

5 MATRIZ DE RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

O Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I é executado pela Fundação Espírito-santense de Tecnologia (PMBA/Fest) desde junho de 2018, no âmbito do TERMO DE REFERÊNCIA 4 e inclui o monitoramento de parâmetros/indicadores abióticos e bióticos, 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 expande sua representatividade, 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, agora em 2024, para a atualização da Matriz de Resultados de cinco anos de monitoramento (dados até o período seco de 2023), também foram consideradas sugestões de melhorias metodológicas identificadas durante workshops internos ao PMBA/Fest.

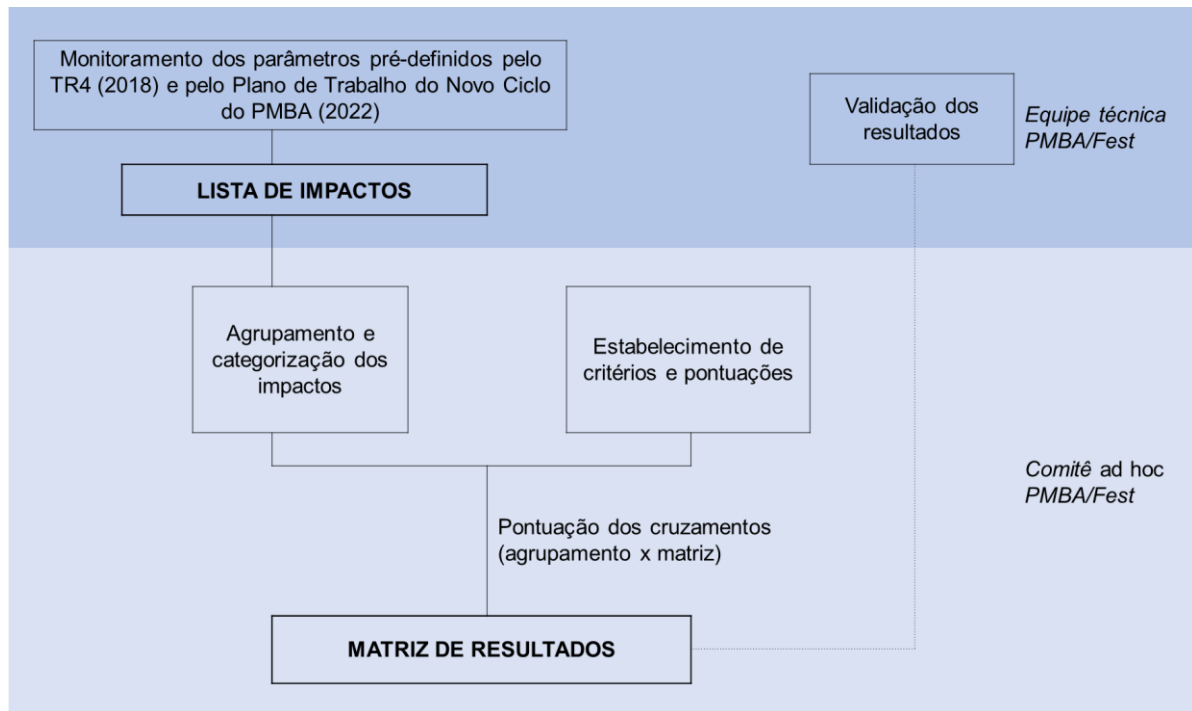
Dessa forma, o objetivo da presente Matriz de Resultados é avaliar, a partir das contribuições dos pesquisadores que conduziram os estudos específicos do PMBA/Fest, os impactos que ocorreram ou que ainda ocorrem em diferentes compartimentos (abiótico e biótico) e que afetaram ou ainda afetam os diferentes níveis tróficos das cadeias alimentares dos ecossistemas estudados. Cabe destacar que o uso de matrizes de interação 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.

5.2 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 (FRANCO *et al.*, 2024). 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 (Tabela 1) se inicia a partir de uma lista de impactos pré-definida, construída com base na resposta de parâmetros e indicadores monitorados ao longo dos cinco anos do PMBA/Fest – 2018 a 2023. As listas de impactos produzidas pelas equipes técnicas são então compiladas e um comitê *ad hoc* realiza o agrupamento dos impactos de acordo com sua natureza e não mais de acordo com o Tema monitorado. 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 Ambientes monitorados pelo PMBA/Fest participam ativamente do processo de construção da Matriz de Resultados e estão contidos na listagem abaixo. Já a relação de coordenadores de Temas, professores e pesquisadores e demais colaboradores envolvidos nos projetos técnico-científicos que fazem parte do PMBA/Fest e que, conseqüentemente, contribuíram ativamente na elaboração da lista de impactos, está sendo apresentada no Sumário Executivo que compõe o RA2023.

5.2.1 Lista de impactos

A lista de impactos, por sua vez, 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/impactos observados, foram estabelecidas referências básicas, desde o primeiro relatório apresentado em 2019, a partir das quais as alterações/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 à 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 ao Material Ligado ao Desastre (MLD), como 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 deste MLD 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 deste MLD no ambiente, mas sim de forma secundária/indireta ou quando é parte de uma cadeia de reações. Por sua vez, quando não é possível ter esta afirmação, 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 Dulcícola, Marinho e Costeiro.

5.2.2 Quantificação da matriz de resultados

A Matriz de Resultados do Relatório Anual 2023 (PMBA/Fest) é uma matriz de interação e funciona como uma listagem de controle bidimensional, disposta 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 a 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), sendo categorizados em: Caráter, Definição, Relação com o Rompimento, Abrangência Espacial, Nível Ambiental/Trófico, Duração e Reversibilidade; à exceção do critério “Relação com o Rompimento”, que foi 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 relacionados ao MLD, 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 (início do PMBA/Fest), ou seja, C, E e/ou H.

Relação com o Rompimento – é atribuída 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 MLD no ambiente;

- Relação Indireta (2): quando não é possível afirmar que o impacto foi influenciado diretamente pela passagem do material ou pela presença do MLD 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 MLD 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, ictiofauna, 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 conseqüentemente a biodiversidade aquática, não poderiam retornar aos níveis/condições aceitáveis/anteriores;
- Parcialmente Reversível (2): se a qualidade da água e do sedimento, e conseqüentemente a biodiversidade aquática, poderiam retornar aos níveis/condições aceitáveis embora diferentes das anteriores;
- Reversível (1): se a qualidade da água e do sedimento, e conseqüentemente 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 conservadora sempre que fosse necessária alguma ponderação. Para a quantificação da Definição, por exemplo, quando mais de uma referência foi 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 3).

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

As células 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 4).

Quadro 4: 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

5.2.3 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.

Os setores dos Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro estão apresentados na Síntese de cada um dos Ambientes, itens 2, 3, e 4 deste relatório, respectivamente.

Para espacialização dos agrupamentos de impactos foi adotada uma abordagem conservadora, em que todos os 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.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma análise aderente à estrutura organizacional e operacional do PMBA/Fest, fora desenvolvida 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, adicionalmente 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.

5.3.1 Impactos e suas características

A lista inicial elaborada por todas as equipes de pesquisa que executam o PMBA/Fest apresentou 288 impactos, sendo 86 impactos no Ambiente Dulcícola, 137 impactos no Ambiente Marinho e 65 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 à ictiofauna estuarina 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.

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

^D Impactos observados no Ambiente Dulcícola

^M Impactos observados no Ambiente Marinho

^C 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, Ictiofauna, Tartarugas, Cetáceos e Aves).

Os compartimentos “Água” e “Sedimento” apresentam resultado para os três ambientes, sendo o compartimento “Água” no Ambiente Costeiro, uma inclusão para o RA2023, em relação às demais Matrizes de Resultados, devido a incorporação deste escopo analítico no Novo Ciclo do PMBA/Fest, que teve início em setembro de 2022. O compartimento “Sedimento” no Ambiente Costeiro é analisada separadamente de acordo com seu ecossistema 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 dos compartimentos não é possível de ser feita entre os ambientes, por exemplo, o Ambiente Dulcícola monitora “Macrófitas” enquanto o Ambiente Marinho monitora “Macroalgas”. Ainda no Ambiente Dulcícola, o compartimento “Perifíton” aparece com exclusividade. O compartimento “Microbiota”, “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 este compartimento se chama “Macroinvertebrados” e é representado por espécies de 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 anfipodas, isopodas, 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 *habitat* com características muito distintas, “Bentos de fundo inconsolidado” (areia e lama) e “Bentos de fundo consolidado” (bancos de rodólitos e ambientes recifais). O compartimento “Ictiofauna” foi analisado para os Ambientes Dulcícola e Marinho, entretanto, para no Ambiente Marinho este compartimento inclui as análises realizadas tanto para ictiofauna estuarina quanto para ictiofauna recifal. 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 117 impactos negativos e 49 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.

Como já explicado na metodologia sobre as células preenchidas com um traço (-), um exemplo acerca disso é a resposta biológica à contaminação no compartimento abiótico ou ainda a contaminação por metais e metaloides em perifíton. Ambos estão preenchidos com o traço pelo fato deste escopo não estar contemplado no monitoramento previsto no termo de referência (TR4) e no Novo Ciclo do PMBA/Fest. Dessa forma, estas células 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 no compartimento Água, enquanto compartimentos bióticos o grupo com maior número de impactos foi a ictiofauna, seguido por macroinvertebrados.

Figura 12: Matriz de Resultados para o Ambiente Dulcícola. Número de interações (linha x coluna) com análise dos impactos, dumarizando 32 impactos negativos e 19 impactos nulos.

CATEGORIA	AGRUPAMENTO DE IMPACTOS	Abiótico		Biótico								
		Água	Sedimento	Macrófitas	Microbiota	Plâncton	Fitoplâncton	Zooplâncton	Ictioplâncton	Perifiton	Macroinvertebrados	Ictiofauna
Sedimentologia	Alterações na composição sedimentológica	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez	-16	-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Química	Alterações na concentração de nutrientes	-10	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Contaminação por compostos orgânicos	-10	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Contaminação por metais e metaloides	-17	-16	-	-	-18	-	-	-	-	-18	-19
Ecotoxicologia	Alterações nos níveis de toxicidade	-10	-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-	-	-9	-	-	-	-	-11	-12
Ecologia	Alterações na estrutura de comunidade	-	-	-11	0	-	-15	-11	0	-14	-11	-12
	Alterações na estrutura de população	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-19
	Aumento na abundância de taxons indicadores de impacto	-	-	-15	-18	-	-12	0	0	0	-11	-12
	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	0
	Danos morfológicos e celulares	-	-	0	-	-	0	0	-11	0	0	0

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

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 ictiofauna. Este fato indica a persistência dos impactos dessa natureza em todos os níveis tróficos, ao longo dos cinco anos de monitoramento. Na categoria Ecologia, a microbiota e a ictiofauna 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 a ictiofauna no impacto de Alterações da diversidade e estrutura genética, um fato possivelmente relacionado à 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, Ecologia e Genética. O impacto Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez identificado nos compartimentos água e sedimento 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. Por fim, verificou-se o impacto da Redução da Diversidade Filogenética na ictiofauna, da categoria Genética. 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 ictiofauna. 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 ictiofauna para ambos os impactos. 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.

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) na ictiofauna, Aumento nos valores de índice de resposta biológica (Ecotoxicologia) para bentos de fundo consolidado e Alterações na estrutura de populações (Ecologia) em 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.

Figura 13: Matriz de Resultados para o Ambiente Marinho. Número de cruzamentos (linha x coluna) com análise dos impactos, resumindo 65 impactos negativos e 28 impactos nulos.

AMBIENTE MARINHO															
CATEGORIA	AGRUPAMENTO DE IMPACTOS	Abiótico		Biótico											
		Água	Sedimento	Macroalgas	Microbiota	Plâncton	Fitoplâncton	Zooplâncton	Ictioplâncton	Bentos de fundo inconsolidado	Bentos de fundo consolidado	Ictiofauna	Tartarugas	Cetáceos	Aves
Sedimentologia	Alterações na composição sedimentológica	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Aumento do potencial de mobilização do fundo	-	-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Química	Alterações na concentração de nutrientes	-13	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Contaminação por metais e metaloide	-16	-17	0	-	-17	-	-18	-	-18	-9	-19	-19	-16	-18
	Contaminação por compostos orgânicos	-13	-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-11	-14	0
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-	-	-11	-	-	-	-12	-8	-10	-	-	-
	Alterações nos níveis de toxicidade	-10	-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecologia	Alterações na estrutura de população	-	-	-	-	-	-	-	-	-7	-	-11	0	0	-12
	Alterações na estrutura de comunidade	-	-	-17	0	-	-18	-17	-17	-18	-18	-12	0	0	0
	Alterações nos parâmetros reprodutivos	-	-	-	-	-	-	-	-17	-	-	0	-16	-	-12
	Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-15	-	-	-10
	Aumento na abundância de táxons indicadores de impacto	-	-	0	-17	-	0	-17	0	-16	0	0	-	-	-
Genética	Aumento da vulnerabilidade populacional	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-13	-
Saúde	Alterações da diversidade e estrutura genética	-	-	-	-	-	-	-	-	-11	-	-13	-17	-17	-13
	Danos morfológicos e celulares	-	-	-12	-	-	0	0	-18	0	0	-8	0	-11	0
	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia	-	-	0	-	-	-17	0	0	0	-11	-12	-19	-14	0
	Mortalidade de organismos	-	-	-	-	-	-	-	-	-18	-	-	-	-16	-
Comportamento	Doenças e presença de agentes infecciosos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-19	-12	-10	-
	Alterações do Uso do Habitat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-12	0	0	-12	-
	Alterações nas taxas de enalhe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-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

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, ictiofauna, tartarugas e aves), enquanto o segundo 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 observadas Alterações nos parâmetros reprodutivos, para ictioplâncton e Aumento na abundância dos táxons indicadores de impacto para microbiota e zooplâncton. O único impacto de Genética, Alterações da diversidade e estrutura genética, foi crítico para tartarugas e 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 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 água e cetáceos, e Contaminação por compostos orgânicos nestes dois compartimentos citados anteriormente e no sedimento. Na categoria Ecologia os impactos considerados altos são referentes à Alterações nos parâmetros reprodutivos em tartarugas, Alterações do nicho isotópico e diversidade na ictiofauna, Aumento de táxons indicadores de impacto em bentos de fundo inconsolidado e Aumento da vulnerabilidade populacional em cetáceos. Alterações da diversidade e estrutura genética (Genética) foi classificado como alto para ictiofauna 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 consolidado 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 ictiofauna (Aumento nos valores de índice de resposta biológica). Na categoria Ecologia os impactos classificados como médios observados para ictiofauna (Alterações na estrutura de população e comunidade) e aves (Alterações na estrutura de população, Alterações nos parâmetros reprodutivos e Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica).

O impacto considerado médio na categoria Genética foi Alterações da diversidade e estrutura genética, para bentos de fundo inconsolidado. Na categoria Saúde os impactos considerados médios foram Danos morfológicos e celulares em macroalgas e cetáceos, Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia para bentos de fundo consolidado e ictiofauna 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 ictiofauna e quanto para aves.

A Matriz de Resultados para o Ambiente Costeiro (Figura 14), por sua vez, apresenta impactos nas categorias Sedimentologia, Química, Ecotoxicologia, Ecologia e Saúde para os compartimentos água, um incremento analítico desta versão tendo em vista a inclusão deste escopo no período do Novo Ciclo do PMBA/Fest, sedimento de praia, restinga e manguezal, vegetação de restinga e manguezal, bentos macrofauna e meiofauna, caranguejo de manguezal e crustáceo de praia.

Figura 14: Matriz de Resultados para o Ambiente Costeiro. Número de cruzamentos (linha x coluna) com análise dos impactos, resumindo 20 impactos negativos e 2 impactos nulos.

CATEGORIA	AGRUPAMENTO DE IMPACTOS	Abiótico				Biótico					
		Água	Sedimento de Praia	Sedimento Restinga	Sedimento de Manguezal	Vegetação de Restinga	Vegetação de Manguezal	Bentos: macrofauna	Bentos: meiofauna	Caranguejo de Manguezal	Crustáceos de Praia
Sedimentologia	Alterações nas características físicas da praia	-	-17	-	-	-	-	-	-	-	-
Química	Contaminação por metais e metaloides	-13	-17	-14	-17	-15	-15	-	-	-17	-10
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-	-	-	-	-	-	-9	-8
Ecologia	Alterações na estrutura de população	-	-	-	-	-	-	-	-	-15	-
	Alterações na estrutura de comunidade	-	-	-	-	-14	0	-17	-17	-14	-
	Alterações nos parâmetros reprodutivos	-	-	-	-	-13	0	-	-	-12	-
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

Os impactos químicos no compartimento abiótico foram identificados principalmente nos sedimentos de praia e manguezal, em função da deposição e concentração do material fino contaminado. Já 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 majoritariamente 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, sendo que a pontuação alcançada em todos estes impactos 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 de praia e para sedimento e caranguejo de manguezal, reforçando assim a importância deste grupo 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 água, sedimento de restinga e vegetação de restinga e manguezal. Na categoria Ecologia, os caranguejos dos manguezais apresentam níveis altos para os impactos Alterações na estrutura de população e da comunidade, e a Vegetação de Restinga em Alterações da estrutura da comunidade e nos parâmetros reprodutivos. 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, na categoria Ecotoxicologia, pelo Aumento nos valores de resposta biológica em caranguejo de manguezal, e na categoria Ecologia com as Alterações nos parâmetros reprodutivos do caranguejo de manguezal.

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

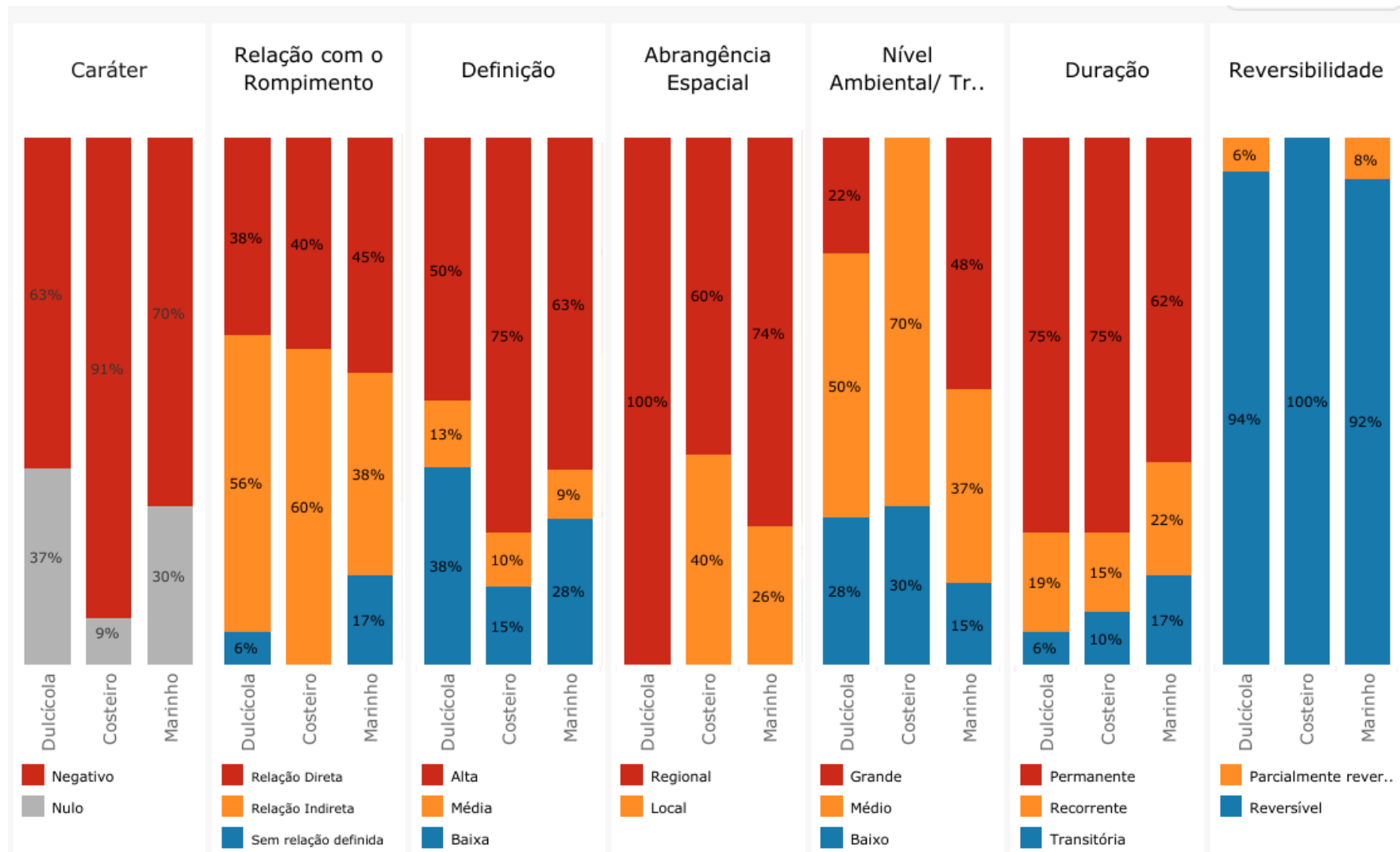
O quantitativo total de impactos considerados na matriz do Ambientes corresponde ao somatório dos impactos classificados no critério **Caráter** com pontuação negativa (-1) ou nula (0) (Figura 15). A Matriz de Resultados do PMBA/Fest, tal qual foi planejada, não considera a análise de efeitos positivos (+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 MLD, de acordo com o critério **Relação com o Rompimento**, foi observado no Ambiente Marinho (45%), seguido do Ambiente Costeiro (40%) e Dulcícola (38%). O aumento do percentual de efeitos diretos, nos Ambientes Costeiro e Dulcícola, pois antes respectivamente 37% e 35%, e a manutenção do número de impactos sem relação definida, em relação ao RA2022 (PMBA, 2023), pode ser um indicativo do avanço e robustez na compreensão dos efeitos do MLD nos ecossistemas Dulcícola, Marinho e Costeiro estudados no PMBA/Fest, ou ainda, uma resposta da evolução do ecossistema ao impacto agudo oriundo da chegada do MLD em 2015. Sob essa mesma ótica, esses fatos podem subsidiar a consistência nos percentuais do critério **Definição** para todos os ambientes em relação ao RA2022.

A maioria dos impactos, em todos os ambientes, ocorreu em uma **Abrangência Espacial** regional, indicando o alcance do efeito do MLD nos ambientes estudados (100% no Ambiente Dulcícola, 60% no Costeiro e 74% no Marinho). 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 (48%). 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 dos impactos (com exceção aos 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=51), Marinho (n=90) e Costeiro (n=21).

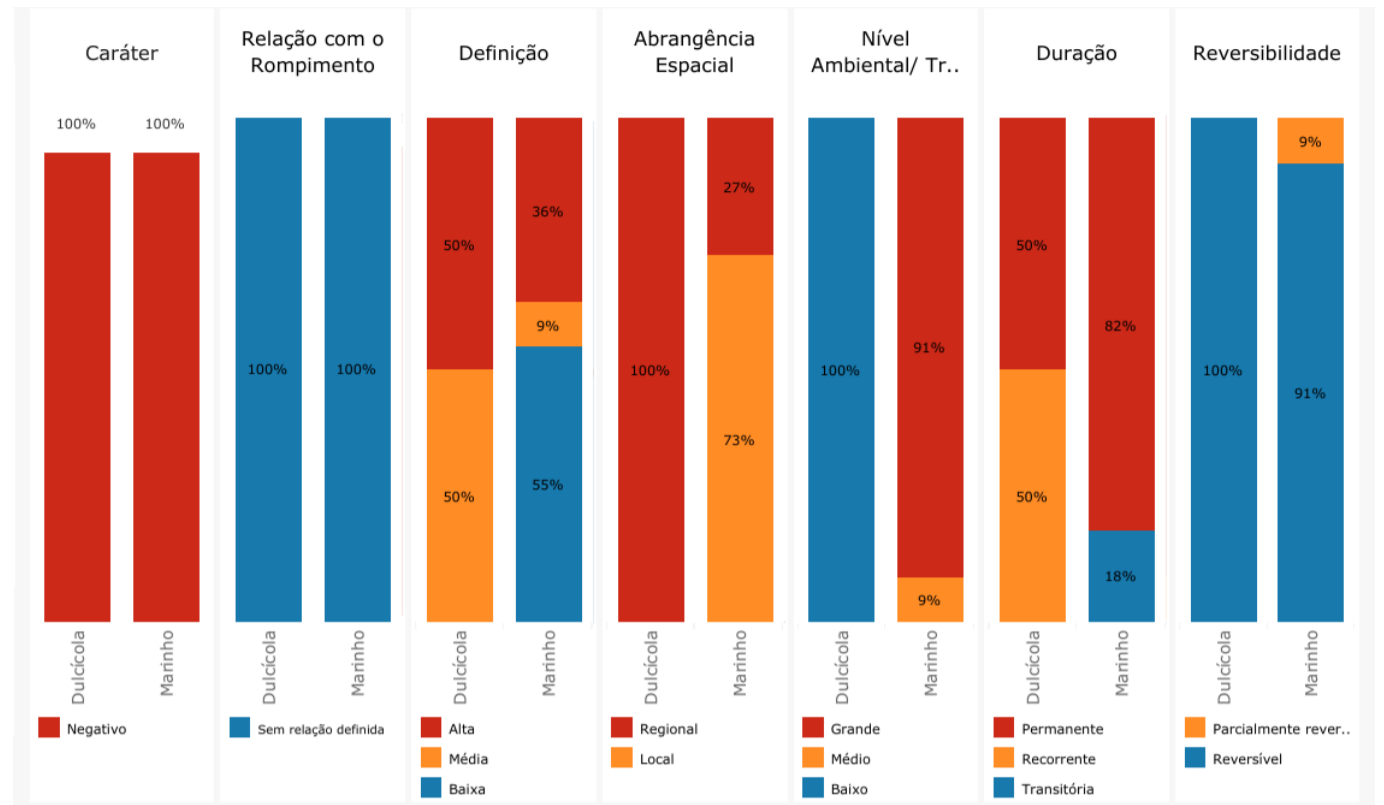


Considerando a importância do estabelecimento de umnexo de causalidade entre os impactos observados e sua relação com o rompimento da barragem de Fundão, a metodologia adotada para a construção da Matriz de Resultados gerada no âmbito do PMBA/Fest permitiu a classificação destes impactos utilizando-se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

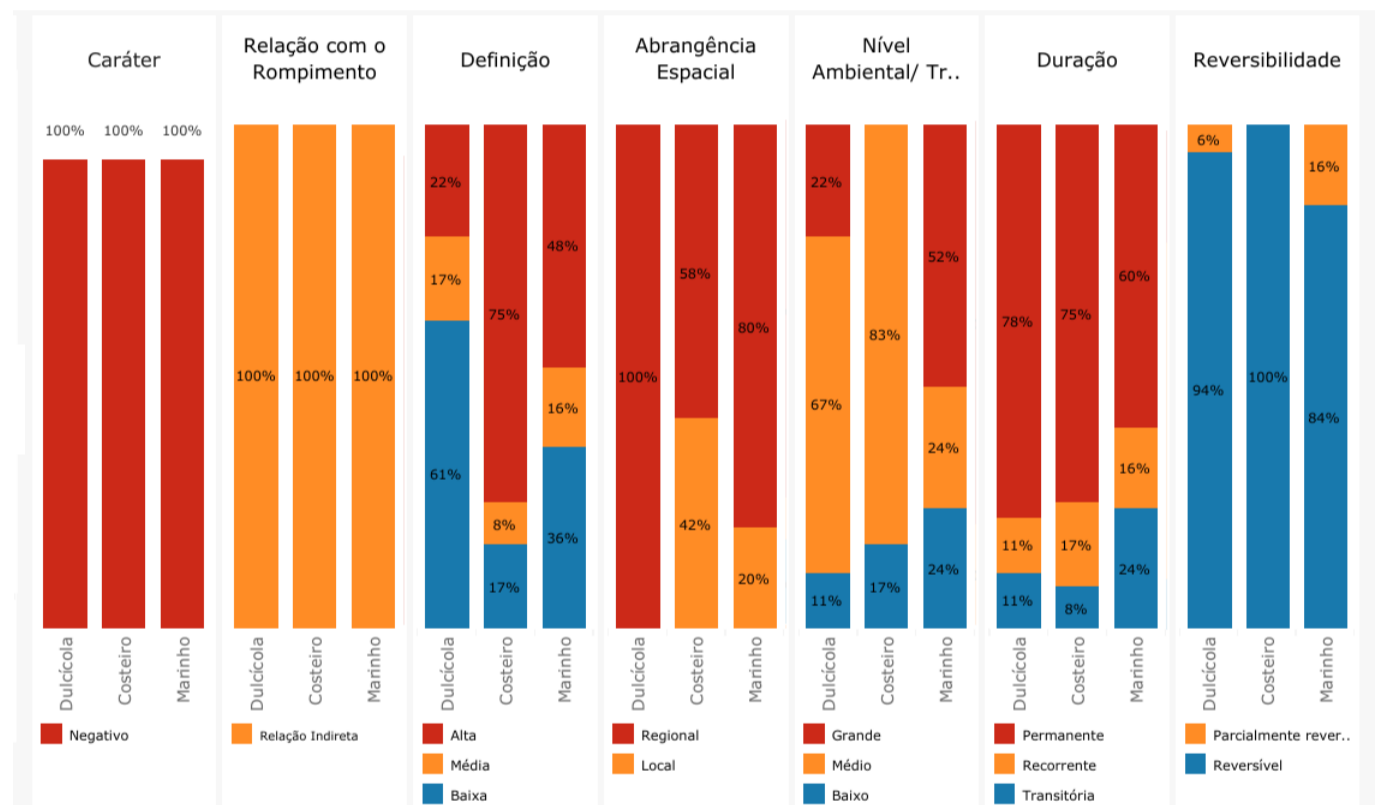
Nesta seleção pode-se verificar que a maior parte dos impactos mostra relação indireta ($n = 55$) ou direta ($n = 49$). De forma geral, para a relação indireta com o rompimento, os critérios que mais influenciam em valores indicativos de maiores impactos são a Definição, especialmente para o Ambiente 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.

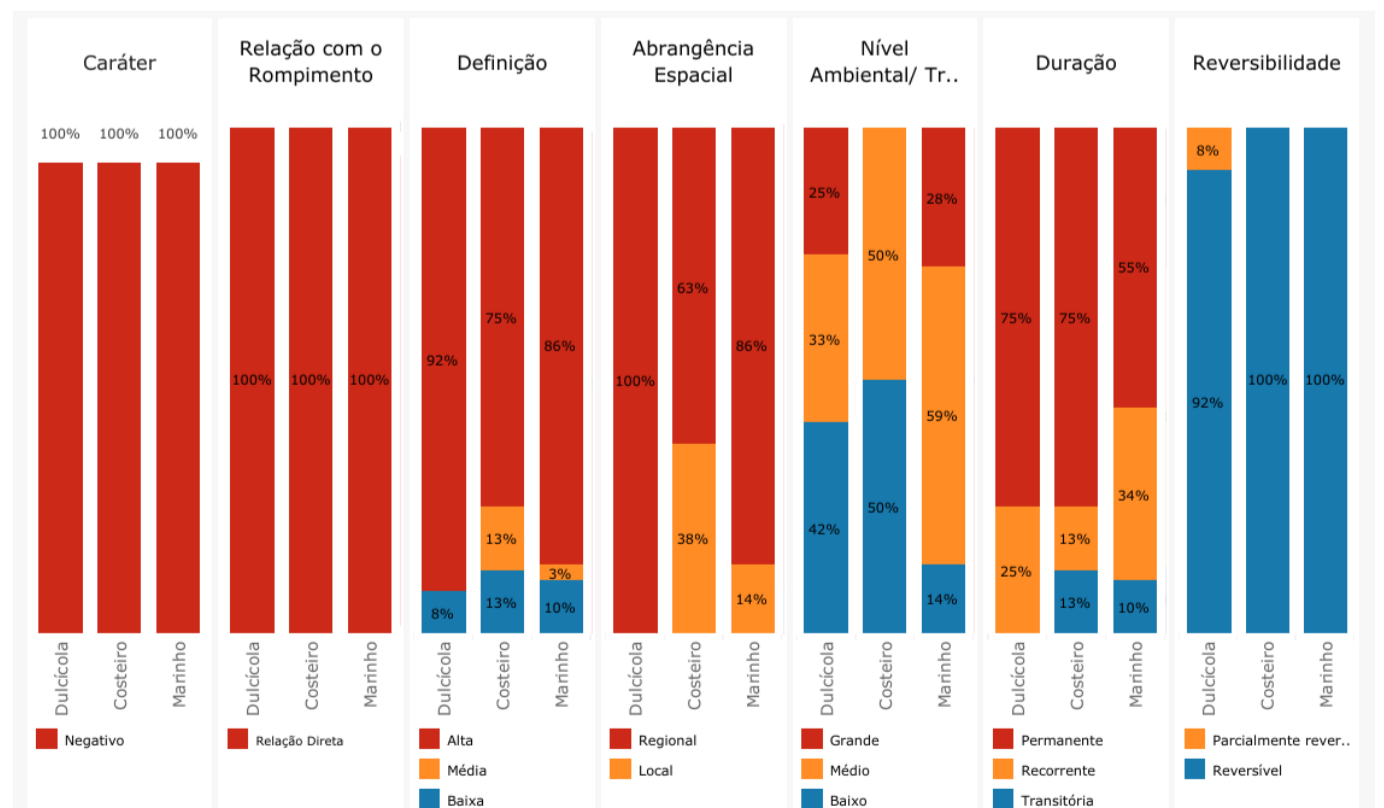
Sem Relação Definida Ainda (n =13)



Indireta (n =55)



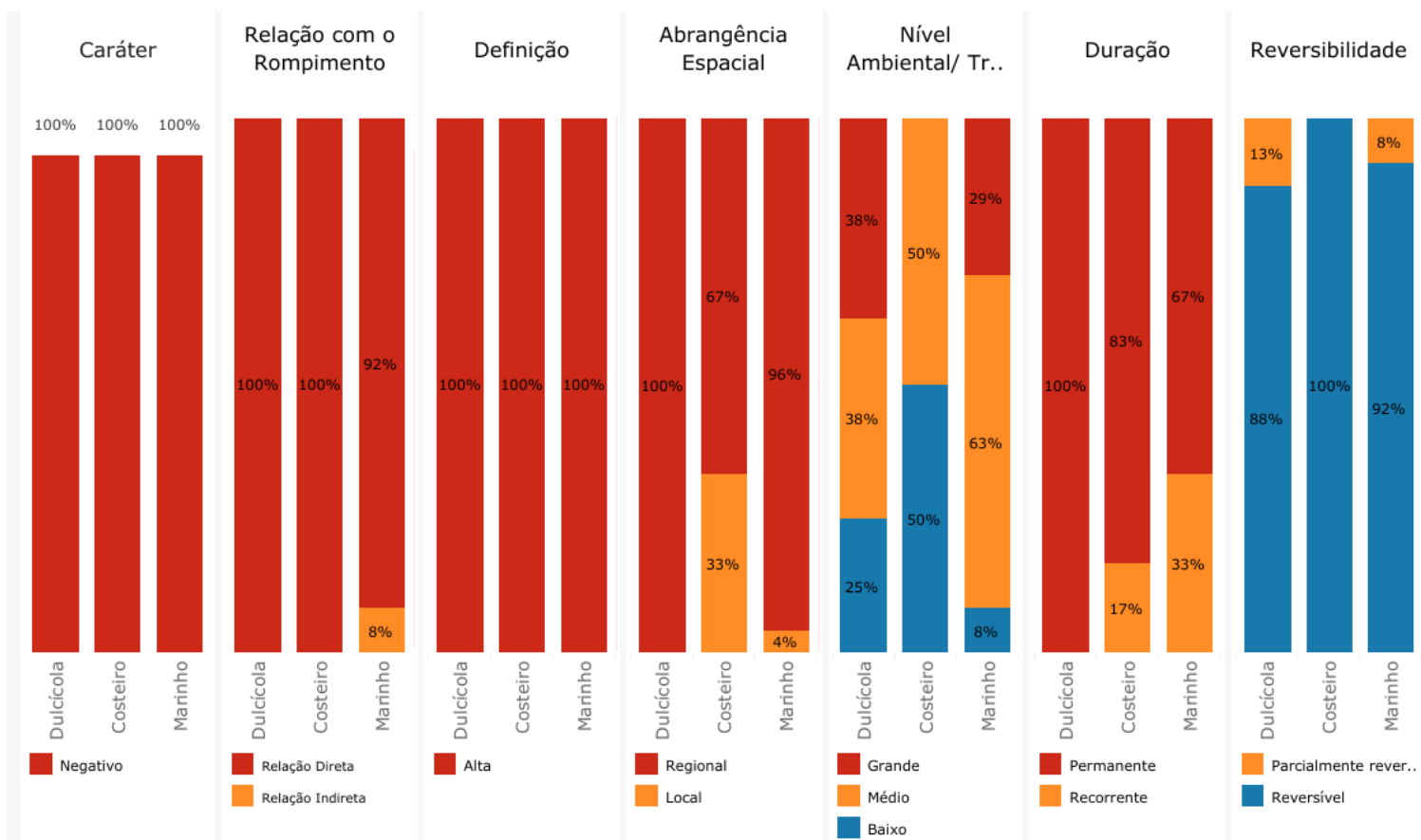
Direta (n =49)



Visando ainda complementar as informações e fornecer mais subsídios para a tomada de decisão, os resultados obtidos a partir das Matrizes geradas no âmbito do PMBA/Fest também foram agrupados e analisados considerando-se estritamente os impactos Críticos (pontuação final entre -17 e -21), para cada ambiente em particular (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 três ambientes foram majoritariamente (totalmente no Dulcícola) considerados regionais, abrangendo mais de um setor. O Ambiente Costeiro foi percentualmente aquele com mais impactos no Nível ambiental/trófico abiótico (50%), seguido do Ambiente Dulcícola (25%). 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 pontuação total como Críticos (faixa de -21 a -17) (n = 38).

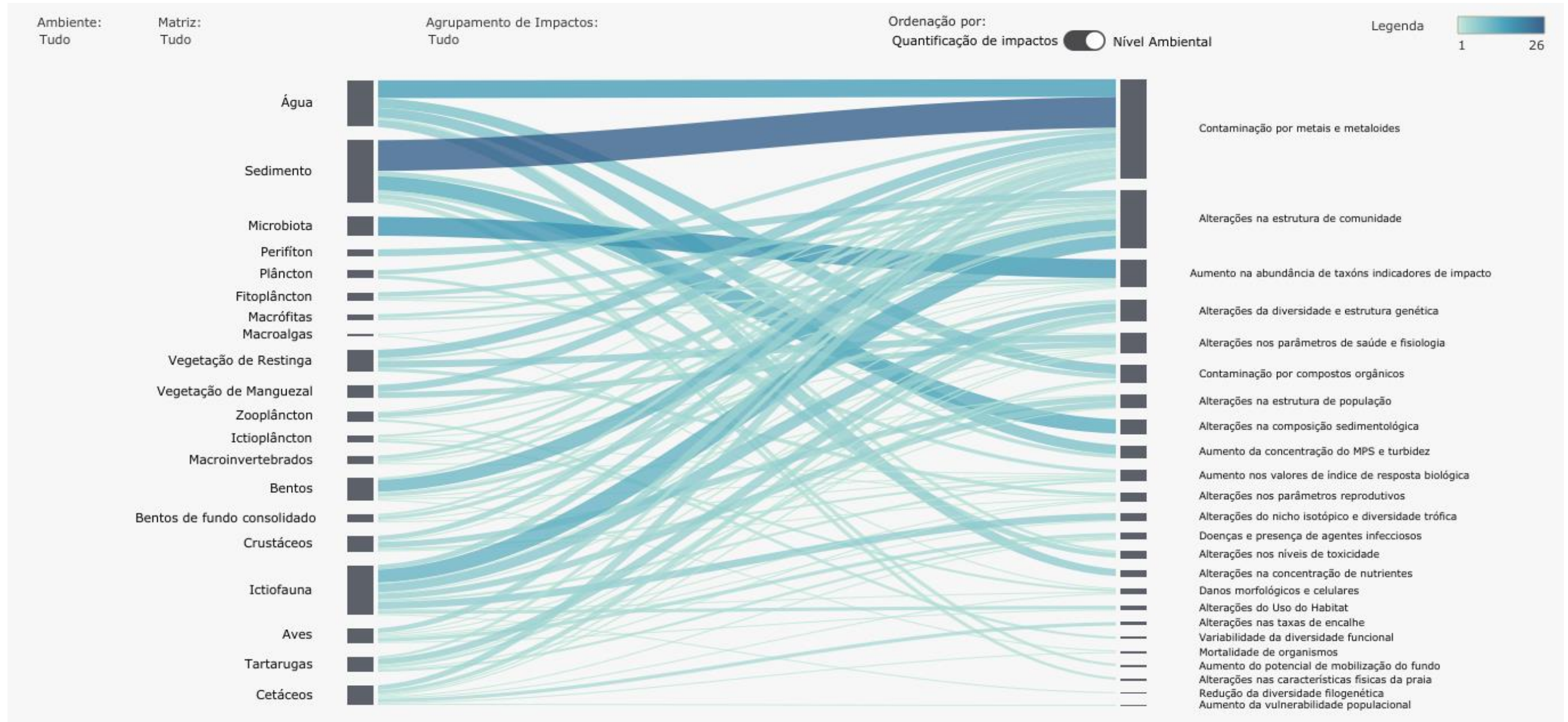


Para complementar apresentamos a seguir gráfico de sankey correlacionando os compartimentos analisados, considerando unificadamente os Ambientes Dulcícola, Costeiro e Marinho e os 24 agrupamentos de impactos identificados pelos resultados do PMBA/Fest (Figura 18). A espessura da linha, assim como sua coloração, corresponde ao número de impactos na associação entre os eixos. Este fluxo permite identificar que entre os compartimentos abióticos, quantitativamente, o sedimento apresenta-se vinculado a 7 agrupamentos de impactos e a água a 5 agrupamentos, sendo comumente identificados nos grupos de Contaminação por metais e metaloides, Contaminação por compostos orgânicos, Aumento na concentração do MPS e turbidez e Alterações nos níveis de toxicidade e, exclusivamente, a água no agrupamento de Alterações na concentração de nutrientes e o sedimento na Alterações na composição sedimentológica, Aumento do potencial de mobilização de fundo e Alterações nas características físicas da praia. Já entre os compartimentos bióticos, a Ictiofauna é mais evidente, correlacionando-se a 11 dos 24 agrupamentos de impacto analisados (Alterações na estrutura de comunidade, Alterações da diversidade e estrutura genética, Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica, Alterações na estrutura de população, Contaminação por metais e metaloides, Alterações do uso do *habitat*, Aumento nos valores de índice de resposta biológica, Redução da diversidade filogenética, Danos morfológicos e celulares, Aumento na abundância de táxons indicadores e impacto e Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia).

Sob a ótica dos agrupamentos de impactos, sobrepõe-se agrupamentos que apresentam resposta direta ao MLD, sendo a Contaminação por metais e metaloides o que possui maior número de inter-relações com as matrizes do PMBA/Fest, que apresenta-se na água, sedimento, plâncton, vegetação de restinga e manguezal, zooplâncton, macroinvertebrados, bentos e bentos de fundo consolidado, crustáceos, ictiofauna, aves, tartarugas e cetáceos, seguido do Alterações na estrutura de comunidade, que está presente no perifiton, fitoplâncton, macrófitas, macroalgas, vegetação de restinga, zooplâncton, ictioplâncton, macroinvertebrados, bentos, bentos de fundo consolidado, crustáceos e ictiofauna.

Pela espessura da linha e coloração, este resultado também infere sobre o quantitativo de impactos correspondente a cada interseção entre compartimento e agrupamento de impacto, listados nos Materiais Suplementares MS_MATRIZ_AD, MS_MATRIZ_AM e MS_MATRIZ_AC.

Figura 18: Relação entre matrizes analisadas e agrupamento de impactos, considerando os Ambientes Dulcícola, Marinho e Costeiro.



5.3.2 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 criação 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 19), Marinho (Figura 20) e Costeiro (Figura 21), foram divididos de acordo com o grau de impacto (Crítico, Alto e Médio), não sendo mapeados os impactos classificados como de Baixo. A representação 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, a ictiofauna foi classificada como criticamente impactada em relação à contaminação por metais e metaloides (impacto de número 4 na Figura 19). De forma similar, o Plâncton (exceto setores afluentes e reservatórios) e o compartimento Água (todos os setores) foram considerados criticamente impactados (impacto de número 4 na Figura 19). 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 nos reservatórios) 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 o compartimento 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 de 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 a cinco impactos nos setores Foz, Norte e APA/Revis.

O Ambiente Costeiro, diferentemente do Dulcícola e Marinho, não possui monitoramento de organismos classificados como de topo de cadeia. Em todos os setores, o Sedimento de Manguezal foi classificado como Crítico quanto à contaminação por metais e metaloides, enquanto o Sedimento de Restinga foi classificado 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 às alterações na estrutura de populações, no setor C, relacionado às mudanças nos parâmetros reprodutivos, e no setor B, às alterações na estrutura de comunidades. Além disso, o Caranguejo de Manguezal, nos setores B e C, foi classificado como impacto médio em relação ao aumento dos índices de respostas biológica.

Figura 19: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Dulcícola de acordo com a pontuação alcançada pela Matriz de Resultados -PMBA/Fest 2023.

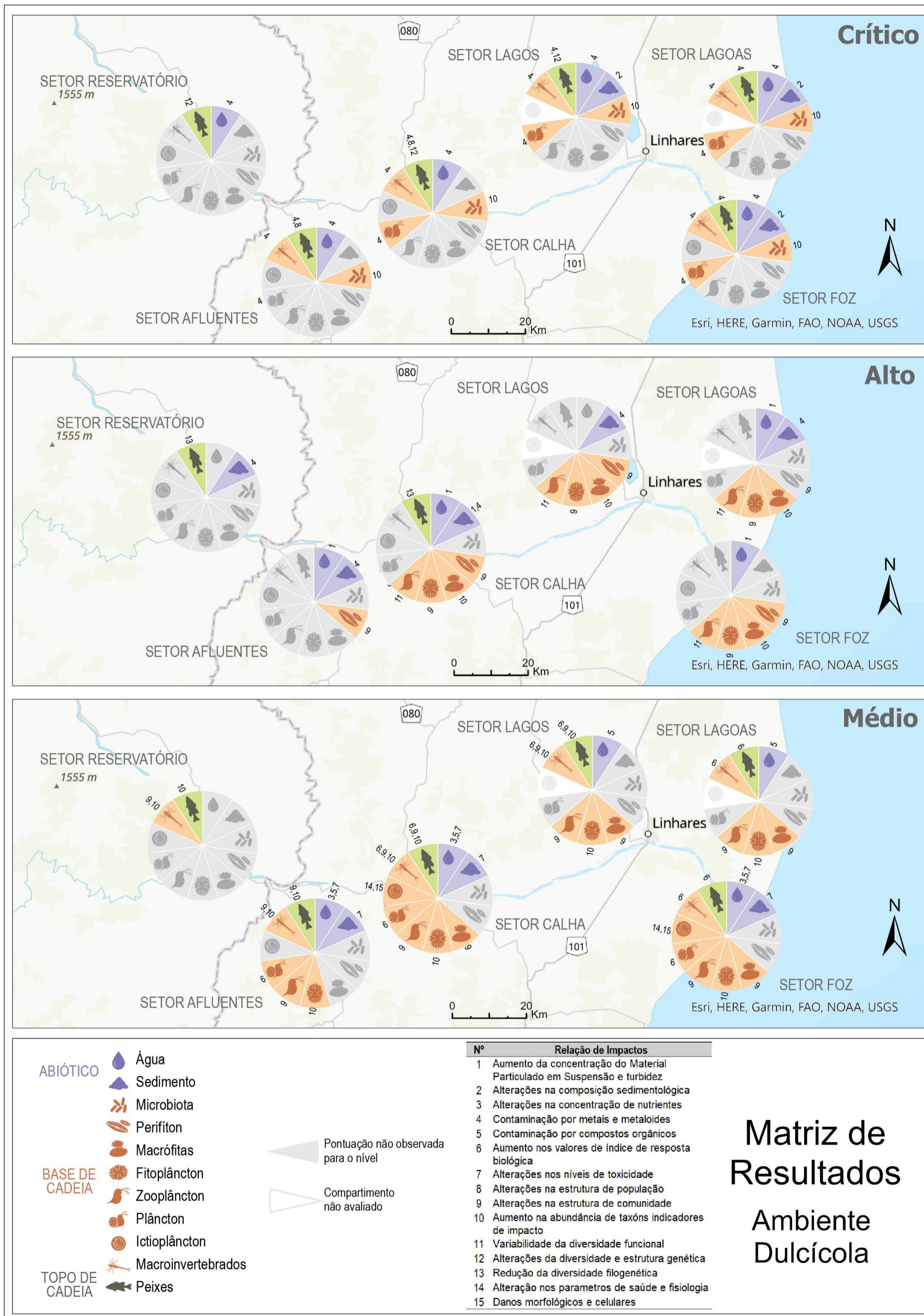


Figura 20: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Marinho de acordo com a pontuação alcançada pela Matriz de Resultados -PMBA/Fest 2023.

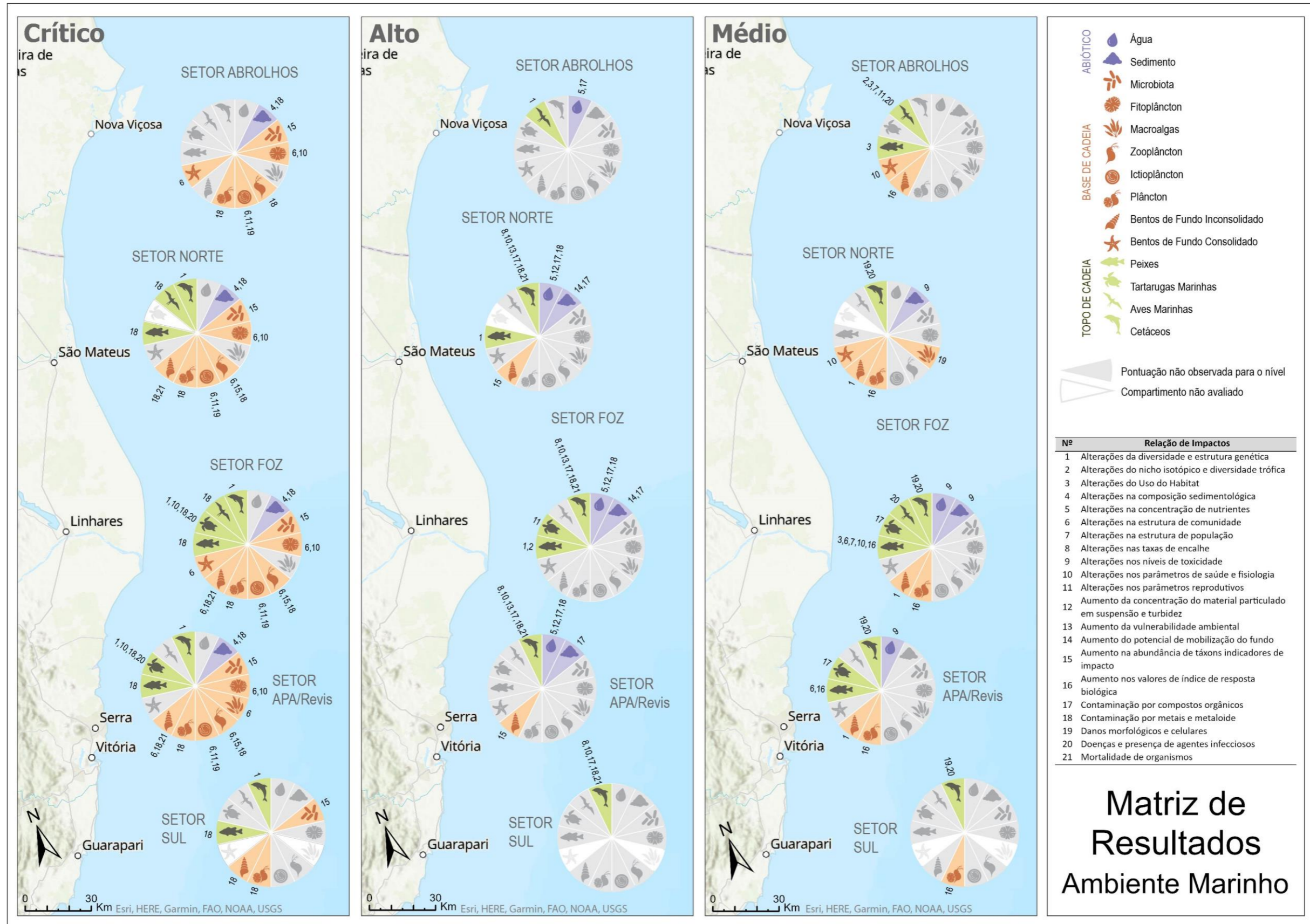
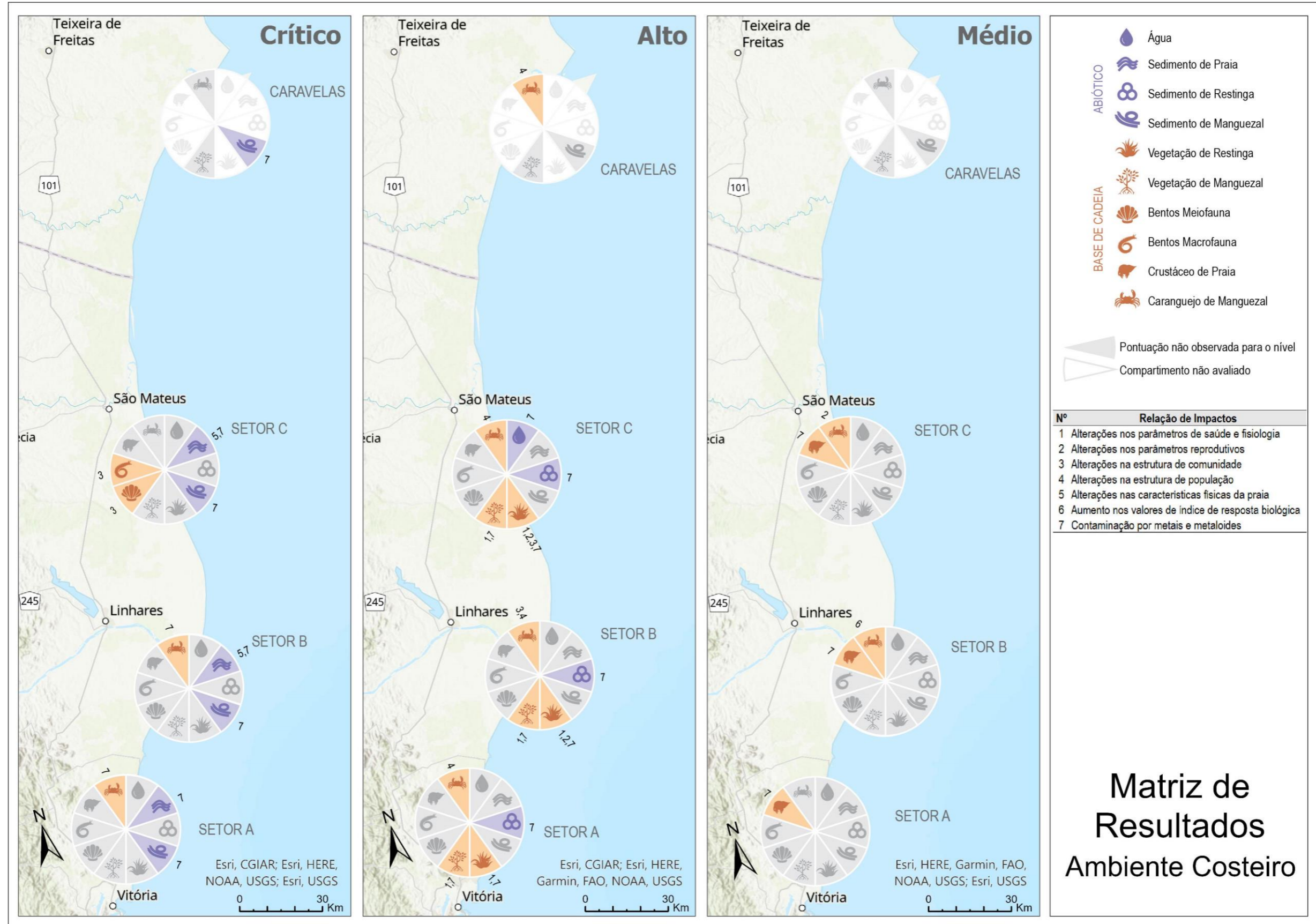
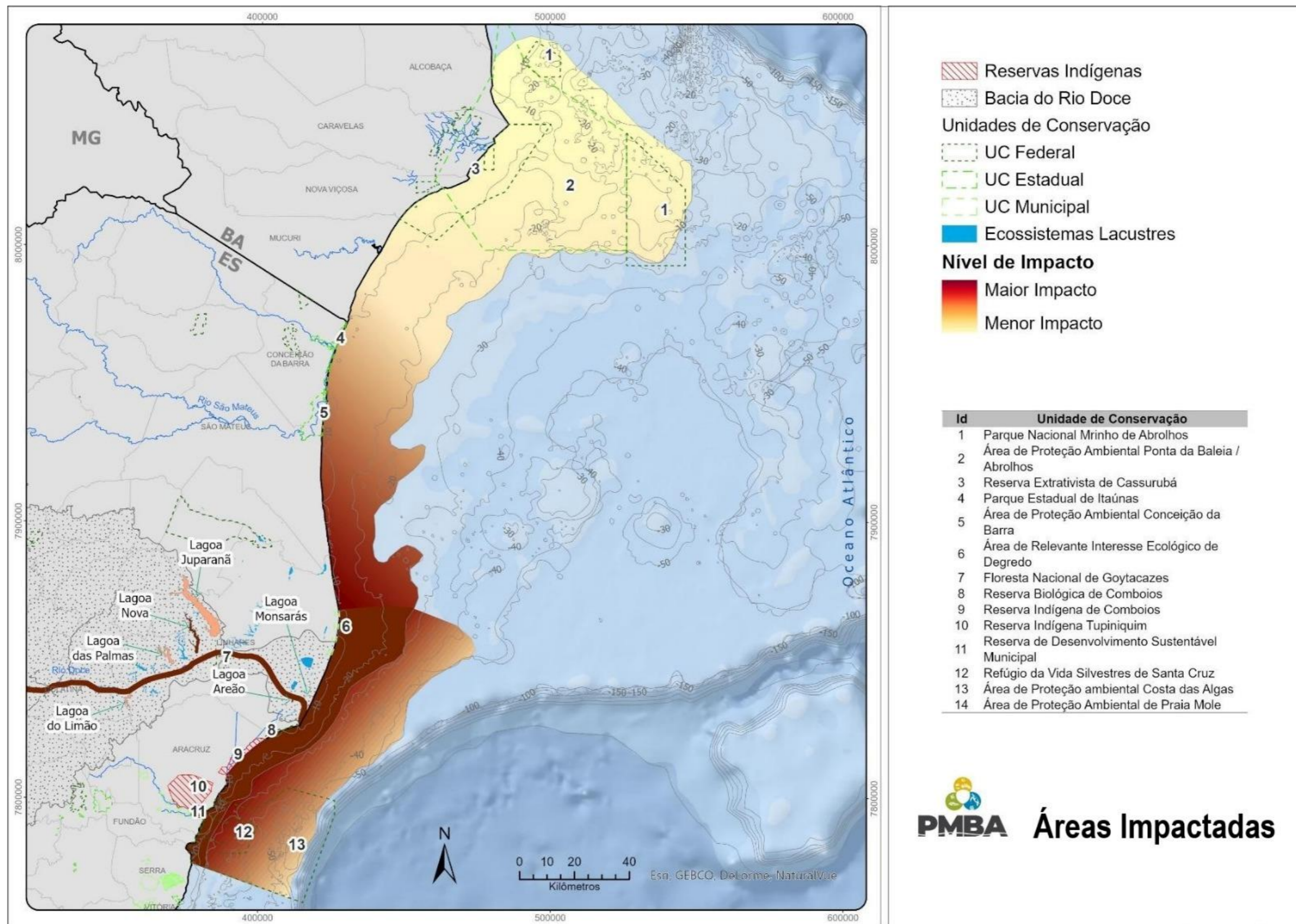


Figura 21: Mapa de espacialização dos resultados para o Ambiente Costeiro de acordo com a pontuação alcançada pela Matriz de Resultados -PMBA/Fest 2023.



Avaliando a macrodistribuição dos casos de impactos nos mapas apresentados acima, com o conhecimento específico da distribuição deles e, ainda, tendo em vista a localização das estações amostrais, foi possível, de forma sistemática, identificar as áreas impactadas pelo MLD, bem como estabelecer seus possíveis limites espaciais (Figura 22). Neste contexto, cabe ressaltar que a delimitação se mantém conforme já apresentado 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 *habitat*, morfologia da costa ou do fundo, padrões hidrodinâmicos, variação de salinidade, dentre outros; e isso significa que não existe uma malha amostral regularmente distribuída no espaço ou baseada em uma escala espacial pré-definida que possibilite uma interpolação para efetiva regionalização dos resultados. Assim, a representação de uma área se dá pelo conjunto de estações componentes que estão representando algum critério ambiental, conforme apresentado a seguir.

Figura 22: Mapa de identificação de áreas impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão no âmbito do PMBA/Fest.



Assim, o mapa de áreas impactadas 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 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 MLD impactou um *habitat* já bastante comprometido por impactos históricos e contemporâneos, cuja condição foi, ainda, drasticamente alterada em função da passagem do MLD. 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 é considerada a região *input* deste material 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. Por fim, cabe ressaltar que, como demonstrado neste relatório, os impactos foram reconhecidos, medidos, classificados e apresentados, considerando-se os critérios previamente estabelecidos e devidamente justificados.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O PMBA/Fest reuniu, ao longo dos últimos cinco anos de execução, uma série de evidências de impactos causados pela passagem e permanência do MLD, permitindo o entendimento dos efeitos espaciais e temporais nos compartimentos bióticos e abióticos da área de estudo (Bacia do baixo rio Doce e região marinhas e costeira 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 todos os compartimentos foram impactados, 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 à Sedimentologia, Química, Ecotoxicologia, Ecologia, Genética, Saúde e Comportamento. Metade dos impactos no Ambiente Dulcícola foram identificados a partir da análise comparativa com dados pretéritos - o que aumenta a robustez da descrição, ou possuem correlação com metais associados ao MLD, enquanto nos Ambientes Marinho e Costeiro esse valor extrapola os 60%. 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 subsidiados a partir dos resultados aqui apresentados. A espacialização dos resultados, 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 assertiva. 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 monitorada pelo PMBA/Fest, com evidências mostrando que mesmo os níveis ambientais/tróficos mais baixos ainda estão sob o efeito das mudanças ambientais. A manutenção do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática poderá registrar em longo prazo a permanência e/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.