemente, provocar uma desestruturação na comunidade de fitoplâncton e do zooplâncton, como já observado durante os anos de monitoramento (RRDM, 2022 – RT-39D; BONECKER et al., 2022). Além disso, para o zooplâncton, o equilíbrio iônico interno (i.e., equilíbrio dos íons Na, K, Mg e Ca) pode ser negativamente afetado pela presença de metais levando a estresse oxidativo e, consequentemente, interferir nas funções celulares desses organismos.

Para a ictiofauna, é possível identificar os efeitos dos metais a partir da presença na coluna d'água ou bioacumulado no plâncton (i.e., via trófica de exposição). Após a absorção, os metais podem interagir diretamente com componentes celulares provocando estresse oxidativo, bioacumular em brânquias, fígado e músculo, bem como ser incorporados aos otólitos (DAROS et al., 2022). Os efeitos desses processos podem ser observados em diferentes níveis de organização biológica, incluindo danos histopatológicos (BEVITÓRIO et al., 2022), deformidades em estágios iniciais de vida (BONECKER et al., 2019), crescimento comprometido (RRDM, 2022 – RT-39D), redução da diversidade e abundância de espécies, levando a uma desestruturação da comunidade de peixes (CONDINI et al., 2022).

Alguns metais (e.g. Hg (mercúrio), Pb (chumbo) e Cu(cobre)) e contaminantes emergentes (e.g. bisfenol A, 17 $\beta$ -estradiol) podem agir como desreguladores endócrinos, interferindo no funcionamento normal do sistema endócrino, afetando a produção, transporte, metabolismo, ligação ou ação dos hormônios (CHAKRABORTY, 2021; PASCHOALINI et al., 2019). Através da ligação com receptor estrogênio ou outro mecanismo, metais e contaminantes emergentes podem alterar a produção da vitelogenina e proteína zona radiata, ambas as proteínas envolvidas no desenvolvimento dos ovos e na reprodução. Portanto, os modelos apresentados na Figura 25 apontam potenciais vias pelas quais metais e outros contaminantes podem levar ao desfecho adverso de interesse regulatório, i.e., estrutura de comunidade ou de assembleias de peixes.

Por fim, na Figura 32, a complexidade das relações entre eventos-chave fica explícita no modelo da VDA da tartaruga marinha, compatível com seu nível trófico. O modelo aponta como os dados de saúde das tartarugas estão relacionados em uma sequência de eventos que pode ter início pela formação de espécies reativas de oxigênio (EROs). Esse evento-chave sucede a exposição e absorção de metais e

outros contaminantes a partir da água, sedimento e outras fontes relacionadas aos hábitos de vida das diferentes espécies de tartaruga (e.g., metais bioacumulados no plâncton, peixes, corais).

O estresse oxidativo induzido por metais pode causar danos moleculares e celulares, traduzidos por alterações nas atividades da creatinofosfoquinase (CPK), alanina aminotransferase (ALT), aspartato aminotransferase (AST) (KUMAR et al., 2019; MIGUEL et al., 2022). Esses danos oxidativos podem levar à morte celular e respostas inflamatórias, expressos em alterações significativas da série vermelha e branca do hemograma das tartarugas. Quando persistentes, esses efeitos a nível molecular e celular são traduzidos em alterações do desenvolvimento e comprometimento da imunidade, eventos-chave representados pela alteração no crescimento, morte de indivíduos e presença de fibropapilomatose, que sucedem o desfecho adverso de interesse regulatório, i.e., perda da diversidade genética e tamanho da população (RRDM, 2022 – RT-39D; MIGUEL et al., 2022).

Assim como nas VDAs de peixes, metais e outros contaminantes aumentam a demanda metabólica dos indivíduos afetados. Esse desgaste energético – traduzido nas tartarugas por alterações em marcadores como glicemia/glicose, colesterol total, albumina e proteínas totais – pode vulnerabilizar os indivíduos, comprometendo a imunidade e o desenvolvimento adequado e consequentemente, levando ao desfecho adverso de interesse regulatório (DA SILVA et al., 2016). Adicionalmente, alguns metais e outros contaminantes podem agir como desreguladores endócrinos, comprometendo o desenvolvimento reprodutivo das tartarugas. Como consequência, pode ocorrer uma redução da fecundidade e postura de ovos associada a presença de metais, afetando significativamente o tamanho da população e diversidade genética.

Figura 31: Modelo conceitual das vias de desfecho adverso do plâncton e da ictiofauna. As setas amarelas mostram as principais fontes de exposição e subscrito estão os temas dos quais as informações serão retiradas. Caixas em cinza representam metais bioacumulados no *pool* de fitoplâncton e zooplâncton, em diferentes tecidos e incorporados aos otólitos dos peixes. Caixas em lilás representa o evento molecular inicial que não é contemplado nos dados do PMBA/Fest, porém é indiretamente mensurado pelas respostas dos biomarcadores. Caixas em azul representam eventos-chave que estão organizados em uma sequência lógica, considerando os diferentes níveis de organização biológica, até o desfecho adverso de interesse regulatório (caixas vermelhas). No canto superior direito do diagrama, encontra-se uma legenda das abreviações e das relações representadas por diferentes setas.

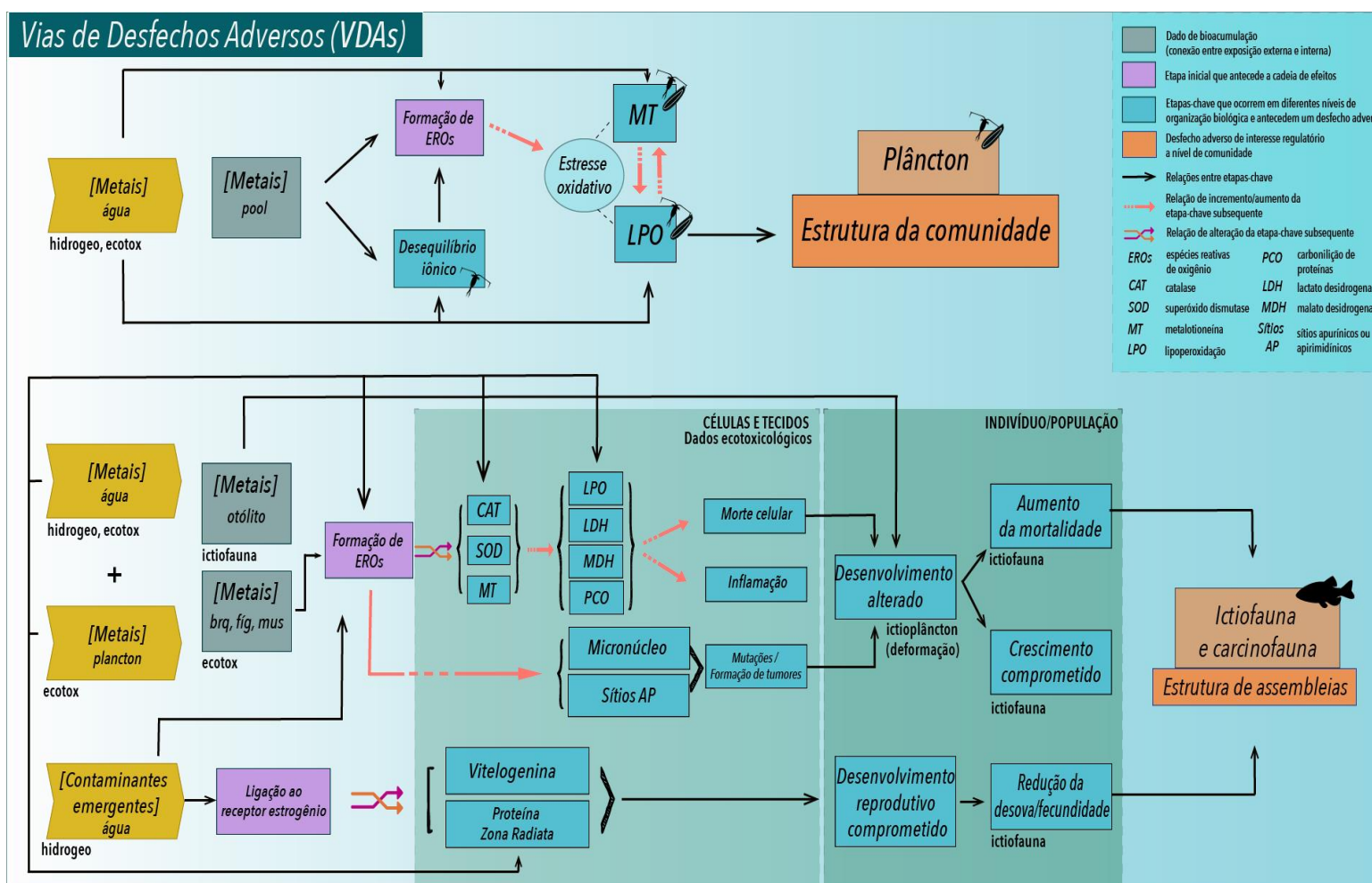
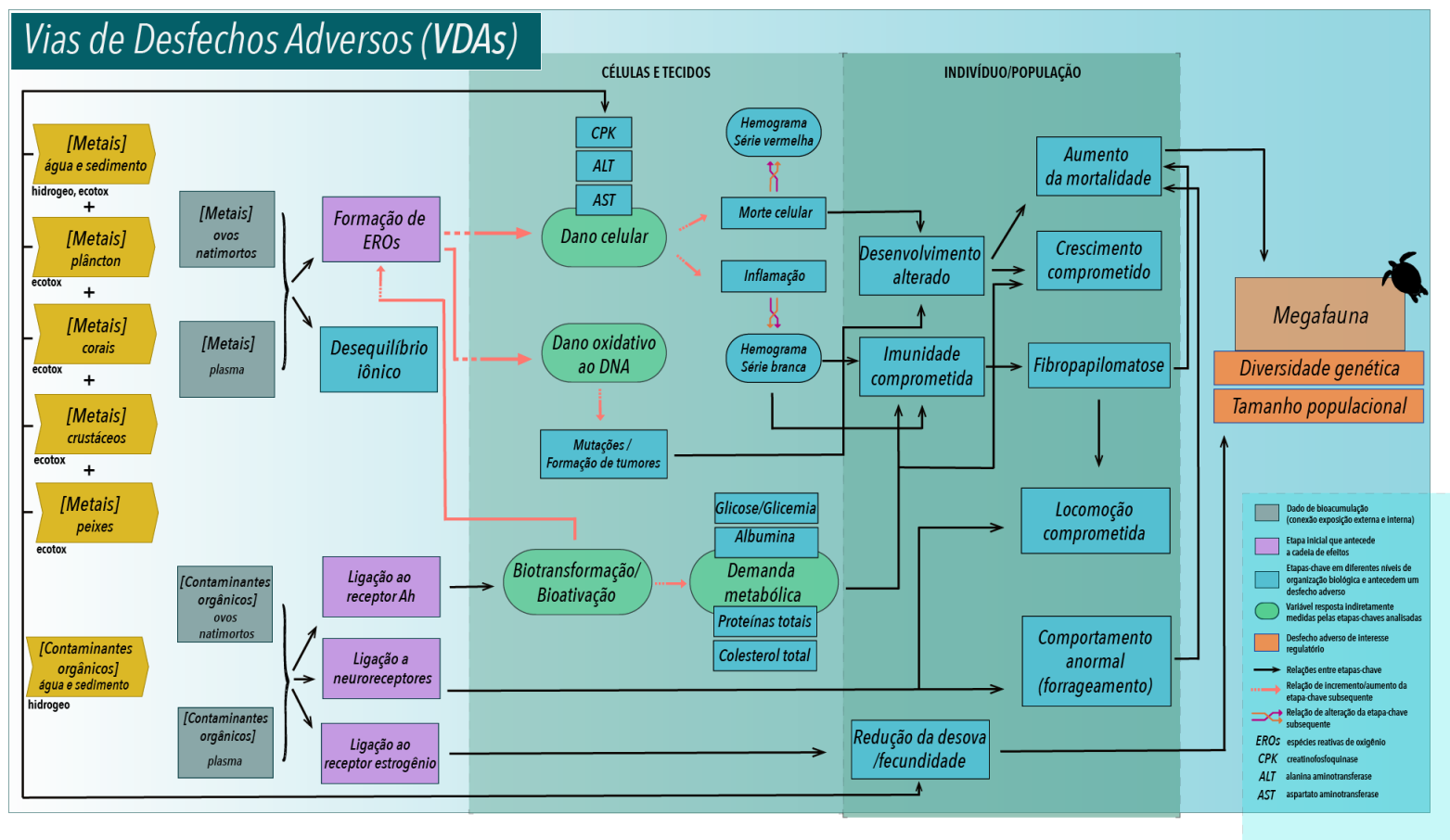


Figura 32: Modelo conceitual das vias de desfecho adverso da tartaruga marinha. As setas amarelas mostram as principais fontes de exposição e subscrito estão os temas dos quais as informações serão retiradas. Caso não esteja subscrito, significa que os dados são fornecidos pelo tema Megafauna – tartarugas. Caixas em cinza representam metais bioacumulados e encontrados em natimortos, ovos (cascas e inteiros) e no plasma. Caixas em lilás representa o evento molecular inicial que não é contemplado nos dados do PMBA/Fest, porém é indiretamente mensurado pelas respostas dos biomarcadores. Elipses verdes são eventos-chaves não medidos ou medidos indiretamente pelo tema. Caixas em azul representam eventos-chave que estão organizados em uma sequência lógica, considerando os diferentes níveis de organização biológica, até o desfecho adverso de interesse regulatório (caixas vermelhas). No canto superior direito do diagrama, encontra-se uma legenda das abreviações e das relações representadas por diferentes setas.





#### 4.6.2 Quantificação das relações: aplicação de modelos de equações estruturais às VDAs planctônicas

Com o objetivo de validar e/ou refinar os modelos conceituais das VDAs, os eventos-chaves identificados e organizados sequencialmente foram utilizados como ponto de partida para modelagem de equações estruturais (*structural equation modeling*, SEM). Especificamente, foi aplicado SEM particionado (*piecewiseSEM*, *pSEM*), 3ª geração de análise de caminhos que lida com relações multivariadas complexas de um conjunto de variáveis. Os *pSEMs* são ferramentas analíticas capazes de testar simultaneamente hipóteses multifacetadas, estruturadas em redes de causa e efeito como as VDAs aqui apresentadas. Isso é possível porque o efeito das variáveis de um modelo é propagado aos modelos estruturados adjacentes, permitindo assim que relações inicialmente não consideradas sejam quantificadas.

Cada relação entre os eventos-chave hipotetizada nos modelos conceituais das VDAs é traduzida em uma equação linear. A sequência de equações é então avaliada simultaneamente, quantificando a significância dos caminhos construídos e aqueles não considerados. Os resultados dos *pSEM* informam a direção e força das relações entre as variáveis dos diferentes modelos estruturados, através de coeficientes de regressão padronizados. Os modelos também retornam coeficientes de determinação ( $R^2$ ), que indicam o quanto uma variável resposta é explicada pelas outras variáveis do modelo. O  $R^2$  varia de 0 a 1, onde 1 indica que a variação na variável resposta é totalmente explicada pelas variáveis preditoras no modelo. Por fim, o bom ajuste dos modelos é indicado pelos valores do critério de informação de Akaike (AIC) e C de Fisher.

Considerando a recente chegada da equipe dedicada à integração, a inerente complexidade do PMBA/Fest associada ao grande volume de dados será tratada de maneira preliminar no presente relatório. Portanto, a estratégia analítica das VDAs iniciou-se utilizando apenas o conjunto de dados do tema Ecotoxicologia para quantificação das vias do fitoplâncton e do zooplâncton. A incompatibilidade na periodicidade de amostragem com os demais temas dificulta a inclusão plausível de variáveis preditoras (e.g., diferentes frações de metais, contaminantes orgânicos e emergentes – dados dos temas Qualidade da Água e da Hidrogeoquímica) e variáveis respostas em níveis de organização biológica superiores (e.g. abundância, produtividade, deformações no ictioplâncton – dados do tema plâncton). Entretanto, os resultados alcançados preliminarmente demonstram o potencial da *pSEM* como ferramenta para compreender relações resposta-preditor e validar ou refinar os modelos conceituais construídos.

Utilizando os modelos conceituais como ponto de partida, a relação entre as concentrações de metais totais e dissolvidos na água superficial e de fundo, bioacumulado no fitoplâncton e zooplâncton, e com os níveis de lipoperoxidação (LPO) e níveis de metalotioneína foram estruturados em modelos lineares mistos sequenciais, dentro do contexto de *pSEM*. Os metais alumínio (Al) e níquel (Ni) só passaram a ser avaliados a partir da campanha 3 e as duas últimas campanhas da Ecotoxicologia ainda estão em processamento. Portanto, para garantir robustez nas relações, 9 metais (arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), manganês (Mn), chumbo (Pb) e zinco (Zn)) foram

individualmente avaliados em relação aos seus efeitos a partir da presença na coluna d'água aos danos oxidativos (LPO), como descritos nas VDAs.

Ainda para garantir e aumentar a robustez dos resultados, as VDAs foram quantificadas por setor nos ambientes marinho e dulcícola, sem distinção temporal dos dados. Os dados contemplam o período de set/out 2018 a jul/ago 2021. A divisão de setores é a mesma utilizada pelo tema Ecotoxicologia: i) ambiente dulcícola: Setor Afluente, Setor Rio, Setor Lagos e Setor Lagoas; ii) ambiente marinho: Setor Sul, Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Setor Foz do Rio Doce, Setor Norte e Setor Abrolhos. A variabilidade entre as estações de cada setor foi contemplada pela adição das estações de coleta como fator aleatório nos modelos estruturais.

Para cada setor, os modelos foram estruturados partindo das relações mais simplificadas do modelo, analisando os 9 metais individualmente (Quadro 6). Para fitoplâncton, a concentração dos metais foram as variáveis preditoras. Já para o zooplâncton, além das concentrações de metais totais e dissolvidos na água superficial e de fundo, o metal bioacumulado no fitoplâncton foi inserido como preditor do metal bioacumulado no zooplâncton (Quadro 7). Além disso, os efeitos dos metais na composição iônica do zooplâncton foram contemplados. A partir de uma análise de componentes principais com as variáveis sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do zooplâncton, a primeira componente resultante foi utilizada para sintetizar a composição iônica.

Primeiramente, os modelos foram ajustados com a função *lmer*, do pacote *lme4* (BATES et al., 2015), na linguagem e ambiente R de programação (R CORE TEAM, 2022). Após o ajuste de cada um dos modelos, eles foram analisados conjuntamente utilizando o pacote *piecewiseSEM* (LEFCHECK, 2016). As relações indiretas apontadas nos resultados da *pSEM* foram utilizadas para refinar o modelo inicial, estabelecendo relações resposta-preditor não consideradas inicialmente. Variáveis não significativas foram removidas quando afetaram significativamente o AIC e C de Fisher, isto é, quando afetaram o ajuste do modelo. O  $R^2$  das respostas que consistentemente apresentaram relação com os metais avaliados, entre os diferentes ambientes e setores, foi extraído para validação do modelo conceitual e ponderações acerca dos padrões encontrados pelo PMBA/Fest.

Quadro 6: Sequência de equações estruturais segundo a notação do pacote lme4 baseadas no modelo conceitual das VDAs do plâncton. A esquerda do símbolo til (~) estão as variáveis respostas, a direita do ~ estão as variáveis preditoras. [*metal* fitoplâncton]: concentração do metal bioacumulado no pool de fitoplâncton; [*metal* total]: concentração do metal total na água de superfície ou fundo; [*metal* dissolvido]: concentração do metal dissolvido na água de superfície e fundo; LPO: lipoperoxidação; (1|estação): inserção das estações de amostragem como fatores aleatórios.

Modelo 1: bioacumulação	$\text{lmer} ([\text{metal} \text{ fitoplâncton}] \sim [\text{metal} \text{ total}] + [\text{metal} \text{ dissolvido}] + (1 \text{estação}))$
Modelo 2: metalotioneína	$\text{lmer} (\text{metalotioneína} \sim [\text{metal} \text{ fitoplâncton}] + (1 \text{estação}))$
Modelo 3: lipoperoxidação (LPO)	$\text{lmer} (\text{LPO} \sim \text{metalotioneína} + (1 \text{estação}))$

Quadro 7: Sequência de equações estruturais baseadas no modelo conceitual das VDAs do plâncton. A esquerda do símbolo til (~) estão as variáveis respostas, a direita do ~ estão as variáveis preditoras. [*metal* zooplâncton]: concentração do metal bioacumulado no pool de zooplâncton; [*metal* total]: concentração do metal total na água de superfície ou fundo; [*metal* dissolvido]: concentração do metal dissolvido na água de superfície ou fundo; [*metal* fitoplâncton]: concentração do metal bioacumulado no pool de fitoplâncton; composição iônica: variável resposta que sintetiza sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) do zooplâncton; LPO: lipoperoxidação; (1|estação): inserção das estações de amostragem como fatores aleatórios.

Modelo 1: bioacumulação	$\text{lmer} ([\text{metal} \text{ zooplâncton}] \sim [\text{metal} \text{ total}] + [\text{metal} \text{ dissolvido}] + [\text{metal} \text{ fitoplâncton}] + (1 \text{estação}))$
Modelo 2: composição iônica	$\text{lmer} (\text{composição iônica} \sim [\text{metal} \text{ zooplâncton}] + (1 \text{estação}))$
Modelo 3: metalotioneína	$\text{lmer} (\text{metalotioneína} \sim [\text{metal} \text{ zooplâncton}] + (1 \text{estação}))$
Modelo 4: lipoperoxidação (LPO)	$\text{lmer} (\text{LPO} \sim \text{metalotioneína} + (1 \text{estação}))$

Os *pSEMs* dos efeitos de cada um dos 9 metais mostraram a força das relações entre os bioamarcadores do fitoplâncton e do zooplâncton com a presença dos metais na água. De maneira geral, os modelos conceituais das VDAs e o uso da LPO e metalotioneína como biomarcadores foram validados quantitativamente. Os valores  $R^2$  foram adotados como uma métrica objetiva das relações causa-efeito entre os biomarcadores do fitoplâncton e zooplâncton e a presença dos metais na água e

bioacumulados. Essa métrica pretende sintetizar a relação da presença dos metais com efeitos deletérios nos organismos, determinando a proporção de explicação da variável resposta (LPO e metalotioneína) em função das variáveis preditoras adicionadas aos modelos. Assim, foi possível verificar as relações propostas conceitualmente, refinar os modelos e fornecer suporte analítico e conceitual aos resultados alcançados no PMBA/Fest. Considerando que metais sem papéis biológicos definidos apresentam um maior potencial de toxicidade em baixas concentrações (MARQUES et al., 2022; SHAH, 2021), os metais foram apresentados em duas categorias distintas: essenciais (Fe, Cu, Mn e Zn) (i.e., desempenham papéis vitais em processos fisiológicos e bioquímicos, garantindo o funcionamento adequado dos organismos) e não-essenciais (As, Cd, Cr, Hg, Pb).

A LPO mostrou-se uma resposta robusta, consistentemente relacionada à presença dos metais na coluna d'água, bioacumulados nos organismos ou diretamente associada aos níveis de metalotioneína nos diferentes setores e ambientes. A forte relação metalotioneína à LPO foi revelado pelo padrão inverso da variabilidade do  $R^2$  desses biomarcadores, i.e., geralmente onde a forte associação da LPO com metais apresentou alto valor do  $R^2$ , a proporção explicada da metalotioneína foi menor, com o inverso também ocorrendo. Esse padrão sugere que em setores onde o dano oxidativo é alto e fortemente associado à presença dos metais, as defesas antioxidantes representadas pela metalotioneína encontram-se reduzidas.

A Figura 33 aponta a proporção da variabilidade explicada da LPO do ambiente dulcícola, do setor Afluentes à Foz do Rio Doce, e no ambiente marinho do setor Sul a Abrolhos. Observa-se um gradiente marcado na relação entre a LPO do fitoplâncton, com a metalotioneína e as concentrações de metais bioacumulados no *pool* de fitoplâncton ou disponíveis na coluna d'água. A proporção de explicação dessa variável é consideravelmente alta no setor Afluentes e está principalmente associada aos níveis de metalotioneína (Material Suplementar MS\_INTEGRAÇÃO\_DULCÍCOLA) em relação à exposição ao Fe. Para o zooplâncton, o gradiente não é tão marcado, com proporções da variabilidade da LPO significativas para o Setor Afluentes e Lagoas, associada principalmente aos níveis de metalotioneína e Hg, Mn, Cd e Cr. A grande proporção da variância da LPO do fitoplâncton e do zooplâncton explicada no setor Afluentes está em consonância com os resultados apresentados Síntese do Ambiente Dulcícola (RRDM, 2022 - RT-39B), dando suporte aos padrões encontrados especialmente na Campanha 6 (Ano 3 - Jul/Ago 2021).

Na Figura 34, o padrão da variabilidade do  $R^2$  da metalotioneína, ou seja, a proporção de explicação desse biomarcador pelo conjunto de metais avaliados, também obedeceu a um gradiente. Porém, a direção foi oposta ao gradiente observado para LPO, demonstrando a relação inversa e encadeada dessas respostas. Principalmente no setor Lagoas, onde a proporção de explicação da LPO é baixa, a metalotioneína do zooplâncton esteve fortemente relacionada às concentrações de Mn e Pb, com seus níveis sendo negativamente afetados pelo aumento da concentração desses metais (Material Suplementar MS\_INTEGRAÇÃO\_DULCÍCOLA). No setor Lagoas, esse padrão se repetiu apenas para o fitoplâncton em relação ao Fe. Para o zooplâncton do mesmo setor, a proporção da variabilidade explicada de ambos os biomarcadores foi semelhante, porém para os metais Hg e Pb, ocorreu uma inversão na relação, isto é, os níveis da metalotioneína dependeram significativamente dos níveis da

LPO (Material Suplementar, MS\_INTEGRAÇÃO\_DULCÍCOLA). Esse resultado reforça a necessidade de refinar os modelos conceituais considerando as particularidades dos setores e dos metais ou contaminantes.

No ambiente marinho, a relação da LPO com os metais e níveis de metalotioneína foi mais variável (Figura 34). Para o fitoplâncton, houve um sutil gradiente do setor Sul – onde os níveis de Pb, Hg e Cu uma proporção considerável da variabilidade da LPO – ao setor Foz do Rio Doce onde a variabilidade foi apenas parcialmente explicada principalmente pelo Fe, Hg e Cd. Os baixos valores de  $R^2$  indicam que há outros processos e variáveis que podem estar levando ao incremento dos níveis de LPO, encontrados especialmente na Campanha 5 (Ano 3 - Jan/Fev 2021), e do índice de resposta biológica (IBR biomarcador) a partir do Ano 3 (RRDM, 2022). Variáveis analisadas por outros temas, como outras frações de metais, contaminantes orgânicos e outras variáveis ambientais (dados Hidrogeoquímica) podem ser preditores importantes que ainda não foram integrados aos modelos.

No setor Norte, a relação da LPO passou a ser fortemente explicada pela presença de Mn e Cd, para o fitoplâncton, e de Cr, Fe, Pb e Zn para o zooplâncton. Já no setor Abrolhos, a variabilidade da LPO parece fracamente explicada pelo conjunto de variáveis testadas, com exceção do Cu e Cr em relação a LPO do zooplâncton (Figura 33). A relação proporcionalmente inversa dos níveis de metalotioneína e LPO ficou evidente nos setores Norte e Abrolhos do ambiente Marinho. Diferentemente do que foi observado para a LPO, a proporção da variabilidade da metalotioneína explicada pelos metais foi mais alta em Abrolhos (Figura 34), onde o Zn e Fe estiveram fortemente associados a metalotioneína do fitoplâncton e Cd e Fe a metalotioneína do zooplâncton.

De maneira geral, tanto para o fitoplâncton quanto para o zooplâncton, os níveis de metalotioneína e LPO não estavam diretamente associados aos metais bioacumulados nos organismos, como descrito no modelo conceitual. Exceto para alguns metais no ambiente marinho (e.g., Fe e Zn para zooplâncton no setor Sul – Material Suplementar MS\_INTEGRAÇÃO\_MARINHO), a toxicidade parece não depender da bioacumulação dos metais nos organismos planctônicos para ocorrer, com os biomarcadores de estresse oxidativo significativamente relacionados às fontes de exposição (i.e., metais na água ou bioacumulados no nível trófico inferior). Para ambos os ambientes, destaca-se a forte e significativa relação dos metais bioacumulados no fitoplâncton com a bioacumulação de metais do zooplâncton, bem como com a metalotioneína e LPO. Portanto, a via trófica de exposição é uma variável que deve ser contemplada para melhor compreensão dos efeitos dos metais (Materiais Suplementares MS\_INTEGRAÇÃO\_DULCÍCOLA e MS\_INTEGRAÇÃO\_MARINHO).

Além de dar suporte e refinar nosso modelo conceitual, as relações apresentadas aqui são coerentes com os resultados encontrados até 2021 pela Ecotoxicologia, corroborando de maneira conceitual e quantitativa com os resultados apresentados na síntese nos Síntese dos Ambientes Marinho e Dulcícola (RRDM, 2022 – RT-39B e RT-39D). Adicionalmente, apontam para a relação LPO-metalotioneína como maneira robusta de rastrear os efeitos dos metais e outros contaminantes nos diferentes setores e ambientes avaliados pelo PMBA/Fest.



Figura 33: Valores de  $R^2$  da variável resposta LPO (lipoperoxidação) entre os diferentes ambientes (marinho e dulcícola) e setores (dulcícola: Afluentes, Rio, Lagos e Lagoas; marinho: Sul, Costa das Algas (APA), Foz do Rio Doce (Foz), Norte e Abrolhos). O  $R^2$  é proporção da variabilidade explicada pelas outras variáveis do modelo. Símbolo (●) preenchido por diferentes cores representa metais essenciais (Cu, Fe, Mn e Zn), já o símbolo (×) de diferentes cores representa metais não-essenciais (As, Cd, Cr, Hg, Pb). O (■) é mediana de todos os valores de  $R^2$  da LPO.

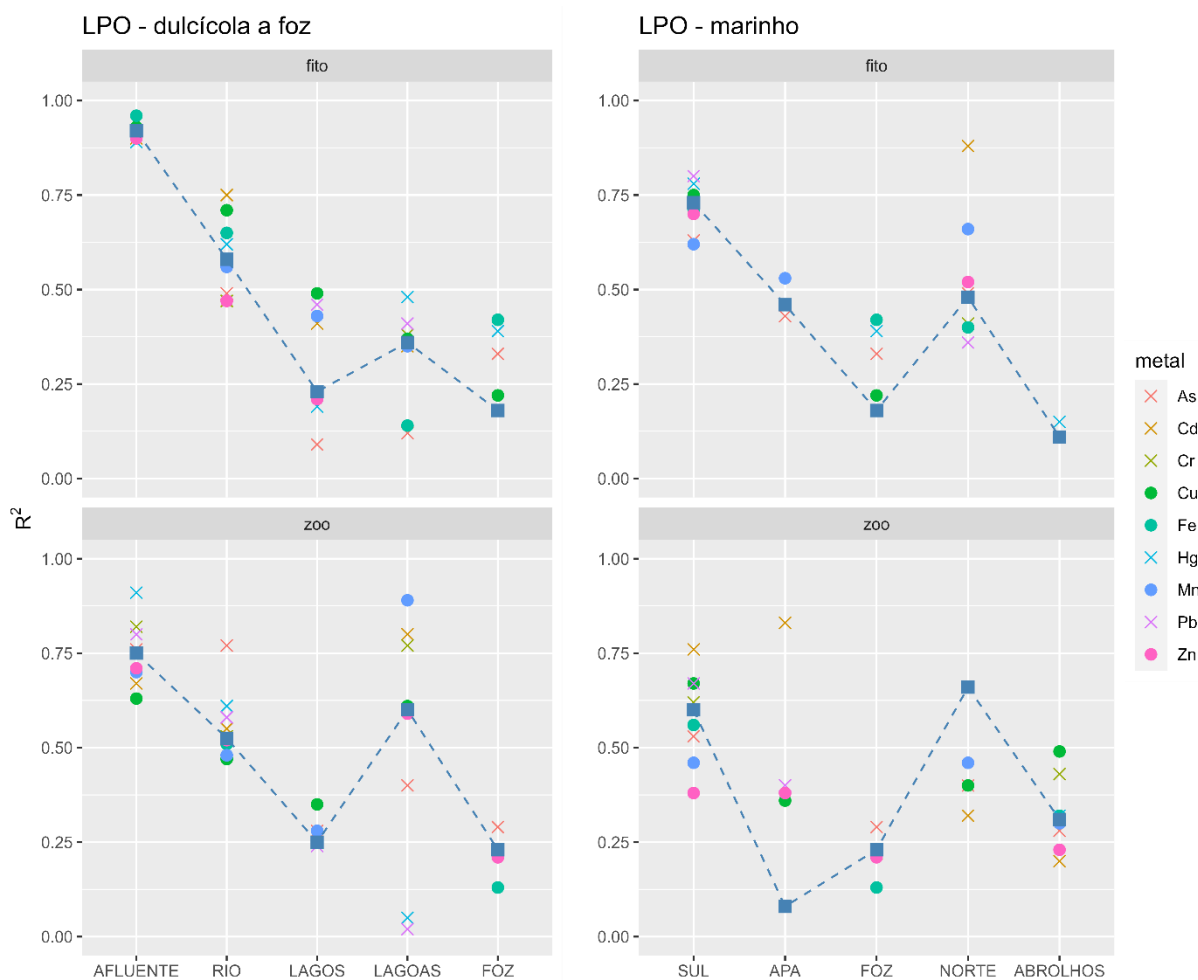
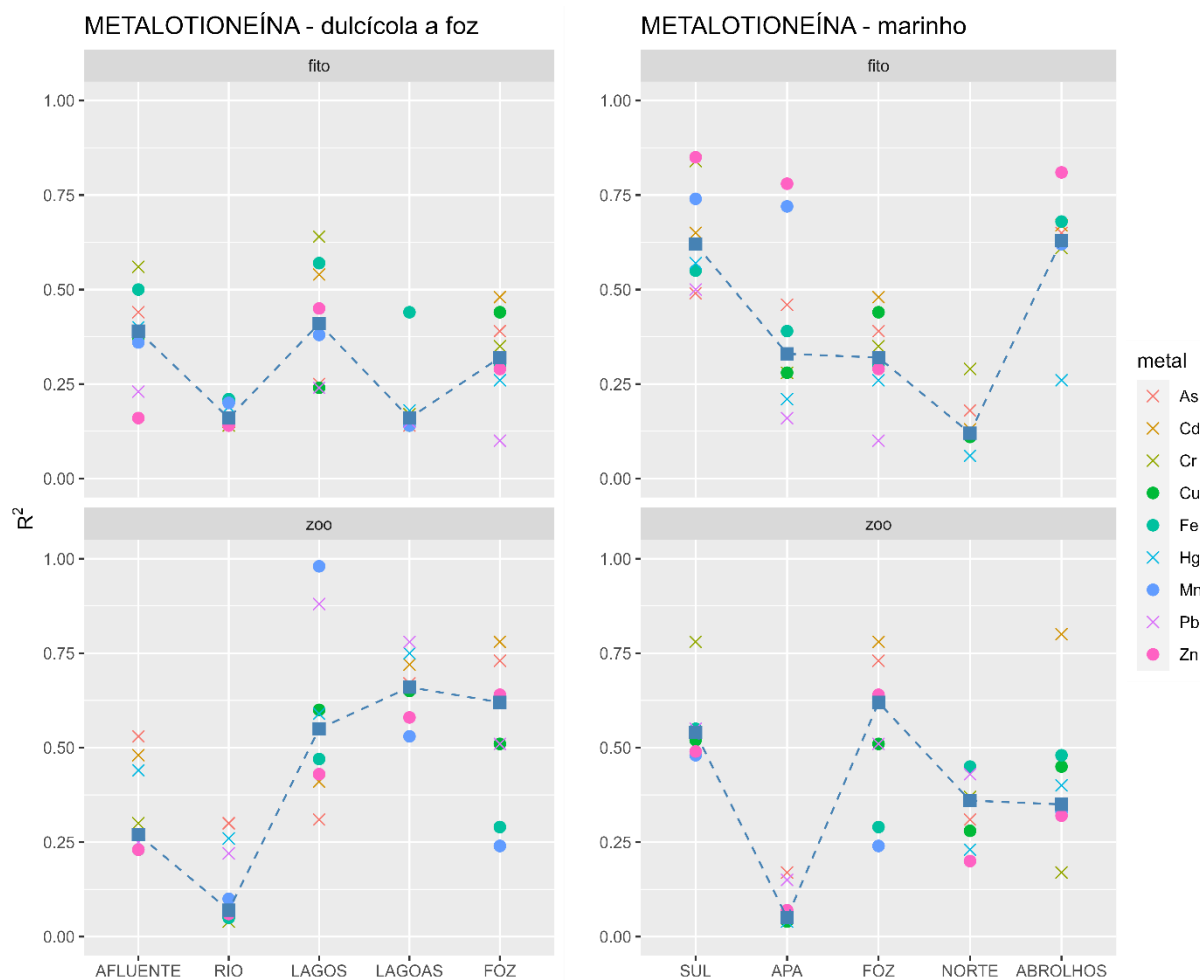


Figura 34: Valores de  $R^2$  da variável resposta metalotioneína entre os diferentes ambientes (marinho e dulcícola) e setores (dulcícola: Afluente, Rio, Lagos e Lagoas; marinho: Sul, Costa das Algas (APA), Foz do Rio Doce (Foz), Norte e Abrolhos). O  $R^2$  é proporção da variabilidade explicada pelas outras variáveis do modelo. (●) preenchido por diferentes cores representa metais essenciais (Cu, Fe, Mn e Zn); (×) de diferentes cores representa metais não-essenciais (As, Cd, Cr, Hg, Pb); (■) é mediana de todos os valores de  $R^2$  da metalotioneína.



## 4.7 RELAÇÕES AMBIENTAIS NO NÍVEL DA COMUNIDADE E ECOSISTEMA

### 4.7.1 Threshold Taxa Indicator Analysis - TITAN

Os possíveis impactos promovidos pelos materiais oriundos do rompimento da Barragem de Fundão sobre a estrutura das comunidades aquáticas foram avaliados a partir da análise de TITAN (Threshold Indicator Taxa Analysis - BAKER & KING, 2010). Para isso, foi realizada uma série de análises correlacionais entre as variáveis preditoras (i.e., os indicadores tanto da presença do material oriundo da Barragem de Fundão quanto de variáveis ambientais indicadoras da qualidade da água), e as densidades das espécies de cada comunidade biológica encontradas na região impactada pelo rompimento da Barragem ao longo do período de amostragem do PMBA/Fest. Além disso, buscou-se a partir da análise de TITAN, avaliar a sincronia entre os pontos em que houve mudanças nas

densidades dos táxons de cada comunidade biológica como uma evidência para os limites das comunidades (ou seja, pontos em que ocorreram fortes respostas, tanto positivas quanto negativas, nas abundâncias de muitos táxons simultaneamente).

Como já mencionado anteriormente, dadas as complexidades das relações ambientais e biológicas na região impactada pelo rompimento da Barragem de Fundão e do relativo pouco tempo de monitoramento do PMBA/Fest, é importante destacar que os resultados aqui apresentados são preliminares, e contemplaram apenas os ambientes dulcícola e marinho (respectivamente pontos iniciais e finais do material oriundo da Barragem de Fundão). Além disso, para fins deste relatório, são apresentados os resultados para as seguintes comunidades biológicas: ambiente dulcícola - Fitoplâncton, Perifiton, Macrófitas, Zooplâncton, Macroinvertebrados e Ictiofauna (sendo os dois últimos apenas utilizados para o setor fluvial); ambiente marinho - Bentos Inconsolidado, Zooplâncton, Ictioplâncton, Carcinofauna e Ictiofauna.

A seleção do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão foi realizada a partir critérios geoquímicos para a identificação da ocorrência do sinal deste material nas estações monitoradas, a qual foi baseada nas concentrações dos seguintes metais: Ni, Cu, Pb, Cr, Fe, Al, Mn, Zn tanto em suas formas particuladas (mg/kg) quanto dissolvidas ( $\mu\text{g/L}$ ). Já os indicadores para a qualidade da água englobaram as seguintes variáveis ambientais da água/sedimento: Turbidez (NTU), MPS (Material Particulado em Suspensão; mg/L), Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), Oxigênio Dissolvido (mg/L), Nitrogênio Total ( $\mu\text{mol/L}$ ) e Fósforo Total ( $\mu\text{mol/L}$ ).

A análise de TITAN, em síntese, faz uma correlação par a par entre a densidade de cada espécie ao longo do gradiente ambiental testado (nesse caso, concentração de metais particulados e dissolvidos e variáveis ambientais) e geram as tendências de redução (z-) ou aumento (z+) da densidade para cada espécie/táxon. O ponto dentro do gradiente em que há um grande número de táxons simultaneamente respondendo positiva ou negativamente, é chamado de ponto de mudança. Dessa forma, a partir das análises de TITAN buscou-se por pontos dentro dos gradientes ambientais testados em que ocorreu uma mudança brusca da comunidade (onde um conjunto de espécies respondeu simultaneamente às mesmas variações nas concentrações da variável preditora). Os resultados das análises de TITAN levaram em consideração dois critérios de validação: pureza e confiabilidade, ambos avaliados a partir de testes de hipóteses considerando 500 permutações do modelo para cada análise. A pureza correspondeu à proporção dos pontos de mudança (z- ou z+) ao longo das reamostragens que concordaram com os valores observados. Já a confiabilidade correspondeu à proporção das reamostragens que registraram um valor indicador significativo (valores de  $p < 0,05$ ). A análise de TITAN foi realizada no ambiente R de programação (R CORE TEAM, 2022) a partir do pacote estatístico *TITAN2* (BAKER et al., 2022)

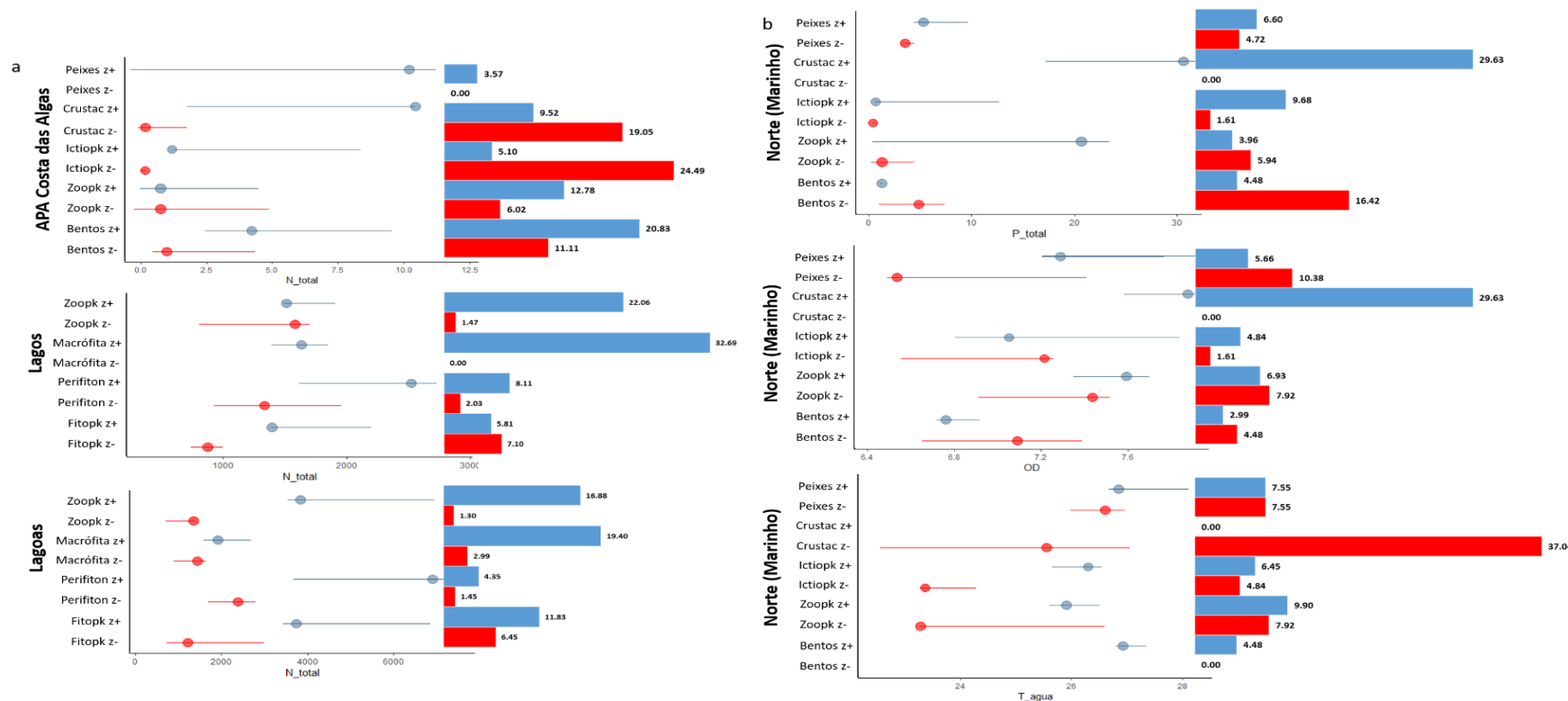
Para garantir a conformidade dos resultados encontrados pelos demais temas do PMBA/Fest, e assim evitar o grande aumento da variabilidade em função das diferentes características físicas, químicas, biológicas e meteoceanográficas de cada setor, as análises de TITAN foram realizadas por setor para ambos ambientes marinho e dulcícola, sem distinção temporal dos dados. Os resultados aqui

apresentados contemplaram o período de Outubro de 2018 a Abril de 2022 para o ambiente marinho e de Outubro de 2018 a Maio de 2022 para o ambiente dulcícola. A divisão de setores foi a mesma utilizada pelos diversos temas do PMBA/Fest: i) ambiente dulcícola: Setor Lagos, Setor Lagoas e Setor Fluvial ii) ambiente marinho: Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Setor Foz do Rio Doce e Setor Norte. Assim como para as análises de VDA (seção 4.6), a variabilidade espacial dos dados para cada setor foi contemplada pela adição dos períodos de coletas e estações de amostragem como fatores aleatórios. Por fim, foi realizada uma abordagem temporal preliminar para as variações nas densidades dos táxons das comunidades a fim de se verificar possíveis tendências de melhora, piora ou estabilidade destas ao longo do tempo de monitoramento do PMBA/Fest.

Houve diferenças nas respostas das comunidades aquáticas tanto de acordo com o setor analisado, quanto pelo gradiente ambiental (variável preditora) e o tipo de comunidade testada, mas, de maneira geral, pode-se observar maiores variações nas respostas positivas dos táxons (i.e., maior dispersão das respostas ao longo do gradiente, o que pode ser observado pelas linhas horizontais azuis nas figuras abaixo) quando comparado às respostas negativas, ou seja, houve uma tendência das respostas negativas ocorrerem de maneira mais simultânea (i.e., em um mesmo ponto do gradiente; vide Figura 35 para maiores detalhes).

Em geral, nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e Norte (ambiente marinho) e Lagos e Lagoas (ambiente dulcícola), observou-se um maior efeito (positivo ou negativo) das variáveis ambientais relacionadas à qualidade da água, sobre as comunidades. Nesse sentido, destaca-se os efeitos do Nitrogênio Total sobre as comunidades dos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Lagos e Lagoas (Figura 35a). Da mesma forma, as comunidades aquáticas do setor Norte (ambiente marinho) foram mais influenciadas pelas variações nas concentrações de Fósforo Total no setor Norte; Oxigênio Dissolvido e Temperatura da Água; Figura 35b).

Figura 35: Média (círculos) e dispersão dos percentis 5 e 95 (linhas horizontais) dos pontos de mudança e porcentagem das comunidades alteradas (barras horizontais) em relação ao gradiente ambiental testado pela análise de TITAN. Em vermelho são representados os táxons que reduziram suas abundâncias e em azul, aqueles que aumentaram suas abundâncias em relação ao gradiente ambiental analisado. a) Resultados da Análise de TITAN para o gradiente de concentrações do Nitrogênio Total (N\_total) para os setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (ambiente marinho) e Lagos e Lagoas (ambiente dulcícola). b) Resultados da Análise de TITAN para o setor marinho Norte em relação aos gradientes de concentração das variáveis Fósforo Total (P\_total), Oxigênio Dissolvido (OD) e Temperatura da água (T\_agua). Os círculos vermelhos apresentaram pouco desvio horizontal, o que significa que muitas espécies decresceram suas abundâncias nos mesmos limites de concentração da variável, quando comparado com as respostas positivas - círculos azuis, os quais apresentam grande variação horizontal, o que significa que as espécies não responderam simultaneamente à determinada concentração do gradiente). Bentos = Bentos Inconsolidado/macroinvertebrados; Zoopk = Zooplâncton, Ictiopk = Ictioplâncton; Crustac = Carcinofauna nectônica; Peixes = Ictiofauna adulta. Fitopk = Fitoplâncton.





Em contrapartida, para os setores Foz do Rio Doce (ambiente marinho) e Fluvial (ambiente dulcícola), as maiores alterações negativas nas densidades das comunidades aquáticas (i.e., reduções nas densidades) foram correlacionadas às maiores concentrações dos metais, especialmente, Al, Fe, Mn, Ni e Cr particulados ou às variáveis turbidez da água e MPS (ambiente dulcícola). Tais variáveis, como já mencionado, podem representar, respectivamente, formas indireta e diretamente relacionadas à presença do material oriundo da Barragem de Fundão (Figura 36 e Figura 37). Ressalta-se ainda, que em geral, as comunidades aquáticas apresentaram respostas a baixas concentrações desses metais na água, ou seja, pontos de mudanças muito próximos ao valor zero, principalmente em relação às respostas negativas de redução das abundâncias dos táxons. Ainda, quando comparados os resultados pelas formas de metais, em geral, houve maior resposta das comunidades aquáticas às formas particuladas, principalmente de Al, Fe, Mn, Ni e Cr, tanto para os setores marinhos quanto dulcícolas (vide o material suplementar, MS\_INTEGRAÇÃO\_TITAN, para resultados mais detalhados). Por fim, observadas respostas pouco significativas das comunidades para os gradientes de concentração dos metais Zn, Cu e Pb (para ambas as formas particuladas e dissolvidas - vide Material Suplementar MS\_INTEGRAÇÃO\_TITAN para resultados mais detalhados).

Em relação aos efeitos dos gradientes ambientais sobre as comunidades aquáticas, observou-se que os metais apresentaram efeitos negativos mais fortes que os positivos para várias comunidades. Em geral, observou-se um maior efeito negativo dos metais sobre a comunidade bentônica nos setores Foz do Rio Doce (marinho; Figura 37) e fluvial (dulcícola; Figura 36). Nesse sentido, destacam-se no setor fluvial, as reduções nas abundâncias de 33% dos táxons dessa comunidade com os aumentos nas concentrações de Al e Mn particulados, 27% com o aumento nas concentrações de Cr particulado e 25% nas concentrações de Fe particulado (Figura 36 e Figura 37). Também houve um efeito negativo de redução de muitas espécies das comunidades dos produtores (e fitoplâncton, perifíton e macrófitas aquáticas), e da ictiofauna em vários setores do ambiente dulcícola, causadas, principalmente, pelo aumento das concentrações de Al, Fe, Mn, Ni e Cr particulados (Ni e Cr principalmente no setor fluvial; vide Figura 36 e material suplementar MS\_INTEGRAÇÃO\_TITAN para maiores detalhes).

Figura 36: Média (círculos) e dispersão dos percentis 5 e 95% (linhas horizontais) dos pontos de mudança e porcentagem das comunidades alteradas (barras horizontais) em relação ao gradiente ambiental testado pela análise de TITAN para o setor marinho Foz do Rio Doce em relação aos gradientes de concentração dos metais particulados: Alumínio (Al\_part), Ferro (Fe\_part), Manganês (Mn\_part) e Níquel (Ni\_part) e da Turbidez da Água. Em vermelho são representados os táxons que reduziram suas abundâncias (z-) e em azul, aqueles que aumentaram suas abundâncias em relação ao gradiente ambiental analisado (z+). Os círculos vermelhos apresentaram pouco desvio horizontal, o que significa que muitas espécies decresceram suas abundâncias nos mesmos limites de concentração da variável), quando comparado com as respostas positivas - círculos azuis, os quais apresentam grande variação horizontal, o que significa que as espécies não responderam simultaneamente à determinada concentração do gradiente). Bentos = Bentos Inconsolidado; Zooplk = Zooplâncton; Ictioplk = Ictioplâncton; Crustac = Carcinofauna nectônica; Peixes = Ictiofauna adulta.

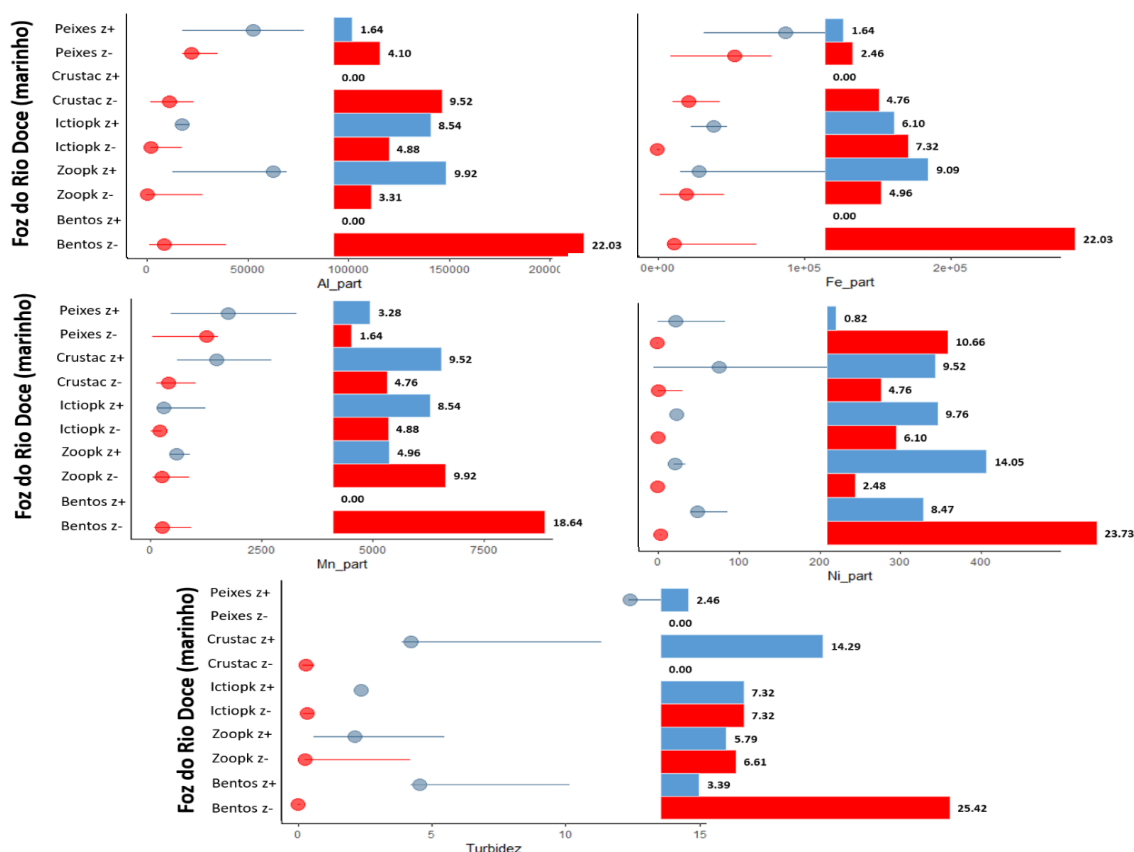
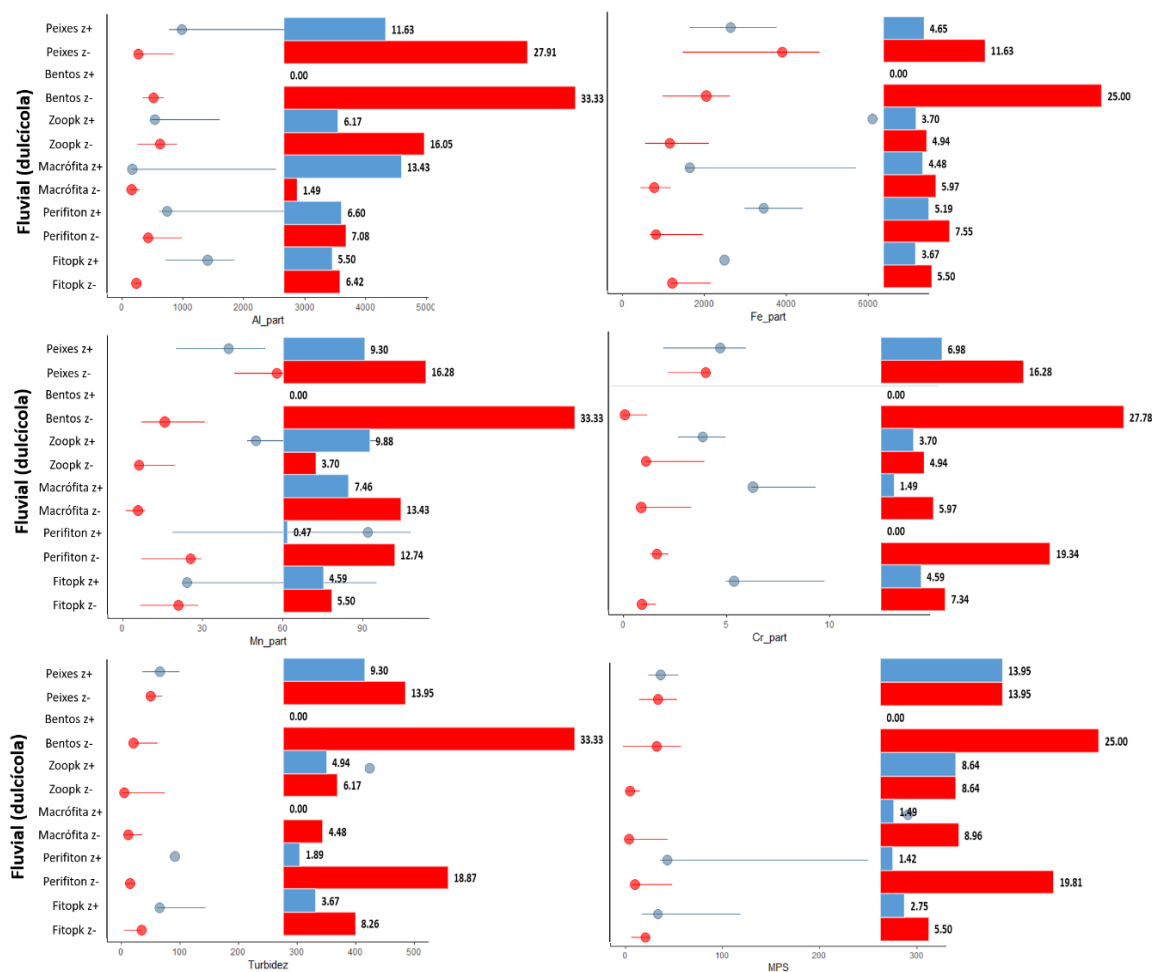


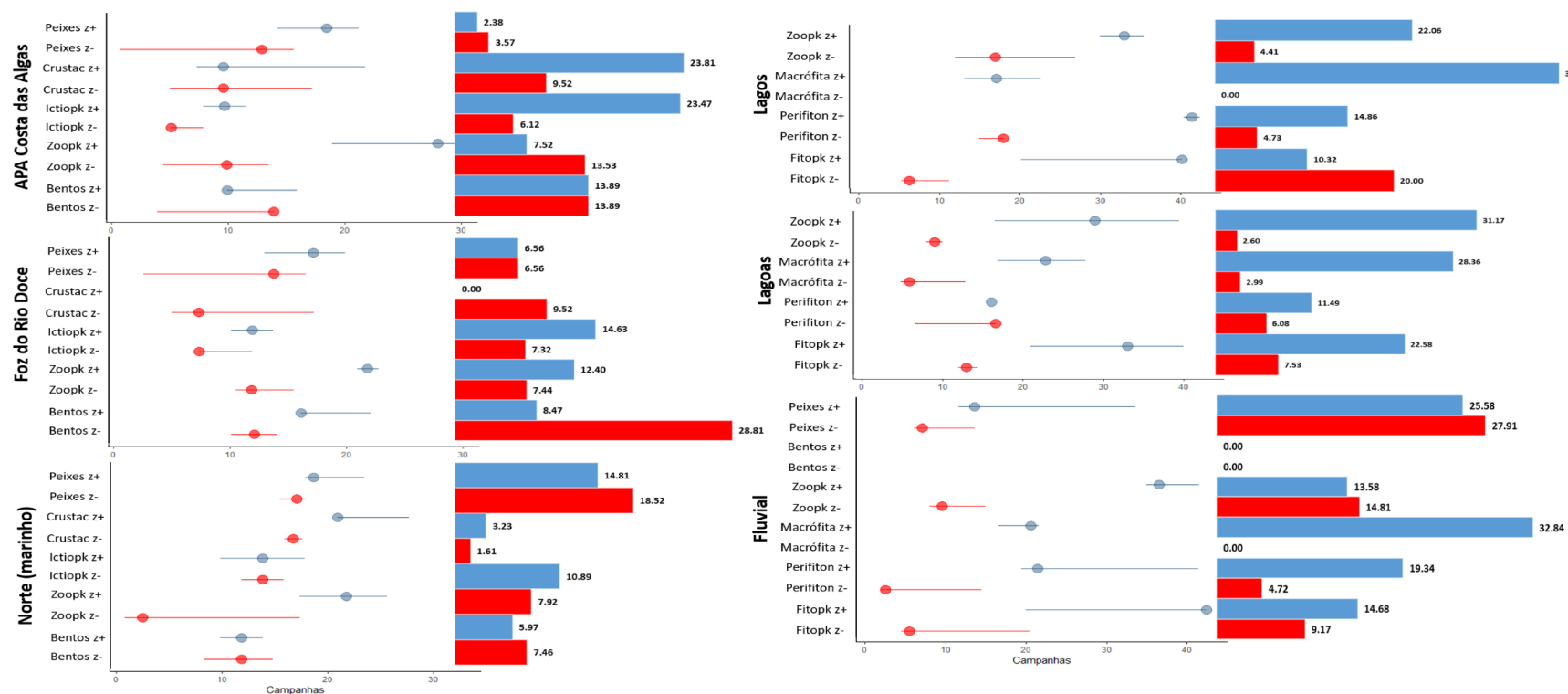
Figura 37: Média (círculos) e dispersão dos percentis 5 e 95 (linhas horizontais) dos pontos de mudança e porcentagem das comunidades alteradas (barras horizontais) em relação ao gradiente ambiental testado pela análise de TITAN para o setor dulcícola fluvial para os gradientes de concentração das variáveis dos metais particulados: Alumínio (Al\_part), Ferro (Fe\_part), Manganês (Mn\_part) e Cromo (Cr\_part), da Turbidez da Água e dos Materiais Particulados em Suspensão (MPS). Os círculos vermelhos apresentaram pouco desvio horizontal, o que significa que muitas espécies decresceram suas abundâncias nos mesmos limites de concentração da variável), quando comparado com as respostas positivas - círculos azuis, os quais apresentam grande variação horizontal, o que significa que as espécies não responderam simultaneamente à determinada concentração do gradiente). Fitopk = Fitoplâncton; Bentos = Macroinvertebrados; Zoopk = Zooplâncton; Ictiopk = Ictioplâncton; Crustac = Carcinofauna nectônica; Peixes = Ictiofauna adulta.



A alta concentração de metais particulados e do MPS na calha do Rio Doce e nos ambientes marinhos vinculados à sua Foz podem ter agido como uma barreira física ou mesmo seletiva para diversas comunidades, principalmente para as comunidades planctônicas. Por exemplo, KANG et al. (2019), relataram, a partir de uma abordagem experimental, a redução de espécies unicelulares e aumento das espécies coloniais de fitoplâncton sob efeito do aumento de turbulência e do material em suspensão na água. Além disso, já é bem conhecida a capacidade de filtração e bioacumulação de metais pelas espécies de bivalves (e.g., MARIGÓMEZ et al., 2002; GUPTA & SINGH, 2011) e mais recentemente, para gastrópodes (NIGARIGA et al., 2023), o que pode ter contribuído para os efeitos negativos encontrados para a comunidade bentônica, para ambos os ambientes marinho e dulcícola. Tais resultados concordam com os demonstrados nas Seção 4.5 e 4.7.2 desta síntese integrativa, e, uma vez que os resultados indicam que o aumento da vazão do Rio Doce causou o aumento nas concentrações dos metais particulados na água e que estes, por sua vez, causaram impactos negativos sobre diversas comunidades biológicas, ressalta-se a importância de incluir os metais particulados tanto nas análises de qualidade da água, quanto para a verificação de suas influências sobre as comunidades biológicas, como formas de indicativos dos efeitos dos materiais oriundos do rompimento da Barragem de Fundão sobre a área estudada.

Por fim, as análises preliminares do TITAN considerando-se o tempo como preditor das variações nas abundâncias das comunidades aquáticas sugeriram o efeito de algum tipo de impacto sobre o ambiente marinho (aqui não distinta a sua causa), o qual foi percebido principalmente até certo momento do monitoramento do PMBA/Fest, uma vez que para várias comunidades, houve táxons que reduziram suas densidades até meados da campanha de Jan/21 e outros que aumentaram suas abundâncias a partir dessa mesma campanha (Figura 38 – coluna à esquerda). Um ponto mais crítico em relação a esse resultado foi identificado para a comunidade de bentos consolidado para o setor Foz do Rio Doce, e para a ictiofauna no setor norte, as quais apresentaram mais táxons com reduções de abundâncias do que com acréscimos ao longo do tempo, o que pode indicar uma redução na qualidade ambiental para esta comunidade. Já para o ambiente dulcícola, foi possível observar uma tendência de melhora nas abundâncias dos táxons ao longo do tempo (com exceção das comunidades de macroinvertebrados bentônicos, zooplâncton e ictiofauna no setor fluvial, as quais ou não obtiveram resultados significativos ou, as perdas de organismos foram maiores que os acréscimos; Figura 38 – coluna à direita).

Figura 38: Média (círculos) e dispersão dos percentis 5 e 95% (linhas horizontais) dos pontos de mudança e porcentagem das comunidades alteradas (barras horizontais) em relação ao tempo pela análise de TITAN. Em vermelho são representados os táxons que reduziram suas abundâncias (z-) e em azul, aqueles que aumentaram suas abundâncias em relação ao gradiente ambiental analisado (z+). Coluna da Esquerda: Resultados da Análise de TITAN para os setores do ambiente marinho em relação às variações temporais. Coluna da Direita: Resultados da Análise de TITAN para os setores do ambiente dulcícola em relação às variações temporais. Bentos = Bentos Inconsolidado/macroinvertebrados; Zoopk = Zooplâncton, Ictiopk = Ictioplâncton; Crustac = Carcinofauna nectônica; Peixes = Ictiofauna adulta. Fitopk = Fitoplâncton.





Importante destacar que os resultados temporais requerem um maior detalhamento, uma vez que a variabilidade ambiental natural desses ambientes pode fortemente ter influenciado esses resultados, o que ficou reforçado pelas variáveis ambientais como Nitrogênio, Fósforo, Temperatura e Oxigênio que influenciaram nas variações das densidades das comunidades em diversos setores. Portanto, para uma abordagem temporal mais eficaz para avaliar os efeitos do rompimento da Barragem de Fundão sobre a estrutura das comunidades torna-se necessária uma série temporal maior e que, mais importante, seja capaz de englobar efeitos climáticos extremos (e.g., cheias extremas na bacia do Rio Doce), os quais, como demonstrado pelos resultados da Seção 4.5 desta síntese, são capazes de remobilizar materiais represados oriundos do rompimento da Barragem de Fundão e aumentar a entrada destes no Rio Doce e, conseqüentemente, aumentar os efeitos negativos sobre todo esse sistema, como demonstrado pelas análises de TITAN.

A partir das sínteses dos resultados obtidos para a análise de TITAN (considerando-se que foram computadas mais de mil análises), pode-se concluir que ao longo do período de monitoramento considerado nesta síntese integrativa, as comunidades aquáticas dos setores ligados mais diretamente ao Rio Doce foram influenciadas mais negativamente pelas concentrações dos metais Al, Fe, Mn, Ni e Cr do que por outras variáveis ambientais, como temperatura, oxigênio ou nutrientes. Em outras palavras, isso significa que mais espécies registraram reduções em suas densidades do que aumentos na presença desses metais.

Os resultados aqui obtidos, apesar de preliminares, reforçam a ideia de que as comunidades aquáticas estão se alterando tanto temporal quanto espacialmente, uma vez que se observou simultaneamente aumentos nas abundâncias de algumas espécies e redução de outras em relação aos gradientes ambientais testados. Tal dinâmica foi relatada para praticamente todas as comunidades aquáticas amostradas no âmbito do PMBA/Fest deste RA2022, onde em geral, notou-se um acréscimo de espécies mais tolerantes ou invasoras em detrimento de espécies mais sensíveis ou nativas. Portanto, as correlações positivas encontradas para a análise de TITAN devem ser interpretadas com cautela, pois podem estar relacionadas a esse aumento nas abundâncias de espécies mais resistentes às condições ambientais impostas. Por isso, novas abordagens do TITAN com enfoque tanto nas identidades das espécies, nas estruturas tróficas, como na dinâmica temporal das comunidades deverão ser realizadas futuramente para a verificação de tendências de recuperação/resiliência das comunidades aquáticas estudadas como forma de se acessar o *status* de conservação na área abrangida pelo PMBA/Fest e que foi impactada pelo rompimento da Barragem de Fundão.

#### **4.7.2 Resposta da biodiversidade às variações físicas, químicas e biológicas nos ambientes.**

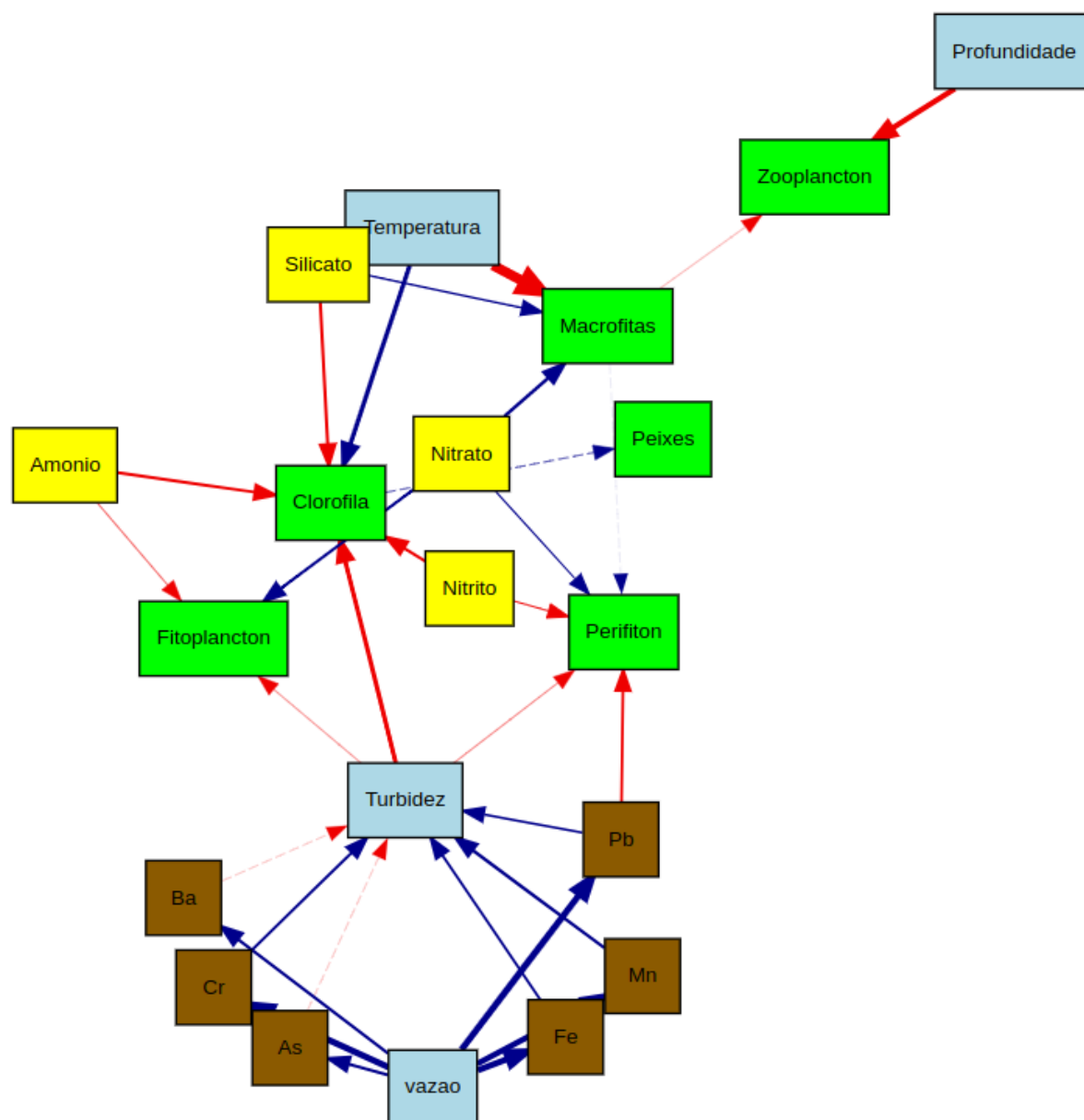
A abordagem de causalidade entre múltiplas variáveis, utilizada para compreender a relações entre os aspectos físicos, químicos e biológicos nos ambientes dulcícola e marinho, revelou a complexidade destes ambientes, já expressa na seção 4.3, através do: encadeamento de relações entre múltiplas variáveis, acoplamento entre diferentes matrizes (sedimento e água), resposta da biodiversidade às múltiplas forçantes e, principalmente, às muitas interações que ocorrem dentro de cada ecossistema. Foi utilizada a Modelagem de Equações Estruturais, já descrita anteriormente na seção 4.6.

A análise no ambiente dulcícola foi realizada separadamente para os ambientes lóticos e lênticos por causa de especificidades no funcionamento: os sistemas lóticos dependem muito de forçantes alóctones, enquanto nos sistemas lênticos, processos autóctones possuem grande importância no funcionamento destes sistemas. A análise do ambiente marinho foi realizada separadamente em quatro setores, previamente definidos por causa da diferença das condições meteoceanográficas que promovem variação nos padrões de circulação e conectividade e, por conseguinte, causam diferenças na biodiversidade. Assim, as análises foram realizadas nas regiões da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Foz do Rio Doce (Foz), Norte e Abrolhos.

Para o RA2022, os dados utilizados para operacionalização do modelo conceitual no ambiente dulcícola foram: vazão do Rio Doce, metais na água, limnológicos, riqueza de espécies de produtores primários (fitoplâncton, perifíton e macrófitas), riqueza de espécies de zooplâncton e riqueza de espécies de peixes. No ambiente lacustre, apenas a Estação 18 foi utilizada, por apresentar correspondência entre as informações. Para operacionalização do modelo conceitual no ambiente marinho, foram utilizados os seguintes dados: vazão, turbidez, IMS, clorofila-a, metais particulado e dissolvido, nutrientes, condições ambientais, sedimentologia, riqueza de espécies de fitoplâncton, zooplâncton, ictioplâncton e bentos.

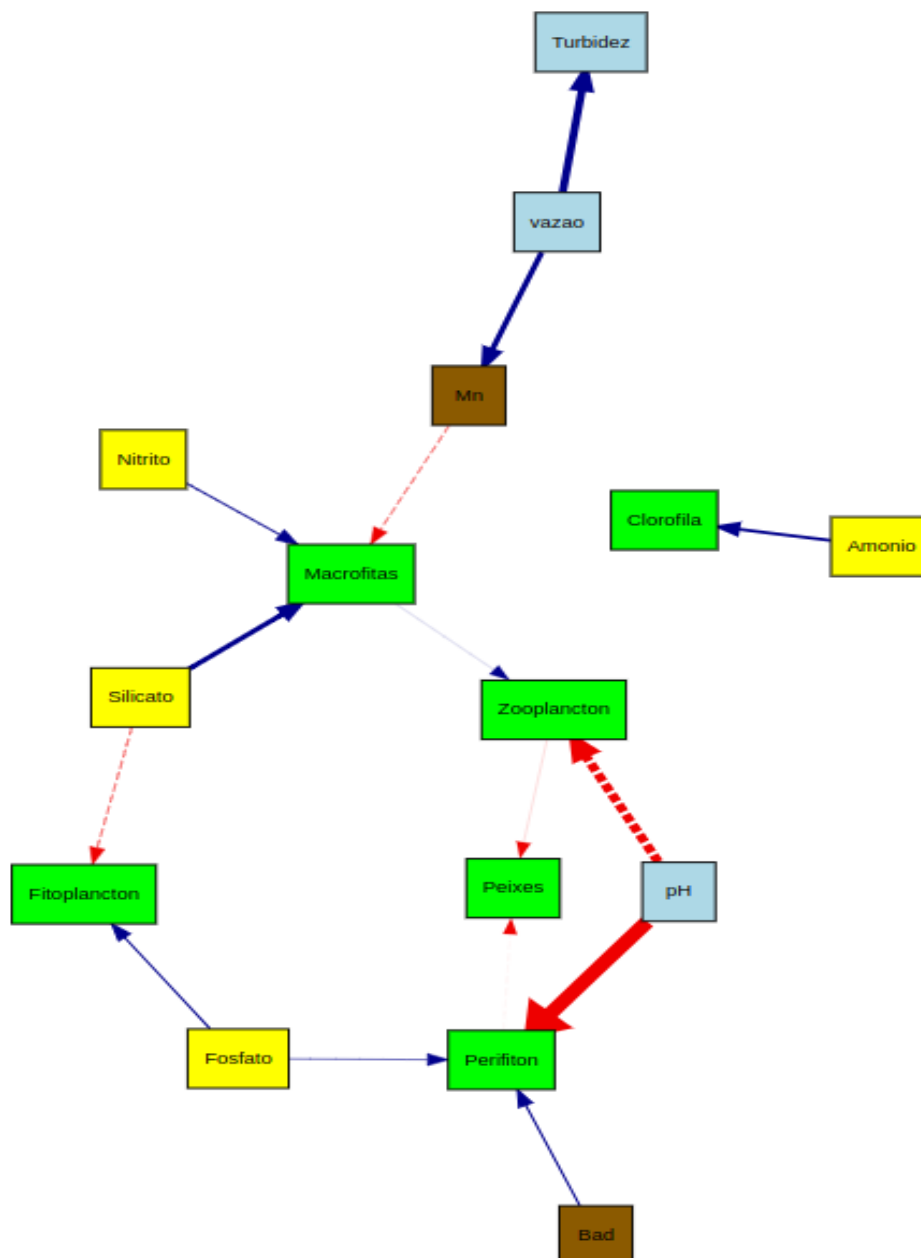
No sistema fluvial (Figura 39), a vazão aumentou a concentração de metais particulados na água (Fe, Cr, Pb, As, Ba e Mn). Como consequência, a turbidez da água também aumentou ( $R^2 = 0,76$ ), sendo influenciada positivamente pelas concentrações de Fe, Cr, Pb e Mn. A variação de turbidez teve relação inversamente proporcional aos produtores primários: concentração de clorofila-a, riqueza de espécies de fitoplâncton e perifíton. A clorofila-a, uma medida de produtividade primária, apresentou um  $R^2$  de 0,48 e foi, significativamente, determinada pelo aumento da temperatura e decréscimo das concentrações de  $\text{NO}_2$ , Si e  $\text{NH}_4$ . A riqueza de espécies de fitoplâncton foi negativamente influenciada pela turbidez e  $\text{NH}_4$  e positivamente influenciada pela concentração de  $\text{NO}_3$ . Esta variável apresentou um coeficiente de explicação ( $R^2$ ) de 0,50. Assim como a riqueza de fitoplâncton, a riqueza de perifíton foi influenciada negativamente pela turbidez e positivamente pelo  $\text{NO}_3$ . Além destas variáveis, a concentração de  $\text{NO}_2$  e Pb mostraram um efeito negativo sobre a riqueza de perifíton. Por outro lado, a riqueza de espécies de macrófitas foi um importante fator para o aumento da diversidade de perifíton. A riqueza de perifíton apresentou um coeficiente de determinação de 0,88 ( $R^2$ ). A riqueza de espécies de macrófitas foi negativamente influenciada pela temperatura e positivamente pela concentração de  $\text{NO}_3$  e Si. Esta variável mostrou um coeficiente de determinação de 0,58 ( $R^2$ ). A riqueza de espécies de zooplâncton esteve associada negativamente com a riqueza de espécies de macrófitas e profundidade e apresentou um coeficiente de determinação de 0,63 ( $R^2$ ).

Figura 39: Representação gráfica do resultado do modelo de equações estruturais nos ambientes fluviais. Setas azuis descrevem uma reação positiva e setas vermelhas uma relação negativa. A espessura da seta representa a importância do coeficiente angular.



No ambiente lântico analisado (Estação 18), a vazão teve efeito positivo sobre a turbidez e a concentração de Mn, explicando 0,63 ( $R^2$ ) e 0,34 ( $R^2$ ) da variabilidade, respectivamente. A concentração de Mn influenciou negativamente a riqueza de espécies de macrófitas aquáticas, a qual foi também positivamente influenciada pela concentração de  $\text{NO}_2$  e Si. A variabilidade da riqueza de espécies de macrófitas apresentou  $R^2$  de 0,63 ( $R^2$ ). A riqueza de macrófitas aquáticas influenciou positivamente a riqueza de espécies de zooplâncton e, juntamente com o efeito negativo do pH explicou 0,19 ( $R^2$ ) da variabilidade da riqueza de espécies do zooplâncton. A riqueza de fitoplâncton foi influenciada positivamente pela concentração de  $\text{PO}_4$ , apresentando 0,48 ( $R^2$ ) de explicação da variabilidade. Assim como o fitoplâncton, a riqueza de espécies de perifiton foi positivamente influenciada pela concentração de fósforo, que juntamente com pH e concentração de Ba,

Figura 40: Representação gráfica do resultado do modelo de equações estruturais no ambiente lacustre. Setas azuis descrevem uma reação positiva e setas vermelhas uma relação negativa. A espessura da seta representa a importância do coeficiente angular.



Relatório Anual 2022 – PMBA/Fest

associação negativa com a turbidez. A variabilidade da turbidez apresentou 0,39 ( $R^2$ ) de explicação, em função dos metais citados acima. Neste setor, a produtividade primária foi determinada ( $R^2$  0,41) positivamente pela concentração de amônia e turbidez, e negativamente pela concentração de Cd e temperatura. A riqueza de espécies de fitoplâncton apresentou apenas  $R^2$  de 0,29. E sua variabilidade foi diretamente proporcional à concentração de Cd particulado, Zi e  $PO_4$  dissolvidos, temperatura, turbidez e vazão. A riqueza de zooplâncton foi positivamente determinada pela temperatura e negativamente pela clorofila-a, turbidez, concentração de Fe e Cd dissolvidos. Esta variável apresentou um  $R^2$  de 0,90. A riqueza de ictioplâncton foi positivamente influenciada pela riqueza de zooplâncton e negativamente pela variação de clorofila-a e vazão, mostrando 0,96 ( $R^2$ ) de explicação de sua variabilidade. A riqueza de bentos foi influenciada positivamente pela percentagem de cascalho e concentração de Cd particulado e negativamente pela concentração de Vp e Ni ( $R^2 = 0,58$ ).

No setor Foz, a vazão também foi responsável pelo aumento de metais particulados e dissolvidos na coluna d'água. Exceto, a concentração de Cu dissolvido, que apresentou uma relação negativa com a vazão (Figura 42). Neste setor, alguns metais particulados e dissolvidos apresentaram relação diretamente (Fe e Ba dissolvidos e V e Cu particulados) e inversamente (Pb e Mn dissolvidos e Cr particulado) proporcional a turbidez, explicando 0,44 ( $R^2$ ) de sua variabilidade. A biomassa dos produtores primários foi positivamente associada à turbidez e a concentração de ferro, e negativamente associada com a temperatura. A variabilidade da clorofila-a apresentou 0,39 ( $R^2$ ) de explicação. A riqueza de espécies de fitoplâncton foi positivamente influenciada pela temperatura e concentração de Cr dissolvidos; e negativamente pela concentração de Fe e Zn dissolvidos. Em geral, a riqueza de zooplâncton apresentou uma associação negativa com metais particulados (principalmente Fe, V e Cd), vazão e clorofila-a, as quais explicaram 0,76 ( $R^2$ ) da variabilidade dos dados. As concentrações de Cr e Ba particulados e riqueza de espécies de zooplâncton influenciaram positivamente a riqueza de espécies de ictioplâncton; enquanto Mn e Cu influenciaram negativamente. A variação da riqueza de espécies de ictioplâncton apresentou uma explicação de 0,51 ( $R^2$ ). A riqueza de espécies de bentos foi positivamente associada a percentagem de cascalho, riqueza de espécies de ictioplâncton e concentração de Ba particulado; e negativamente associada com concentração de Ni e Mn particulados. Estas variáveis explicaram 0,87 ( $R^2$ ) da variabilidade dos dados.



Figura 41: Representação gráfica do resultado do modelo de equações estruturais no setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz. Setas azuis descrevem uma reação positiva e setas vermelhas uma relação negativa. A espessura da seta representa a importância do coeficiente angular.

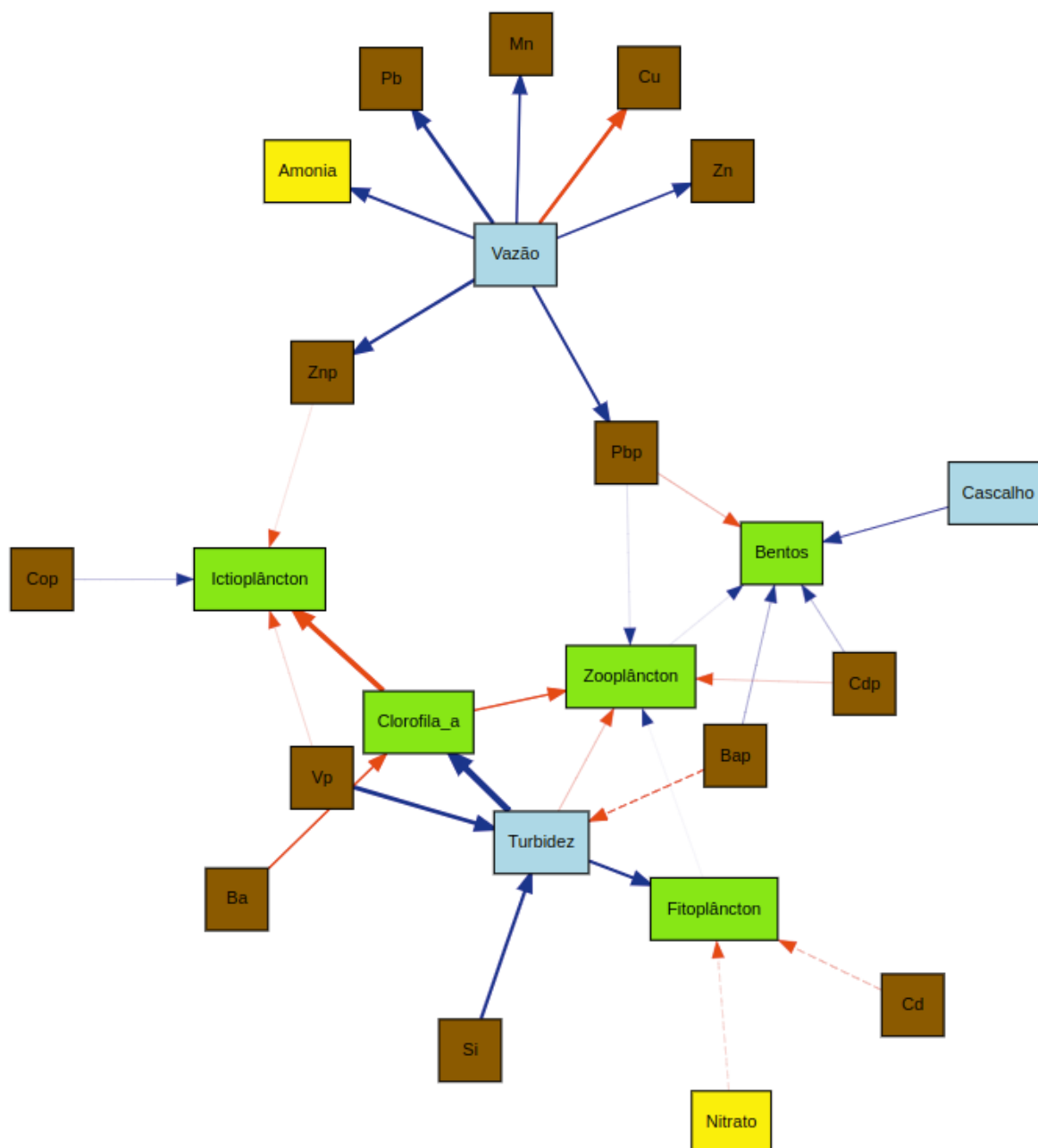
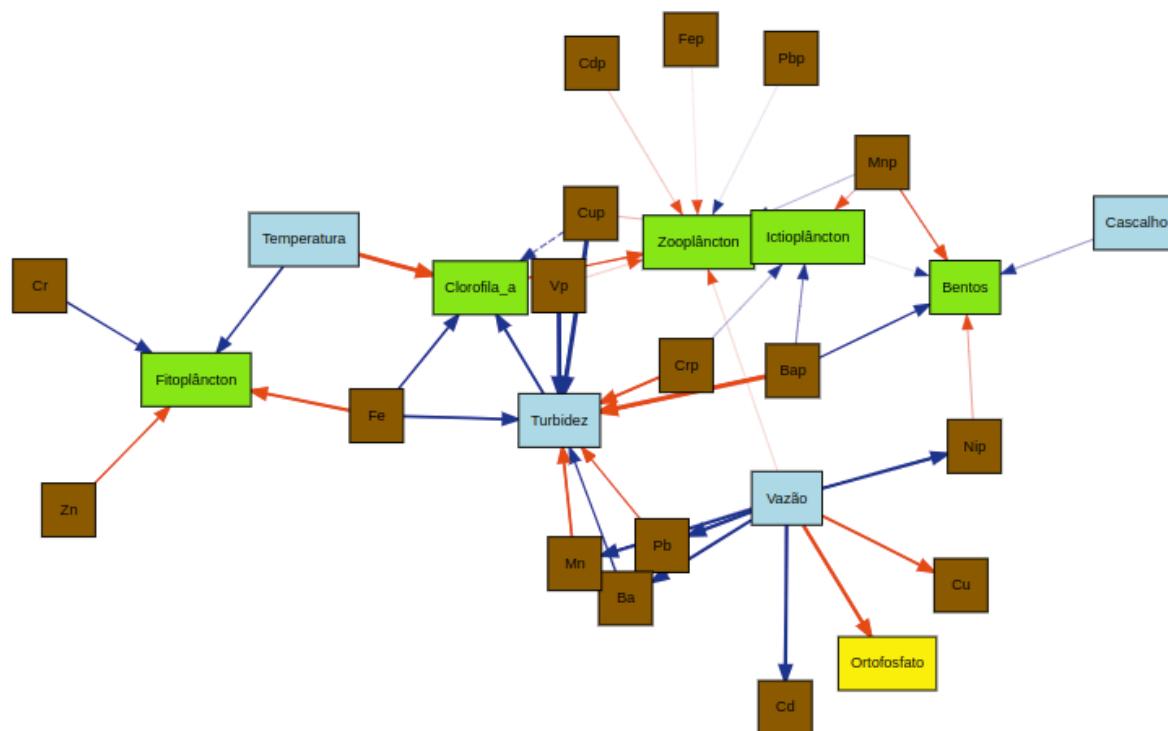
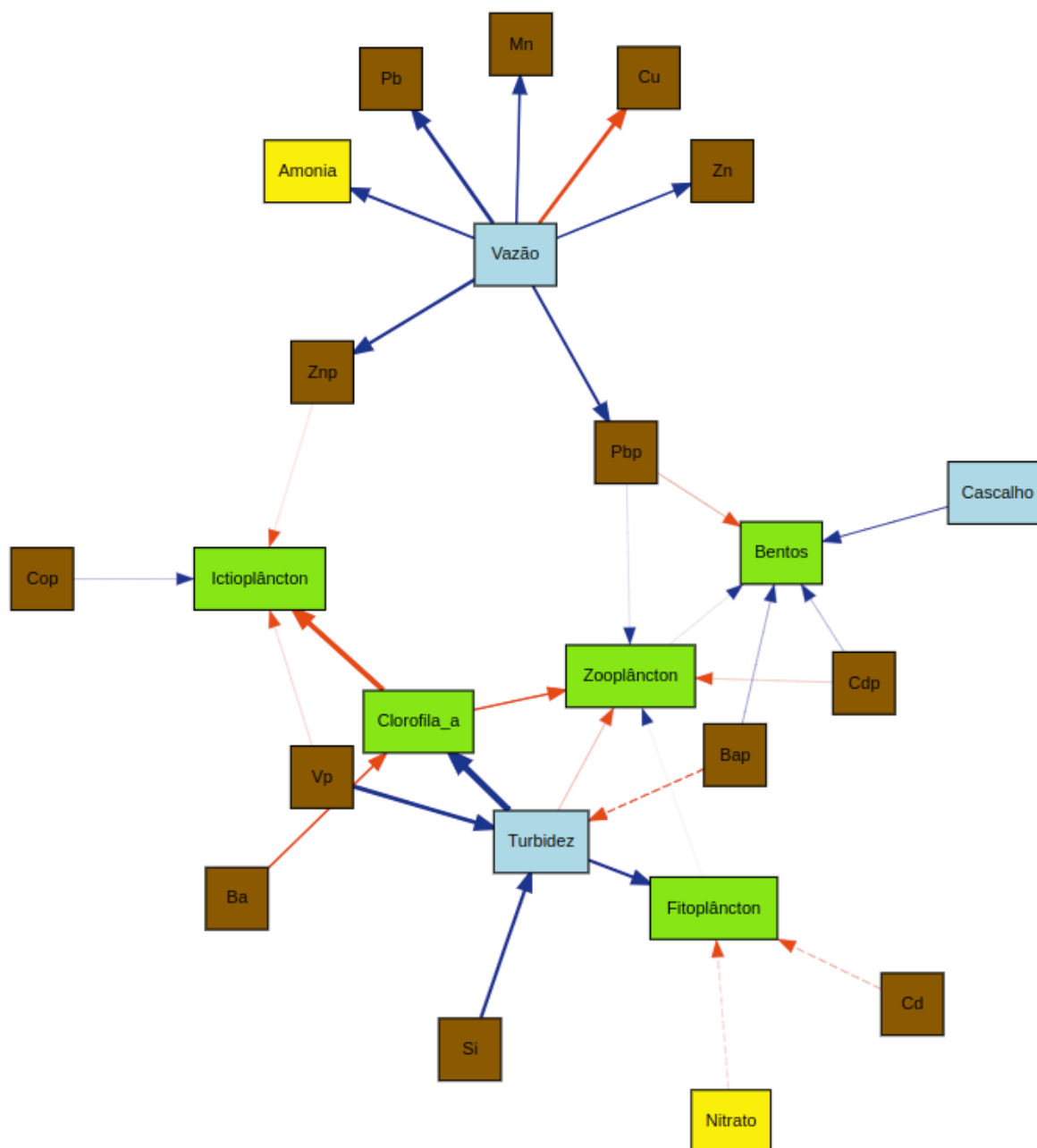


Figura 42: Representação gráfica do resultado do modelo de equações estruturais no setor Foz do Rio Doce. Setas azuis descrevem uma reação positiva e setas vermelhas uma relação negativa. A espessura da seta representa a importância do coeficiente angular.



No setor Norte, a vazão influenciou positivamente as concentrações de Pb, Zn e Mn e Amônia (Figura 43). As concentrações de V e Ba particulados e silicatos foram determinantes para a variabilidade da turbidez ( $R^2$  0,41). A biomassa dos produtores primários foi positivamente influenciada pela turbidez e negativamente influenciada pela concentração de Ba dissolvido. A variabilidade desta variável foi explicada em 0,57 ( $R^2$ ), apenas pelas duas variáveis citadas. Neste setor, a riqueza de espécies de fitoplâncton também foi positivamente influenciada pela turbidez. Mas, negativamente pelas concentrações de Cd e  $\text{NO}_3$ . A variabilidade da riqueza de fitoplâncton foi 0,13 ( $R^2$ ). A riqueza de espécies de zooplâncton foi positivamente associada com a riqueza de espécies de fitoplâncton; mas, foi negativamente associada com turbidez, clorofila-a e concentração de Cd. Estas variáveis explicaram 0,70 ( $R^2$ ) da variabilidade da riqueza de espécies de zooplâncton. A riqueza de espécies de ictioplâncton foi negativamente influenciada pelas concentrações de Zn e V particulados e clorofila-a. Estas variáveis explicaram 0,69 ( $R^2$ ) da variação da riqueza de espécies de ictioplâncton. A riqueza de espécies de bentos foi negativamente afetada pela concentração de Pb particulado e positivamente com as concentrações de Ba e Cd particulados, riqueza de espécies de zooplâncton e percentagem de cascalho. Um total de 0,92 ( $R^2$ ) da variação da riqueza de bentos foi explicada por estas variáveis.

Figura 43: Representação gráfica do resultado do modelo de equações estruturais no setor Norte. Setas azuis descrevem uma reação positiva e setas vermelhas uma relação negativa. A espessura da seta representa a importância do coeficiente angular.



Foi possível registrar múltiplas relações entre os componentes abióticos e bióticos que representavam os modelos conceituais de funcionamento dos ambientes e de dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão (seção 4.3). Além disso, a riqueza de espécies (uma das formas de mensurar a biodiversidade) foi altamente dependente das variações das condições e recursos, corroborando com a expectativas que do ponto de vista ecossistêmico, os ambientes funcionam integrando todos os seus componentes. Importante ressaltar, que o setor fluvial do Rio Doce, o Setor Foz e Norte do Rio Doce (assim como indicado pela seção 4.7.1), foram os setores que apresentaram maiores indícios negativos de efeitos do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão sobre a riqueza de espécies e funcionamento dos ecossistemas.

## 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

### 4.8.1 Considerações finais

Essa síntese teórica e analítica de dados demonstrou que relações causa-efeito são dinâmicas e respondem a processos específicos. Como ponto de partida, foi evidenciado que os impactos provocados por rompimentos de barragens de rejeitos em que há a conexão do ambiente dulcícola com os ambientes costeiro e marinho, são eventos raros no histórico global, e que ocasionam uma cadeia de impactos complexa e desafiadora. Assim, as pesquisas sobre essa temática são principalmente voltadas aos ambientes, com um volume menor de trabalhos de integração e conectividade entre ambientes. De fato, tanto as pesquisas globais quanto as nacionais se agruparam em divisões semelhantes às grandes áreas do conhecimento: geologia, hidrografia, química e ecologia, como historicamente tem sido a tradição da pesquisa no Brasil e no mundo. Este quadro é esperado, uma vez que a integração é uma etapa posterior ao desenvolvimento do arcabouço específico.

A partir do levantamento sistemático da literatura sobre acidentes com rompimentos de barragens e a análise dos painéis e seminários desenvolvidos pelos temas dentro do PMBA/Fest, foi descrito o modelo conceitual espaço-temporal de dispersão do material oriundo da Barragem de Fundão dentro da Bacia do Rio Doce (porção capixaba) e na região marinha e costeira adjacente. A construção deste modelo permitiu: a) mostrar as principais conectividades e inter-relações ecológicas observadas no âmbito do PMBA/Fest; b) priorizar os principais processos causa-consequência na integração analítica das matrizes de água, sedimento e biota, c) identificar quais indicadores da presença do material oriundo da Barragem de Fundão permitem uma descrição mecanicista da deposição e dispersão desse material e seu efeito em vias internas, a nível celular, individual, populações, comunidades aquáticas e na dinâmica da biodiversidade. A partir dos modelos conceituais e da avaliação analítica das mudanças no uso e cobertura da terra na bacia do Rio Doce entre 1985 e 2021, foi possível perceber que a bacia do Rio Doce passou por fortes mudanças no uso e cobertura da terra antes do rompimento, entretanto, também ocorreram transformações depois do rompimento (2015-2021). Também foi identificado um aumento das concentrações do material particulado em suspensão, bem como a sua expressão espacial depois do rompimento, principalmente durante o período chuvoso.

Depois da análise de paisagem, foram demonstrados como os processos hidro-meteoceanográficos que atuam na região impactada pelo rompimento da Barragem de Fundão alteraram os indicadores de qualidade ambiental da coluna d'água/sedimento, podendo, consequentemente, acarretar em modificações nas comunidades aquáticas. Através dessas análises foi possível corroborar que os processos descritos no modelo conceitual dulcícola e marinho determinam o padrão de deposição e dispersão nos ambientes e que cada um possui comportamento distinto dos índices de qualidade ambiental (abióticos) e fitoplâncton/zooplâncton (bióticos). Assim, se enfatiza a importância de avaliarmos esses processos e parâmetros nas vias de desfecho adverso e no impacto observado ao nível de ecossistema, possibilitando uma resposta desde o micro até a macro escala.

A análise integrativa avançou mostrando e quantificando os modelos conceituais de vias internas, a nível celular e individual, que levam a desfechos adversos de interesse regulatório. De maneira geral,

dano oxidativo (LPO) avaliado no plâncton mostrou-se consistentemente relacionado à presença dos metais na coluna d'água, bioacumulados nos organismos, dando suporte ao modelo conceitual e demonstrando sua abrangência aos diferentes ambientes e setores. Adicionalmente, a via trófica mostrou-se uma fonte de exposição forte e significativa, uma vez que os metais bioacumulados no zooplâncton e sua resposta bioquímica estiveram relacionados a concentração de metais bioacumulados do fitoplâncton. Portanto, a construção e quantificação das vias internas mostrou-se uma ferramenta importante que fornece suporte conceitual e analítico ao PMBA/Fest, bem como relaciona-se aos resultados aqui apresentados.

Após a análise no âmbito dos indivíduos, foi demonstrado que os impactos do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão atingiram as comunidades aquáticas. De forma geral, se destacaram os impactos negativos causados pelos metais particulados Al, Fe, Mn, Ni e Cr sobre as comunidades aquáticas nos setores mais diretamente influenciados pelo aporte do Rio Doce, sendo as comunidades bentônicas tanto do ambiente dulcícola quanto do ambiente marinho as mais afetadas negativamente por estes metais.

Por fim, foi demonstrado como as variações físicas, químicas e biológicas têm determinado a dinâmica da biodiversidade na Bacia do Rio Doce (porção capixaba) e na região marinha e costeira adjacente. De uma forma geral, a dinâmica da biodiversidade no sistema fluvial e na região marinha sujeita à foz do Rio Doce mostrou responder às forçantes que atuam nos ambientes e que controlam o padrão de deposição, ressuspensão e transporte dos indicadores do material oriundo do rompimento de Fundão, como por exemplo o aumento da concentração de metais e a maior disponibilidade de nutrientes na coluna de água.

Os modelos de equações estruturais foram avaliados sob duas perspectivas: estimacão global e estimacão local (LEF CHECK, 2016). Na estimacão global, o modelo é avaliado integralmente e na estimacão local cada equacão é resolvida separadamente. Assim, no âmbito global, os resultados apresentados necessitam de uma série temporal de dados maior para melhorar a qualidade do modelo integrativo. Uma rápida visualizacão da representacão gráfica permite identificar explicitamente muitos parâmetros, aumentando o número de graus de liberdade do modelo global e diminuindo o p-valor em relacão ao ajuste. Nas avaliaçoes futuras, isto será melhorado com o aumento do N amostral e simplificacão dos modelos. Por outro lado, a estimacão local permite testar individualmente cada elo da equacão estrutural, o que foi fundamental para representar a significância das relaçoes descritas nesta seçao.

Finalmente, considerando os termos de referênci que indicam que esforços devem ser envidados de modo a retornar o sistema a seu estado original ou melhorá-lo, uma visao de futuro pode ser inferida deste primeiro relatório. Soluçoes baseadas na natureza, como manejo de solo e reflorestamento, têm o potencial de controlar a intensidade dos impactos compreendidos e sua propagacão na paisagem, aumentando retençao e suavizando fluxos de forma a evitar pulsos extremos. Iniciativas de recuperaçao e restauracão, no entanto, devem se basear em modelos complexos, que levem em consideracão a hidrologia e seus processos de conectividade, incluindo retençao e dispersao, e a



consequência hidrodinâmica da conectividade com os ambientes costeiros e marinhos. Uma vez implementada, a efetividade de iniciativas de recuperação e restauração deve então ser monitorada e reavaliada. O presente relatório apresenta elementos em construção referentes a diferentes níveis analíticos e dimensionais complementares, que integrados buscam contribuir na visão ecossistêmica da paisagem afetada.

#### **4.8.2 Perspectivas futuras**

Aprimoramentos no modelo conceitual e analítico do ambiente dulcícola e marinho, integrando respostas da biodiversidade decorrentes da presença do material oriundo do rompimento ou de processos naturais em diferentes escalas e compartimentos. Seguem a seguir alguns produtos e abordagens que ainda estão em desenvolvimento considerando a abordagem integrada dos ambientes.

- i) Inclusão e descrição de modelos conceituais e analíticos para o ambiente costeiro.
- ii) Avanços no entendimento dos processos físicos, biogeoquímicos e interação entre os compartimentos nos três ambientes.
- iii) Elaboração e descrição de modelos conceituais e analíticos integrativos dos três ambientes, incluindo modelos com níveis tróficos e ecológicos.
- iv) Visualização da escala de tempo nos principais processos e cadeias de impacto.
- v) Análises integradas entre os ambientes (dulcícola, marinho e costeiro) considerando mudanças na resiliência da bacia e incorporando a variabilidade climática.
- vi) Construção de variáveis compostas, que sintetizam a presença de todos os metais no ambiente externo e bioacumulados, para aumentar a complexidade do modelo e nosso entendimento das relações.
- vii) Sugerir medidas de conservação e/ou recuperação a serem implementadas nos diferentes ecossistemas.

## 5 REFERÊNCIAS

- ALBINO, J., CONTI NETO, N., OLIVEIRA, T. C. A. The beaches of Espírito Santo. In: Short, A.D., Klein, A.H.F. (Eds.) *Brazilian Beach Systems*. Springer: Sydney. p. 333–361, 2016.
- ALBINO, J.; GIRARDI, G; NASCIMENTO, A.K. Atlas de erosão e progradação costeira do litoral do Espírito Santo. In: Muehe, D. (Org), *Atlas de erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: MMA, 2006, p. 227-264.
- ALBINO, K.; SUGUIO, K. 2010. Sedimentation processes and beach morphodynamics active at the Doce River mouth, Espírito Santo State, Brazil. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*. V. 82. n.4. p. 1031-104.
- ANKLEY, G. T.; BENNETT, R. S.; ERICKSON, R. J.; HOFF, D. J.; HORNUNG, M. W.; JOHNSON, R. D.; MOUNT, D. R.; NICHOLS, J. W., RUSSOM, C. L.; SCHMIEDER, P. K.; SERRRANO, J. A.; TIETGE, J. E.; VILLENEUVE, D. L. Adverse outcome pathways: A conceptual framework to support ecotoxicology research and risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(3), 730–741, 2010. <https://doi.org/10.1002/etc.34>
- ANKLEY, G. T.; EDWARDS, S. W. The adverse outcome pathway: A multifaceted framework supporting 21st century toxicology. *Toxicology*, 9, 1–7, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2018.03.004>
- BAKER, M. E.; KING, R. S. A new method for identifying and interpreting biodiversity and ecological community thresholds. *Methods in Ecology and Evolution*. 1, 25–37, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00007.x>
- BAKER, M. E.; KING, R. S.; KAHLE, D. 'TITAN2' – Threshold Indicator Taxa Analysis. R package, 2022.
- BASTOS, A. C., ET AL. Monitoramento da influência da pluma do Rio Doce após o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana/MG - Novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados, Departamento De Oceanografia, Centro De Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- BASTOS, A.C.; QUARESMA, V.S.; MARANGONI, M.B.; D'AGOSTINI, D.P.; BOURGUIGNON, S.N.; CETTO, P.H.; SILVA, A.E.; FILHO, G.M.A.; MOURA, R.L.; COLLINS, M. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: a synthesis from a mixed siliciclasticcarbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *J. S. Am. Earth Sci.* 12, 2015.
- BATES, D.; MAECHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48, 2015. doi:10.18637/jss.v067.i01.
- BECANA, M.; MORAN, J.F.; INTURBE-ORMAETXE, I. 1998. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. *Plant and Soil*, v.201, p.137–147.
- BEVITÓRIO, L. Z.; DA SILVA, N. G.; PIROVANI, J. C. M.; MARQUES, J. A.; VIEIRA, C. E. D.; ZEBRAL, Y. D.; DAMASCENO, E. M.; LOPES, L. L. R.; DE SANT'ANA, L. P.; MARUBE, L. C.; DA COSTA, S. R.;

MARTINS, C. D. M. G.; SANDRINI, J. Z.; SOUZA, M. M.; BIANCHINI, A.; DO VALE-OLIVEIRA, M. Impacts of tailings of Fundão dam (Brazil) rupture on marine fish: Metals bioaccumulation and physiological responses. *Marine Pollution Bulletin*, 177, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113511>

BIANCHI, T. Biogeochemistry of estuaries. New York, Oxford University Press.2007.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; DOMINGUEZ, J.M.L.; MARTIN, L.; SILVA, I.R.; DE-MEDEIROS, K. Past and current sediment dispersion pattern estimates through numerical modeling of wave climate: an example of the Holocene delta of the Doce River, Espírito Santo, Brazil. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências*. V. 79. n.2. p. 33-341.2007.

BONECKER, A. C. T.; CASTRO, M. S. D.; COSTA, P. G.; BIANCHINI, A.; BONECKER, S. L. C. Larval fish assemblages of the coastal area affected by the tailings of the collapsed dam in southeast Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, 32, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100848>

BONECKER, A. C. T.; MENEZES, B. S.; DIAS JUNIOR, C.; SILVA, C. A.; ANCONA, C. M.; DIAS, C. D. O.; LONGHINI, C. M.; COSTA, E. S.; SÁ, F.; LÁZARO, G. C. S.; MILL, G. N.; ROCHA, G. M.; LEMOS, K. D. N.; DA CONCEIÇÃO, L. R.; DEMONER, L. E.; FERNANDES, L. F. L.; CASTRO, M. S. D.; ALVES, M. M.; LAINO, P. D. S.; BONECKER, S. L. C. An integrated study of the plankton community after four years of Fundão dam disaster. *Science of the Total Environment*, 806, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.15061>

BOURGUIGNON, S.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; VIEIRA, F. V.; PINHEIRO, H.; AMADO-FILHO, G.; DE MOURA, R.; TEIXEIRA, J. Seabed Morphology and Sedimentary Regimes defining Fishing Grounds along the Eastern Brazilian Shelf. *Geosciences*, v. 8, p. 91, 2018.

BUCHMAN, M.F. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Screening Quick Reference Tables. NOAA OR&R Report 08-1, Office of Response and Restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, 34 p.2008.

CAGNIN, R. C.; LONGHINI, C. M.; COSTA, E. S.; DA SILVA, C.A; ZORZAL-ALMEIDA, S.; MENDES, D.; PASA, V. M. D.; BARBEIRA, P. J. S.; DELAZARI-BARROSO, A.; GÜCKER, B.; BOËCHAT, I. G.; LIMA, A. T.; RODRIGUES NETO, R.; SÁ, F.; BARROSO, G. F. Macronutrients and dissolved iron in a land-ocean approach: Influences of contamination by ore tailings in Southeastern Brazil. *Frontiers in Marine Science*, 10. 2022. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.990809>

CAO, Z.; DUA, H.; FENG, L.; MA, R.; XUE, K. Climate and human induced changes in suspended particulate matter over Lake Hongze on short and long timescales. *Remote Sens. Environ.* 192, 98–113, 2017.

CARUSI, A.; DAVIES, M. R.; DE GRANDIS, G.; ESCHER, B. I.; HODGES, G.; LEUNG, K. M. Y.; WHELAN, M.; WILLETT, C.; ANKLEY, G. T. Harvesting the promise of AOPs: An assessment and recommendations. *Science of the Total Environment*, 628:629, 1542–1556, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.015>

CHAKRABORTY, S. B. Non-Essential Heavy Metals as Endocrine Disruptors: Evaluating Impact on Reproduction in Teleosts. *Proceedings of the Zoological Society*, 74(4), 417–431, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12595-021-00399-x>

COIMBRA, K. T. O.; ALCÂNTARA, E.; DE SOUZA FILHO, C. R. An assessment of natural and manmade hazard effects on the underwater light field of the Doce River continental shelf. *Science of the Total Environment*, 685, 1087-1096. 2019.

CONDINI, M. V.; PICHLER, H. A.; DE OLIVEIRA-FILHO, R. R.; CATTANI, A. P.; ANDRADES, R.; VILAR, C. C.; JOYEUX, J. C.; SOETH, M.; DE BIASI, J. B.; EGGERTSEN, L.; DIAS, R.; HACKRADT, C. W.; FÉLIX-HACKRADT, F. C.; CHIQUIERI, J.; GARCIA, A. M.; HOSTIM-SILVA, M. Marine fish assemblages of Eastern Brazil: An update after the world's largest mining disaster and suggestions of functional groups for biomonitoring long-lasting effects. *Science of the Total Environment*, 807, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150987>

COORDENAÇÃO DE PROJETOS, PESQUISAS E ESTUDOS TECNOLÓGICOS (COPPETEC). Sobre sedimentos depositados na zona costeira adjacente à foz do Rio Doce, após a ruptura da barragem da Samarco em 05/11/2015. P5 – Relatório de processos sedimentológicos conexos ao Rio Doce e aos rios adjacentes – Etapa 3, 2019.

COSTA, C.S.B.; SEELIGER, U.; CORDAZZO, C.V. Aspectos da ecologia populacional de *Panicum racemosum* (Spreng) nas dunas costeiras do rio Grande do Sul, Brasil. In: Lacerda, L.D.de; Araújo, D.S.D.de; Cerqueira, R.; Turcq, B. (Orgs), *Restinga: origem, estrutura e processos*. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 1984, p.395-411.

COSTA, R. G.; ARAÚJO, C. F. S.; Bah, A. H. F.; GOMES-JUNIOR, E. A.; RODRIGUES, Y. J. M.; MENEZES-FILHO, J. A. Lead in mangrove root crab (*Goniopsis cruentata*) and risk assessment due to exposure for estuarine villagers. *Food Additives and Contaminants*. B v. 11(4), 293e301, 2018. <https://doi.org/10.1080/19393210.2018.1504824>

CPRM: MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO DOCE RELATÓRIO 01: Acompanhamento da onda de cheia Primeira Campanha de Campo, 2015. *Frontiers in Marine Science*. 9:990809, 2022. doi: 10.3389/fmars.2022.990809

D'ÁDDAZIO, V.; TOGNELLA, M.M.P.; FERNANDES, A.A.; FALQUETO, A.R.; ROSA, M.B.; GONTIJO, I., OLIVEIRA, M.A. Impact of Metal Accumulation on Phtosynthetic Pigments, Carbon Assimilation, and Oxidative Metabolism in Mangroves Affected by the Fundão Dam Tailings Plume. *Coasts* (2023), 3, 135-144. *Coasts*, 3, 125–144. 2023. <https://doi.org/10.3390/coasts3020008>.

DA SILVA, C. C.; KLEIN, R. D.; BARCAROLLI, I. F.; BIANCHINI, A. Metal contamination as a possible etiology of fibropapillomatosis in juvenile female green sea turtles *Chelonia mydas* from the southern Atlantic Ocean. *Aquatic Toxicology*, 170, 42–51, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2015.11.007>

DAROS, F. A.; CONDINI, M. V.; ALTAFIN, J. P.; OLIVEIRA F. F.; HOSTIM-SILVA, M. Fish otolith microchemistry as a biomarker of the world's largest mining disaster. *Science of the Total Environment*, 807, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151780>

DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L. Esquemas evolutivos da sedimentação quaternária nas feições deltaicas dos rios São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*. V. 11. n. 4. p. 227-237. 1981.

DOMINGUEZ, J.M.L.; BITTENCOURT, A.C.S.P.; MARTIN, L. O Papel Da Deriva Litorânea de Sedimentos Arenosos na Construção Das Planícies Costeiras Associadas às Desembocaduras dos Rios São Francisco (SE-AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*. V. 13. n.2. p. 98-105. 1983.

DU, J.; HESP, P.A. Salt spray distribution and its impact on vegetation zonation on coastal dunes: a review. *Estuaries and Coasts*, v. 43, p.1885–1907. 2020.

DUARTE, L. F.; SOUZA, C. A.; PEREIRA, C. D. S.; PINHEIRO, M. A. A. Metal toxicity assessment by sentinel species of mangroves: in situ case study integrating chemical and biomarkers analyses. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* V. 145, 367e376, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.051>

DUARTE, L. F.; BLASCO, J.; CATHARINO, M. G. M.; MOREIRA, E. G.; TROMBINI, C.; NOBRE, C. R., & PEREIRA, C. D. S. Lead toxicity on a sentinel species subpopulation inhabiting mangroves with different status conservation. *Chemosphere*, v. 251, p. 126394, 2020.

EKOS. Análise Crítica (peer-review) da Matriz de Resultados do Relatório Anual 2020 do PMBA/Fest-RRDM (RT-36F RRDM/DEZ 20). Peer-reviewer especialista em avaliação de impacto ambiental: Alberto Fonseca. Ordem de Serviço nº 37, 2021.

FERNÁNDEZ-SEVERINI, M. D.; HOFFMEYER, M. S.; MARCOVECCHIO, J. E. Heavy metals concentrations in zooplankton and suspended particulate matter in a southwestern Atlantic temperate estuary (Argentina). *Environmental monitoring and assessment*, 185, 1495-1513, 2013.

FIGUEIREDO, M.D.; LAMEIRAS, F.S.; ARDISSON, J.D.; ARAÚJO, M. H.; TEIXEIRA, A. P. C. Tailings from Fundão tragedy: physical–chemical properties of the material that remains by Candonga dam. *Integr Environ Assess Manag* 1–7, 2020.

FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, v. 29, p.511-66. 1978.

GANGLOFF, A.; VERNEY, R.; DOXARAN, D.; ODY, A.; ESTOURNEL, C. Investigating Rhône River plume (Gulf of Lions, France) dynamics using metrics analysis from the MERIS 300m Ocean Color archive (2002–2012). *Cont. Shelf Res.* 144, 98–111, 2017.

GLASSON J, THERIVEL R, CHADWICK A. Introduction to Environmental Impact Assessment. London and New York: Routledge; 2005.



GOMES, L. E.; CORREA, L. B.; SÁ, F.; NETO, R. R.; BERNARDINO, A. F. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 120, 28–36, 2017.

GROH, K. J.; CARVALHO, R. N.; CHIPMAN, J. K.; DENSLOW, N. D.; HALDER, M.; MURPHY, C. A.; ROELOFS, D.; ROLAKI, A.; SCHIRMER, K.; WATANABE, K. H. Development and application of the adverse outcome pathway framework for understanding and predicting chronic toxicity: II. A focus on growth impairment in fish. *Chemosphere*, 120, 778–792, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.10.006>

GUO, K., CHENG, C., CHEN, L., XIE, J., LI, S., HE, S. & XIAO, F. Application of *Deinococcus radiodurans* in the treatment of environmental pollution by heavy metals and radionuclides. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 331, 655–664, 10.1007/s10967-021-08141-9. 2022.

GUPTA, S. K.; SINGH, J. Evaluation of mollusc as sensitive indicator of heavy metal pollution in aquatic system: a review. *IIOAB Journal*, 2 (1), 49-57, 2011.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M.; DE REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; DE SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*, 7(1), 10706, 2017.

HESP, P.A. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, v.48, p.245–268. 2002.

JACKSON, D. W. T., COOPER, J.A.G. Geological control on beach form: accommodation space and contemporary dynamics. *Journal of Coastal Research*. Special Issue No. 56. Proceeding of the 10th International Coastal Symposium ICS 2009, v. I, p. 69-72, 2009. DOI <http://doi.org/10.2112/1551-5036-85.sp1>

KANG, L.; HE, Y.; DAI, L.; HE, Q.; AI, H.; YANG, G.; LIU M.; JIANG, W.; LI, H. Interactions between suspended particulate matter and algal cells contributed to the reconstruction of phytoplankton communities in turbulent waters. *Water Research*, 149, 251-262, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.053>

KARR, J.R. Seven foundations of Biological Monitoring and Assessment. *Biologia Ambientale*, 20:7-18, 2006.

KEESSTRA, S.; NUNES, J.; NOVARA, A.; FINGER, D.; AVELAR, D.; KALANTARI, Z.; CERDÀ, A. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 610, 997-1009, 2018.

KENDALL, M. G.. *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London, 1975.

KUKI, K.N.; OLIVA, M.A.; PEREIRA, E.G. Iron ore industry emissions as a potential ecological risk factor for tropical coastal vegetation. *Environmental Management*, v.42, p.111–121. 2008.

KUMAR, N.; KRISHNANI, K. K.; SINGH, N. P. Oxidative and Cellular Metabolic Stress of Fish: An Appealing Tool for Biomonitoring of Metal Contamination in the Kolkata Wetland, a Ramsar Site.

Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 76(3), 469–482, 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s00244-018-00587-5>

LANCHARD, F.; LELOC'K, F.; HILY C.; BOUCHER J. Fishing effects on diversity, size and community structure of the benthic invertebrate and fish megafauna on the Bay of Biscay coast of France. Marine Ecology Progress Series, v. 280, p. 249-260, 2004.

LEACH, C.B.; WEITZMAN, B.P.; BODKIN, J.L.; ESLER, D.; ESSLINGER, G.G.; KLOECKER, K.A.; MONSON, D.H.; WOMBLE, J.N.; HOOTEN, M.B. Revealing the extent of sea otter impacts on bivalve prey through multi-trophic monitoring and mechanistic models. Journal of Animal Ecology, 00, 1– 14, 2023.

LEFCHECK, J. S. piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. Methods in Ecology and Evolution, 7(5), 573–579, 2016. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>

LEMONS, A. T.; OSADCHIEV, A.; MAZZINI, P. L.; MILL, G. N.; FONSECA, S. A.; GHISOLFI, R. D. Spreading and accumulation of river-borne sediments in the coastal ocean after the environmental disaster at the Doce River in Brazil. Ocean and Coastal Research, 70, 2022.

LEOPOLD L.B, CLARKE F.E., HANSHAW B.B., BALSLEY J.R. A procedure for evaluating environmental impact. Geological Survey Circular, Washington, n. 645, p. 1-16. 1971.

LIMA, K.O.O; TOGNELLA, M.M.P.; SCHMILDT, A.; SCHMIDT, E.R.; PORTO, L.A.; ALMEIDA FILHO, E.; VIEIRAS, S.F.R.; BRITES JÚNIOR, N.V.; FARIAS, H.C.E.; TOSTA, V.C.; GONTIJO, I. Baseline Study of *Ucides cordatus* Populations and Contribution to the Management of These Social and Economic Resources. Wetlands ,43:28. 2023. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01676-5>.

LIU, C.; WANG, R.; GAO, H.; WU, X.; YIN, D. Transport of trace metals and their bioaccumulation in zooplankton from Changjiang (Yangtze River) to the East China Sea. Science of The Total Environment, 851, 158156, 2022.

LONGHINI, C. M., RODRIGUES, S.K., COSTA, E.S., et al. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical approach. Science of The Total Environment, v. 803, p. 149883, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149883.

LONGHINI, C. M.; RODRIGUES, S. K.; COSTA, E. S.; DA SILVA, C. A.; CAGNIN, R. C.; GRIPP, M.; LEHRBACK, B. D.; MILL, G. N.; DE OLIVEIRA, E. M. C.; HERMOGENES, C. C. M.; RODRIGUES, D. G. F.; DAVID, A. M.; GRAMLICH, K. C.; BISI JÚNIOR, R. C.; GOMES, A. A. P.; DA SILVA FILHO, J. P.; ALMEIDA, J. F.; SOUZA, K. F.; LUZ JUNIOR, W. A. R.; POLEZE, L. M. B.; BARROS, R. R.; RIGO, D.; GHISOLFI, R. D.; NETO, R. R.; SÁ, F. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical approach. Science of the Total Environment, 803, 149883, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149883>

LONGHINI, C.; MAHIEU, L.; SÁ, F.; VAN DEN BERG, C. M. G.; SALAÜN, P.; RODRIGUES NETO, R. Coastal waters contamination by mining tailings: What triggers the stability of iron in the dissolved and soluble fractions? *Limnology and Oceanography*, 66(1), 171–187, 2020.

MAGRIS, R. A.; MARTA-ALMEIDA, M.; MONTEIRO, J. A.; BAN, N. C. A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil). *Science of the Total Environment*, 659, 828-840, 2019.

MANN, H. B. Non-parametric test against trend, *Econometrica*, 13, 245-259, 1945.

MARIGÓMEZ, I.; SOTO, M.; CAJARAVILLE, M. P.; ANGULO, E. & GIAMBERINI, L. Cellular and sub-cellular distribution of metals in molluscs. *Microscopy Research and Technique*, 56 (5), p. 358–392, 2022. <https://doi.org/10.1002/jemt.10040>

MARIN, V.; ARRANZ, I.; GRENOILLET, G.; CUCHEROUSSET, J. Fish size spectrum as a complementary biomonitoring approach of freshwater ecosystems. *Ecological Indicators*, v. 146, 2023.

MARQUES, J. A.; COSTA, S. R.; MARASCHI, A. C.; VIEIRA, C. E. D.; COSTA, P. G.; DE MARTINEZ GASPAR MARTINS, C.; SANTOS, H. F.; SOUZA, M. M.; SANDRINI, J. Z.; BIANCHINI, A. Biochemical response and metals bioaccumulation in planktonic communities from marine areas impacted by the Fundão mine dam rupture (southeast Brazil). *Science of the Total Environment*, 806, 150727, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150727>

MARTIN L, SUGUIO K, DOMINGUEZ JML, FLEXOR JM Geologia do Quaternário Costeiro do Litoral Norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo), São Paulo, p 112. 1997.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J.M.; ACHANJO, J.D. Anais da Academia Brasileira de Ciências. V. 68. n. 3. p. 389-402. 1996.

MAUN, M.A. The Biology of Coastal Sand Dunes. Oxford, University Press, New York, 265p. 2009.

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 Sinuaer Associates Inc. Sunderland, Massachusetts, Estados Unidos, 2006.

MÉNDEZ, V., FUENTES, S., MORGANTE, V., HERNÁNDEZ, M., GONZÁLEZ, M., MOORE, E. & SEEGER, M. Novel hydrocarbonoclastic metal-tolerant *Acinetobacter* and *Pseudomonas* strains from Aconcagua river oil-polluted soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 17, 1074–1087, 10.4067/S0718-95162017000400017. 2017.

MIGUEL, C.; COSTA, P. G.; BIANCHINI, A.; LUZARDO, O. L. P.; VIANNA, M. R. M.; SANTOS, M. R. D. Health condition of *Chelonia mydas* from a foraging area affected by the tailings of a collapsed dam in southeast Brazil. *Science of the Total Environment*, 821, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153353>

- MILLER, M. E., GHISOLFI, R. D. AND BARROSO, G. F. Remote sensing monitoring of mining tailings in the fluvial-estuarine-coastal ocean continuum of the Lower Doce River Valley (Brazil). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(542). 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11123-x>
- MILYUKIN, M.V.; GONCHARUK, V.V. Chemical Monitoring of Organic Ecotoxics in Aqueous Systems. *J. Water Chem. Technol.* 41, 307–312, 2019.
- MIRANDA, L. S.; WIJESIRI, B.; AYOKO, G. A.; EGODAWATTA, P.; GOONETILLEKE, A. Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Research*, 202, 117386, 2021.
- MUÑOZ-PEREZ, J.J.; TEJEDOR, L.; MEDINA, R. Equilibrium beach profile model for reef protected beaches. *Journal of Coastal Research*, v.15, n.4, p. 950-957, 1999.
- NECHAD, B.; RUDDICK, K. G.; PARK, Y. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 854-866, 2010.
- NIGARIGA, P.; SAREN, D.; VARMA, R. SUGUMAR, V. Assessment of trace metal bioaccumulation on the shells of edible gastropod *Chicoreus ramosus* and *Hemifusus pugilinus*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(608), 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11130-y>
- NOGUEIRA, I.C.M., PEREIRA, H. P. P., PARENTE, C. E., GALLO, M. N. Climatologia de Ondas da Bacia do Espírito Santo e parte norte da Bacia de Campos. Relatório Técnico - Fundação COPPETEC, 2015.
- NOTA TÉCNICA CT-GRSA 10/2018 Assunto: Aprovação do Programa Manejo de Rejeitos (PG 23) – Objetivos, Projetos e Escopo.
- NUNES, G.T., et al. Ecological trap for seabirds due to the contamination caused by the Fundão dam collapse, Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 807. 2022.
- OLIVEIRA, K. S. S. Influência das Condições de Vento e do Aporte Fluvial na Dinâmica Sedimentar do Trecho Centro-Norte da Plataforma Continental do Espírito Santo (PCES). 144 f. Doutorado (Doutorado) - programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. 2018.
- OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, D. S. V. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *Journal of South American Earth Sciences*, 78, 101-115, 2017.
- OLIVEIRA, K.S.S.; QUARESMA, V.S.; NOGUEIRA, I.C.M.; VIEIRA, F.V.; BASTOS, A.C. Wave-driven sediment mobility on the Eastern Brazilian shelf under different weather systems. *Geo-Marine Letters*, 41(3), 1-17, 2021.
- OLIVEIRA, T.C.A.; ALBINO, J.; VENANCIO, I. Transporte longitudinal de sedimentos no litoral da planície deltaica do Rio Doce. *Quaternary and Environmental Geosciences*. V. 6. p. 20-25. 2015.

ORLANDO, M. T. A.; GALVÃO, E. S.; CAVICHINI, A. S.; C. V. G. T.; ORLANDO, C. G. P.; GRILO, C. F.; SOARES, J.; OLIVEIRA, K. S. S.; SÁ, F.; JUNIOR, A. C.; BASTOS, A. C.; DA SILVA QUARESMA, V. Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. *Chemosphere* 257, 127184, 2020.

PASCHOALINI, A. L.; SAVASSI, L. A.; ARANTES, F. P.; RIZZO, E.; BAZZOLI, N. Heavy metals accumulation and endocrine disruption in *Prochilodus argenteus* from a polluted neotropical river. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 539–550, 2019.

PEREIRA, O.J.; THOMAZ L.D.; ARAUJO D.S.D. Fitossociologia da vegetação de ante dunas da restinga de Setibá/Guarapari e em Interlagos, Vila Velha, ES. *Boletim do Museu de Biologia Mello Leitão*, v.1, p.65-75. 1992.

PETER, C. I.. "Water requirements and distribution of *Ammophila arenaria* and *Scaevola plumieri* on South African coastal dunes." PhD diss., Rhodes University. 2000.

PINHEIRO, M. A. A.; SILVA, P. P. G.; DE ALMEIDA DUARTE, L. F.; ALMEIDA, A. A.; ZANOTTO, F. P. Accumulation of six metals in the mangrove crab *Ucides cordatus* (Crustacea: Decapoda) and its food source, the red mangrove *Rhizophora mangle* (Angiosperma: Rhizophoraceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 81, p. 114-121, 2012.

PSG. Estudo de Impacto Ambiental: Terminal Portuário de Uso Múltiplo da Nutripetro. Vitória: PSG EQUILIBRIUM DO BRASIL LTDA, 2013. Disponível em: <https://iema.es.gov.br/Media/iema/CQAI/EIA/2013/Nutripetro/EIA%20-%20Nutripetro.pdf>

QUARESMA, V. S.; BASTOS, A. C.; LEITE, M. D.; COSTA, A.; CAGNIN, R. C.; GRILO, C.; ZOGHEIB, L.; OLIVEIRA, K. S. S. The effects of a tailing dam failure on the sedimentation of the eastern Brazilian inner shelf. *Continental Shelf Research*, 104172, 2020.

QUARESMA, V. S.; CATABRIGA, G.; BOURGUIGNON, S. N.; GODINHO, E.; BASTOS, A. C. Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 45(4), 635-644, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.047>

QUARESMA, V.S.; AGUIAR, V.M.C.; BASTOS, A.C.; OLIVEIRA, K. S.; VIEIRA, F. V.; SÁ, F.; BAPTISTA NETO, J. A. The impact of trace metals in marine sediments after a tailing dam failure: the Fundão dam case (Brazil). *Environmental Earth Sciences*. 80(571), 2021.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. URL <https://www.R-project.org/>.

RASCIO, N.; NAVARI-IZZO, F. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant science*, v.180, n.2, p.169-181, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>



REIS, M.P., SUHADOLNIK, M.L.S., DIAS, M.F., ÁVILA, M.P., MOTTA, A.M., BARBOSA, F.A.R. & NASCIMENTO, A.M.A. 2020. Characterizing a riverine microbiome impacted by extreme disturbance caused by a mining sludge tsunami. *Chemosphere*, 253, 126584, 10.1016/j.chemosphere.2020.126584.

RENOVA. Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado – PRAI. Fundação Renova, 2016.

RICHARD, E. C.; DUARTE, A.H. JR; ESTRADA, G.C.D.; BECHTOLD, J.; MAIOLI, B.G.; FREITAS, A. H. A., WARNER, K. E., FIGUEIREDO, L. H. M. Influence of fundão tailings dam breach on water quality in the Doce river watershed. *Integr Environ Assess Manag* 16(5):583–595, 2020.

ROCHA, G. M.; SALVADOR, B.; DE SOUZA LAINO, P.; SANTOS, G. H. C.; DEMONER, L. E.; DA CONCEIÇÃO, L. R.; TEIXEIRA-AMARAL, P.; MILL, G. N.; GHISOLFI, R. D.; COSTA, E. S.; LONGHINI, C. M.; DA SILVA, C. A.; CAGNIN, R. C.; SÁ, F.; RODRIGUES NETO, R.; DIAS JÚNIOR, C.; OLIVEIRA, K. S. S.; GRILO, C. F.; QUARESMA, V. S.; BONECKER, S. L. C. & FERNANDES, L. F. L. Responses of marine zooplankton indicators after five years of a dam rupture in the Doce River, Southeastern Brazil. *Science of The Total Environment*, 151249, 2022.

RODRIGUES et al., 2016 - RODRIGUES, A.C.D., DOS SANTOS, A.M., DOS SANTOS, F.S., PEREIRA, A.C.C., SOBRINHO, N.M.B.A. Response mechanisms of plants to heavy metal pollution: Possibility of using macrophytes for remediation of contaminated aquatic environments. *Rev. Virtual Quim.*, v.8, p.262–276, 2016. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20160017>

RRDM, Rede Rio Doce Mar, Relatório Semestral de Evolução (RSE). RT-37, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 143 pag. 2021.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Análise Abiótica e Biótica no Ambiente Marinho – Discussão Integrada. RT-19K, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 57 pag. 2019.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Ambiente Costeiro. RT-39C, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 349 pag. 2022.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Ambiente Marinho. RT-39D, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1410 pag. 2022.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Ambiente Dulcícola. RT-39B, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 613 pag. 2022.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Matriz de Resultados Ambientes Dulcícola, Costeiro e Marinho. RT-36F, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 50 pag. 2020.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Matriz de Resultados Ambientes Dulcícola, Costeiro e Marinho. RT-39F, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 68 pag. 2022.

SÁ, F.; LONGHINI, C. M.; COSTA, E. S.; DA SILVA, C. A.; CAGNIN, R. C.; DE OLIVEIRA GOMES, L. E.; LIMA, A. T.; BERNARDINO, A. F., RODRIGUES NETO, R. Time-sequence development of metal (loid) s following the 2015 dam failure in the Doce river estuary, Brazil. *Science of the Total Environment*, 769, 144532. 2021.

SCHNEEWEISS, A.; JUVIGNY-KHENAFOU, N. P. D.; OSAKPOLOR, S.; SCHARMÜLLER, A.; SCHEU, S.; SCHREINER, V. C.; ASHAUER, R.; ESCHER, B. I.; LEESE, F.; SCHÄFER, R. B. Three perspectives on the prediction of chemical effects in ecosystems. *Global Change Biology*, 29, 21–40, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16438>

SHAH, S. B. Heavy Metals in the Marine Environment—An Overview. In S. B. Shah (Ed.), *Heavy Metals in Scleractinian Corals* (pp. 1–26). Springer International Publishing. 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73613-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73613-2_1)

SHORT, A.D. Australian beach systems-nature and distribution. *Journal of Coastal Research*. 22(1):11–27, 2006.

SILVA, A.C., CAVALCANTE, L.C.D., FABRIS, J.D., et al. 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 Rev Espinhaço UFVJM*. 2016:44–53.

SOUZA, A.E. Respostas morfofisiológicas em plantas expostas à estressores abióticos decorrentes da exploração de minério de ferro. 2016. 85f. Dissertação (Mestrado em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários) - Campus Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SOUZA, B. S.& ALBINO, J. Development and morphodynamics of beaches on horizontal shore platforms on the microtidal southeast coast of Brazil. *Geomorphology*, v. 363, p. 107232, 2020.

SPINASSÉ, V. & TOGNELLA, M.M.P. Estimativa populacional e potencial extrativo do caranguejo-uçá no pós-defeso: subsídios à Gestão em Unidade de Conservação de uso sustentável. *Research, Society and Development* 9:12. 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.10992>

SUN, Q.; LI, Y.; SHI, L.; HUSSAIN, R.; MEHMOOD, K.; TANG, Z.; ZHANG, H. Heavy metals induced mitochondrial dysfunction in animals: Molecular mechanism of toxicity. *Toxicology*, 469, Elsevier Ireland Ltd. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153136>

THOMAZ, L.D.; MONTEIRO, R. Distribuição das espécies na comunidade halófila-psamófila ao longo do litoral do Estado do Espírito Santo. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, v. 36, n. 2, p. 375-399. 1993.

VAN DER OOST, R.; MCKENZIE, D. J.; VERWEIJ, F.; SATUMALAY, C.; VAN DER MOLEN, N.; WINTER, M. J.; CHIPMAN, J. K. Identifying adverse outcome pathways (AOP) for Amsterdam city fish

by integrated field monitoring. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 74, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103301>

VIEIRA, F. V.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S. LEITE, M.D.; COSTA JR, A; OLIVEIRA, K. S. S.; DALVI, C. F.; BAHIA, R. G.; HOLZ, V. L.; MOURA, R. L.; AMADO-FILHO, G. M. Along-Shelf Changes in Mixed Carbonate-Siliciclastic Sedimentation Patterns. *Continental Shelf Research* 187: 103964, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103964>. 2019.

VILLA, H.; QUINTELA, J.; COELHO, M.L.; ICELY J.D.; ANDRADE, J.P. Phytoplankton biomass and zooplankton abundance on the south coast of Portugal (Sagres), with special reference to spawning of *Loligo vulgaris*. *Scientia Marina*, 61(2): 123-129, 1997.

WINTON, V. H. L., EDWARDS, R., BOWIE, A. R., KEYWOOD, M., WILLIAMS, A. G., CHAMBERS, S. D., ... & PATON-WALSH, C. Dry season aerosol iron solubility in tropical northern Australia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.16, n.19, p.12829-12848, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-16-12829-2016>

YANG, L.; ZENG, J.; GAO, N.; ZHU, L.; FENG, J. Elucidating the Differences in Metal Toxicity by Quantitative Adverse Outcome Pathways. *Environmental Science and Technology*, 56(18), 13233–13244, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03828>