

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

Material Suplementar Ambiente Costeiro

Tema: Praias

RT- 46/ JUN 24

RA2023 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2024

EQUIPE TÉCNICA

Subprojeto Morfodinâmica

Coordenador

Jacqueline Albino

Equipe

Branco Mateus Murata Eguchi

Giseli Modolo Vieira Machado

Luiz Henrique Sielski

Alexandre Burini

Denise de Sousa Paiva Tagliari

Lucas Bermudes de Castro

Maitê Noda Zanotti

Julyana Caprini Fardin

Isabele Correia dos Santos

Luana Ferreira Dias

Subprojeto Geoquímica

Coordenador

Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima

Equipe

Geisamanda Pedrini Brandão Athayde

Jefferson Rodrigues De Souza

Maiara Krause

Tiago Pereira Cunha

Larissa Dias Roriz

Suellen Geronimo Cordeiro

Ema Karolyane Barbosa Gireli

Helena Bezerra Ferrari

Luis Felipe Baptista Rampazzo

Rômulo Silveira Rodrigues

Subprojeto Bentos

Coordenador

Karla Gonçalves da Costa

Equipe

Vanessa Simão do Amaral

Gean Zanetti

Tathiana Guerra Sobrinho

Jacqueline de Almeida Neves

Amanda Deolindo Moreira

Bruna Adenalian Coelho Teixeira

Emanuely Ezidio da Silva

Isabela Jabour e Silva

Alice Aparecida Vasconcelos Soares de
Menesês

Carolyna Fracalossi Mendes

Lara Schultz Rizzo

Leonan Rodrigues de Souza

Maria Clara Garschagen Dellaqua

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL.....	4
2	METODOLOGIA.....	4
2.1	MORFODINÂMICA PRAIAL	4
2.1.1	Coleta.....	4
2.1.2	Análise.....	7
2.2	GEOQUÍMICA	12
2.2.1	Coleta.....	12
2.2.2	Análise.....	13
2.3	BENTOS	21
2.3.1	Coleta.....	21
2.3.2	Análise.....	22
2.4	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS	24
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	26
3.1	MORFODINÂMICA.....	27
3.1.1	Presença de lama.....	27
3.1.2	Alteração morfológica da praia	31
3.2	GEOQUÍMICA	35
3.2.1	Concentração de elementos químicos no sedimento.	35
3.2.2	Normalização de Elementos de Terras Raras (ETR) em sedimento	41
3.2.3	Concentração de elementos químicos na água.....	43
3.3	BENTOS	47
3.3.1	Parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica	47
3.3.2	Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica	60
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	75
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	82
6	REFERÊNCIAS	82

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostral do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) MS – Malha e Frequência amostral, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) MS – Mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais monitoradas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais monitoradas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de 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 agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia). Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

2.1 MORFODINÂMICA PRAIAL

2.1.1 Coleta

2.1.1.1 Clima de ondas

Informações sobre os parâmetros de ondas para períodos de média e curta duração foram obtidas do fundeio F1 (Ambiente Marinho, Tema Hidrodinâmica) e de dados de modelagem disponibilizados pelo portal de previsões Surf guru (www.surfguru.com.br). Os dados utilizados de modelagem foram validados através dos dados dos fundeios para, então, serem integrados às análises da morfodinâmica praial. O clima de ondas foi avaliado levando em consideração os dados de ondas do Fundeio F1

(Ambiente Marinho, Tema Hidrodinâmica) em conjunto com os dados do modelo principalmente para comparação e validação dos dados referentes à campanha de setembro de 2019 na qual ainda não havia dados de ondas disponíveis pelos fundeios.

2.1.1.2 Topobatimetria

O levantamento topobatimétrico dos perfis praias foi realizado nas 11 estações amostrais distribuídas ao longo da área de estudo. Os resultados das 2 estações (S4 e N3) retiradas do Plano de Trabalho do novo Ciclo do PMBA ainda estão incluídos neste relatório. Os perfis foram levantados a partir de um referencial fixo (marco geodésico), situado além do limite do pós-praia, e se estenderam até o limite da antepraia média, correspondente à profundidade de fechamento (isóbata de 10 m).

Os marcos geodésicos foram instalados previamente em locais de fácil acesso, de substrato estável e livre de cobertura vegetal ou quaisquer outros obstáculos que impedissem a visagem de satélites. Para a obtenção das coordenadas geodésicas dos marcos, foi realizado previamente um rastreamento de longa duração. Desta forma, foi instalado sobre o marco, com o auxílio de um tripé, um receptor GNSS, que armazenou as coordenadas medidas pelo aparelho por um período de 4 horas de aquisição. O sistema geodésico de referência utilizado foi o SIRGAS 2000.

O levantamento da porção emersa do perfil praias foi realizado por meio de posicionamento espacial e altimétrico utilizando um GNSS com função RTK, que faz correções em tempo real entre o receptor fixo na base e o receptor móvel (*rover*). A correção do posicionamento em tempo real ocorre por meio da comunicação via sinal de rádio entre os receptores, permitindo que a base transmita ao receptor móvel a posição corrigida para o ponto que se deseja conhecer a posição.

Antes de cada levantamento, o GNSS base foi instalado sobre o marco e sua posição aferida. Durante todo o levantamento topográfico o receptor móvel permaneceu acoplado ao bastão com altura fixa. O bastão foi posicionado sobre as feições do perfil praias e suas posições e altimetrias foram coletadas. Simultaneamente foi anotada a descrição da feição observada (por exemplo, duna, cordão, berma, face praias, máximo recuo das ondas e submerso). Para realização do levantamento topográfico foi utilizada a configuração em modo RTK, desta forma o GNSS/móvel coletou os dados com correção em tempo real, não sendo necessário um pós-processamento dos dados.

O levantamento do perfil na zona submarina (antepraia) foi realizado com o auxílio de uma embarcação dotada de posicionamento por GNSS/GPS, empregando ecobatimetria monofeixe com frequências de operação de 210kHz/33kHz (dupla frequência), para obtenção da profundidade e espessura da camada de lama. A navegação e a integração dos dados de posicionamento e profundidade foram feitas pelo programa *Hypack*. O ecobatímetro utilizado foi o *Midas Surveyor* da Valeport.

Com o intuito de garantir a precisão dos dados, antes da realização do levantamento foi planejado o posicionamento do transdutor e da antena GNSS/GPS na embarcação. Na sequência, com o auxílio de uma trena rígida, determinou-se a distância entre a origem do sistema (transdutor) e a antena do GNSS/GPS. Esse processo de determinação das distâncias entre os sensores é chamado de medição

dos *off-sets*. A aplicação dos *off-sets* foi realizada antes do início dos levantamentos batimétricos e os parâmetros medidos foram inseridos no programa *Hypack*.

Para a coleta de dados batimétricos utilizou-se, mais especificamente, a ferramenta *Hypack Survey* do programa *Hypack*. Esta ferramenta auxilia na navegação sobre o perfil planejado e integra os dados de posição fornecidos pelo GNSS/GPS e o valor de profundidade registrado pelo ecobatímetro. Os dados brutos foram salvos na memória do computador portátil para posterior processamento.

2.1.1.3 Sedimento

As amostras de sedimento ao longo do perfil praiar emerso foram coletadas em quatro subestações: na berma, a partir da abertura de uma pequena trincheira de aproximadamente 20 cm; na face da praia superior; na face da praia inferior e no limite praia/antepraia (zona de arrebentação das ondas), por raspagem, totalizando 4 amostras por estação.

Ao longo do perfil praiar submerso (antepraia) foram coletadas amostras superficiais nas profundidades de 5 e 10 m, totalizando mais 2 amostras por estação, com auxílio de embarcação e amostrador de fundo do tipo Van Veen. O alinhamento da embarcação em relação ao perfil topobatimétrico foi realizado por meio do software de navegação *Hypack* e seu posicionamento quanto à profundidade foi realizado a partir dos dados obtidos durante o levantamento batimétrico.

Os sedimentos coletados foram acondicionados em sacos ou potes plásticos devidamente identificados com o nome da estação amostral, a localização do ponto de coleta ao longo do perfil topobatimétrico e a data da amostragem.

Todas as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Sedimentologia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) para análise granulométrica, determinação dos teores de carbonatos, determinação dos teores e identificação dos minerais pesados e determinação dos teores de matéria orgânica total nas amostras lamosas.

2.1.1.4 Mapeamento da lama na antepraia

O mapeamento sistemático das áreas com maior deposição de lama na antepraia foi realizado por levantamentos geofísicos utilizando ecobatímetro monofeixe de dupla frequência e sonar de varredura lateral. Amostras sedimentológicas foram coletadas e posteriormente enviadas para avaliação dos parâmetros texturais e geoquímicos. Os levantamentos foram realizados na antepraia dos flancos norte e sul da planície do Rio Doce. Os limites da área de investigação foram estendidos para 7 km ao sul e 23 km ao norte da desembocadura. A área sondada inicia na imediações da foz do Rio e se estende até o limite sul na estação amostral S6 Rebio de Comboios e ao norte na estação N2 Degredo. Este mapeamento teve por objetivo verificar a distribuição espacial dos depósitos de lama na antepraia.

O plano de sondagem dentro das áreas de influência da foz contou com espaçamento de cerca de 80 m entre as linhas de sondagem, traçadas paralelamente à costa, abrangendo o início na zona de arrebentação das ondas até cerca de 10 m de profundidade, buscando incluir a profundidade de fechamento do perfil praiar. Durante o levantamento foram coletados simultaneamente os dados

batimétricos com ecobatímetro e sonar de varredura lateral, assim como dados de posicionamento obtidos por meio de receptor GNSS.

Após definidos os diferentes tipos de fundo, a partir do processamento do levantamento sonográfico, sedimentos foram coletados para verificar a interpretação do sinal acústico (*ground thruthing*). Para tanto, os sedimentos foram coletados com amostrador de fundo do tipo Van Veen, nos diferentes tipos de fundo, e principalmente nos depósitos lamosos situados na antepraia.

2.1.1.5 Aquisição de imagens aéreas e georreferenciamento para análise de variação da linha de costa

Realizou-se a aquisição das imagens aéreas correspondentes aos anos de 1970, 2007, 2014 e 2020 a partir do repositório de dados oficial do Espírito Santo, o GEOBASES. Esta etapa envolveu a obtenção das imagens brutas necessárias para a análise da variação da linha de costa.

Especificamente para as imagens de 1970, foi conduzido o processo de georreferenciamento no software ArcMap (ESRI). Este procedimento teve como objetivo associar coordenadas espaciais às imagens de 1970, garantindo sua correta posição geográfica e permitindo sua comparação com as demais imagens. As demais imagens (anos de 2007, 2014 e 2020) já estavam prontas para o uso, não necessitando de processos adicionais de georreferenciamento ou construção de ortofotomosaicos, uma vez que foram adquiridas de fontes que as disponibilizaram em condições adequadas para análise.

2.1.2 Análise

2.1.2.1 Topobatimetria

Os dados brutos obtidos no levantamento do perfil praiial com o RTK foram extraídos da controladora e exportados em arquivo ASCII. Os arquivos contêm as coordenadas geográficas (latitude e longitude), altimetria do terreno, além de dados complementares quanto à classificação da feição praiial observada, inseridos no momento da aquisição. Informações auxiliares de incerteza horizontal e vertical (HSDV e VSDV) e de geometria de satélites (HDOP e VDOP) também foram extraídas com a finalidade de verificar a qualidade dos dados. Os dados foram planilhados e processados em Excel, verificando a consistência dos valores de latitude, longitude e altimetria para a área de estudo. A partir do horário do término de cada levantamento, foi realizado o ajuste altimétrico de cada perfil ao nível médio do mar local, segundo técnica sugerida por Bigarella et al. (1961). Como referência maregráfica foram utilizados os dados de maré disponíveis no site da Marinha do Brasil, referentes ao Terminal de Barra do Riacho, o referencial mareográfico mais próximo da área de estudo (DHN, 2021).

Os dados brutos do levantamento batimétrico foram extraídos da Central de Controle do ecobatímetro por meio do programa *SurveyLog*. A partir deste programa os dados foram exportados e apresentados nos formatos .BIN, ASCII e XYZ. Esses arquivos foram processados no módulo *Single Beam Process* do programa *Hypack*, no qual foram conferidos os valores de *offsets* da disposição dos equipamentos na embarcação e aplicada a correção da maré para o dia e a hora do levantamento, com base na tábua de maré do Terminal de Barra do Riacho (DHN, 2021).

O processamento dos dados batimétricos prosseguiu com a remoção dos picos de sondagem (*spikes*), que consistem em dados espúrios que não refletem a profundidade real. Em função da alta frequência de aquisição dos dados (6 Hz), estes foram suavizados para compensar o movimento da embarcação durante a sondagem. Para isto, foi utilizada a ferramenta *smooth* do programa de processamento.

O arquivo auxiliar .BIN também foi carregado no pacote *Single Beam Process*. Esse formato de arquivo permitiu a visualização dos ecogramas para interpretação dos padrões de fundo e verificação/validação dos valores batimétricos.

Os dados dos perfis expressos em distâncias e cotas, gerados pelo levantamento topobatimétrico dos perfis praias e antepraia, foram plotados em gráficos 2D por meio do programa *Excel* da *Microsoft*. Em função da dificuldade de navegação na zona de arrebentação é esperada uma lacuna de informação na antepraia rasa. Para preencher esta lacuna foi realizada a interpolação dos dados de batimetria e topografia e os perfis foram concetados para obtenção final do perfil topobatimétrico.

2.1.2.2 Sedimentologia

- Granulometria

A determinação da granulometria dos sedimentos arenosos foi realizada por meio de peneiramento a seco. Inicialmente, as amostras foram lavadas para a retirada do sal e colocadas na estufa para secar a uma temperatura média de 40°C. Após a secagem, as amostras foram quarteadas por meio do quarteador do tipo Jones até o peso aproximado de 50 g. Na sequência, a amostra quarteada foi posta no agitador de peneiras por 15 minutos. Para o peneiramento foi utilizado um jogo de peneiras com malha de -2 a 4 ϕ (4 a 0,063 mm) (Tabela 1). Após o peneiramento, o sedimento retido em cada peneira foi pesado para a determinação do percentual de cada fração granulométrica.

Para determinar o teor e granulometria dos sedimentos lamosos foi realizada primeiramente o peneiramento úmido de toda a amostra na malha de 4 ϕ (0,063 mm), a fim de separar os sedimentos arenosos (<4 ϕ) dos lamosos (>4 ϕ). Para retirar a matéria orgânica do sedimento lamoso, foi adicionado peróxido de hidrogênio (H₂O₂) em alíquotas das amostras totais de lama. O procedimento de queima foi realizado em chapa aquecedora na capela de exaustão de gases. As amostras foram lavadas para retirada do peróxido e sua granulometria foi determinada pelo granulômetro a laser *Malvern*.

A partir do percentual das frações granulométricas, os parâmetros estatísticos propostos por Folk & Ward (1957) foram calculados para todas as amostras por meio do programa GRADISTAT (Blott, &Pye, 2001).

Tabela 1: Especificação da malha das peneiras para o peneiramento a seco.

Φ	mm
- 2,00	4,000
-1,75	3,360
-1,25	2,380
-1,00	2,000
- 0,50	1,410
0,00	1,000
0,50	0,710
1,00	0,500
1,50	0,350
2,00	0,250
2,50	1,770
3,00	0,125
3,25	0,105
3,75	0,074
4,00	0,063

- Teor de carbonato no sedimento

A determinação do teor de carbonato foi realizada a partir de sua queima com ácido clorídrico 10% (HCl). Neste procedimento, foram utilizados cerca de 50 g das amostras pré-processadas (lavadas, secas e quarteadas). A amostra foi, então, colocada em um béquer, ao qual foi adicionado o HCl até a completa dissolução dos carbonatos. O procedimento de queima foi realizado em chapa aquecedora na capela de exaustão de gases.

Na sequência, as amostras foram lavadas para a retirada do ácido e, então, colocadas para secar na estufa a uma temperatura em torno de 40 °C. O descarte do resíduo da lavagem foi realizado em um recipiente próprio para o descarte de reagentes. Após a secagem, as amostras foram pesadas para quantificação do teor de carbonato.

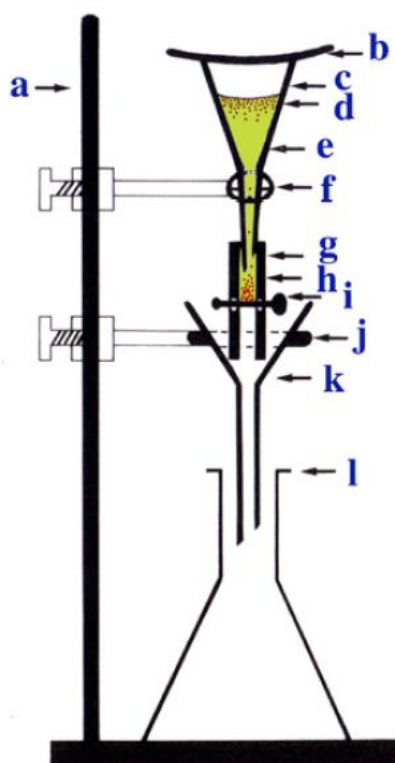
- Teor e identificação de minerais pesados no sedimento

A determinação do teor de minerais pesados foi realizada por meio do método gravitacional utilizando bromofórmio. Após a dissolução do carbonato de cálcio, as amostras foram colocadas em um funil de separação contendo bromofórmio e agitadas com um bastão de vidro (Figura 1-c).

Decorridos alguns minutos, os minerais pesados se depositaram no tubo de borracha associado ao funil (Figura 1-g). Com a pinça que prende a borracha foi aberta uma pequena passagem para que os minerais pesados fossem transferidos para o funil com um filtro de papel (Figura 1-l e k). Os minerais retidos neste filtro foram lavados com álcool e o resíduo da lavagem foi descartado em um recipiente

próprio para o descarte de reagentes. A amostra foi, então, colocada no dessecador para secagem. Após a secagem, os sedimentos foram pesados para a quantificação do teor de minerais pesados.

Figura 1: Estrutura para separação de minerais pesados pelo método gravitacional. a) estrutura de apoio; b) vidro relógio; c) funil de separação; d) minerais leves; e) líquido de separação (bromofórmio); f) suporte do funil; g) tubo de borracha; h) minerais pesados; i) pinça que permite ou não a passagem do líquido e da fração pesada; j) suporte do funil de filtração; k) funil de filtração; l) frasco de recepção.



A identificação dos minerais pesados foi realizada por meio de observação em lupa binocular. Neste sentido, foram observados 300 grãos de minerais pesados em cada fração resultante do peneiramento a seco (GaleHouse, 1971). As amostras que possuíam um número inferior a este, tiveram todos os minerais pesados presentes identificados.

Para descrição dos resultados, os minerais pesados foram agrupados de acordo com suas propriedades físicas de densidade e químicas de estabilidade, o que permite avaliar o grau de maturidade do pacote sedimentar (Van Gosen, *et al.*, 2014; Garzanti, 2017). Minerais pesados com densidade superior a 4 g/cm³ foram agrupados como mais densos, sendo estes: zircão, rutilo, monazita e minerais opacos. Minerais pesados com densidade inferior à 3,5 g/cm³ foram agrupados como menos densos, sendo estes: anfibólio, turmalina, silimanita e epidoto. Minerais ultraestáveis são: zircão, turmalina e rutilo e minerais instáveis: anfibólio e epidoto.

- Teor de matéria orgânica total no sedimento

O teor de matéria orgânica total foi quantificado para as amostras lamosas por meio de sua queima em forno mufla a 450°C durante 4 horas. Para este procedimento foram separados cerca de 2 g da amostra

em cadinhos de cerâmica que foram colocados na mufla. A partir da diferença entre o peso inicial da amostra e o peso final, após a queima, foi determinado o teor de matéria orgânica total.

2.1.2.3 Mapeamento de lama na antepiraia

Os dados batimétricos foram processados conforme a seção 2.1.2.1. Já os dados sonográficos foram processados corrigindo a geometria do dado, executando o rastreamento do fundo e aplicando correções de ganho variáveis em função do tempo de retorno e da distorção devido à inclinação na incidência do sinal acústico. *Slope Varying Gain - SVG* e *Time Varying Gain -TVG*. Os sonogramas processados foram então utilizados para produzir mosaicos que possibilitaram a identificação de distintos tipos de fundo. Depois de identificados os fundos lamosos, os mosaicos sonográficos foram utilizados para estabelecer a continuidade lateral e abrangência dos diferentes tipos de fundo.

As amostras de sedimento coletadas para verificar a interpretação do sinal acústico (*ground thruthing*) foram processadas de acordo com a seção 2.1.2.2 para a obtenção dos parâmetros granulométricos e de acordo com a seção 2.2.2.1 e 2.2.2.3 para obtenção da composição geoquímica.

2.1.2.4 Análise da mobilidade da linha de costa na foz do Rio Doce

- Construção do ortofotomosaico para 1970

As imagens georreferenciadas de 1970 foram utilizadas para a construção de um ortofotomosaico específico para este ano. O ortofotomosaico é uma representação geográfica retificada das imagens aéreas, corrigindo distorções causadas por fatores como altitude do voo, inclinação da câmera e deformações do terreno. Essa etapa foi realizada para garantir a obtenção de uma imagem corrigida e de alta precisão para o ano de 1970.

- Identificação manual da linha de vegetação

A identificação manual da linha de vegetação foi realizada para todos os ortofotomosaicos de 1970, 2007, 2014 e 2020. Utilizando o software ArcMap, as áreas vegetadas no limite costeiro de cada período de imagens foram cuidadosamente demarcadas e registradas. Essa abordagem permitiu criar camadas de referência para cada ano analisado, oferecendo informações precisas sobre a posição da linha de costa em cada período.

- Avaliação da mobilidade da linha de costa

Para realizar a análise da variação da linha de costa, foi utilizado o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). O DSAS foi desenvolvido pelo *U.S. Geological Survey* (USGS) *Coastal and Marine Geology Program* para auxiliar na análise e monitoramento de mudanças na linha de costa (Thieler et al., 2009). A ferramenta foi projetada para uso em conjunto com o software ArcGIS, fornecendo uma interface amigável para análise de dados geoespaciais relacionados à geomorfologia costeira.

Dentro do DSAS, a análise da variação da linha de costa foi conduzida com base em transectos, que são linhas perpendiculares à linha de costa. Foi adotado um espaçamento de 100 metros entre os

transectos, permitindo uma representação adequada da variação da linha de costa ao longo do tempo para cada par de anos.

Foram calculados quatro parâmetros de variação da linha de costa: SCE (*Shoreline Change Envelope*), NSM (*Net Shoreline Movement*), EPR (*End Point Rate*) e LRR (*Linear Regression Rate*) para cada par de anos analisado (1970-2007, 2007-2014 e 2014-2020), bem como para o período total de 1970-2020. Essas taxas ofereceram *insights* sobre as mudanças na linha de costa e sua evolução ao longo do tempo.

SCE (*Shoreline Change Envelope*): a taxa SCE, também conhecida como envelope de mudança da linha de costa, é uma medida da mudança total da linha de costa entre dois períodos de tempo. Essa taxa calcula a distância máxima de recuo ou avanço da linha de costa dentro de uma determinada área de estudo. O valor do SCE representa a diferença entre a posição mais avançada e a posição mais recuada da linha de costa ao longo dos períodos analisados.

NSM (*Net Shoreline Movement*): A taxa NSM, ou Movimento Líquido da Linha de Costa, mede a mudança líquida da linha de costa entre dois períodos de tempo. Essa taxa leva em consideração tanto as áreas de avanço quanto as áreas de recuo da linha de costa, fornecendo uma medida do deslocamento líquido das áreas costeiras. O valor do NSM pode ser positivo, indicando um avanço da linha de costa, ou negativo, indicando um recuo.

EPR (*End Point Rate*): A taxa EPR, ou Taxa de Ponto Final, é uma medida da taxa média de mudança da linha de costa ao longo de um período de tempo específico. Essa taxa calcula a taxa média de recuo ou avanço da linha de costa por ano, em metros. O EPR fornece uma visão geral das mudanças ocorridas na linha de costa durante o período analisado.

LRR (*Linear Regression Rate*): A taxa LRR, ou Taxa de Regressão Linear, é uma medida da taxa de mudança da linha de costa estimada por meio de uma regressão linear. A regressão linear é aplicada aos dados da linha de costa ao longo do tempo para estimar a taxa de recuo ou avanço. A taxa LRR fornece uma representação da tendência de mudança da linha de costa ao longo do período analisado.

2.2 GEOQUÍMICA

2.2.1 Coleta

A coleta de amostras de água e sedimento foi realizada concomitantemente ao estudo da morfologia e sedimentologia das praias. A coleta das amostras de sedimento superficial na praia (berma, face superior, face inferior e antepraia rasa) foi realizada com coletores de plástico, a fim de evitar a contaminação das amostras. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos (tipo Ziplock) previamente identificados e mantidas sob refrigeração, em caixa térmica com gelo, para a sua preservação até o laboratório. Nas isóbatas de 5 m e 10 m, a coleta de sedimento foi realizada com auxílio de um amostrador de fundo do tipo Van Veen. O sedimento dragado foi transferido para bandejas plásticas e amostrado, com o auxílio de uma colher de plástico, coletando porções de diferentes pontos do sedimento e as transferindo para sacos plásticos (tipo ZipLock) previamente

identificados. Vale destacar que, durante a coleta das amostras, o sedimento que entrou em contato com a superfície interna do amostrador Van Veen não foi amostrado, para tanto, a camada superior do sedimento foi descartada antes da amostragem. O amostrador Van Veen foi lavado abundantemente com água do próprio ponto de coleta para evitar contaminação cruzada entre as amostras coletadas em diferentes pontos. Após o procedimento de amostragem, as amostras de sedimento foram mantidas sob refrigeração, em caixa térmica com gelo, para a sua preservação até o laboratório.

As amostras de água em profundidade (50 cm acima do fundo) foram coletadas nas isóbatas de 5 e 10 m com o auxílio de uma garrafa de Van Dorn. Ao chegar à superfície, as amostras de água foram transferidas para garrafas plásticas descontaminadas e previamente identificadas. A amostra de água utilizada para a determinação do teor total de elementos químicos foi acidificada utilizando HNO_3 subdestilado até $\text{pH} < 2$. Para a obtenção da fração dissolvida, a amostra de água total foi filtrada em membrana de porosidade $0,45 \mu\text{m}$ e a amostra filtrada foi recolhida e acidificada até $\text{pH} < 2$. O material particulado em suspensão (MPS) retido no filtro foi acondicionado em tubos de polipropileno. Todas as amostras foram mantidas refrigeradas em caixa térmica.

Todas as amostras de sedimento e água para a determinação de elementos químicos foram encaminhadas ao Laboratório de Espectrometria Atômica do Núcleo de Competências em Química do Petróleo (NCQP) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). No laboratório, as amostras de sedimento e água foram armazenadas em freezer a -22°C observando os prazos de validade para as análises (6 meses a partir do momento da coleta).

2.2.2 Análise

2.2.2.1 Preparo das amostras de sedimento

Para o início das análises em laboratório, as amostras de sedimento foram secas em estufa a 60°C por 72 horas (peso constante). Após resfriamento em dessecador, as amostras de sedimento foram peneiradas para obter a fração $< 1 \text{ mm}$. Nessa fração, foi realizado o quarteamento da amostra para obtenção de uma fração representativa; as amostras quarteadas foram acondicionadas em sacos plásticos, previamente identificados, até o momento da pesagem.

Para a decomposição parcial (pseudo total) das amostras de sedimento foi utilizado o método US EPA 3051A. Uma massa de aproximadamente 250 mg da amostra de sedimento fino (\varnothing partículas $< 1 \text{ mm}$) e seco foi pesada em frascos de Teflon para uso em forno micro-ondas seguindo-se a adição de 10 mL de HNO_3 concentrado destilado. As amostras foram mantidas em repouso à temperatura ambiente dentro da capela por aproximadamente 15 minutos para uma pré-decomposição. Ao final desse período, as amostras foram submetidas à decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas utilizando um programa de aquecimento que consiste no aquecimento por $5,5 \pm 0,25 \text{ min}$ até atingir a temperatura de $175 \pm 5^\circ\text{C}$, com permanência nessa temperatura por 4,5 min, sendo a última etapa de resfriamento por 10 min. Em seguida, os frascos foram deixados por 30 min à temperatura ambiente para resfriamento e posterior abertura. As soluções obtidas foram filtradas com papel de filtro

quantitativo de filtração rápida (faixa preta de 12,5 cm), transferidas para um tubo de polipropileno e o volume aferido para 25 mL com água ultrapura de resistividade 18 MΩ cm.

Para o procedimento de decomposição total das amostras de sedimentos, para posterior determinação dos elementos terras raras, foi utilizado o método US EPA 3052. Aproximadamente 200 mg da amostra de sedimento seco (\emptyset partículas < 1mm) foram pesados em frascos de Teflon próprio para o uso no forno micro-ondas, onde foram adicionados 9 mL de HNO_3 , 3 mL de HF e 1,2 g de H_3BO_3 . O ácido bórico foi adicionado para promover a complexação do fluoreto remanescente. Após a etapa de pré-decomposição (aproximadamente 15 minutos, à temperatura ambiente, na capela), os frascos foram devidamente fechados e a mistura submetida à decomposição assistida por radiação micro-ondas. O programa de temperatura utilizado consistiu no aquecimento à $180 \pm 5^\circ\text{C}$ em aproximadamente 5,5 minutos e permanência nesta temperatura por 9,5 minutos; foi utilizado um tempo de resfriamento de 10 min. Concluído o ciclo, o rotor do micro-ondas foi retirado e mantido por cerca de 30 min à temperatura ambiente dentro da capela para posterior abertura dos tubos. Ao final, a solução foi filtrada em funil de polipropileno e papel de filtro quantitativo de filtração rápida (faixa preta de 12,5 cm), e o filtrado transferido quantitativamente para um tubo de polipropileno e avolumado para 25 mL com água ultrapura.

Para determinação de Hg nas amostras foi utilizado o analisador direto de mercúrio DMA-80. Esta técnica é recomendada, pois pode-se trabalhar diretamente com as amostras, dispensando-se a etapa de pré-tratamento, necessitando apenas que as amostras sólidas estejam secas.

2.2.2.2 Preparo das amostras de água

Para a determinação dos elementos químicos em sua fração total foi utilizado o método US EPA 3015A. Uma alíquota de 20 mL da amostra de água homogeneizada foi transferida para um frasco de Teflon próprio para o uso no forno micro-ondas, onde foram adicionados 4 mL de HNO_3 concentrado. Após a adição, os frascos foram devidamente fechados e a mistura foi submetida à decomposição assistida por radiação micro-ondas. O programa de temperatura utilizado consistiu no aquecimento à 175°C em 5,5 min e permanência por 4,5 min; seguido do resfriamento por 10 min. Após o período de resfriamento dos tubos, a solução foi transferida quantitativamente para um tubo de polipropileno e avolumada para 25 mL com água ultrapura.

Para a determinação dos elementos químicos na fração dissolvida, uma alíquota de 10 mL dessa amostra foi transferida para um tubo de polipropileno, onde foram adicionados 200 μL de trietilamina (TEA) para coprecipitar os elementos químicos com o $\text{Mg}(\text{OH})_2$. A mistura foi agitada por 1 minuto com o auxílio do vórtex e posteriormente centrifugada por 15 minutos a 3000 rpm. Após a centrifugação, o sobrenadante foi retirado e descartado e o precipitado obtido foi ressolubilizado com 2 mL de HNO_3 5% v v⁻¹. A solução final foi avolumada para 4 mL com água ultrapura.

Para o preparo das amostras de MPS foi utilizado o método US EPA 3051A. O filtro seco contendo a amostra de MPS foi pesado em frascos de Teflon para o uso em forno micro-ondas seguindo-se a adição de 10 mL de HNO_3 concentrado destilado. Após a adição do ácido, as amostras foram mantidas

em repouso por aproximadamente 15 minutos à temperatura ambiente dentro da capela (etapa de pré-decomposição). Ao final desse período, os frascos foram fechados adequadamente e submetidos à decomposição assistida por radiação micro-ondas. Foi utilizado um programa de temperatura que consiste em aquecimento à 175 ± 5 °C em aproximadamente $5,5 \pm 0,25$ min e permanência nesta temperatura por 4,5 minutos; foi utilizado um tempo de resfriamento de 10 min. Concluído o ciclo, retirou-se o rotor do micro-ondas deixando-o por cerca de 30 min à temperatura ambiente dentro da capela para posterior abertura dos tubos. Ao final, a amostra decomposta foi filtrada utilizando funil de polipropileno e papel de filtro quantitativo de filtração rápida (faixa preta de 12,5 cm). A solução obtida foi acondicionada em tubo de polipropileno e avolumada para 25 mL com água ultrapura.

2.2.2.3 Determinação elementar nas amostras de sedimento

A determinação dos elementos químicos nas amostras foi realizada por diferentes técnicas analíticas dependendo da concentração dos analitos nas amostras e da capacidade de detecção das técnicas. Tendo em vista as características de desempenho analítico da espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), ela foi utilizada para determinação dos elementos em níveis traço, enquanto para os elementos minoritários e majoritários a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) foi empregada. A determinação de mercúrio foi realizada diretamente nas amostras de sedimento e água utilizando o analisador direto de mercúrio (DMA-80).

Os limites de quantificação (LQ) e os respectivos isótopos (ou comprimentos de onda) obtidos para os elementos Al, As, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, V e Zn pelo método de extração parcial são apresentados na Tabela 2 e para os elementos La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc e Y pelo método de decomposição total são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Detalhamento da técnica analítica utilizada na determinação dos analitos na matriz sedimento, pelo método de extração parcial (EPA 3051A), e seus respectivos comprimentos de onda/Isótopo e Limites de quantificação (LQ).

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
Extração parcial (EPA 3051A)	Al	ICP OES	396,153	-	3,45
	As	ICP-MS	-	75	0,19
	Ba	ICP-MS	-	137	0,12
	Cd	ICP-MS	-	114	0,07
	Co	ICP-MS	-	59	0,11
	Cr	ICP-MS	-	53	0,32
	Cu	ICP-MS	-	63	0,7
	Fe	ICP OES	259,939	-	8,89
	Mn	ICP OES	257,610	-	0,13
	Ni	ICP-MS	-	60	0,17
	Pb	ICP-MS	-	208	0,12
	Sn	ICP-MS	-	120	0,21
	V	ICP-MS	-	51	0,12
	Zn	ICP OES	206,200	-	2,5

Tabela 3: Detalhamento da técnica analítica utilizada na determinação dos analitos na matriz sedimento, pelo método de decomposição total (EPA 3052), e seus respectivos comprimentos de onda/Isótopo e Limites de quantificação (LQ).

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
Total (EPA 3052)	La	ICP-MS	-	139	0,003
	Ce	ICP-MS	-	140	0,094
	Pr	ICP-MS	-	141	0,018
	Nd	ICP-MS	-	146	0,070
	Sm	ICP-MS	-	152	0,018
	Eu	ICP-MS	-	151	0,005
	Gd	ICP-MS	-	160	0,016
	Tb	ICP-MS	-	159	0,008
	Dy	ICP-MS	-	162	0,018
	Ho	ICP-MS	-	165	0,006
	Er	ICP-MS	-	166	0,017
	Tm	ICP-MS	-	169	0,003
	Yb	ICP-MS	-	174	0,018
	Lu	ICP-MS	-	175	0,006
	Sc	ICP-MS	-	45	5,611
	Y	ICP-MS	-	89	0,038

A exatidão das metodologias foi avaliada pela análise dos materiais de referência certificados (MRC) de sedimento marinho NIST 2702 e de sedimento estuarino BCR – 667 (*European Commission*). Os valores obtidos pelo método US EPA 3051A foram comparados por recuperação da extração e estão apresentados na Tabela 4. Os valores obtidos pelo método US EPA 3052 estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 4: Comparação entre os valores (mg kg^{-1}) encontrados e certificados para o MRC NIST 2702 Sedimento Marinho (n=3) pelo método US EPA3051A.

Elementos	Concentração (média \pm desvio padrão)		Recuperação (%)
	Valor certificado	Valor encontrado	
Al	84100 \pm 2200	20637 \pm 5513	24
As	45,3 \pm 1,8	33,0 \pm 1,4	73
Ba	397,4 \pm 3,2	73,1 \pm 5,9	18
Cd	0,817 \pm 0,011	0,36 \pm 0,01	44
Co	27,7 \pm 0,58	21,3 \pm 0,75	76
Cr	352 \pm 22	181 \pm 11	51
Cu	117,7 \pm 5,6	95,5 \pm 2,8	81
Fe	74000	47677 \pm 14504	64
Mn	1757 \pm 58	1100 \pm 330	62
Ni	75,4 \pm 1,5	22,53 \pm 4,4	29
Pb	132,8 \pm 1,1	106,3 \pm 5,6	80
Sn	31,6 \pm 2,4	5,82 \pm 2,12	18
V	357,6 \pm 9,2	245,7 \pm 10,9	68
Zn	485,3 \pm 4,2	269,5 \pm 82,2	55

Tabela 5: Comparação entre os valores (mg kg^{-1}) encontrados e certificados para o MRC BCR – 667 (European Commission) (n=3) pelo método US EPA 3052.

Elementos	Concentração (média \pm desvio padrão)	
	Valor certificado	Valor encontrado
La	27,8 \pm 1	26,6 \pm 3,2
Ce	56,7 \pm 2,5	55 \pm 6,6
Pr	6,1 \pm 0,5	5,88 \pm 0,81
Nd	25 \pm 1,4	25,1 \pm 3,4
Sm	4,66 \pm 0,2	4,74 \pm 0,78
Eu	1 \pm 0,05	0,322 \pm 0,167
Gd	4,41 \pm 0,12	4,17 \pm 0,67
Tb	0,682 \pm 0,017	0,055 \pm 0,123
Dy	4,01 \pm 0,14	3,65 \pm 0,55
Ho	0,8 \pm 0,06	0,538 \pm 0,114
Er	2,35 \pm 0,15	1,68 \pm 0,28
Tm	0,326 \pm 0,025	0,161 \pm 0,035
Yb	2,2 \pm 0,09	1,54 \pm 0,21
Lu	0,325 \pm 0,02	0,336 \pm 0,03
Sc	13,7 \pm 0,7	10,2 \pm 9
Y	16,7-25,3	18,9 \pm 3,2

A determinação de mercúrio foi realizada diretamente nas amostras de sedimento fino (\varnothing partículas < 1 mm) e seco utilizando o analisador direto de mercúrio (DMA-80). Para isso, uma massa de 100 mg

de amostra de sedimento, acondicionada em barcas de níquel, foi introduzida no equipamento. O comprimento de onda utilizado foi de 253.65 nm e o LQ obtido nas amostras de sedimentos foi de 1,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$. O CRM NIST 1547 foi analisado diretamente e o valor obtido ($25,5 \pm 0,3 \mu\text{g kg}^{-1}$) foi concordante com o valor certificado ($31,7 \pm 4,3 \mu\text{g kg}^{-1}$).

2.2.2.4 Determinação elementar nas amostras de água

Os limites de quantificação (LQ) e os respectivos isótopos (ou comprimentos de onda) obtidos para os elementos pelos métodos de determinação dos elementos químicos na água total, na fração dissolvida e no material particulado em suspensão estão apresentados nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 6: Detalhamento da técnica analítica utilizada na determinação dos analitos na matriz água, pelo método de decomposição total (EPA 3015A), e seus respectivos comprimentos de onda/Isótopo e Limites de Quantificação (LQ).

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg L ⁻¹)
Água total (EPA 3015A)	Al	ICP-MS	-	27	66,2
	As	ICP-MS	-	75	4,18
	Ba	ICP OES	455,403	-	12,8
	Cd	ICP-MS	-	114	0,375
	Co	ICP-MS	-	59	0,184
	Cr	ICP-MS	-	52	1,03
	Cu	ICP-MS	-	63	6,54
	Fe	ICP-MS	-	57	27,0
	Mn	ICP-MS	-	55	1,49
	Ni	ICP-MS	-	58	1,31
	Pb	ICP-MS	-	208	0,314
	Sn	ICP-MS	-	120	9,67
	V	ICP-MS	-	51	0,284
	Zn	ICP-MS	-	66	11,6

Tabela 7: Detalhamento da técnica analítica utilizada na determinação dos analitos na matriz água (fração dissolvida), pelo método de coprecipitação, e seus respectivos comprimentos de onda/Isótopo e Limites de Quantificação (LQ).

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg L ⁻¹)
Coprecipitação	Al	ICP-MS	-	27	2,96
	As	ICP-MS	-	75	0,103
	Ba	ICP OES	455,403	-	
	Cd	ICP-MS	-	114	0,011
	Co	ICP-MS	-	59	0,005
	Cr	ICP-MS	-	52	0,081
	Cu	ICP-MS	-	63	0,080
	Fe	ICP-MS	-	57	1,11
	Mn	ICP-MS	-	55	0,061

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg L ⁻¹)
	Ni	ICP-MS	-	58	0,073
	Pb	ICP-MS	-	208	0,007
	Sn	ICP-MS	-	120	0,124
	V	ICP-MS	-	51	0,016
	Zn	ICP-MS	-	66	0,440

Tabela 8: Detalhamento da técnica analítica utilizada na determinação dos analitos no material particulado em suspensão (MPS) e seus respectivos comprimentos de onda/Isótopo e Limites de Quantificação (LQ).

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
MPS (EPA 3051A)	Al	ICP OES	396,153	-	15,9
	As	ICP-MS	-	75	0,67
	Ba	ICP-MS	-	137	2,00
	Cd	ICP-MS	-	114	0,10
	Co	ICP-MS	-	59	0,12
	Cr	ICP-MS	-	53	3,00
	Cu	ICP-MS	-	63	0,90
	Fe	ICP OES	259,939	-	42,1
	Hg	AAS (DMA-80)	253,65	-	7,00*
	Mn	ICP OES	257,610	-	0,65
	Ni	ICP-MS	-	60	1,39
	Pb	ICP-MS	-	208	0,49
	Sn	ICP-MS	-	120	0,34
	V	ICP-MS	-	51	0,77
	Zn	ICP OES	206,200	-	9,60

*µg kg⁻¹

A exatidão do método US EPA 3015A foi avaliada pela análise do material de referência certificado (MRC) de água marinha ERM-CA403. Para o método de coprecipitação o MRC *Trace Metals 1 in seawater* – QC (LRAB2290, Sigma, Brasil) foi utilizado. Os valores obtidos pelo método US EPA 3015a estão apresentados na Tabela 9. Os valores obtidos pelo método de coprecipitação estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 9: Comparação entre os valores ($\mu\text{g L}^{-1}$) encontrados e informados para o *Trace Metals 1 in seawater* – QC (n=3) pelo método US EPA3015A.

Elementos	Concentração (média \pm desvio padrão)	
	Valor certificado	Valor encontrado
Al	1830 \pm 32,6	2024
As	584 \pm 10,4	545
Ba	-	-
Cd	609 \pm 10,	351
Co	588 \pm 10,5	538
Cr	426 \pm 7,60	378
Cu	120 \pm 2,15	88
Fe	2340 \pm 42,0	2186
Mn	477 \pm 851	449
Ni	-	-
Pb	533 \pm 7,60	320
Sn	-	-
V	104 \pm 1,85	66
Zn	1420 \pm 25,4	958

Tabela 10: Comparação entre os valores ($\mu\text{g L}^{-1}$) encontrados e certificados para o MRC água marinha ERM-CA403 (n=3) pelo método de coprecipitação.

Elementos	Concentração (média \pm desvio padrão)	
	Valor certificado	Valor encontrado
Al	-	-
As	1,90 \pm 0,13	1,85 \pm 0,05
Ba	-	-
Cd	0,094 \pm 0,011	0,103 \pm 0,01
Co	0,074 \pm 0,011	0,086 \pm 0,01
Cr	0,21 – 0,31	0,314 \pm 0,02
Cu	0,87 \pm 0,13	0,781 \pm 0,2
Fe	2,7 – 4,2	5,78 \pm 0,04
Mn	2,47 \pm 0,11	3,13 \pm 0,14
Ni	1,04 \pm 0,16	0,761 \pm 0,14
Pb	0,098 \pm 0,010	0,154 \pm 0,004
Sn	-	-
V	-	-
Zn	4,6 \pm 0,6	4,66 \pm 1,3

A determinação de mercúrio foi realizada diretamente nas amostras de água total e da fração dissolvida utilizando o analisador direto de mercúrio (DMA-80). Para isso, uma massa de 100 mg de amostra de água, acondicionada em barcas de quartzo, foi introduzida no equipamento. O comprimento de onda

utilizado foi de 253,65 nm e o LQ obtido nas amostras de sedimentos foi de 3,00 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para água total e 4,00 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para a fração dissolvida.

2.2.2.5 Cálculo do índice *Sediment Quality Guideline Quotients*

O SQG-q é obtido pela normalização das concentrações de cada elemento químico em relação aos seus respectivos valores de *Probable Effects Level* (PEL) estabelecidos pelos dados coletados no âmbito do programa *National Status and Trends Program* do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA; Buchman, 2008). De acordo com SQG-q, a qualidade do ambiente pode ser classificada em três categorias em relação aos prováveis efeitos adversos à fauna bentônica; não impactado para valores de SQG-q < 0,1; moderadamente impactado para valores entre 0,1 e 1 e fortemente impactado para valores superiores a 1.

2.2.2.6 Normalização dos ETRs e cálculos das anomalias de Cério e Európio

O perfil de distribuição dos elementos terras raras (ETR) normalizados foi obtido a partir das concentrações totais de ETR dividido pela concentração elementar do normalizador *Post Archean Australian Shale* (PAAS), com exceção de Sc e Y, uma vez que o normalizador não apresenta valores de referências para tais elementos. As anomalias de ocorrência do Ce/Ce* e Eu/Eu* foram calculadas segundo Taylor e McLennan (1995), a partir das concentrações normalizadas $Ce/Ce^* = [3 \times Ce_{normalizado}] / [2 \times La_{normalizado} + Nd_{normalizado}]$ e $Eu/Eu^* = Eu_{normalizado} / \sqrt{(Sm \times Gd)}$, sendo PAAS o normalizador.

2.3 BENTOS

2.3.1 Coleta

Para o monitoramento da estrutura da comunidade de invertebrados bentônicos marinhos ocorreram duas coletas (semestrais) e em eventos climáticos (ressacas, ondas, ventos, chuvas intensas) para amostragens da macrofauna e meiofauna nas praias do litoral norte do Espírito Santo. O objetivo do monitoramento é avaliar os impactos provenientes do resíduo de mineração no comportamento da fauna bentônica marinha em praias arenosas sob possível influência da pluma de sedimento. Nessa região, algumas áreas já possuem dados anteriores que serão usados para fins de comparação.

As coletas foram realizadas em 11 estações amostrais distribuídas ao longo do litoral norte do Espírito Santo em diferentes faixas de praia: antepraia (infralitoral), face praial (mesolitoral) e berma (supralitoral), sempre em maré baixa de sizígia. Em cada estação, foram realizados três transectos, onde foram coletadas amostras em quatro níveis: berma (supralitoral), face superior (mesolitoral superior), face inferior (mesolitoral inferior) e antepraia rasa (infralitoral). O mesolitoral é o local que compreende a distância entre a linha da maré mais alta e o limite inferior de recuo máximo das ondas no horário previsto para a maré mais baixa de sizígia. O supralitoral encontra-se acima do mesolitoral, em direção a duna e o infralitoral é a região submersa, onde as amostras são coletadas a uma profundidade aproximada de 1 m. Foram coletadas uma amostra de macrofauna e uma amostra de meiofauna em cada um dos níveis de cada transecto, totalizando 12 amostras de cada componente

bentônico por estação amostral (as amostras serão coletadas em triplicata em cada faixa de cada ponto).

As coletas nas isóbatas de 5 e 10 m, realizada em triplicata, foram feitas na embarcação, com auxílio de draga Van Veen, totalizando 6 amostras por estação amostral.

Na praia emersa, as amostras foram tomadas com coletores cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 20 cm de profundidade. Nas isóbatas, as amostras foram coletadas com pegador de fundo do tipo Van Veen. Todas as amostras da macrofauna foram lavadas em água do mar no próprio campo, em malha de 0,5 mm de abertura. Após lavadas, foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente etiquetados e fixadas em álcool etílico 70%, garantindo a preservação de dados moleculares e morfológicos para estudos futuros.

Para a meiofauna as amostras foram coletadas com coletores cilíndricos de 2 cm de diâmetro e 10 cm de profundidade. Nas isóbatas, as amostras foram coletadas em triplicata com pegador de fundo do tipo Van Veen, de onde inicialmente foram retiradas as amostras de meiofauna (2 cm de diâmetro e até 10 cm de profundidade, quando possível) e o restante foi usado para a análise da macrofauna. Todas as amostras foram diretamente acondicionadas em frascos plásticos etiquetados, fixados em solução de formalina a 10% e adicionado corante rosa de bengala para melhor visualização dos organismos no momento da triagem em laboratório.

Todas as amostras de sedimento para as análises da fauna bentônica (macro e meiofauna) foram encaminhadas ao Laboratório de Ecossistemas Marinhos do Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

2.3.2 Análise

2.3.2.1 Análise em laboratório

Em laboratório, a macrofauna foi triada manualmente e os organismos encontrados foram identificados até a menor categoria taxonômica possível sob microscópio estereoscópico e óptico, com auxílio de bibliografia especializada e enviados aos especialistas quando necessário. A meiofauna das amostras da porção emersa foi extraída do sedimento por elutriação em água, sendo o sobrenadante passado em peneira de 0,063 mm de abertura e triagem manual. No entanto, como as amostras das isóbatas são lamosas e com sedimento muito fino (diferente das amostras da porção emersa e antepraia rasa), a meiofauna foi extraída por um processo de flotação em solução de açúcar com densidade 1,14 g/ml, como descrito por Esteves *et al.* (1995). O tratamento constitui em agitação manual das amostras e repouso. Após 40 minutos as amostras foram lavadas em malha de 0,063 mm. Em seguida foram armazenadas e fixadas com solução de formol a 10%. Com essa metodologia, a meiofauna é totalmente separada do sedimento, facilitando a triagem e a preparação das lâminas para identificação.

Posteriormente, o material foi identificado ao nível de grandes grupos em placas de *Dollfus* compostas por 200 quadrados utilizando, para tal, um microscópio estereoscópio.

2.3.2.2 Análise dos dados

Para verificar possíveis variações dos parâmetros da diversidade de invertebrados bentônicos entre os compartimentos e campanhas, foram aplicadas análises de variâncias (ANOVA), através de modelos lineares generalizados (GLMs), tendo os parâmetros de diversidade como variáveis dependentes e campanha e compartimento como as variáveis explicativas categóricas em todos os modelos. A partir das variações significativas observadas entre compartimentos e de posse dos dados referentes aos atributos físico-químicos presentes no ambiente, como a granulometria e as concentrações dos elementos químicos, foram feitos testes estatísticos para verificar como os parâmetros da diversidade respondem às concentrações de tais elementos em cada compartimento. As variáveis resposta (dependentes), num primeiro momento, foram os parâmetros de diversidade básicos da comunidade: densidade e riqueza de espécies observadas, Diversidade de Shannon-Wiener (H' , \log_2), equitabilidade (J' de Pielou) e diversidade beta total. As variáveis explicativas (independentes) foram os compartimentos (A, B', C), bem como as campanhas, além das concentrações de lama e dos principais elementos químicos advindos do rejeito. Para tais testes foram realizadas análises de covariância (ANCOVA), adequadas quando existem variáveis X tanto categóricas quanto contínuas nos modelos. Além disso, os mesmos protocolos de análises descritos para os parâmetros da diversidade bentônicas também foram realizados para os grupos-chave, para os quais suas densidades serão sempre as variáveis resposta nos modelos ajustados.

Para todas as análises relativas aos parâmetros numéricos das comunidades foram construídos modelos lineares generalizados (GLMs), usando-se as distribuições de erros adequadas e corrigindo sub ou sobre dispersões (WARTON *et al.*, 2016) quando ocorrerem. Todos os modelos construídos, bem como todos os testes estatísticos foram realizados na plataforma R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2023). Todas as análises foram submetidas à análise de resíduos para verificação das distribuições de erro utilizadas, adequação dos modelos e retirada de possíveis 'outliers'.

Análises de ordenação multidimensional do tipo NMDS e ANOSIM também foram realizadas com o intuito de verificar se a estrutura taxonômica (composição e densidade) varia entre as estações amostrais, bem como entre os períodos (seco/chuvoso). Quando as variações foram significativas, a análise percentual de similaridade (SIMPER) foi executada para verificar quais táxons foram os principais influenciadores de quaisquer diferenças observadas entre grupos de amostras. Mais uma vez, tais abordagens e testes robustos no monitoramento da biodiversidade nos permitem responder se as modificações observadas nas comunidades bentônicas são devidas aos impactos por elas experimentados, mesmo embora não tenhamos áreas controles e dados pretéritos. Todas as análises relativas à estrutura da fauna bentônica foram realizadas utilizando o software Primer v7 (CLARKE & GORLEY, 2015).

Apesar do tamanho macrofaunal dos poliquetas intersticiais *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura* cf. *varioidentata*, esses habitam os espaços entre os grãos de sedimento, justificando que sejam tratados como um único grupo funcional, os "poliquetas intersticiais" ou "fauna intersticial" (WESTHEIDE, 2008). Quando considerados na macrofauna, a alta abundância desses organismos em praias arenosas,

principalmente de grãos mais grossos, causa a superestimação da densidade e biomassa do local (VANOSMAEL *et al.*, 1982). Dessa forma, visando uma melhor acuidade das análises da macrofauna, os poliquetas intersticiais *S. pussicus* e *H. variodentata* foram retirados das análises dos descritores desse grupo e tratados separadamente como grupos chave.

2.3.2.3 Coleção

Uma coleção biológica pode ser entendida como um conjunto de organismos, ou partes destes, preservados fora do ambiente natural, isto é, de seu sítio de coleta. Seus componentes são preparados e organizados de modo a informar a procedência e identificação taxonômica de cada um dos espécimes, o que lhe confere status científico. Tais acervos, muito mais que servirem como repositórios de material biológico à pesquisa científica, subsidiam atividades de ensino e importante prestação de serviços, além de apresentarem valioso material de importância histórica. Sumarizando, organizar, qualificar e disseminar a informação taxonômica e biogeográfica, além de promover a conservação *ex situ* de exemplares da biodiversidade são os maiores objetivos de uma coleção biológica.

A importância das coleções científicas, mantidas especialmente nos museus de história natural, é inegável. Algumas dessas coleções são de abrangência mundial, abrigam dezenas de milhões de exemplares e têm um fluxo de visitação ininterrupto de biólogos, ambientalistas e outros pesquisadores que necessitam consultar o seu acervo. As coleções científicas constituem, de fato, uma fonte crucial de informação para todos os que, por sua atividade, têm contato com seres vivos.

Em 2014, a instituição UFES-CEUNES, recebeu a aprovação do credenciamento como fiel depositária de amostras de componentes do patrimônio genético para a Coleção Zoológica Norte Capixaba – CZNC (Credenciamento nº 114/2014/SECEX/CGEN, publicado no D.O.U nº 200, de 16 de outubro de 2014, Seção 3, página 143.), sendo, portanto, todo produto deste monitoramento tombado na referida coleção, com as autorizações para atividades com finalidade científica SISBIO nºs 64178-7 e 73539-1 e IEMA Proc. nº 89091876, Autorização de Pesquisa NUBIO nº 004-2020 para o Parque Estadual de Itaúnas.

Os indivíduos identificados (macro e meiofauna) foram registrados na Coleção Zoológica Norte Capixaba - CZNC na divisão de invertebrados marinhos. Organismos da macrofauna foram colocados em frascos, fixados em álcool 70%, registrados, numerados, etiquetados e guardados. Os representantes da meiofauna são condicionados em frascos tipo flaconete ou *eppendorfs*, fixados em álcool, registrados, numerados e etiquetados.

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Exclusão das análises de identificação de carbonato e morfoscopia – Morfodinâmica: a identificação em lupa das classes de sedimentos carbonáticos e da morfoscopia dos grãos de quartzo, foram excluídas do Plano de Trabalho do Ambiente Costeiro para o Novo Ciclo do PMBA/Fest (iniciado em agosto de 2022), devida à constância destas variáveis, que não apresentaram grandes variações ao longo do tempo de monitoramento e também à baixa correlação com o impacto do rejeito de lama.

Inserção mapeamento de lama na antepraia – Morfodinâmica: o mapeamento de lama na antepraia foi incorporado no Plano de Trabalho do Ambiente Costeiro para o Novo Ciclo do PMBA/Fest (iniciado em agosto de 2022) como um monitoramento semestral contemplando os períodos seco e chuvoso, para identificar e monitorar áreas de maiores concentrações de lama.

Inserção da análise da variação da linha de costa – Morfodinâmica: a análise da variação decadal (1970, 2007, 2014 e 2020) da linha de costa adjacente ao Rio Doce foi incorporada no Plano de Trabalho do Ambiente Costeiro para o Novo Ciclo do PMBA/Fest (iniciado em agosto de 2022) como um produto único, com objetivo de identificar tendências históricas de alterações da posição da linha de costa existentes antes do Rompimento da Barragem e possíveis modificações nas taxas de acreção/retração da costa após a entrada de lama na antepraia decorrente deste evento.

Inserção das análises de MPS – Geoquímica: o material particulado em suspensão (MPS), considerado um parâmetro importante na avaliação dos potenciais impactos do aporte do rejeito na área de monitoramento, ressaltado pelos revisores da EKOS Ambiental após a avaliação do Relatório Anual 2019 (RA2019), passou a ser analisado a partir do Ano 2 de monitoramento. Além da quantificação de MPS, em mg/L, foram determinadas as concentrações dos elementos químicos no MPS.

Inserção das análises geoquímicas na água do mar – Geoquímica: a partir de agosto de 2022, após aprovação do novo acordo (Novo Ciclo PMBA/Fest) também foi inserido o monitoramento de elementos químicos na água do mar em sua fração total e dissolvida, levando em consideração as interações que ocorrem entre o sedimento e a coluna d'água. Com a inserção do estudo da hidrogeoquímica do ambiente, é possível obtermos conclusões mais precisas e um estudo mais completo do meio.

Exclusão das análises da fração biodisponível do sedimento– Geoquímica: tendo em vista a inclusão das análises de água na fração total e dissolvida, a fração biodisponível do sedimento se torna desnecessária, já que passamos a avaliar as frações em que os elementos se encontram mais disponíveis para serem assimilados pelos organismos vivos. Dessa forma, a análise da fração biodisponível do sedimento foi retirada no novo acordo.

Inserção das análises de ETRs no sedimento – Geoquímica: o monitoramento dos elementos terras raras (ETRs) no sedimento também foi inserido no Novo Ciclo PMBA/Fest, com o intuito de obtermos um marcador geoquímico para chegada do rejeito, de tal forma que através do comportamento desses elementos nas amostras coletadas, seja possível tirar conclusões sobre a presença ou não do rejeito proveniente do Rompimento.

Adaptações na metodologia da análise estatística – Bentos: a descrição da fauna bentônica na avaliação espaço-temporal foi realizada considerando as características sedimentológicas das praias, mantendo o agrupamento original das praias do Compartimento B'. O subprojeto Bentos não adotou a subdivisão do Compartimento B' em dois (B e B'), como abordados pelos subprojetos Morfodinâmica e Geoquímica, devido à semelhança dos parâmetros ecológicos da fauna bentônica entre as praias desse

setor. Dessa forma, para as análises estatísticas, a variável categórica “Compartimento” é formada por três setores, sendo o Compartimento A ($n=3$), o B’ ($n=4$) e o C ($n=4$). Essa diferença no n amostral no modelo apresenta um pequeno desequilíbrio amostral. Ao subdividir o Compartimento B’ em dois, este desequilíbrio se torna mais acentuado, tornando o modelo ainda mais desbalanceado, tendo o Compartimento A ($n=3$), B ($n=1$), B’ ($n=3$) e o C ($n=4$), reduzindo o poder estatístico ao observar as diferenças reais do ambiente. Comparar duas categorias em que uma tem uma amostra e outra três é desaconselhável estatisticamente, porém, discussões pontuais, como ocorre na integração dos dados bióticos e abióticos de praia, foram feitas com base em resultados exploratórios. Para o relatório e análises da fauna bentônica, utilizamos a nomenclatura B’ para esse compartimento.

Inserção das análises de diversidade e equitabilidade - Bentos: a partir da Campanha de agosto de 2022 foram incluídas as análises da diversidade beta e equitabilidade de Pielou.

Exclusão do detalhamento da Nematofauna - Bentos: a partir da Campanha de agosto de 2022 foi mantido apenas a densidade média de Nematoda como parte da meiofauna bentônica.

3 RESULTADOS DOS INDICADORES

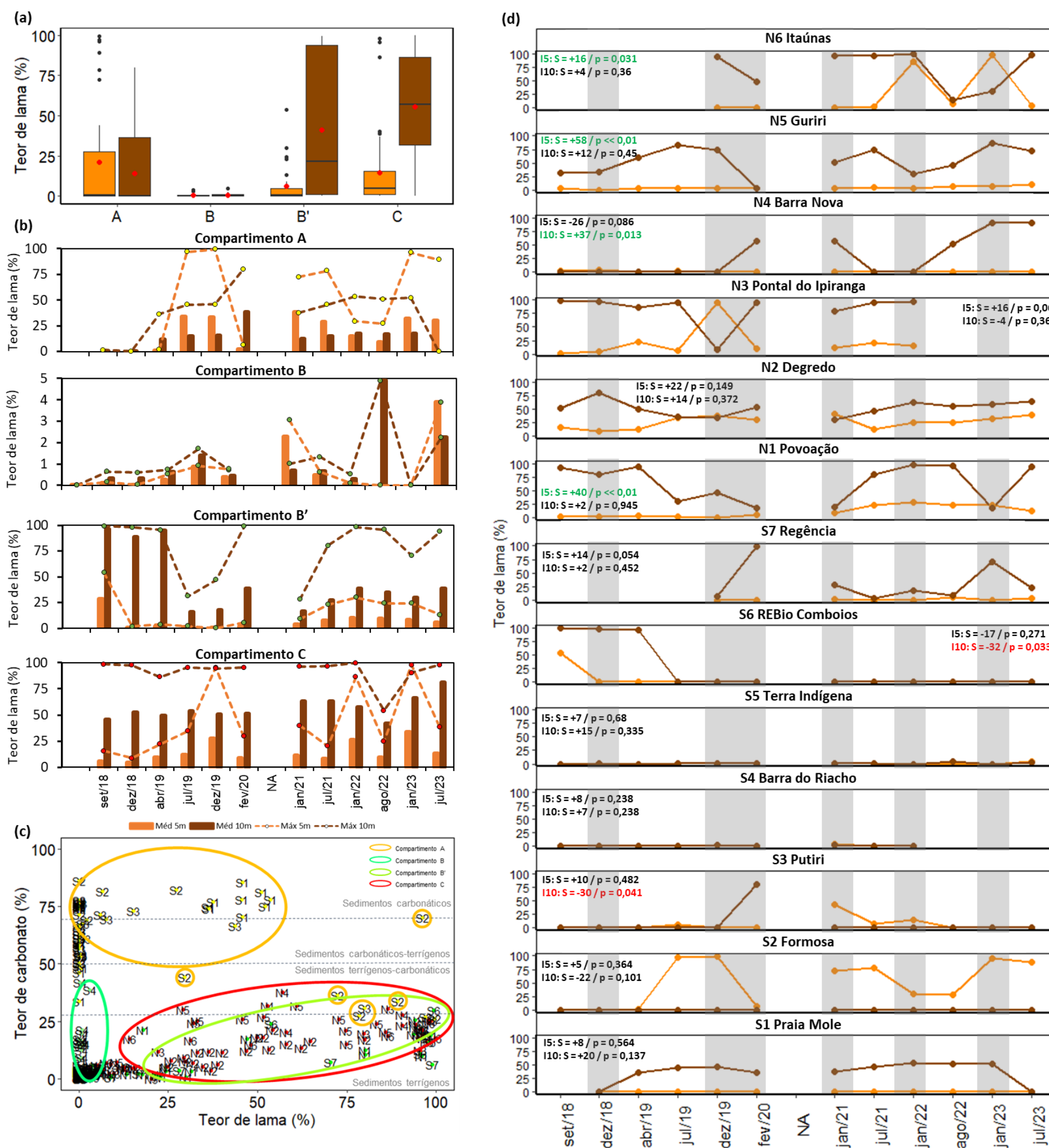
Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar 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. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao Rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

3.1 MORFODINÂMICA

3.1.1 Presença de lama

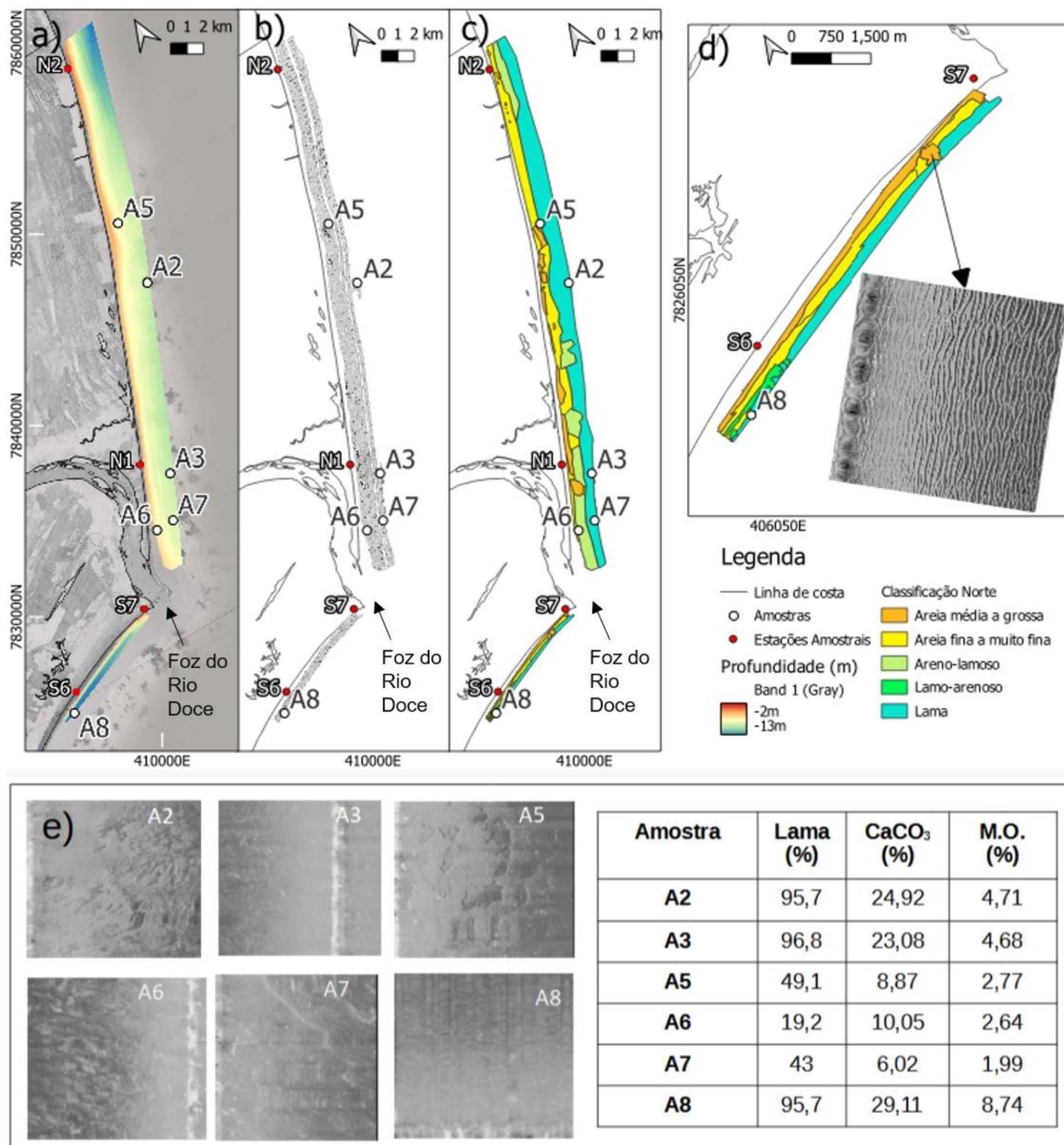
Figura 2: Teor e composição da lama. Para este indicador, utilizou-se dados somente da antepraia (isóbatas de 5 e 10 m), uma vez que na praia emersa os teores de lama são nulos ou muito baixos. (a) Mostra a variação espacial do teor de lama ao longo dos Compartimentos, através dos box-plots que apresentam a mediana (linha preta) e a média (ponto vermelho), para as profundidades de 5 m (laranja) e 10 m (marrom). (b) Apresenta a variação temporal dos teores médios e máximos dentro dos Compartimentos. (c) Apresenta uma regressão linear entre o teor de lama e de carbonato dos sedimentos da antepraia, destacando as características semelhantes dentro de cada Compartimento e delimitando as classes de composição do sedimento, baseado na sua proveniência (carbonática, terrígena e as combinações destes) (Larsonneur, 1977). (d) Apresenta a variação temporal do teor de lama para cada uma das estações que compõem os Compartimentos para isóbata de 5 m (laranja) e 10 m (marrom). Este gráfico acompanha os respectivos valores estatísticos referentes ao teste de tendência monotônica de Mann-Kendall (S é referente ao parâmetro estatístico do teste, no qual valores positivos (negativos) estão em verde (vermelho) e representam tendências de aumento (diminuição) da série de dados e sua magnitude, sendo p , referente ao nível de significância do teste, considerado aqui acima de 95%). Os dados utilizados na construção dos gráficos foram do período de set/2018 à jul/2023. Destaques em cinza representam períodos chuvosos. Períodos sem dados são referentes à interrupção das atividades de campo devido à pandemia de COVID-19 e adição/exclusão tardia de estações amostrais.



O **Compartimento A** apresenta teor médio de lama na antepraia ($17,9 \pm 12,8\%$) com valor intermediário em comparação com os demais (a), com composição predominantemente carbonática (c), sendo que temporalmente, seus teores de lama são variados. A estação S1 Praia Mole apresenta teores altos e constantes em 10 m ($36,6 \pm 15,5\%$) (d) com composição majoritariamente carbonática (c); enquanto S2 Formosa (d) possui os maiores teores de lama em 5 m do Compartimento A ($59,7 \pm 39,0\%$), com grande variação e eventual composição terrígena (c); por fim, S3 Putiri apresenta dois picos de lama ao longo do monitoramento, um na profundidade de 5m (jan/21: $43,7\%$) e outro em 10 m (fev/20: $79,9\%$) (d). Neste Compartimento, uma única tendência significativa, de redução dos teores de lama, foi observada na profundidade de 10 m em S3 Putiri. O **Compartimento B** apresenta os menores teores médios de lama na antepraia ($0,8 \pm 1,2\%$) ao longo do litoral monitorado (a), sem grandes variações temporais (b) e a composição predominantemente terrígena (c). Os teores de lama das estações dentro deste Compartimento não ultrapassam 5% e são praticamente constantes, com uma tendência de redução apenas na profundidade de 10 m em S5 Terra Indígena. O **Compartimento B'** apresenta teor médio de lama na antepraia ($23,4 \pm 34,6\%$) com valor intermediário-alto em comparação com os demais (a), com composição inteiramente terrígena (c) e com maiores teores de lama ocorrendo na profundidade de 10 m (b). A estação S6 Comboios (d) apresentou altos valores de lama em 10 m, somente nas três primeiras campanhas (set/18; dez/18; abril/19: $97,5 \pm 1,9\%$), com valores permanentemente nulos nas demais, por isso, apresentando uma tendência de diminuição da concentração de lama; a estação S7 Regência, imediatamente ao sul da desembocadura, apresentou altos valores de lama somente em 10 m durante os períodos chuvosos (fev/20, jan/21, jan/22 e jan/23: $53,5 \pm 38,0\%$), evidenciando a contribuição direta da carga de sedimentos do Rio Doce para esta estação (d); a estação N1 Povoação (d), imediatamente ao norte da desembocadura, é a que mais contribui constantemente para os altos teores de lama na antepraia deste Compartimento, com maiores teores em 10 m ($64,2 \pm 34,2\%$), mas também significativos em 5 m ($11,6 \pm 10,8\%$), com tendência significativa de aumento nesta profundidade, o que sugere um transporte da lama para profundidades mais rasas. O **Compartimento C** é o que apresenta maiores e mais constantes teores médios de lama na antepraia ($35,2 \pm 35,1\%$) em relação aos demais Compartimentos (a), em ambas profundidades, 5 e 10 m (b) e com composição majoritariamente terrígena (c). A estação N2 Degredo (d) apresenta os maiores valores e alta constância nos teores de lama na antepraia em geral, chegando até 40% em 5 m de profundidade ($26,0 \pm 9,2\%$) e 80% em 10m ($51,5 \pm 10,3\%$); N3 Pontal do Ipiranga (d) apresenta maiores valores de lama na profundidade de 10 m ($93,0 \pm 6,5\%$) e menores, mas ainda significativos, em 5 m ($20,7 \pm 28,8\%$); a estação N4 Barra Nova (d) apresenta teores praticamente nulos em 5 m, mas altos valores e variações periódicas sem sazonalidade em 10 m ($29,0 \pm 37,6\%$), com tendência significativa de aumento; N5 Guriri apresenta baixos, porém incomuns, valores de lama em 5 m ($4,4 \pm 2,4\%$), com uma tendência significativa de aumento, enquanto na profundidade de 10 m apresenta alto teor na maior parte do tempo ($53,9 \pm 25,7\%$). A estação N6 Itaúnas (d) apresentou valores de lama significativos em 5 m em jan/22 e jan/23 ($92,0 \pm 8,0\%$), com uma tendência de aumento nesta profundidade, enquanto em 10 m os valores são altos e mais constantes ($68,5 \pm 36,6\%$).

Concluindo, a **distribuição longitudinal da lama** parece indicar uma situação crônica no Compartimento C, com altas quantidades de lama terrígena na antepraia, em 5 m e principalmente 10 m, o que não é esperado para um ambiente praial, especialmente nas porções mais rasas da antepraia. O Compartimento B' é influenciado diretamente pela vazão do rio, o que reflete nos altos teores de lama, principalmente em 10 m, em especial a estação N1 Povoação. Importante ressaltar que as três estações que apresentaram tendência de aumento no teor de lama estão localizadas no flanco norte da Planície. A presença de altos valores de lama ocorre também no Compartimentos A, que apesar da composição majoritariamente carbonática, há uma fração terrígena que eventualmente supera a carbonática, principalmente em S2 Formosa e S3 Putiri. O Compartimento B não apresenta valores significativos de lama. O incremento de lama dentro do sistema praial tipicamente arenoso pode trazer alterações a médio e longo prazo como aplainamento da praia e consequente aumento dos eventos inundacionais, além de interrupção do transporte das frações arenosas da antepraia para a praia emersa devido ao trapeamento ocasionado pela lama, desencadeando processos erosivos ocasionados por déficit sedimentar.

Figura 3: Presença de lama na antepraia. Mapeamento batimétrico (a) e sonográfico (b) do leito marinho realizado em março e outubro de 2023 na antepraia adjacente à desembocadura do Rio Doce. (c) Classificação granulométrica do leito marinho baseado no levantamento sonográfico e nas análises granulométricas das amostras coletadas no interior da área de interesse (pontos em branco). (d) Detalhe da classificação granulométrica no flanco sul da planície. (e) Imagem dos diferentes sinais acústicos dos depósitos lamosos presentes na antepraia adjacente à foz do Rio Doce, além dos teores de lama, carbonato de cálcio (CaCO_3) e matéria orgânica (M.O.) das amostras de sedimento de fundo.

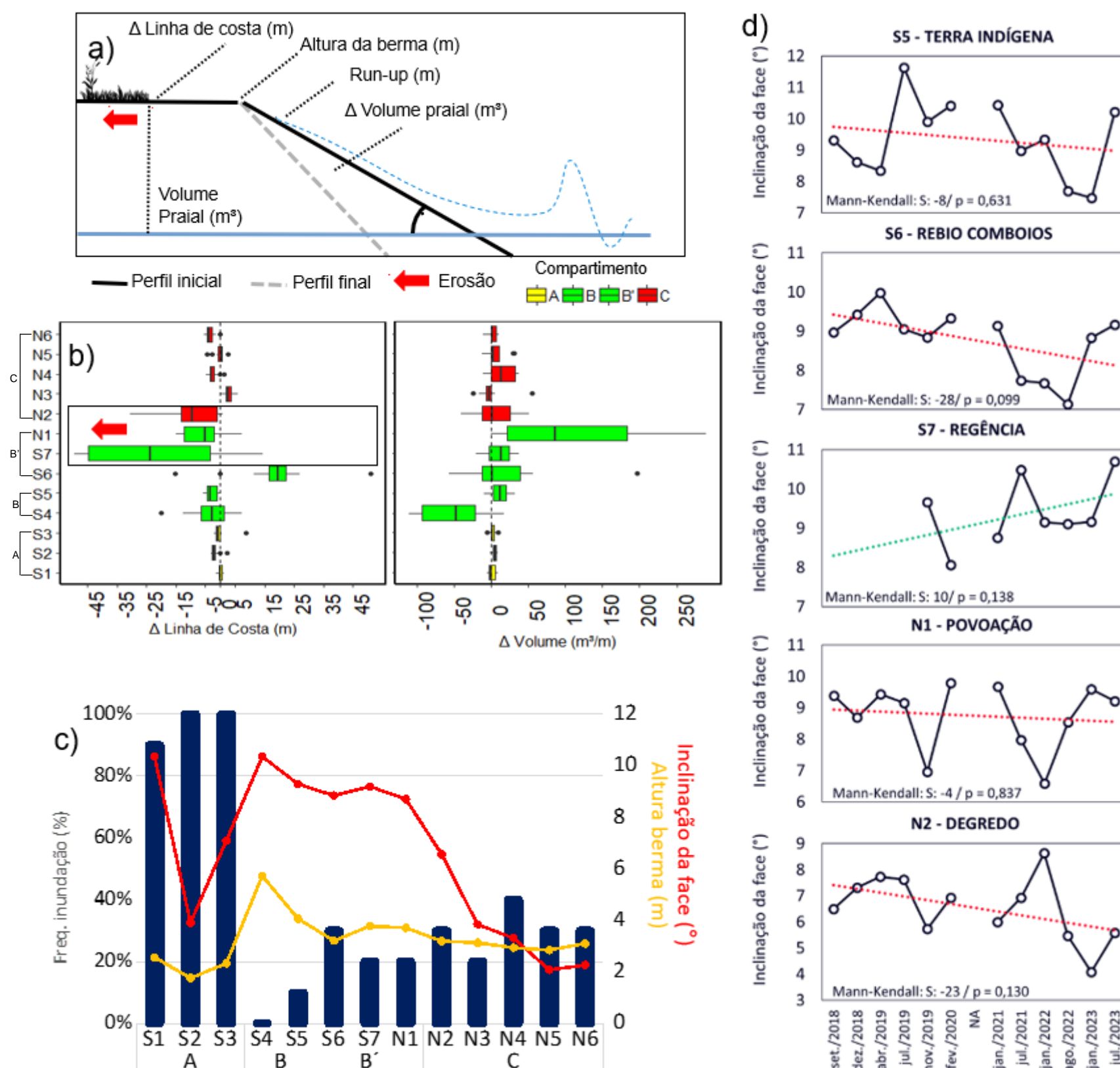


A batimetria revela diferenças significativas entre a largura e a declividade da antepraia dos flancos sul e norte da planície do Rio Doce e que influenciam no padrão de distribuição de lama entre o sul e norte da foz (Figura 3— a, b e c). No flanco sul, nas imediações da foz, sob influência direta da carga do rio e próximo à estação S7 Regência, a antepraia rasa (aproximadamente em 2 m de profundidade), apresenta inclinação acentuada, próximo a 4°, que se torna mais amena em direção à antepraia inferior (em torno de 1°). Mais distante da foz, próximo à estação S6 REBio Comboios, o relevo é marcado por uma elevação abrupta do leito entre a praia e a antepraia, (aproximadamente 6°) o que define uma antepraia estreita, com largura inferior a 200 m. No flanco norte da planície, a antepraia é mais larga, em torno de 2.000 m e declividade menos acentuada, em média 1°, com as linhas isobatimétricas espaçadas próximo à foz e mais estreitas ao norte da área, próximo da estação N2 Degredo. A topografia mais suave e mais rasa demonstra preferência de deposição de sedimentos mais finos que são aportados pelo Rio Doce na zona costeira e transportados para o norte, no sentido resultante do transporte da deriva litorânea, e depositados na antepraia (Oliveira et al., 2015).

Nos sinais de retroespalhamento acústico de fundo da antepraia do flanco sul há um predomínio de marcas de ondas arenosas (Figura 3 - d) assimétricas, em sua maioria sinuosas e lunares, tanto simples como compostas. O padrão de espalhamento acústico mais claro e rugoso, entre as profundidades de 5 e 10m, são correlatos com os dados de amostra de fundo coletadas ao longo do monitoramento nas estações S6 Comboios e S7 Regência e que indicam uma predominância de areias fina a muito fina ao sul. Os sinais acústicos característicos de fundo lamoso, com aspecto escuro e liso, são raros na antepraia do flanco sul, mas aparecem junto à foz e na antepraia profunda, além dos 10 m de profundidade e intercalados com bancos arenosos. Os sinais acústicos de fundo lamoso são mais frequentes ao norte da foz e apresentam coloração mais escura e aspecto que variam de lisos/homogêneos a heterogêneos (amostras A3 e A5, respectivamente). Os resultados granulométricos mostram a presença de altos teores de lama (superior a 80%) na região mais profunda da área, próximo a 8m de profundidade, nas amostras A2 e A3 (Figura 3 - c), enquanto que teores de lamas inferiores a 30% são comuns em águas mais rasas. Os teores de M.O. são inferiores a 5% e teores de CaCO₃, que indica contribuição sedimentar marinha, são inferiores a 30% havendo, portanto, a proveniência dominante de lama terrígena. Ao norte da foz, o fundo marinho apresenta maior heterogeneidade nos padrões sonográficos lamosos, sugerindo uma maior mistura entre os tipos de sedimento, lamosos e arenosos, e que sugerem uma relação de dependência com o aporte recente do rio para a antepraia. Enquanto, ao sul da foz, em função da elevação abrupta do relevo entre a antepraia profunda e a rasa, a transição entre sedimentos arenosos e lamosos é mais bem marcada e condicionada pela rápida mudança na profundidade. O levantamento sonográfico e batimétrico da antepraia do entorno da foz confirmam, por fim, o transporte de lama aportada pelo rio para norte e junto à costa, seguindo o sentido preferencial da corrente, e a deposição intercalada a bancos arenosos. Na antepraia ao sul da foz, exposta às ondas mais energéticas de sul e sudeste, a deposição de lama é dificultada e, quando ocorre, aparece intercalada a bancos arenosos e em geral restrita à região mais funda da antepraia. Uma consequência possível com o incremento de lama na antepraia é o trapeamento dos sedimentos arenosos, impedindo-os de serem transportados até a praia, desencadeando o déficit sedimentar e erosão na praia.

3.1.2 Alteração morfológica da praia

Figura 4: Morfologia das praias, linha de costa e eventos de inundação da berma por ação do espraçamento da onda. (a) diagrama dos parâmetros morfológicos avaliados ao longo dessa seção, com destaque para atuação da onda e do espraçamento da onda sobre a face (linha pontilhada azul), sendo: Δ **Linha de Costa (m)**: a variação da posição no contato da praia com a restinga; Δ **Volume Praia (m³/m)**: a variação de volume de sedimentos, abaixo do perfil ativo emerso, entre o NMM e linha de costa (contato praia/restinga); **Run-up (m)** a altura máxima do alcance do espraçamento da onda em relação ao NMM; **Altura da berma (m)** a altura correspondente a maior elevação da berma em relação ao NMM; e **Inclinação da face (°)** a inclinação calculada entre o NMM e a superfície basal da face praial. Os valores negativos de Δ **Linha de Costa (m)** representam a retração do perfil rumo ao continente, e Δ **Volume praial (m³/m)** representa a redução do volume de areia da praia emersa ativa, a variação desses parâmetros tem como base a primeira campanha amostral (ago/2018) em comparação com as campanhas subsequentes.; (b) mobilidade do perfil praial baseada nos parâmetros Δ **Linha de Costa (m)** e **Volume Praia (m³/m)** (c) distribuição espacial da frequência de eventos em que o *run-up* transpõe a berma praial, o que indica a chegada do espraçamento até as feições superiores da praia, e valores médio da inclinação da face praial (°) e altura da berma (m) das estações amostrais. d) Evolução temporal das inclinações das faces praias entre as estações S5 Terra Indígena, e N2 Degredo com seus respectivos valores estatísticos referentes ao teste de tendência monotônica de Mann-Kendall (S é referente ao parâmetro estatístico do teste, no qual valores positivos (negativos) representam tendências de aumento (diminuição) da série de dados e sua magnitude; e p é referente ao nível de significância do teste, considerado aqui acima de 95%).



As praias do Compartimento A são pouco desenvolvidas em termo de volume de sedimento e apresentam a menor variação nos parâmetros morfológicos avaliados, tanto em Δ **Volume praial (m³/m)** como em Δ **Linha de Costa (m)**, podendo ser consideradas praias estáveis temporalmente (Figura 4b). Quanto à frequência de eventos inundacionais (Figura 4c), quando o *run-up* transpõe a berma praial, essas praias apresentam as maiores ocorrências, com os valores superiores a 85%. A baixa inclinação dos perfis, com bermas ausentes ou pouco desenvolvidas e a presença de couraças lateríticas impermeabilizando o leito marinho potencializam o empilhamento da onda junto à costa e, também, o acesso de possíveis contaminantes. Apesar do espraçamento da onda atingir toda a extensão da praia, é possível notar que o *run-up* não provoca alteração significativa na linha de costa.

Nas praias dos Compartimentos B e B', a granulometria de areias médias e muito grossas com alta permeabilidade, faces praias mais íngremes e bermas mais altas definem um estado morfodinâmico refletivo, que limita o desenvolvimento do espraçamento, e estabelece uma relação inversa entre a frequência de inundação e a granulometria, inclinação e altura da berma. Ou seja, praias com areias mais grossas, mais inclinadas e com bermas mais altas tendem a ser menos propícias a eventos de transposição da onda sobre a berma. Quanto à mobilidade do perfil, as praias desses compartimentos apresentam alta mobilidade, com tendência erosiva ao longo do monitoramento, mas com grande capacidade de recuperação do volume de areia. À exceção ao padrão erosivo

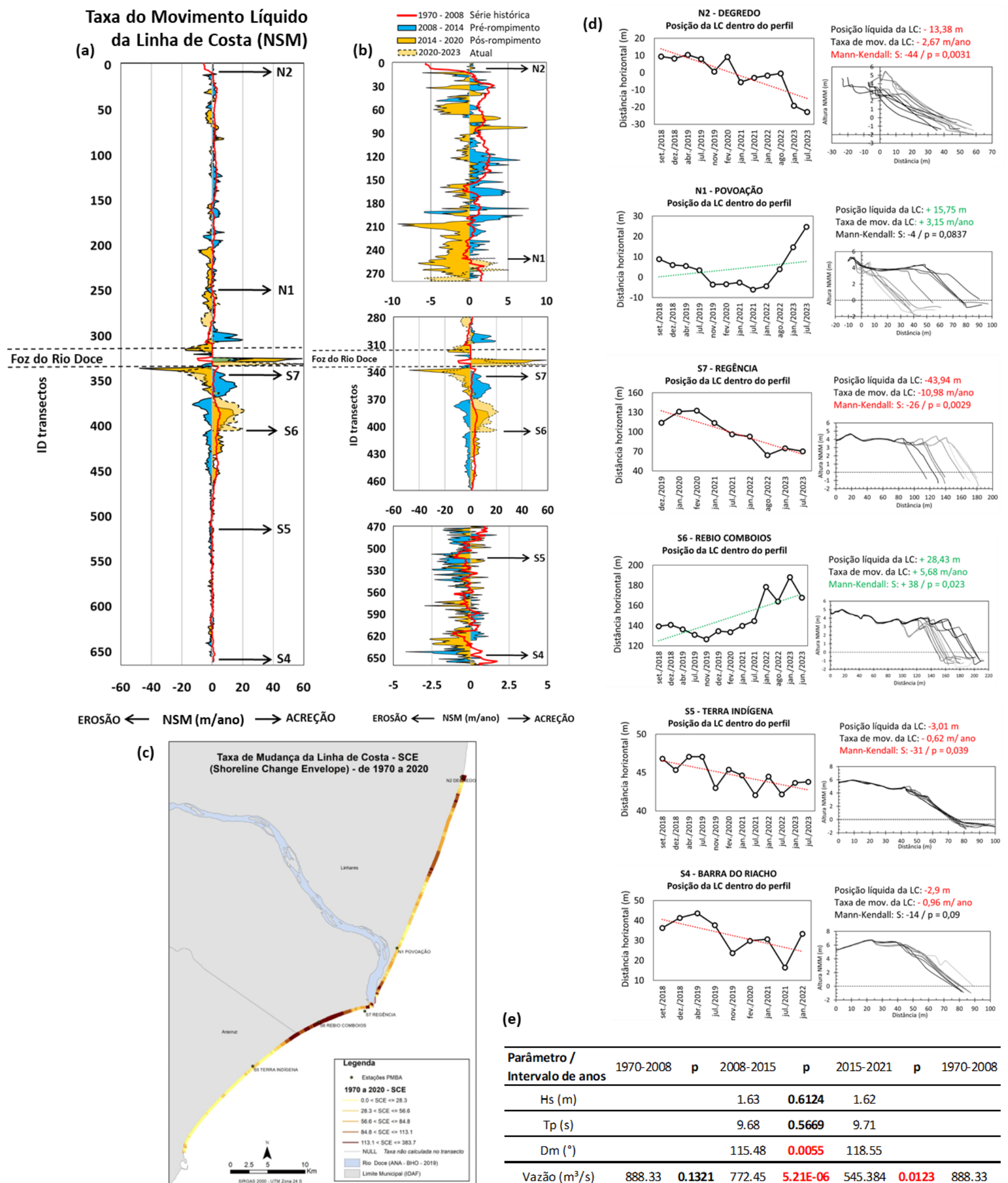
desse setor da costa, é possível observar na estação S6 Rebio Comboios uma tendência de avanço da linha da costa. No Compartimento B, estações de S4 Barra do Riacho e S5 Terra Indígena de Comboios, a frequência de inundação da berma pelo espraçamento é inferior a 1 %, com apenas uma ocorrência na estação N5 Terra Indígena de Comboios. Nessas duas estações o valor Δ **Linha de Costa (m)** indica erosão média de 5 m, enquanto que Δ **Volume praial (m^3/m)** apresentou redução média de 50 m^3/m em S4 Barra do Riacho e aumento médio de 5 m^3/m em S5 Terra Indígena de Comboios. No Compartimento B' a média da frequência de inundação da berma é de 23 % e os parâmetros de mobilidade são os maiores dentre as estações analisadas, dada a proximidade da foz, o que a submete às variações sazonais nas cargas sedimentares do rio, e ao alto grau de exposição do setor às ondas. A estação S6 REBio de Comboios apresentou uma tendência de acreção da linha de costa, enquanto em S7 Regência e N1 Povoação erosão máxima de 50 m e 15 m, respectivamente.

No Compartimento C, a resultante da deriva litorânea rumo a norte transporta os sedimentos mais finos trazidos para a costa pelo Rio Doce e os depositam na extremidade norte da planície. O sedimento mais fino determina praias com menores inclinações, bermas mais baixas e com características dissipativas. Dada a essas características, as praias estão sujeitas eventos de inundação média de 30 % durante o período analisado. Nessas praias a mobilidade morfológica é mais restrita, havendo estabilidade temporal nos valores de Δ **Volume praial (m^3/m)**, em médias inferiores a 50 m^3/m . Apesar da baixa mobilidade do compartimento a estação N2 Degredo experimentou uma erosão máxima de 28 m.

Na Figura 4- d representa a evolução temporal da declividade da face praial entre as estações S5 Terra Indígena e N2 Degredo, onde é testada a hipótese da relação de aplainamento do perfil condicionado ao aporte de lama na antepraia. A estação S6 REBio de Comboios é a que apresentou a maior tendência significativa de aplainamento do perfil associada a uma tendência de avanço da linha de costa. Ao longo do monitoramento, nas estações erosivas de S7 Regência e N2 Degredo as tendências foram menos significativas (valores de p 0,138 e 0,130, respectivamente) e apresentaram tendências opostas, com aumento da inclinação em S7 e redução em N2 durante o período monitorado.

Resume-se que as praias localizadas nas proximidades da foz do Rio Doce apresentam maior mobilidade morfológica, pois são diretamente influenciadas pela carga sedimentar sazonal do rio, enquanto que as praias de terraço apresentam estabilidade morfológica, uma vez que na ocasião da chegada de contaminantes tendem a ficar retidos nesse compartimento. De modo geral, o litoral associado à foz do Rio doce apresenta uma tendência erosiva, porém com intensidades diferentes. O destaque relevante é a erosão dos perfis nas estações S7 Regência, N1 Povoação, e N2 Degredo.

Figura 5. Avaliação morfológica de meso e microescala da Linha de Costa (LC) na planície do Rio Doce. Os gráficos (a) e (b) representam a avaliação morfológica de mesoescala por meio da Taxa de Movimentação Líquida da Linha de Costa (NSM; contato vegetação-praia) para cada período sucessivo: 1970 a 2008, 2008 a 2014; 2014 a 2020; 2020 a 2023 (a) com a mesma escala para todos os transectos e (b) com escalas diferentes dependendo da ordem de grandeza do NSM (b). Os valores positivos indicam progradação e negativos indicam erosão durante o período especificado, o valor da taxa está em metros por ano para cada período analisado. São 663 transectos espaçados em 100 m ao longo de cerca de 66 km de costa (33 km no flanco norte e 33 km no flanco sul da foz), sendo que o transecto 1 está no extremo norte e a foz está localizada no transecto 321. A análise do período de 2020 a 2023 foi realizada apenas na região da foz. O mapa (c) apresenta a avaliação morfológica de mesoescala por meio da Taxa de Mudança da Linha de Costa (SCE), o qual só representa a magnitude das alterações da LC entre 1970 e 2020. O gráfico (d) apresenta a avaliação de microescala da posição da Linha de Costa (contato vegetação-praia), a partir do monitoramento dos perfis praias com GNSS-RTK ao longo do período de setembro/2018 à julho/2023, com seus respectivos valores estatísticos referentes ao teste de tendência monotônica de Mann-Kendall (S é referente ao parâmetro estatístico do teste, no qual valores positivos (negativos) estão em verde (vermelho) e representam tendências de aumento (diminuição) da série de dados e sua magnitude; e p é referente ao nível de significância do teste, considerado aqui acima de 95%). Os perfis estão plotados com gradiente de cinza do mais antigo (mais claro) ao mais novo (mais escuro). A tabela (e) apresenta os valores médios dos parâmetros de onda (Hs: altura significativa, Tp: período de pico, Dm: direção predominante) e de vazão, para os mesmos intervalos de tempo considerados na avaliação da LC de mesoescala, juntamente com os valores de significância do teste (p) ANOVA, que foi realizado entre cada intervalo, para avaliação de modificações das forçantes físicas que influenciam a movimentação da LC.



Avaliando espacialmente a análise de mesoescala, é possível observar um gradiente na ordem de grandeza do NSM e SCE, onde os maiores valores estão concentrados na região adjacente à foz e imediatamente ao sul da mesma, com mobilidade máxima de 383 m, e diminuindo, em geral, em direção ao flanco norte e extremo sul da planície (Figura 6 - a,b,c). A análise de microescala se apresenta concordante com este padrão espacial (Figura 6-d).

Em relação à magnitude dos intervalos temporais, o primeiro período analisado entre 1970 e 2008, que representa a série histórica, apresenta intervalo de 38 anos e sua magnitude da taxa de variação (seja progradante ou retrogradante) é de no máximo 10 m/ano. A sua baixa magnitude de variação fica explícita no gráfico (a, b), no qual a linha vermelha, que correspondente ao período, oscila levemente em torno da estabilidade (NSM = 0). O período entre 2008 e 2014, que apresenta intervalo de 6 anos analisados pré-Rompimento, apresentou variações máximas na ordem de 25 m/ano, o que já se sobrepõe em relação à série histórica. Para período pós-Rompimento, entre 2014 e 2020, que apresenta também 6 anos de intervalo, a magnitude da taxa de variação é mais que o dobro do período pré-Rompimento, chegando à magnitude de quase 60 m/ano. O último período, que corresponde ao atual de 2020 a 2023, apresenta manutenção dos padrões observados no período pós-Rompimento.

Na análise de evolução espaço-temporal, fica explícita a inversão do comportamento progradante/retrogradante em determinadas seções da linha de costa para os diferentes intervalos analisados. À norte da desembocadura, há, em geral, uma inversão do padrão anterior ao Rompimento da Barragem (ambos intervalos da série histórica e pré-Rompimento), onde apresentava progradação (~80% dos transectos progradante), passou a apresentar, após 2014, retrogradação (~70% dos transectos retrogradante) na maior parte da linha de costa. Há dois trechos que chamam atenção pela magnitude da retrogradação: 1) o trecho correspondente aos transectos 200 e 270 (inserida estação N1 Povoação), que apresenta taxa de erosão de até -10 m/ano no período pós-Rompimento e 2) na margem imediatamente ao norte da foz (entre os transectos 300 e 315) com variação máxima acima de -15 m/ano. Para o período atual, a região correspondente à estação N1 Povoação voltou a apresentar tendência progradante de cerca de +3 m/ano, o que é compatível com a taxa observada na microescala de +3,15 m/ano, mas sem tendência significativa, devido à retrogradação previa à 2019. A região imediatamente ao norte da foz mantém o padrão pós-Rompimento. Mais ao norte da planície, a estação N2 Degredo, apresenta tendência significativa de recuo da LC na análise de microescala, com taxa de -13,38 m/ano, o que não é observado no monitoramento de mesoescala.

No flanco sul da planície, há duas situações diferentes de inversão do padrão antes e após Rompimento: 1) no trecho entre os transectos 330 a 370 (inserida estação S7 Regência) ocorre uma nítida inversão do padrão pós-Rompimento, que antes era claramente progradante e passa a ser retrogradante com magnitude cerca de 3 vezes maior (~ -20 m/ano) quando comparado com o período pré-Rompimento (~ +7 m/ano). O período atual mantém padrão pós-Rompimento e na análise de microescala, há um recuo significativo da LC entre 2018-2023, com magnitude de aproximadamente -11 m/ano; e 2) no trecho entre os transectos 370 a 470 (inserida estação S6 REBio Comboios) há uma inversão do padrão retrogradante pré-Rompimento para progradante no período pós-Rompimento e atual (coincidindo com a série histórica), e com magnitudes entre +5 a 20 m/ano. A tendência significativa de aumento da LC em microescala entre 2018-2023 coincide com a progradação em mesoescala observada para este mesmo trecho, com magnitude de +6 m/ano. No trecho mais ao sul da planície (entre os transectos 470 e 650) há baixa magnitude do NSM e alta variabilidade espacial, sem uma tendência clara de modificação. Simultaneamente, a estação S4 Barra do Riacho não apresenta tendência significativa de modificação da LC em microescala, coincidindo com a estabilidade observada na mesoescala; enquanto S5 Terra Indígena apresenta uma tendência de recuo da LC com taxa de -0,62 m/ano, coincidindo com a baixa taxa de retrogradação (- 1 m/ano) observada em mesoescala.

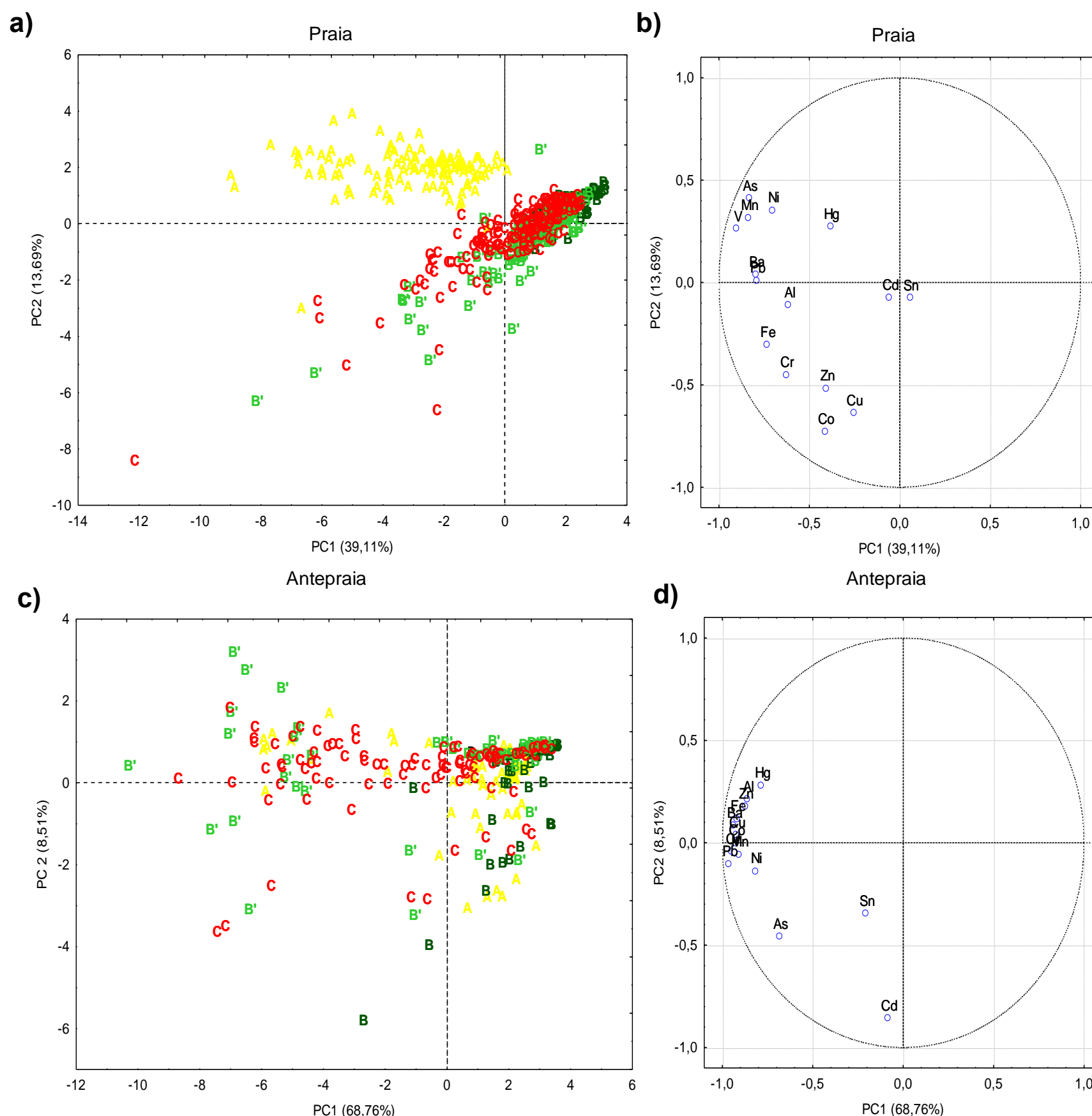
A avaliação de possíveis modificações dos principais processos hidrológico e oceanográficos (vazão do Rio Doce e clima de ondas) responsáveis pela variação da LC nesta região apresentou resultados significativos de diferença de distribuição apenas para direção predominante da entrada de ondas (Dm) e da vazão do rio Doce (Figura 6-e). A Dm, apesar de ter apresentado modificação significativa da distribuição entre o período de pré- e pós-Rompimento, não apresenta mudança da média que pudesse gerar uma modificação no sentido da deriva litorânea, permanecendo no quadrante Leste, o que juntamente com uma mesma distribuição de Hs e Tp para ambos períodos, indica que as modificações da LC não estão associadas às modificações no clima de ondas. A vazão, por outro lado, apresentou modificação significativa, com valor médio pós-Rompimento (545,8 m³/s) muito inferior a ambos períodos pré-Rompimento (888,3 m³/s) e série histórica (772,4 m³/s), o que pode ter ocorrido devido ao assoreamento do rio dado à presença do rejeito lamoso. Valores menores de vazão significam menor potencial de transporte de sedimento, o que pode estar diretamente ligado às modificações da LC observadas pós-Rompimento da Barragem, com tendência retrogradante no flanco norte da planície, trecho do litoral.

Concluindo, o padrão de mobilidade da linha de costa ao longo da planície do Rio Doce mudou de progradacional para retrogradacional e de maior magnitude após o Rompimento da Barragem na margem sul da desembocadura (Regência) e em praticamente todo flanco norte da planície (referente ao trecho contemplado nesta análise), podendo estar associado à diminuição no *input* de sedimentos naturalmente aportados pelo Rio, incluindo frações mais grossas, e o aumento de sedimentos mais finos, especialmente as frações lamosas, após o Rompimento da Barragem.

3.2 GEOQUÍMICA

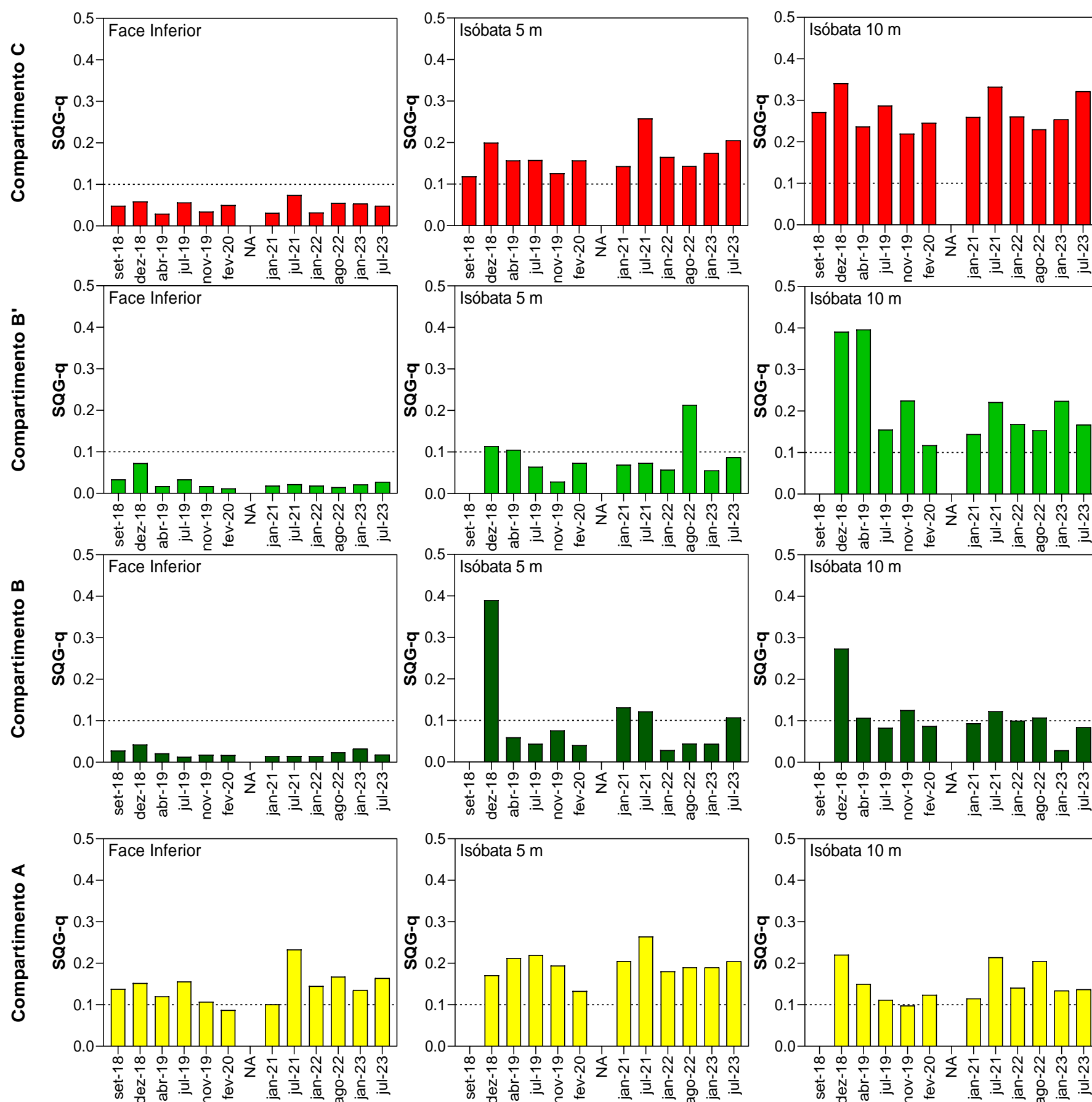
3.2.1 Concentração de elementos químicos no sedimento.

Figura 6: Gráfico de escores e pesos para PC1 e PC2 em função das amostras de sedimento da praia (**a** e **b**) e antepraia (**c** e **d**) ao longo de toda malha amostral; Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde escuro, S4 a S5), B' (verde claro, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6). Dados obtidos de setembro de 2018 a julho de 2023.



No contexto da distribuição espacial dos elementos químicos ao longo das praias, a análise de componentes principais (PCA) evidencia variações distintas na parte emersa do perfil praial. O Compartimento A se destaca por apresentar concentrações mais elevadas de elementos químicos, notadamente As, Hg, Mn, Pb, Ni e V (**a** e **b**). Em relação aos Compartimentos B' e C, na parte emersa, merecem destaque os elementos Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Pb e Zn. Na porção submersa do perfil praial (Antepraia), os Compartimentos B' e C se destacam por exibir os maiores teores de elementos químicos (**c** e **d**). Essas observações corroboram com dados de anos anteriores, indicando que a descarga do Rio Doce e a direção predominante da deriva litorânea para o Norte resultam em concentrações mais acentuadas de elementos químicos nas praias do Compartimento C. Apesar da marcante influência da descarga do Rio Doce na concentração de elementos químicos nas praias do setor norte (N2 Degredo até N6 Itaúnas), é importante frisar que as praias do Compartimento B' (S6 Regência até N1 Povoação), localizadas nas imediações da desembocadura, também exibem níveis significativos de elementos químicos, em virtude do aporte direto de sedimentos do Rio Doce.

Figura 7: Índice de contaminação do sedimento das praias baseado no SQG-q (do inglês *sediment quality guideline quotient*) obtidos para os Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde escuro, S4 a S5), B' (verde claro, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6), na face inferior, isóbata 5 m e isóbata 10 m. Dados obtidos de setembro de 2018 a julho de 2023. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19.



A avaliação espaço-temporal dos elementos químicos ao longo do período de monitoramento foi realizada a partir da utilização do índice *Sediment Quality Guideline Quotients* (SQG-q; Longhini et al., 2022) que permite realizar um diagnóstico qualitativo sobre a condição da contaminação ambiental. A utilização do SQG-q para o ambiente praias é importante devido, principalmente, à falta de valores de referência locais para a concentração dos elementos químicos, que inviabiliza o emprego de índices consolidados como o índice de geoacumulação (Igeo), por exemplo.

O compartimento A tem registrado valores de SQG-q superiores a 0,1 para todas as feições praias avaliadas, indicando que esse Compartimento está moderadamente impactado. A alta concentração de As encontrada no sedimento desse compartimento, contribui de forma acentuada para esse impacto. Cabe ressaltar que a praia emersa (face inferior) do Compartimento A foi a única classificada como impactada. Isso se deve às características geológicas muito peculiares desse compartimento, como a presença de afloramentos rochosos (terraço de abrasão) e um alto teor de carbonatos de origem bioclástica. Essas características criam condições para a fixação de elementos químicos no sedimento das praias desse compartimento onde a geologia da praia e os aspectos morfodinâmicos são os responsáveis pelos resultados encontrados ao longo do monitoramento ambiental.

No Compartimento B, os sedimentos da praia emersa (face inferior) durante todo o período de monitoramento, foi classificado como não impactado devido à sua composição predominantemente constituída por areia grossa com alta permeabilidade. Nas isóbatas de 5 metros e 10 metros desse compartimento, ocasionalmente os sedimentos são classificados como moderadamente impactado.

No Compartimento B', é observado um comportamento análogo ao Compartimento B. Exceto pelos sedimentos das isóbata 10 metros, que no Compartimento B' tem apresentado valores de SQG-q entre 0,1 e 1 ao longo do período de monitoramento, sendo então considerado moderadamente impactado.

No Compartimento C, assim como nos demais compartimentos, a praia emersa apresenta sedimentos não impactados ao longo de todo o período de monitoramento. Para as isóbatas, tanto de 5 metros quanto para de 10 metros, são observados os maiores valores de SQG-q (próximo a 0,4) indicando ser o ambiente mais impactado devido aos maiores teores de lama e a atuação da deriva litorânea que transporta material proveniente do Rio Doce predominantemente para o norte da malha amostral.

Resumidamente, as isóbatas de 5 metros nos compartimentos analisados geralmente proporcionam condições favoráveis para uma menor deposição de lama e, por conseguinte, para a não fixação de elementos químicos potencialmente tóxicos. Isso ocorre devido ao seu elevado dinamismo e à maior interação das ondas com o sedimento de fundo. Por outro lado, as isóbatas de 10 metros em praticamente todos os compartimentos têm se mostrado moderadamente impactadas, com valores de SQG-q próximos a 0,4 nos Compartimentos B' e C. Esse fato evidencia a influência do Rio Doce, uma vez que a deriva litorânea é responsável por direcionar aproximadamente 70% do material oriundo do Rio Doce para o norte da malha amostral afetando de maneira mais significativa o compartimento C. No ano de 2023 observa-se um pequeno aumento nos valores de SQG-q para o Compartimento C em relação a 2022, sendo os valores obtidos próximos ao ano de 2018, início do monitoramento. Os resultados apresentados ressaltam a importância de um monitoramento a longo prazo, pois não é observada uma tendência de recuperação do ambiente praias quanto a concentração dos elementos químicos no sedimento.

Quadro 1: Frequência de ocorrência para as alterações nas concentrações de As no sedimento da praia emersa (**a**) e na antepraia (isóbatas 5 e 10 m) (**b**), considerando os dados pré-rompimento da barragem como valores de referência (Mirlean et al., 2013). NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19; ADP: Acima dos Dados Pretéritos.

a)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5	
	Chuvoso		Seco		Chuvoso		Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
	set/18	dez/18	abr/19	jul/19	dez/19	fev/20	NA	jan/21	jul/21	jan/22	ago/22	jan/23	jul/23
Compartimento													
A													
B													
B'													
C													

■ Não amostrado □ Não alterado □ < 25% ADP □ ≥25% ADP ■ ≥50% ADP ■ ≥75% ADP ■ 100% ADP

b)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5	
	Chuvoso		Seco		Chuvoso		Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
	set/18	dez/18	abr/19	jul/19	dez/19	fev/20	NA	jan/21	jul/21	jan/22	ago/22	jan/23	jul/23
A													
B													
B'													
C													

■ Não amostrado □ Não alterado □ < 25% ADP □ ≥25% ADP ■ ≥50% ADP ■ ≥75% ADP ■ 100% ADP

A determinação da frequência de ocorrência foi realizada por meio de cálculos utilizando os valores de referência obtidos em um estudo conduzido por Mirlean et al. (2013). As amostras foram coletadas pelos autores nos meses de outubro e dezembro de 2011, ou seja, anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão. Os dados pretéritos utilizados referem-se às medianas das concentrações de As e Fe obtidas ao longo do litoral do estado do Espírito Santo, tanto na praia quanto na antepraia. Os resultados classificam os compartimentos de acordo com a frequência de ocorrência de resultados acima dos dados pretéritos (ADP), como não alterado, < 25% ADP, ≥ 25% ADP, ≥ 50% ADP, ≥ 75% ADP e 100% ADP. Observa-se que o Compartimento A tem consistentemente apresentado, na praia emersa, concentrações de As no nível mais elevado desta classificação (100% ADP), ou seja, 100% das amostras desse compartimento apresentam concentrações de As superiores aos dados pretéritos (**a**). Já os Compartimentos B e B' não demonstraram variação nos teores de As em relação aos dados pretéritos (**a**). Corroborando com o cenário encontrado para todos os elementos químicos monitorados, o Compartimento C apresentou, em mais de 25% de suas amostras, valores de concentração superiores aos dados históricos. Adicionalmente, nesse compartimento, durante as campanhas de dezembro de 2018 (estação chuvosa) e julho de 2021 (estação seca), mais de 50% das amostras registraram concentrações de As superiores aos dados de referência (**a**). Os resultados obtidos para As nas isóbatas de 5 e 10 metros em comparação com os dados pretéritos, não apresentaram, de maneira geral, variações significativas ao longo do período de monitoramento (**b**).

Quadro 2: Frequência de ocorrência para as alterações nas concentrações de Fe no sedimento da praia emersa (**a**) e na antepraia (isóbatas 5 e 10 m) (**b**), considerando os dados pré-rompimento da barragem como valores de referência (Mirlean et al., 2013). NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19; ADP: Acima dos Dados Pretéritos.

a)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5	
	Chuvoso		Seco		Chuvoso		Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
Compartimento	set/18	dez/18	abr/19	jul/19	dez/19	fev/20	NA	jan/21	jul/21	jan/22	ago/22	jan/23	jul/23
A													
B													
B'													
C													

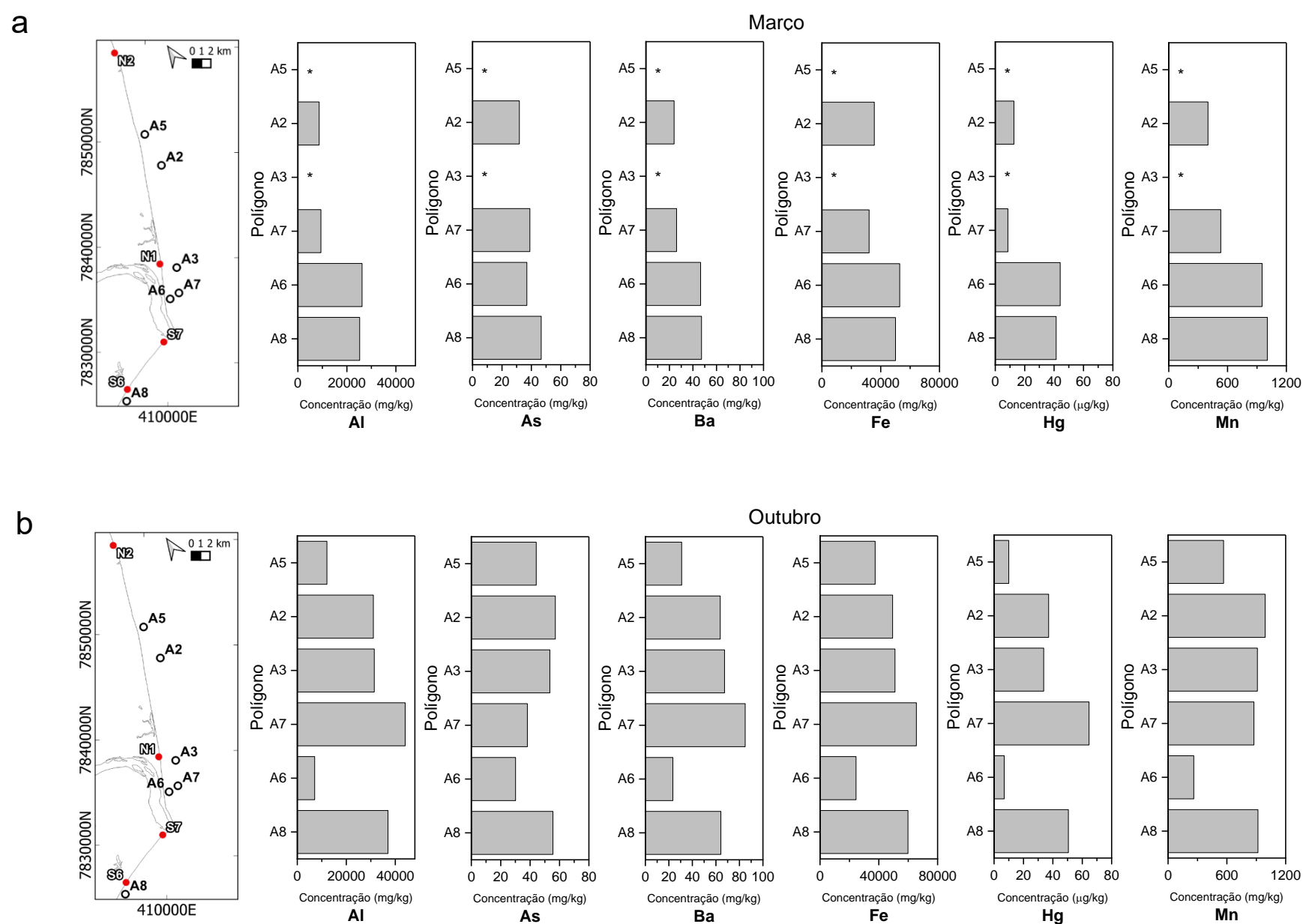
☐ Não amostrado
 ☐ Não alterado
 ☐ < 25% ADP
 ☐ ≥25% ADP
 ☐ ≥50% ADP
 ☐ ≥75% ADP
 ☐ 100% ADP

b)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5	
	Chuvoso		Seco		Chuvoso		Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco
Compartimento	set/18	dez/18	abr/19	jul/19	dez/19	fev/20	NA	jan/21	jul/21	jan/22	ago/22	jan/23	jul/23
A													
B													
B'													
C													

☐ Não amostrado
 ☐ Não alterado
 ☐ < 25% ADP
 ☐ ≥25% ADP
 ☐ ≥50% ADP
 ☐ ≥75% ADP
 ☐ 100% ADP

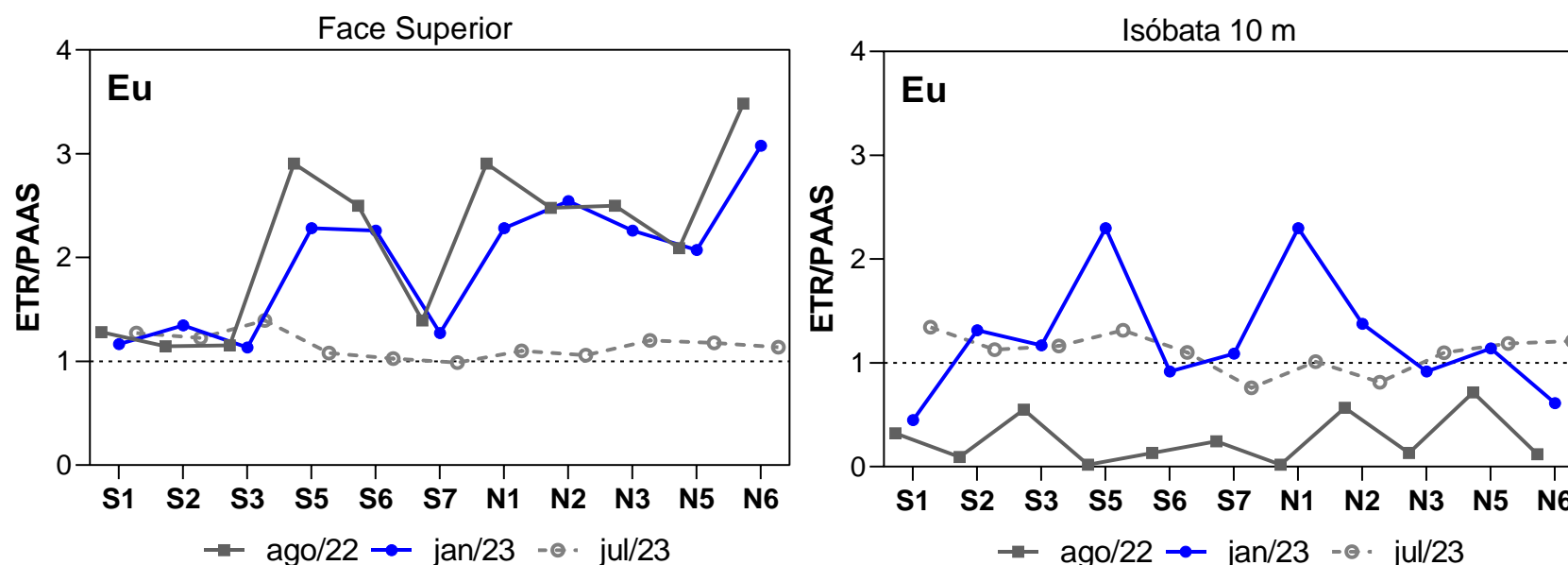
A determinação da frequência de ocorrência de amostras com concentrações de (Fe) acima dos dados pretéritos foi realizada conforme apresentado na legenda estendida do Quadro 1. As concentrações de Fe na praia emersa (**a**) e nas isóbatas (**b**) evidenciam alterações significativas e de forma sistemática em praticamente todos os compartimentos ao longo do monitoramento. Destaca-se, em particular, as isóbatas do compartimento B', que englobam as praias localizadas nas proximidades da Foz do Rio Doce, apresentando em grande parte das campanhas 100% das amostras com concentrações acima dos dados históricos.

que não foram coletadas.

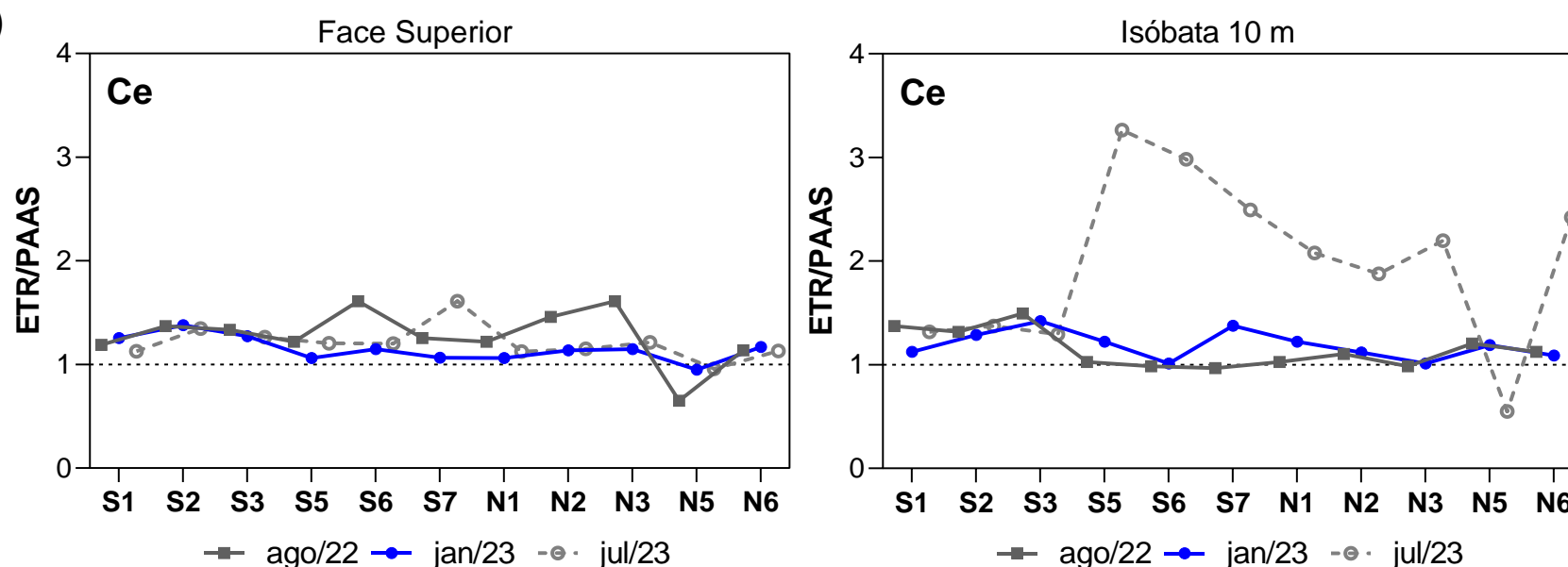


Ao longo das duas amostragens, observa-se comportamentos distintos nos níveis de elementos químicos nos sedimentos da foz do rio Doce. Inicialmente, em março de 2023, destaca-se que as amostras ao sul da foz (A8) e imediatamente ao norte em profundidades rasas (A6) apresentam as maiores concentrações de elementos químicos. Em outubro de 2023, essa tendência é alterada, visto que os teores dos elementos químicos nas amostras ao norte da foz (A2 e A7) aumentam em comparação com março de 2023, ao passo que os teores em A6 diminuem durante esse recorte temporal. Os sedimentos em A2 e A7 são principalmente compostos por lama, ao passo que A6 contém sedimentos predominantemente areno-lamosos (Figura 3). Esses resultados em A6 confirmam a intensa dinâmica nas adjacências da foz do rio Doce, enquanto os aumentos observados em A2 e A7 confirmam períodos de predominância no transporte de lama do rio em direção ao norte, o que resulta em consideráveis incrementos nos teores dos elementos químicos nos sedimentos.

c)



d)

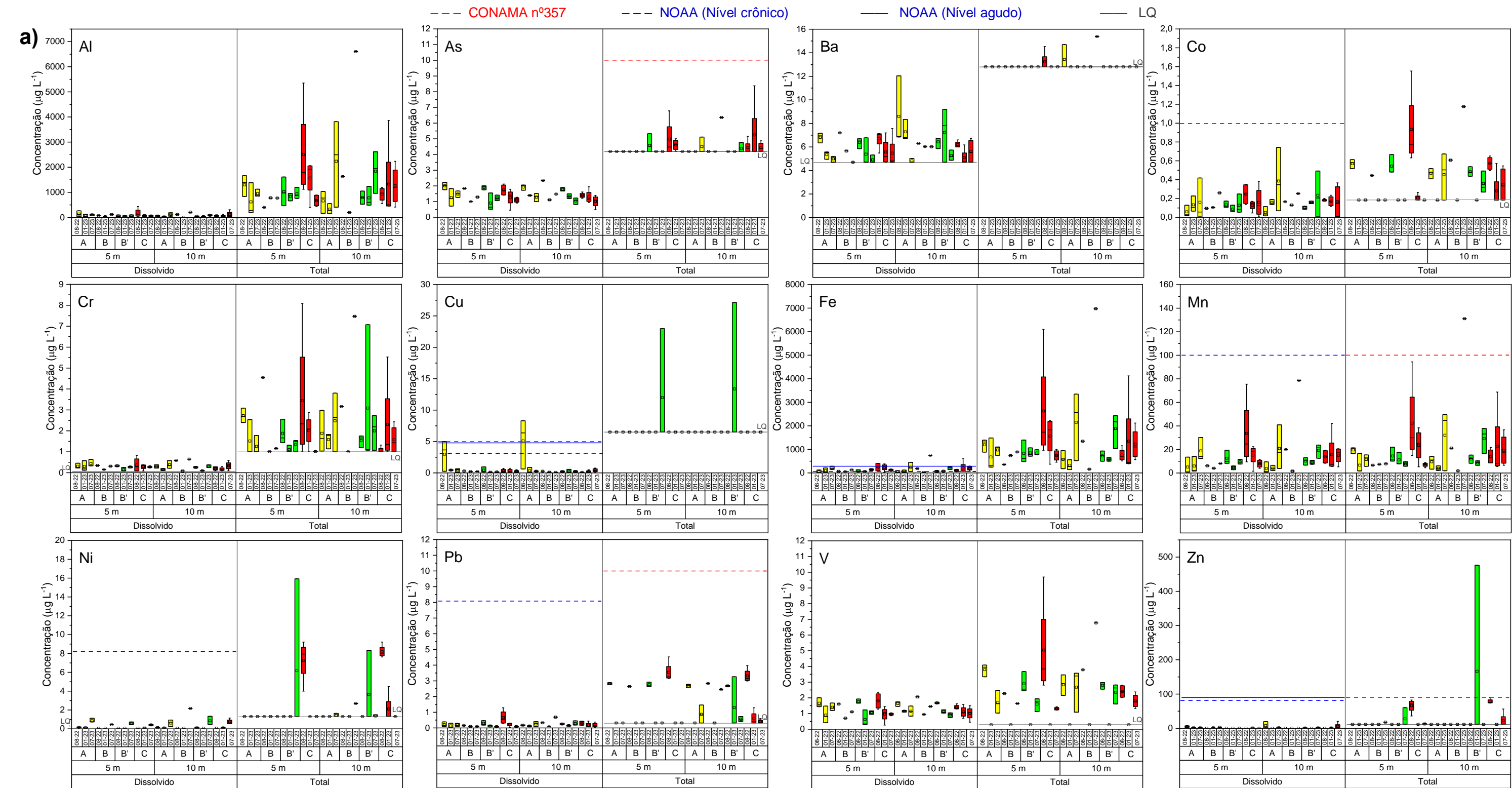


A ausência de dados pretéritos sobre a concentração de Elementos de Terras Raras (ETR) no ambiente costeiro, aliada à falta de legislação específica para esses elementos, representa um desafio para a obtenção de conclusões mais precisas e fundamentadas a respeito desse ambiente. Contudo, um estudo recente conduzido por Cagnin et al. (2023) contribui com informações substanciais referentes a dados históricos ao analisar a concentração de Elementos de Terras Raras (ETR) em testemunhos obtidos no rio do Carmo, situado em Mariana, MG. É importante ressaltar que esse rio desempenha um papel crucial como principal fornecedor de água para o rio Doce. Os resultados obtidos no rio do Carmo foram utilizados para a avaliação temporal e espacial dos ETR no período de agosto de 2022 a julho de 2023, considerando a ausência de valores de referência para esses elementos nas estações amostrais monitoradas pelo PMBA. Os valores obtidos por Cagnin et al. (2023) foram de $0,7 \text{ mg kg}^{-1}$ para o $\sum \text{ETRL}$ (La a Eu) e de $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ para o $\sum \text{ETRP}$ (Dy a Lu). Qualquer valor acima do estabelecido como referência foi interpretado como acima dos dados pretéritos, enquanto valores abaixo da referência foram considerados como não alterados. Com relação ao Elementos Terras Raras Leves (a), pode-se observar que os $\sum \text{ETRL}$ na face superior apresentaram valores superiores ao dado pretérito nos compartimentos A e C, com exceção de N6. Por outro lado, os compartimentos B e B' demonstraram valores inalterados, exceto por S7. Os $\sum \text{ETRL}$ nas isóbatas de 10 m revelaram valores acima dos dados pretéritos em todos os compartimentos. Com relação aos Elementos Terras Raras Pesados (b), é possível observar que os $\sum \text{ETRP}$ na face superior e nas isóbatas de 10 m também apresentaram valores acima do dado pretérito nos compartimentos A, B, B' e C. De maneira geral, identificam-se valores de $\sum \text{ETRL}$ e $\sum \text{ETRP}$ superiores aos dados pretéritos tanto nas isóbatas de 10 metros (zona de transição entre o ambiente praiar e a plataforma continental) quanto na face superior (praia emersa), sugerindo um aporte recente desses elementos. Com relação as anomalias de Eu (c), não foi observado um perfil semelhante entre as campanhas de agosto de 2022, janeiro de 2023 e julho de 2023. Isto se deve ao predomínio de anomalias positivas (>1) na face superior das estações amostrais. Por outro lado, na isóbata de 10 metros, as anomalias alternaram entre valores positivos (>1) e negativos (<1). Ao investigar as anomalias de Ce (d), observou-se um padrão semelhante nas campanhas de agosto de 2022, janeiro de 2023 e julho de 2023, com predominância de anomalias positivas (>1) tanto na face superior quanto na isóbata de 10 metros. Isso ocorre em concordância com os valores elevados de $\sum \text{ETRL}$ e $\sum \text{ETRP}$ em relação aos dados pretéritos. Anomalias positivas de Ce indicam a deposição desses elementos no sedimento na forma de complexos de oxi/hidróxidos de ferro, manganês ou alumínio. Por outro lado, as anomalias negativas de Eu sugerem variações nas características litológicas dos sedimentos. Conclui-se que estão ocorrendo modificações no perfil sedimentar do ambiente praiar, evidenciadas ao longo das três campanhas.

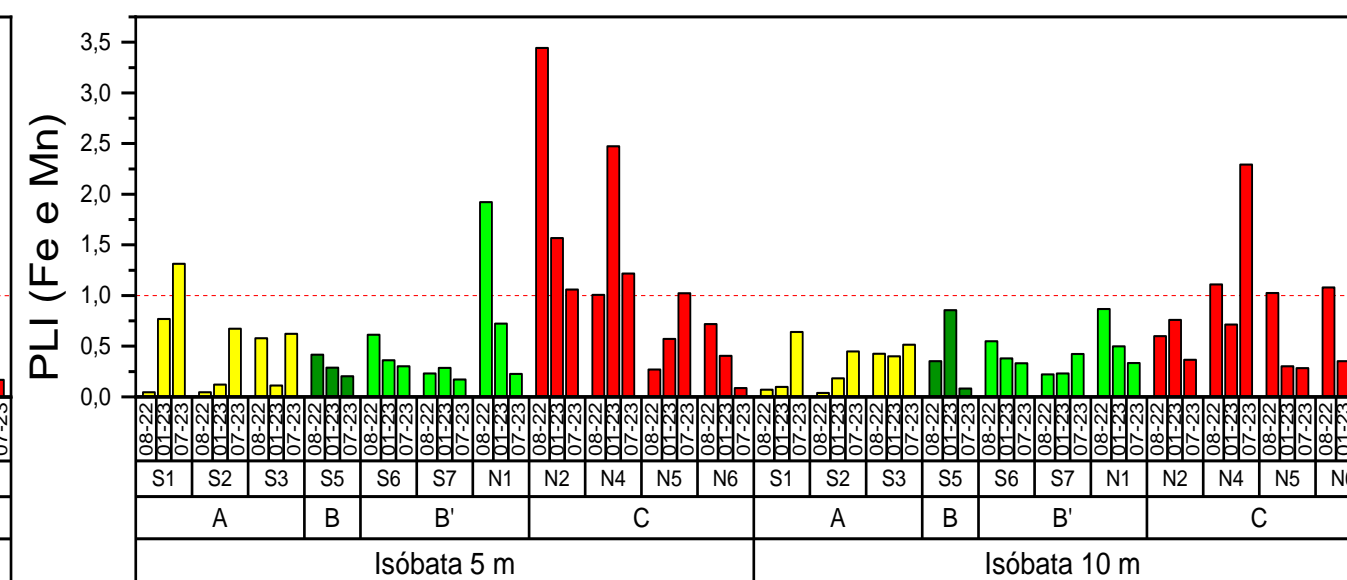
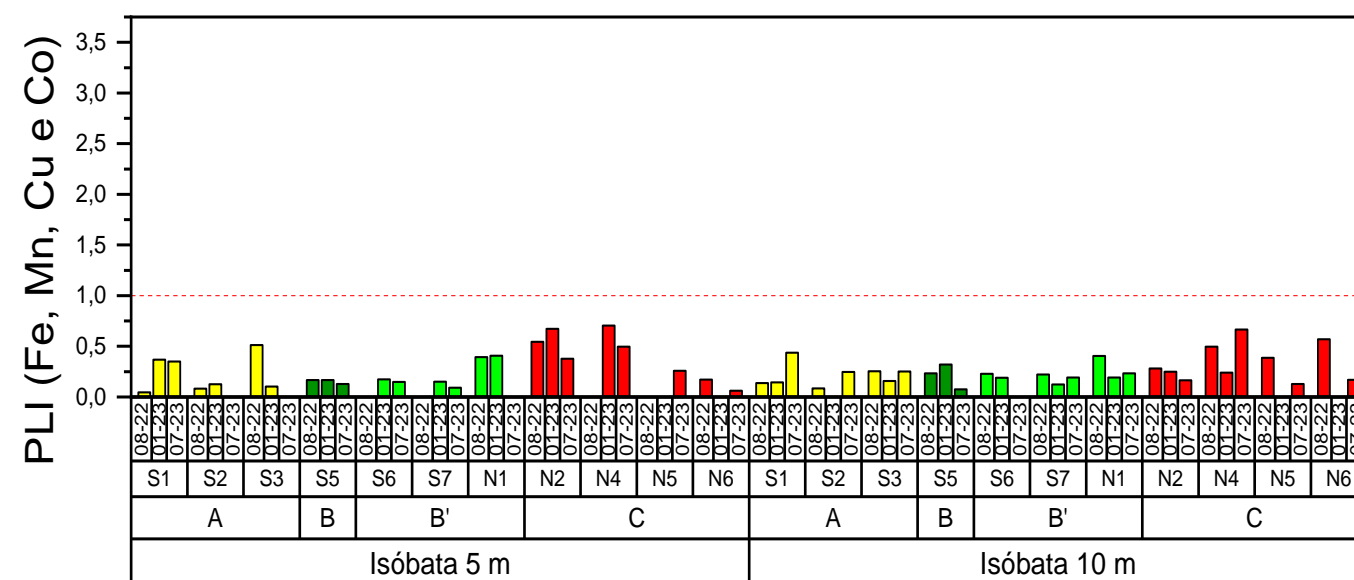
3.2.3 Concentração de elementos químicos na água

Figura 10: **(a)** Distribuição das concentrações de elementos químicos totais e dissolvidos em amostras de água do mar coletadas nas estações amostrais dos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde, S5), B' (verde, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6) para isóbata de 5 metros (5 m) e isóbata de 10 metros (10 m). Linha tracejada vermelha indica valor limite CONAMA nº357, linha tracejada azul indica limite crônico – NOAA, linha contínua azul indica limite agudo – NOAA e linha contínua cinza indica o limite de quantificação. **(b)** Valores obtidos para PLI (*Pollution Load Index*).

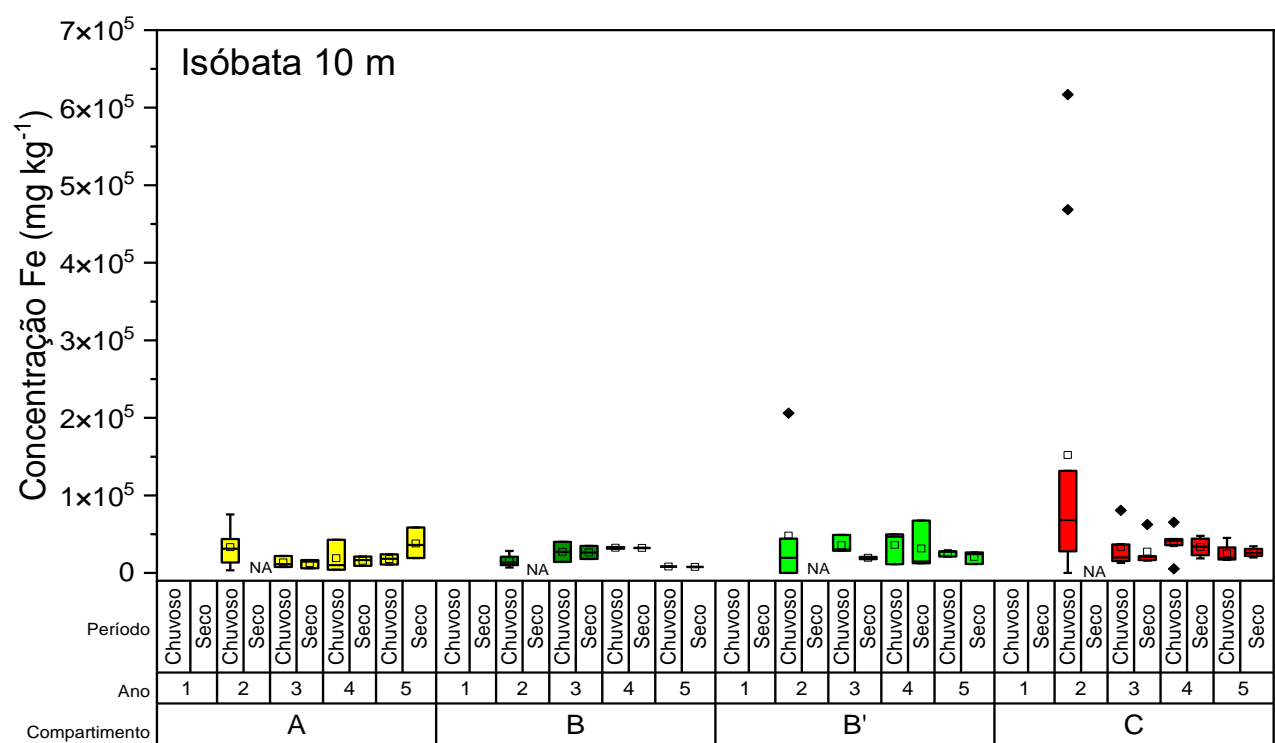
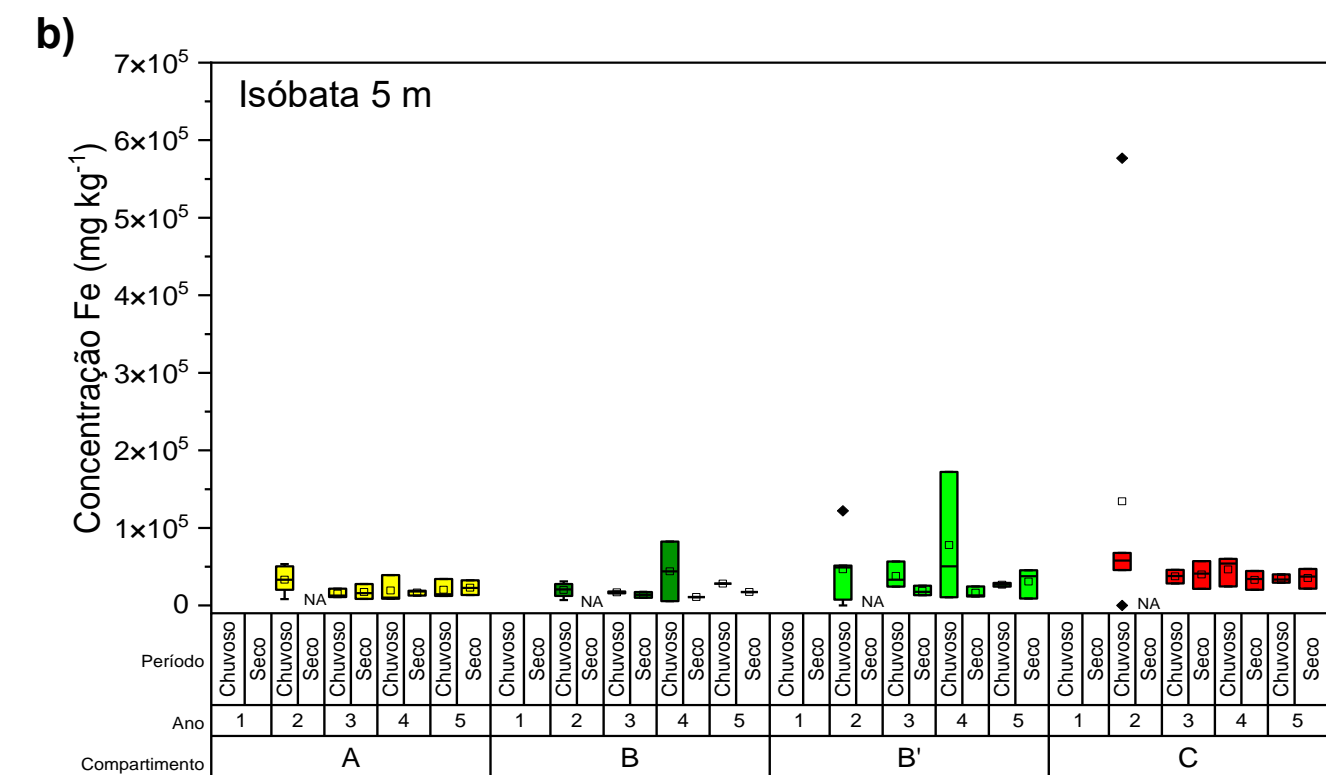
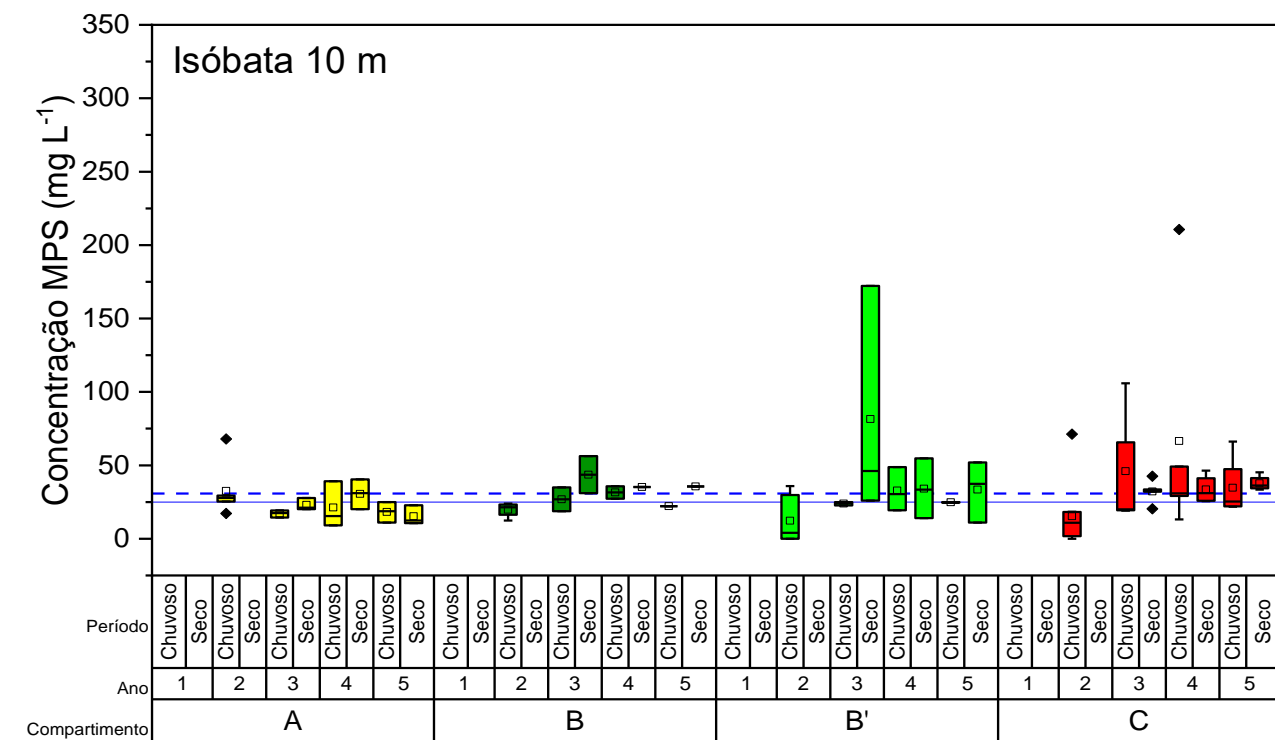
Dados obtidos no período de agosto de 2022 a julho de 2023.



b)



A avaliação da qualidade da água foi conduzida com base nos critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA n°357 (CONAMA, 2005) e pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Buchman, 2008) para níveis agudos e crônicos em ambientes de água salina. De forma geral, ao analisar as concentrações totais dos elementos químicos, observou-se que os compartimentos A (amarelo), B/B' (verde) e C (vermelho) mantiveram-se abaixo dos limites estipulados pela Resolução CONAMA n°357 (—) para águas salinas de classe 1 (a). No entanto, na fração dissolvida, a maioria das amostras analisadas apresentou concentrações de Fe que ultrapassaram o limite crônico estabelecido pelo NOAA ($50 \mu\text{g L}^{-1}$) (—). Além disso, os valores de Fe dissolvido excederam o limite agudo ($300 \mu\text{g L}^{-1}$) definido pelo NOAA (—) nas estações amostrais do Compartimento C, especialmente nas isóbatas de 5 metros (agosto de 2022 e janeiro de 2023) e 10 metros (janeiro de 2023) (a). O Índice de Carga de Poluição (PLI) também foi empregado para avaliar o grau de poluição das águas, utilizando os dados crônicos fornecidos pelo NOAA no cálculo, devido à escassez de dados históricos (b). Ao considerar os elementos Fe, Mn, Cu e Co no cálculo do PLI, os valores resultantes foram inferiores a 1, indicando uma área não poluída. No entanto, ao restringir a análise aos elementos mais significativos, Fe e Mn (Longhini et al., 2022), os valores de PLI foram superiores a 1 no compartimento C, especialmente nas isóbatas de 5 metros das estações N2 e N4, indicando uma possível área poluída (b).

[illegible]

No compartimento A, se observa uma distribuição uniforme de Material Particulado em Suspensão (MPS) ao longo do monitoramento, com exceção de outliers durante o período chuvoso do Ano 2, identificados nas isóbatas de 5 e 10 metros. Além disso, em 5 metros, observam-se concentrações ligeiramente mais elevadas durante o período seco do Ano 4.

No compartimento B, identificamos uma distribuição uniforme ao longo das campanhas, sem tendências significativas, com a exceção do período seco do Ano 4 nas isóbatas de 10 metros que apresenta maiores teores de MPS.

Quanto ao compartimento B', também notamos uma distribuição sem tendências significativas durante todo o monitoramento, exceto no período chuvoso do Ano 2, evidenciando maiores concentrações nas isóbatas de 5 metros e concentrações mais elevadas no período seco do Ano 3, nas isóbatas de 10 metros.

O compartimento C, de maneira geral, apresenta as maiores concentrações de MPS. Durante os períodos chuvosos, o compartimento C registra maiores teores de MPS em 10 metros devido ao aporte de sedimento fino proveniente do rio Doce. Em 5 metros, o período seco exhibe teores mais elevados, indicando que uma maior atuação das ondas pode remobilizar o fundo e colocar materiais mais finos em suspensão. No entanto, em 5 metros, também são observados outliers em períodos de alta vazão do rio, como nos anos 2 e 4 durante os períodos chuvosos. Durante o período citado, outliers são observados tanto nas isóbatas de 5 metros quanto em 10 metros.

Os padrões observados sugerem influências sazonais e fluviais significativas nos teores de MPS nos compartimentos estudados. O aumento das vazões do Rio Doce se mostra como uma variável determinante no aumento dos teores de MPS, como evidenciado no compartimento C. Esse padrão de distribuição em direção ao norte, ocorre devido à atuação da deriva litorânea no transporte de sedimentos, relatado anteriormente por Oliveira et al. (2015). Além disso, períodos de maior energia de onda também possuem a capacidade de elevar pontualmente os teores de MPS nos compartimentos estudados. Essa relação dinâmica é corroborada pelos resultados de concentração dos elementos químicos observados ao longo do monitoramento, representados neste contexto apenas pelo Fe (**b**), devido à forte correlação observada para todos os elementos químicos.

3.3 BENTOS

3.3.1 Parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica

Tabela 11: Resultados das ANOVAs (Análises de variância) realizadas com os parâmetros da diversidade da macrofauna bentônica (Densidade média (N), riqueza taxonômica (S), diversidade de Shannon-Wiener (H'), equitabilidade de Pielou (J) e diversidade beta (β)) para praia emersa e antepraia entre os compartimentos e campanhas durante todo o período de realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). “oscila” com o tempo.

ns – não significativo ($p > 0,05$). NA – não se aplica.

Variação espaço-temporal do indicador Macrofauna															
Variáveis	N			S			H'			J			β		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>															
Compartimento	8,85	0,0	B' > A, C		ns			ns		8,56	0,0	C > A, B'		ns	
Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
<u>Antepraia</u>															
Compartimento	5.18	0.0	B' < A, C	12.2	0,0	B' < A, C	5.7	0.00	B' < A, C		ns			ns	
Campanha		ns			ns			ns			ns		5.61	0.01	Oscila
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			NA	
Isóbatas		ns			ns			ns			ns			NA	

Como principal resultado, é possível observar que a densidade da macrofauna de praia emersa continua maior no Compartimento B', onde as praias apresentam características mais refletivas, contrariando a literatura mundial para padrões de distribuição de macrofauna bentônica (DEFEO *et al.*, 1992; HACKING, 1998; BRAZEIRO, 1999; MCLACHLAN & BROWN, 2006; MCLACHLAN *et al.*, 2013). Como já visto nos relatórios anteriores, as praias do Compartimento C possuem características mais dissipativas e é onde a deriva litorânea sentido norte favorece a deposição dos sedimentos provenientes do Rio Doce (OLIVEIRA *et al.*, 2015; QUARESMA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017), com retenção de diferentes elementos químicos (BRAHIM *et al.*, 2024). Dessa forma, a menor densidade observada nesse compartimento sugere que essa área continua afetada pelos rejeitos trazidos pelo rio. No entanto, na antepraia, o

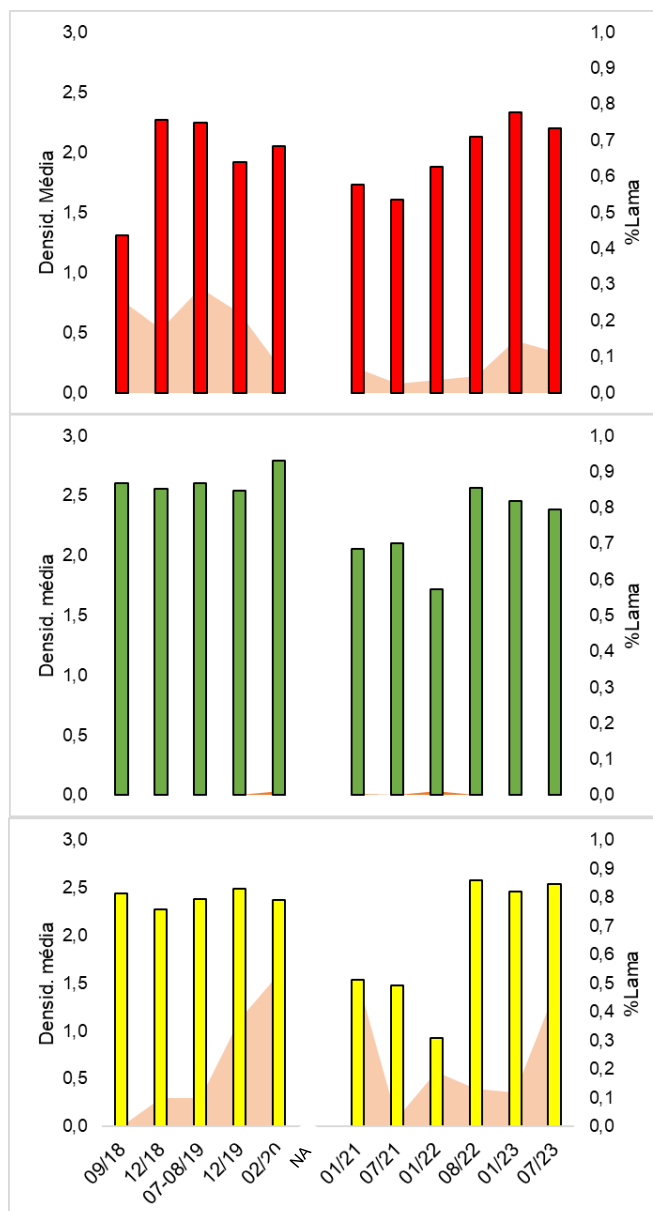
Compartimento B' apresenta os menores valores de densidade, riqueza e diversidade de Shannon-Wiener, não havendo diferenças significativas entre as isóbatas. Padrão que vem se mantendo ao longo do monitoramento (FEST, 2023). Esses resultados possivelmente são respostas ao aporte direto de sedimentos do Rio Doce nesse compartimento, seja por alterar a granulometria do local ou devido aos elementos químicos associados. As tendências temporais de aumento da densidade de organismos e da diversidade (H') na antepiraia (FEST, 2023), deixam de ocorrer com a incorporação da campanha 07/2023.

Tabela 12: Resultados das ANOVAs realizadas com os grupos chave da macrofauna bentônica da praia emersa e da antepraia entre os compartimentos e campanhas amostradas durante todo o período de realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). ns – não significativo ($p > 0,05$). NA – Não se aplica.

Variação espaço-temporal na densidade (ind/m ²) dos Grupos-chave												
Variáveis	Compartimento			Campanha			Compartimento x Campanha			Isóbatas		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>												
Oligochaeta	12.62	0.00	B', A > C		ns			ns		NA	NA	NA
<i>S. pussicus</i>	25.97	0.00	B' > C > A		ns			ns		NA	NA	NA
<i>H. cf. variodentata</i>	32.00	0.00	B' > C > A		ns			ns		NA	NA	NA
<i>E. brasiliensis</i>		ns			ns			ns		NA	NA	NA
Amphipoda	3.85	0.02	A > C		ns			ns		NA	NA	NA
<u>Antepraia</u>												
Spionidae		ns			ns			ns			ns	

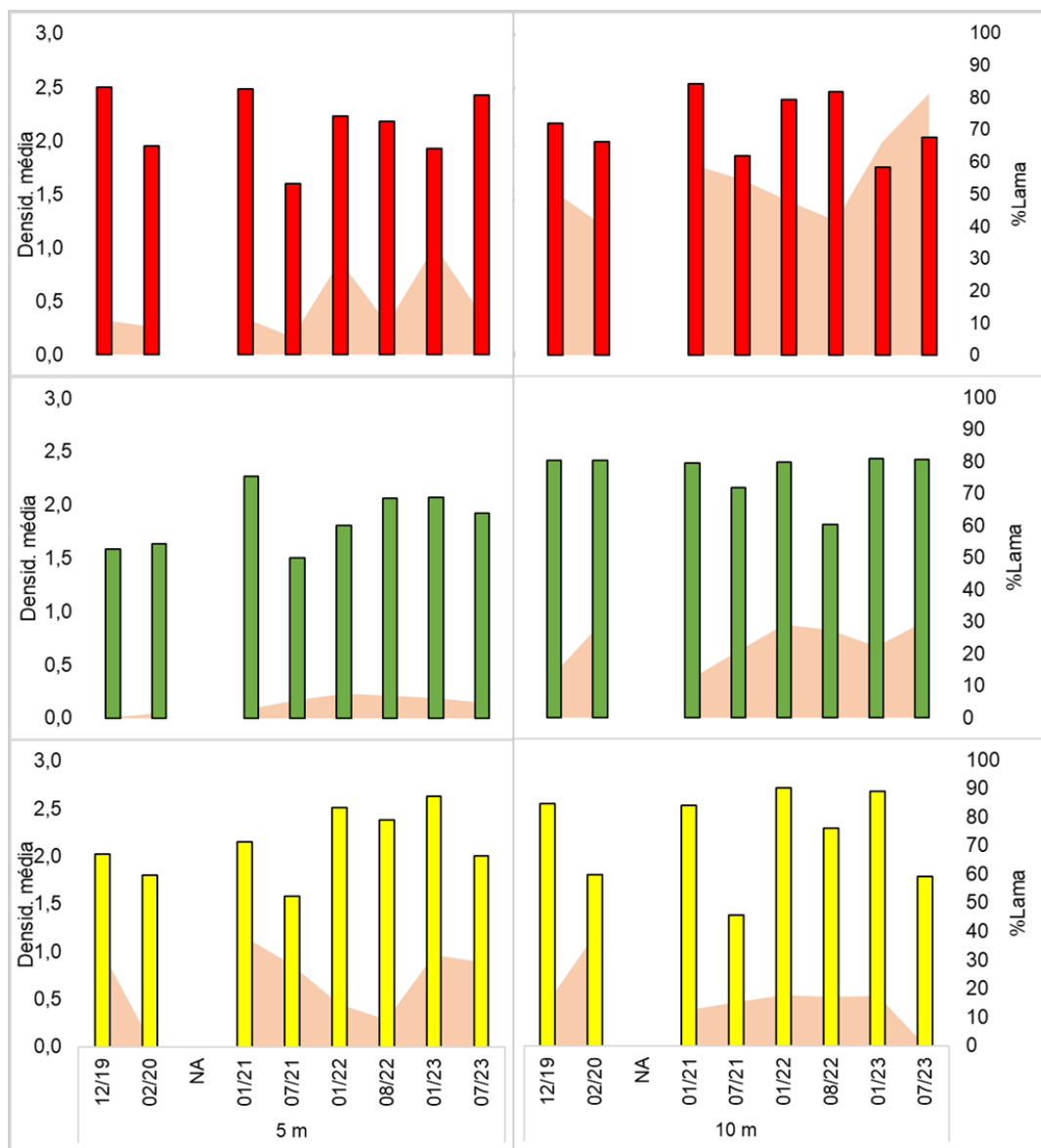
Os grupos chaves, Oligochaeta, *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura cf. variodentata*, apresentam maiores densidades no Compartimento B' do que nos demais. Cabe ressaltar que as duas últimas espécies preferem sedimentos com areia grossa (VILLORA-MORENO, 1997; DI DOMENICO, 2012), característica presente nesse compartimento, enquanto que a alta abundância de oligoquetas presente, principalmente, na praia de Povoação (N1), possivelmente é decorrente do enriquecimento de detritos orgânicos e/ou da entrada de larvas trazidas pelo Rio Doce. Já o crustáceo Amphipoda segue apresentando maiores densidades no Compartimento A, região onde a complexidade estrutural do ambiente promove abrigo e alimento que favorecem a presença desse grupo. O fato dos anfípodas serem considerados bons indicadores (VELOSO *et al.*, 2009; DEFEO *et al.*, 2009) e conhecidos por serem sensíveis a poluentes no sedimento (RÉ *et al.*, 2009; DE-LA-OSSA-CARRETERO *et al.*, 2012) reforçam que as praias emersas do compartimento A não estão afetadas pelo rejeito do Rio Doce. O padrão descrito acima, de variação apenas entre os compartimentos, tem se mantido constante ao longo do monitoramento, não sendo registrados diferenças entre as campanhas.

Figura 12: Densidade média (Log X +1) da macrofauna bentônica da praia emersa em relação negativa com a porcentagem de lama durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam a densidade média da macrofauna bentônica; área sombreada distribuição de lama (%); NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



As praias do Compartimento C são do tipo dissipativa e, de acordo com a literatura mundial para praias arenosas, era esperado altos valores de densidade e riqueza da macrofauna nesse local (DEFEO & MACLAHAN, 2005; MCLAHAN & DORVLO, 2006; MCLAHAN, 2018). Isso não ocorreu desde o início do monitoramento, provavelmente devido a maior presença de lama associada aos elementos químicos nesse setor, provenientes da descarga do Rio Doce (BRAHIM *et. al*, 2024). Embora outros parâmetros da macrofauna apresentem diferenças significativas entre os compartimentos, não é possível observar estabilidade ou alguma tendência de melhora ao longo do tempo.

Figura 13: Densidade média (Log X +1) da macrofauna bentônica na antepiraia em relação à distribuição de lama durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam a densidade média da macrofauna bentônica; área sombreada distribuição de lama (%); NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



Apesar das maiores porcentagens de lama no compartimento C, a fauna desse local não apresentou relação com essa variável (Quadro 3). No entanto, no Compartimento B' foi registrado os menores valores de diversos parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica (Tabela 11) apresentando relação significativa negativa com o aumento do teor de lama em ambas as isóbatas. Essa diferença de resposta da macrofauna pode ter relação com a composição dos organismos e o comportamento destes na presença de lama. A relação de fauna com lama também foi observada no Compartimento A, porém os parâmetros ecológicos estão com valores mais altos.

Quadro 3: Resultados das ANCOVAs (análises de covariância) realizadas com os parâmetros da macrofauna bentônica (Densidade média (N), Riqueza taxonômica (S), Diversidade de Shannon-Wiener (H') e Equitabilidade de Pielou (J), que apresentaram variações significativas entre os compartimentos (Tabela 11), em relação à porcentagem de lama, assim como à concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb da praia emersa e antepraia amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul: relação positiva; em vermelho: relação negativa.

Integração do indicador Macrofauna com lama (%) e concentrações elementar															
Variáveis	Praia emersa						Antepraia								
	Compart. A		Compart. B'		Compart. C		Compart. A			Compart. B'			Compart. C		
	N	J	N	J	N	J	N	S	H'	N	S	H'	N	S	H'
%Lama															
Arsênio (As)															
Alumínio (Al)															
Bário (Ba)															
Ferro (Fe)															
Manganês (Mn)															
Níquel (Ni)															
Chumbo (Pb)															

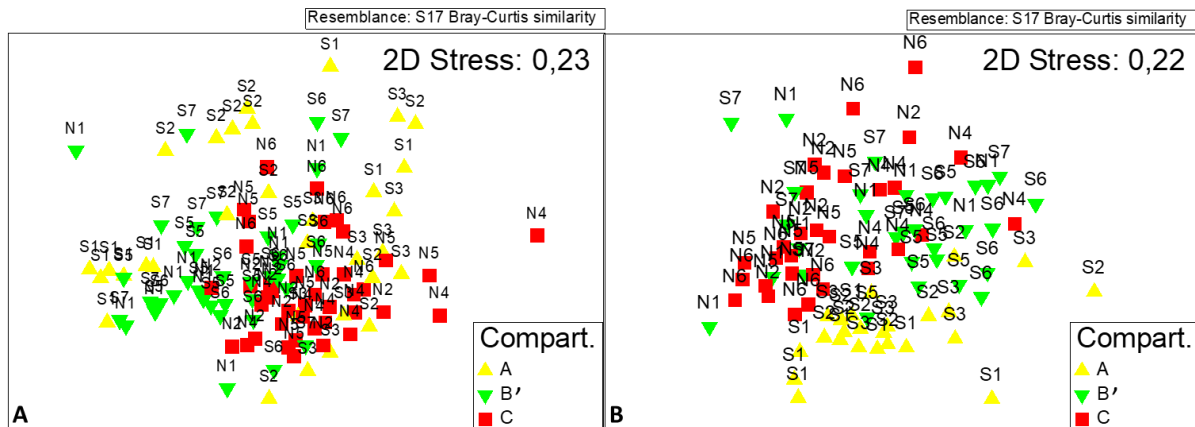
Como exemplificado na Figura 12, no Compartimento C, onde a corrente de deriva leva os rejeitos do Rio Doce, a densidade da macrofauna da praia emersa diminui com o aumento da porcentagem de lama. Enquanto que, na antepraia, o compartimento B' apresenta os menores valores ecológicos e a macrofauna é afetada negativamente pelo aumento da porcentagem de lama e do teor de Pb. As demais relações significativas observadas, principalmente no Compartimento A, precisam de cautela para serem interpretadas como consequência do rejeito. Nesse compartimento, as altas concentrações de diferentes elementos químicos presentes no sedimento são associadas à presença de CaCO_3 que é abundante no compartimento (SOUZA *et al.*, 2022).

Quadro 4: Resultados das ANCOVAs realizadas com a densidade (ind/m²) dos grupos-chaves da macrofauna bentônica, que apresentaram variações significativas entre os compartimentos (Tabela 12), em relação à porcentagem de lama, assim como à concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb da praia emersa amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul: relação positiva; em vermelho: relação negativa.

Integração do indicador Macrofauna com os %Lama e concentrações elementares												
Variáveis	Oligochaeta			<i>S. pussicus</i>			<i>H. variodentata</i>			Amphipoda		
	Compart. A	Com-part. B'	Com-part. C	Com-part. A	Compart. B'	Compart. C	Compart. A	Compart. B'	Compart. C	Compart. A	Compart. B'	Compart. C
%Lama												
Arsênio (As)												
Alumínio (Al)												
Bário (Ba)												
Ferro (Fe)												
Manganês (Mn)												
Níquel (Ni)												
Chumbo (Pb)												

As densidades dos grupos-chave Oligochaeta, *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura cf. variodentata* foram maiores na praia emersa do Compartimento B', onde foi registrado a menor porcentagem de lama e de elementos químicos no sedimento. Com exceção de *S. pussicus*, que é um poliqueta típico de sedimentos mais grossos, portanto, não esperado em alta abundância no compartimento C, os oligoquetas e *H. variodentata* tiveram relações negativas com ao menos um elemento químico presente nos Compartimentos A e C. Sabendo que o Compartimento A tem naturalmente maiores concentrações de diversos elementos químicos (SOUZA *et al.*, 2022) e que o Compartimento C retém elementos químicos provenientes do Rio Doce (BRAHIM *et al.*, 2024), as relações negativas observadas nessa tabela indicam o efeito negativo do rejeito, causando a redução da densidade dos grupos-chave macrofaunais. Do mesmo modo, o crustáceo Amphipoda teve sua densidade reduzida principalmente no compartimento C, com o aumento de As, Fe e Pb, reforçando o indicativo que esse Compartimento está impactado. Anfípodos são usados como bioindicadores e biomonitores ambientais, uma vez que são mais sensíveis às alterações produzidas pelos contaminantes ambientais do que outros organismos nas suas comunidades (GESTEIRA & DAUVIN, 2000).

Figura 14: Análise de ordenação da estrutura da macrofauna bentônica entre os Compartimentos durante o monitoramento do PMBA/FEST (set/2018 a jul/2023). A) Praia emersa. B) Antepraia.



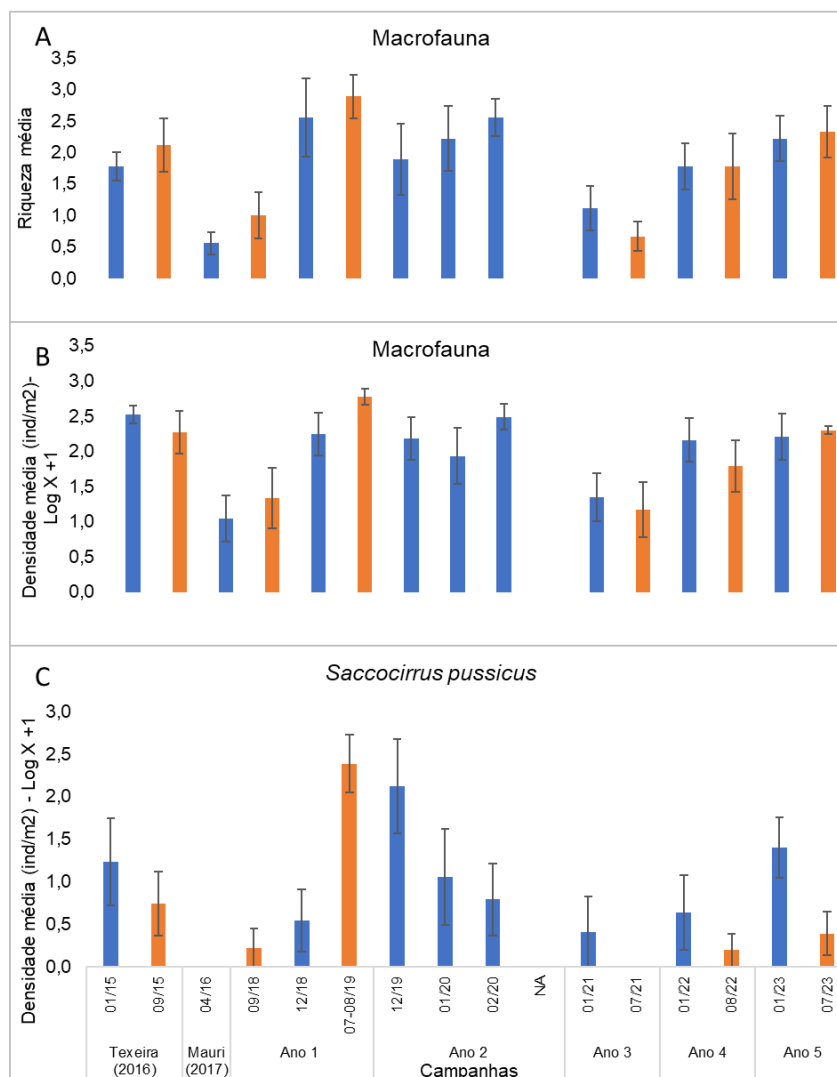
A) Praia emersa: A análise de ordenação (nMDS) evidenciou agrupamentos da estrutura da macrofauna (composição e densidade) entre os Compartimentos, resultado que vem se mantendo ao longo do monitoramento. A análise ANOSIM, confirma as diferenças significativas ($R(\text{global})=0,112$; $p=0,001$), onde todos compartimentos diferem entre si (Tabela 13), assim como já apresentado em (FEST, 2023 a,b). A análise SIMPER mostrou que variações nas densidades de Oligochaeta e Nemertea, que apresentam os maiores valores no compartimento B', e do isópode *Excirolana braziliensis*, que apresenta maior densidade no compartimento B' e C, foram os principais responsáveis pelas diferenças. A análise ANOSIM também evidenciou diferenças significativas da estrutura da macrofauna entre as campanhas ($R(\text{global})=0,039$; $p=0,001$), onde a campanha do período seco 07/23 diferiu significativamente de praticamente todas as campanhas anteriores, com exceção da campanha 08/22, também do período seco. A análise SIMPER indicou que essas diferenças ocorreram devido, principalmente, às variações nas densidades de Oligochaeta, do isópode *Excirolana braziliensis* e dos Nemertea, que apresentaram baixas densidades nas campanhas 07/23 e 08/22. **B) Antepraia:** A análise de ordenação nMDS também mostrou claro padrão de agrupamento das amostras entre os compartimentos. A análise ANOSIM confirmou a diferença significativa da estrutura da macrofauna entre todos os compartimentos ($R(\text{global})=0,176$; $p=0,001$; Tabela 13), assim como evidenciado em (FEST, 2023 a). A análise SIMPER mostrou que, de modo geral, as variações nas densidades dos Amphipoda e dos poliquetas Spionidae, Syllidae e Magelonidae foram as principais responsáveis pelas diferenças encontradas entre os compartimentos na antepraia, onde Amphipoda e Syllidae apresentam maiores valores no compartimento A, Spionidae é mais abundante nos compartimentos B' e C e Magelonidae no compartimento C. A análise ANOSIM também mostrou algumas diferenças temporais significativas ($R(\text{global})=0,068$; $p=0,001$), onde a última campanha (07/23) diferiu das campanhas dos períodos chuvosos 02/20, 01/21 e 01/22 e do período seco 07/21. Esse resultado parece ter ocorrido ao acaso, visto que não há um padrão temporal aparente. Variações nas densidades de Spionidae e Amphipoda foram os responsáveis por estas diferenças. A análise ANOSIM também detectou diferenças significativas na estrutura da fauna entre as isóbatas ($R(\text{global})=0,028$; $p=0,007$), onde o SIMPER detectou que as maiores densidades de Spionidae e Amphipoda na isóbata de 10 m foram as responsáveis por esta dissimilaridade. Mesmo padrão já observado no (FEST, 2023).

Tabela 13: Resultado da análise de similaridade ANOSIM da Macrofauna de praias emersas e antepraia entre os compartimentos e entre as campanhas em todo o período do monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Apenas resultados significativos ($p > 0,05$) foram evidenciados na tabela abaixo. NA: Não se aplica.

	Praia emersa				Antepraia			
	Fator	R	p	Dissi. Média	Fator	R	p	Dissi. Média
Compart.	A x B'	0,182	0,00	96,5	A x B'	0,213	0,001	92,93
	A x C	0,116	0,00	97,2	A x C	0,185	0,001	92,72
	B' x C	0,062	0,00	94,6	B' x C	0,141	0,001	92,35
Campanha	09/18 x 07/23	0,113	0,00	94,2	02/20 x 07/23	0,092	0,013	93,31
	12/18 X 07/23	0,052	0,01	94,0	01/21 x 07/23	0,118	0,006	91,61
	07/08/19 x 07/23	0,044	0,05	93,5	07/21 x 07/23	0,097	0,011	95,08
	12/19 X 07/23	0,031	0,04	93,8	01/22 x 07/23	0,075	0,022	90,72
	02/20 X 07/23	0,053	0,00	97,7				
	01/21 x 07/23	0,072	0,00	96,5				
	07/21 x 07/23	0,107	0,00	95,3				
	01/22 x 07/23	0,103	0,00	96,8				
	01/23 x 07/23	0,042	0,02	94,1				
Isóbatas	NA	NA	NA	NA	5m x 10m	0,028	0,007	91,93

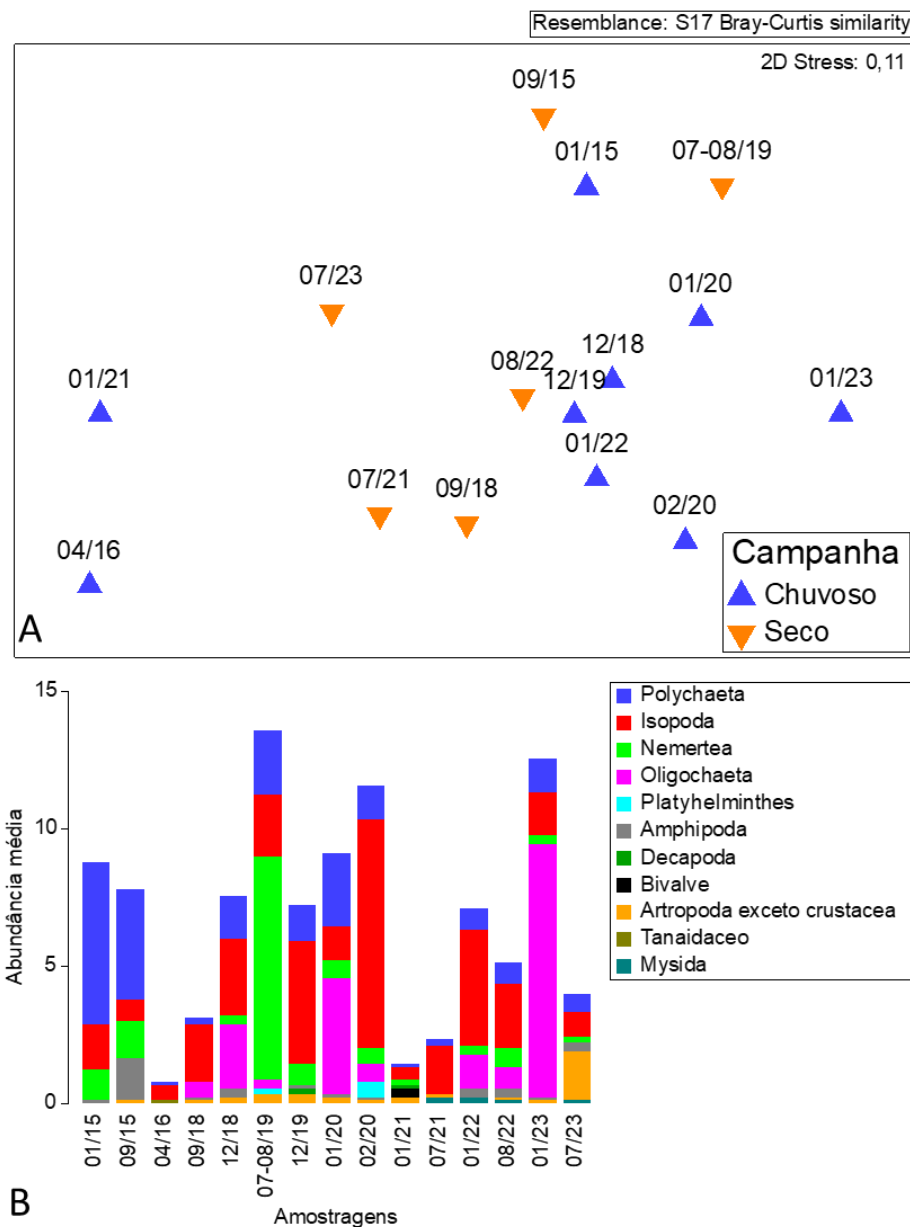
Os baixos valores de R Global indicam que variações nas densidades dos táxons contribuíram mais para as dissimilaridades do que para as diferenças na composição taxonômica. Os dados apresentados nessa tabela foram interpretados em conjunto com as demais análises multivariadas e comentados na legenda estendida da Figura 14.

Figura 15: Parâmetros ecológicos da macrofauna de Degredo (N2). A) Riqueza taxonômica; B) Densidade média (Log X +1) e; C) densidade do grupo chave *Excirolana braziliensis*. Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (jan/2015 e set/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Dados do período Chuvoso de 2016 (abr/2016) referem-se aos dados pretéritos retirados do trabalho de conclusão de curso de Mauri (2017). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Campanha jan/2020 realizada durante a cheia do Rio Doce; Campanha emergencial 02/2020 realizada pós cheia do Rio Doce. Barras em azul, período chuvoso; barras em laranja, período seco. NA – não amostrado devido à pandemia de Covid-19.



Apesar das variações temporais recorrentes nos parâmetros da macrofauna de Degredo, as últimas campanhas (Ano 4 e Ano 5) vem mostrando um aumento dos valores de densidade e riqueza, acima dos reduzidos valores dos parâmetros ecológicos registrados logo após a chegada da lama de rejeitos. No entanto, ao analisar os grupos-chave separadamente, é possível ver variações distintas dependendo do táxon. Na Figura 15 (C) podemos observar a variação da densidade média do poliqueta *Saccocirrus pussicus*, estando inclusive ausente em algumas campanhas.

Figura 16: A) Análise de ordenação da estrutura da macrofauna bentônica de Degredo (N2) entre as campanhas; B) Repartição da abundância de grupos macrofaunais. Ambos durante todo o monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023) e dados pretéritos (jan/2015 a set/ 2015). Dados pretéritos abrangem: jan/2015 a set/2015, retirados da dissertação de Teixeira (2016); abr/2016(Mauri, 2017).



A) A análise de ordenação nMDS da estação amostral Degredo mostra um agrupamento das campanhas pré-rompimento (01/15 e 09/15) e bem distante da campanha 04/16 (pós-rompimento,). A Análise ANOSIM comprova esse resultado (Tabela 13), mostrando que a campanha realizada em 2016, meses após a chegada dos rejeitos, apresentou a estrutura da macrofauna bem dissimilar às campanhas realizadas antes do rompimento. No entanto, ao longo do monitoramento do PMBA, diversas campanhas mostraram similaridades da fauna com o período pré-rompimento, ao mesmo tempo que em algumas campanhas a macrofauna se assemelha aos dados apresentados por Mauri (2017). Isso demonstra a oscilação da estrutura da macrofauna ao longo desses anos. A variação temporal entre o período seco e chuvoso também foi testada, no entanto, a ANOSIM não

revela diferença significativa entre os dois períodos ($R(\text{global}) = 0,006$; $p = 0,338$). **B)** Na repartição de abundância é possível observar o resultado do SIMPER, onde logo após o rompimento (04/16) é possível ver reduções das abundancias de todos os táxons da macrofauna. A partir daí, fica claro a troca de dominância de organismos, onde, nas campanhas pré-rompimento, havia uma dominância de poliquetas, que foram drasticamente reduzidos nas campanhas seguintes à chegada da lama e, até o momento, não mostrou recuperação. Após o rompimento, os isópodes e, eventualmente, os oligoquetas têm dominado a macrofauna no local.

Tabela 14: Resultado da análise de similaridade ANOSIM da Macrofauna da estação amostral N2-Degredo entre as campanhas de todo o período do monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023) em comparação com dados pretéritos. Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (01/2015 e 09/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Dados do período Chuvoso de 2016 (04/2016) referem-se aos dados pretéritos retirados do trabalho de conclusão de curso de Mauri (2017). Resultados significativos ($p < 0,05$) foram evidenciados em negrito.

Campanhas	N2 - Degredo			
	Fator	R	p	Dissi. Média
Teixeira (2016)	01/15 x 09/15	-0,042	0,65	77,1
Teixeira (2016) x Mauri (2017)	01/15 x 04/16	0,11	0,05	89,9
	09/15 x 04/16	0,158	0,03	94,5
Teixeira (2016) x PMBA/FEST	01/15, 09/18	0,133	0,06	89,9
	01/15, 12/18	-0,047	0,71	78,8
	01/15, 07-08/19	0,123	0,08	77,8
	01/15, 12/19	-0,039	0,65	81,9
	01/15, 01/20	-0,047	0,71	81,3
	01/15, 02/20	0,017	0,34	79,8
	01/15, 01/21	0,134	0,03	92,2
	01/15, 07/21	0,1	0,08	90,9
	01/15, 01/22	0,016	0,33	84,2
	01/15, 08/22	0,016	0,34	84,2
	01/15, 01/23	0,086	0,11	85,1
	01/15, 07/23	0,181	0,03	85,6
	09/15, 09/18	0,177	0,03	93,6
	09/15, 12/18	0,002	0,38	81,8
	09/15, 07-08/19	0,088	0,12	78,6
	09/15, 12/19	-0,06	0,81	82,3
	09/15, 01/20	-0,055	0,77	82,5
	09/15, 02/20	-0,016	0,50	80,3
	09/15, 01/21	0,11	0,08	93,5
	09/15, 07/21	0,124	0,06	93,7
	09/15, 01/22	-0,01	0,46	84,4
	09/15, 08/22	-0,004	0,44	84,8
	09/15, 01/23	0,043	0,23	84,0
	09/15, 07/23	0,152	0,06	85,5
Mauri (2017) x PMBA/FEST	04/16, 09/18	-0,034	0,72	92,6
	04/16, 12/18	0,063	0,14	91,2
	04/16, 07-08/19	0,433	0,00	95,9
	04/16, 12/19	0,066	0,14	94,2
	04/16, 01/20	0,067	0,14	90,8
	04/16, 02/20	0,172	0,03	91,6
	04/16, 01/21	-0,008	0,56	94,1
	04/16, 07/21	-0,051	0,85	93,0
	04/16, 01/22	0,065	0,11	93,6
	04/16, 08/22	0,037	0,24	92,0
	04/16, 01/23	0,173	0,02	95,9
	04/16, 07/23	0,193	0,02	94,0

Os dados apresentados nessa tabela foram interpretados em conjunto com as demais análises multivariadas e comentados na legenda estendida da Figura 16.

3.3.2 Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica

Tabela 15: Resultados das ANOVAs (Análises de variância) realizadas com os parâmetros da diversidade da meiofauna bentônica (Densidade média (N), riqueza taxonômica (S), diversidade de Shannon-Wiener (H'), equitabilidade de Pielou (J) e diversidade beta (β)) para praia emersa e antepraia entre os compartimentos e campanhas durante todo o período de realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). “-” diminui com o tempo; “+” aumenta com o tempo. “oscila” com o tempo. ns – não significativo ($p>0,05$). NA – Não se aplica.

Variáveis	N			S			H'			J			β		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>															
Compartimento	8.61	0.00	A, C > B'	8.67	0.0	A, B' > C	58.0	0.0	B' > A, C	54.3	0.0	B' > A, C		ns	
Campanha	5.78	0.01	Oscila		ns			ns			ns			ns	
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			NA	
<u>Antepraia</u>															
Compartimento		ns		8.56	0	A > B', C	74.59	0	A > B', C	14.78	0	A > B', C	12.3	0.00	A > C
Campanha	52.82	0.00	+	5.61	0.01	+		ns		13.42	0.0	-	5.4	0.00	-
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
Isóbata		ns			ns			ns			ns			NA	

Para a praia emersa, os Compartimentos A e C apresentam as maiores densidades significativas da meiofauna, assim como abordado em (FEST, 2023). No entanto, o compartimento C possui os menores valores de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou, o que significa uma dominância de poucos organismos, que possivelmente são tolerantes e/ou oportunistas justamente no compartimento que recebe a deposição dos sedimentos provenientes do Rio Doce (OLIVEIRA *et al.*, 2015), com retenção de diferentes elementos químicos (BRAHIM *et al.*, 2024) trazidos pela deriva litorânea sentido norte. Com a inclusão dos dados da última campanha (07/23), ao longo do tempo deixaram de ocorrer oscilações significativas, tanto da riqueza quanto da diversidade de Shannon-Wiener, mostrando uma tendência de estabilização desses parâmetros. No entanto, a densidade de organismos mostra oscilação temporal, o que significa que a variação da densidade de organismos dominantes (possíveis tolerantes/oportunistas) em algumas campanhas está interferindo nesse resultado. Na antepraia, os Compartimentos B' e C obtiveram os menores valores significativos de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener, equitabilidade de Pielou e as maiores dissimilaridades entre as espécies presentes nas amostras (diversidade beta). Da mesma forma que ocorre com a praia

emersa, os menores valores desses três parâmetros citados indicam a dominância de poucos organismos, que pode ser uma resposta aos rejeitos presentes no sedimento desses locais. Já a maior dissimilaridade da meiofauna nas amostras do compartimento C (menor valor de diversidade beta) parece ser consequência da distribuição em manchas que ocorre com os organismos bentônicos (GIERE, 2009). Quanto à variação temporal, a riqueza e densidade da meiofauna apresentam uma tendência de aumento ao longo do tempo, padrão já evidenciado em FEST (2023). Esse aumento pode ser decorrente de animais oportunistas e tolerantes, visto que o índice de equitabilidade (J) está reduzindo, assim como a diversidade beta.

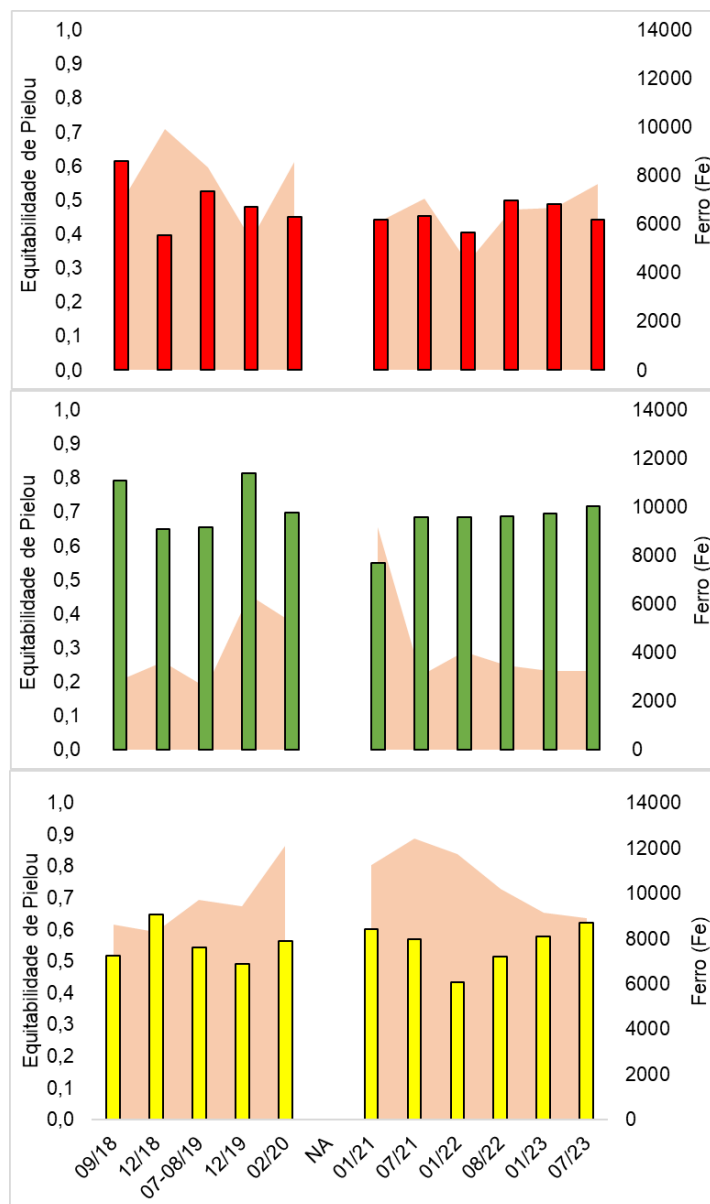
Tabela 16: Resultados das ANOVAs realizadas com os grupos chave da meiofauna bentônica da praia emersa e da antepraia entre os compartimentos e campanhas amostradas durante todo o período de realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). “+” aumenta com o tempo. Ns – não significativo. Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). “*oscila*” com o tempo. Ns – não significativo ($p > 0,05$).

Densidade média (ind/10cm ²) de Grupos Chave						
Variáveis	Nematoda			Copepoda		
	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>						
Compartimento	26.63	0.00	A, C > B'			
Campanha	6.54	0.01	<i>Oscila</i>	4.41	0.03	+
Compartimento x Campanha		ns			ns	
<u>Antepraia</u>						
Isóbata		ns			ns	
Compartimento	3.76	0.02	C > A	37.69	0.00	A > B', C
Campanha	50.43	0.00	+	6.44	0.01	<i>Oscila</i>
Compartimento x Campanha		ns			ns	

Na praia emersa, Nematoda apresenta maiores densidades nos compartimentos A e C. Em ambos compartimentos, as praias são caracterizadas por serem dissipativas a intermediárias, com a granulometria do sedimento mais fina do que em B' e, por isso, tem condições mais adequadas a uma maior abundância de Nematoda. Associado a isso, para o compartimento C, onde tem maior retenção dos elementos químicos provenientes da descarga do Rio Doce (BRAHIM *et al.*, 2024), a maior abundância de Nematoda possivelmente é devido a sua característica oportunista, visto que esses organismos são conhecidos por serem muito tolerantes a diversos poluentes orgânicos e inorgânicos e outros distúrbios ambientais (THIERMANN *et al.*, 2000, WILSON & KAKOULI-DUARTE 2009, LOSI *et al.*, 2013, LOSI *et al.*, 2021). No compartimento A as altas concentrações de elementos químicos presentes são associadas à presença de CaCO₃ que é abundante no compartimento (SOUZA *et al.*, 2022). Dessa forma, a alta densidade de Nematoda nesse compartimento não tem implicação com os rejeitos do minério. Da mesma forma, para a antepraia, a maior densidade significativa de Nematoda no Compartimento C pode ter relação com as características oportunistas/tolerantes de várias espécies desse grupo, enquanto que, por outro lado, as menores densidades de Copepoda nos Compartimentos B' e C podem ter relação com a sensibilidade desses organismos para distúrbios (SANTOS & FONSÊCA-GENEVOIS, 1994; SANTOS *et al.*, 1995; SANTOS *et al.*, 1997;

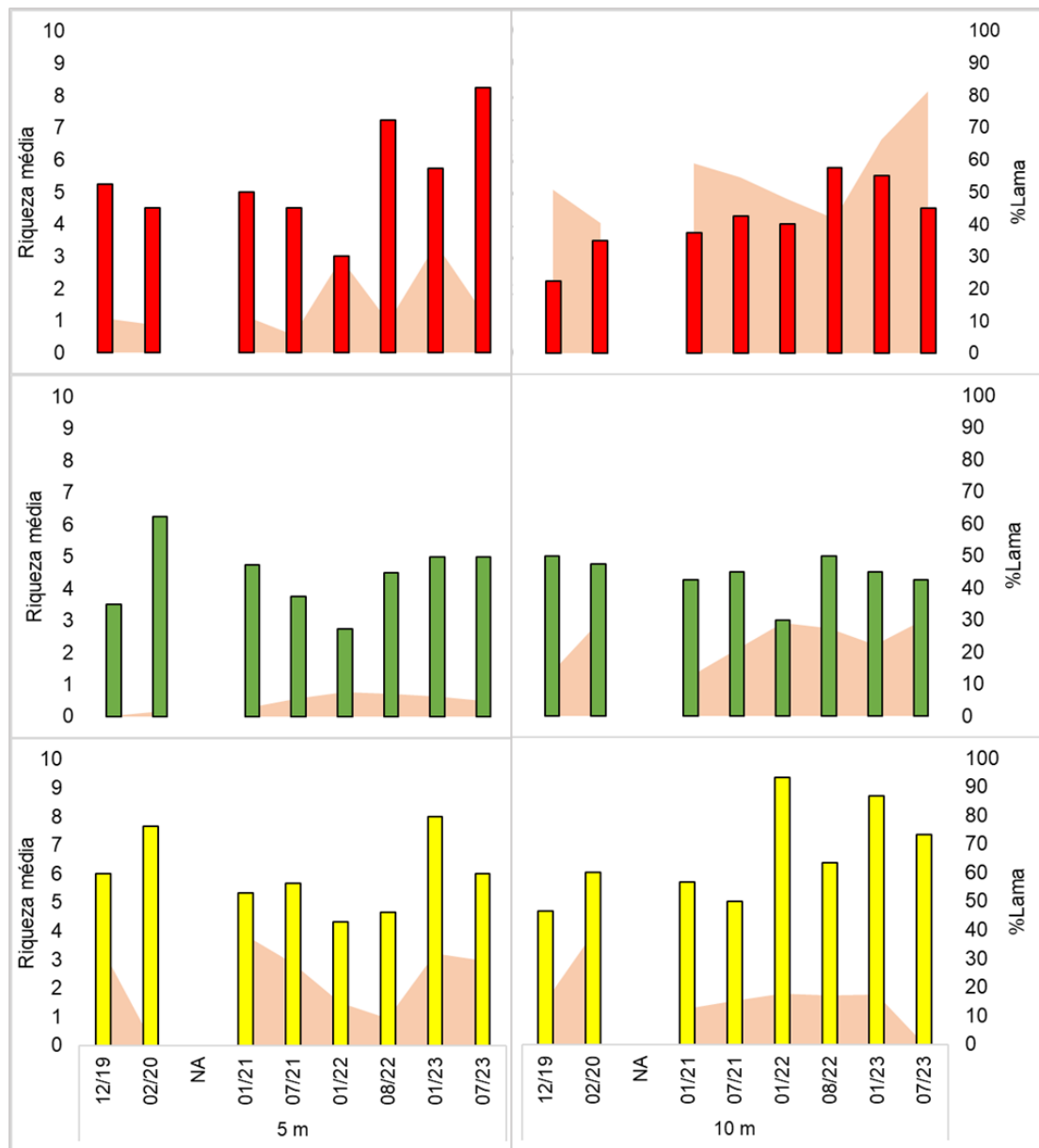
LOTUFO & ABESSA, 2002; MOELLMANN & CORBISIER, 2003; WANDENESS *et al.*, 2009; KIHARA *et al.*, 2011). Ao longo das campanhas, há uma oscilação na densidade de Nematoda na praia emersa, enquanto que Copepoda vem apresentando uma tendência de aumento, padrão que vem se consolidando e já evidenciado no RT44 (FEST, 2023). Para a antepiraia, a densidade do crustáceo Copepoda teve oscilação significativa ao longo das campanhas, enquanto Nematoda apresenta tendência de aumento ao longo do tempo.

Figura 17: Equitabilidade de Pielou (J) da Meiofauna da praia emersa em relação significativa negativa à presença de Ferro (Fe) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam a diversidade de Shannon da meiofauna bentônica; área sombreada distribuição de Lama (%). NA – não amostrado devido à pandemia de COVID/19.



A redução da equitabilidade nos Compartimentos A e C indica aumento de dominância de um ou poucos organismos. Na figura acima é possível notar que o aumento na concentração de Fe nesses compartimentos reduz o valor da equitabilidade, ou seja, causa mais diferenças entre a densidade dos diferentes táxons. Nesses mesmos compartimentos há os menores valores de diversidade de Shannon-Wiener e, para o Compartimento C, também o menor valor de riqueza taxonômica, demonstrando que a densidade de organismos, mesmo sendo alta, está distribuída de forma que alguns poucos táxons dominem em relação aos demais. Essa dominância possivelmente é reflexo da alta densidade de Nematoda nesses locais, que pode apresentar diversas espécies com características tolerantes e oportunistas aos impactos ambientais.

Figura 18: Riqueza da Meiofauna bentônica da antepiraia em relação negativa significativa à distribuição de Ferro (Fe) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam a riqueza da meiofauna bentônica; área sombreada distribuição de porcentagem de lama NA – não amostrado devido à pandemia de COVID/19.



Em todos os compartimentos, as porcentagens de lama presentes na antepiraia afetam negativamente a riqueza taxonômica da meiofauna bentônica. No entanto, no Compartimento C, onde tem as maiores concentrações de lama, a riqueza chega a ser significativamente menor do que nos demais, o que evidencia o efeito deletério da lama na meiofauna, atuando no desaparecimento ou evitando a chegada e/ou permanência de novos táxons no local.

Quadro 5: Resultados das ANCOVAs (análises de covariância) realizadas com os parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica (Densidade média (N), riqueza taxonômica (S), diversidade de Shannon-Wiener (H') e equitabilidade de Pielou (J), que apresentaram variações significativas entre os compartimentos (ver tabela 6) em relação à %Lama, assim como a concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb da praia emersa e antepraia amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul – relação positiva; em vermelho – relação negativa.

Integração do indicador Meiofauna com %Lama e concentrações elementar																					
Variáveis	Praia emersa												Antepraia								
	Compart. A				Compart. B'				Compart. C				Compart. A			Compart. B'			Compart. C		
	N	S	H'	J	N	S	H'	J	N	S	H'	J	S	H'	J	S	H'	J	S	H'	J
%Lama																					
Arsênio (As)																					
Alumínio (Al)																					
Bário (Ba)																					
Ferro (Fe)																					
Manganês (Mn)																					
Níquel (Ni)																					
Chumbo (Pb)																					

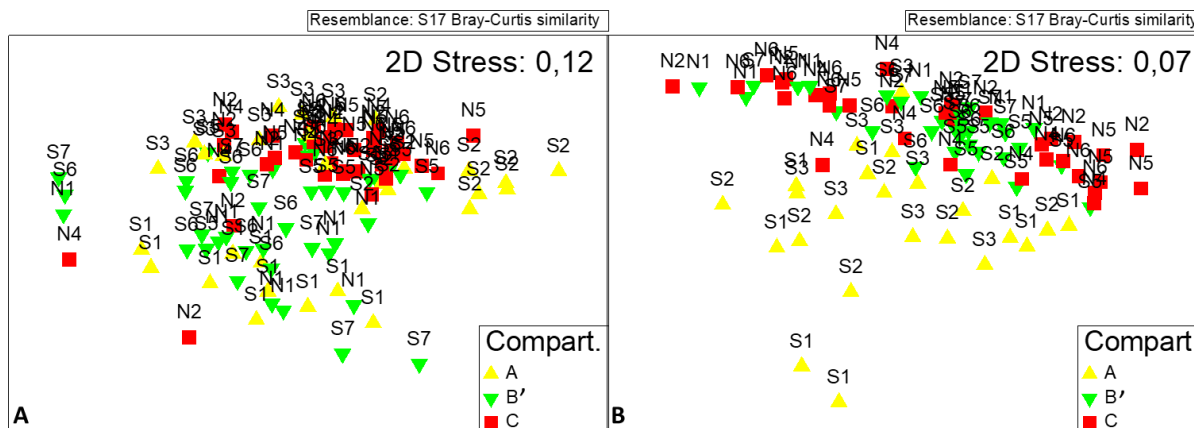
Para a praia emersa, no Compartimento A, além da relação com o Ferro (Fe), alguns parâmetros ecológicos da meiofauna também apresentam relações negativas com a porcentagem de lama, As, Al e Mn, e positivas com As, Al, Ba e Ni. Enquanto que no Compartimento C, a meiofauna parece se beneficiar da presença de As e Al, causando o aumento da densidade e riqueza, possivelmente de Nematoda, grupo dominante nesse local. Já para a Antepraia, assim como em (FEST, 2023), os menores valores de riqueza, diversidade e equitabilidade foram registrados nos Compartimentos B' e C, onde todos esses parâmetros apresentaram relações negativas com a lama (ver exemplo na Figura 18). Além da lama, também ocorreram outras relações negativas dos parâmetros ecológicos da meiofauna com elementos químicos.

Quadro 6: Resultados das ANCOVAs realizadas com a densidade dos grupos chave da meiofauna bentônica (Nematoda e Copepoda) que apresentaram variações significativas entre os compartimentos (ver Tabela 15) em relação à porcentagem de lama, assim como a concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb da praia emersa e antepraia amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul: relação positiva; em vermelho: relação negativa.

Integração do indicador Meiofauna com porcentagem de lama e concentrações elementar									
Variáveis	Praia emersa			Antepraia					
	Nematoda			Nematoda			Copepoda		
	Compart. A	Compart. B'	Compart. C	Compart. A	Compart. B'	Compart. C	Compart. A	Compart. B'	Compart. C
%Lama									
Arsênio (As)									
Alumínio (Al)									
Bário (Ba)									
Ferro (Fe)									
Manganês (Mn)									
Níquel (Ni)									
Chumbo (Pb)									

Na praia emersa, a densidade de Nematoda reduz na presença de lama no Compartimento A. No entanto, a presença de diversos elementos químicos, incluindo As, Al e Ba no Compartimento C, causa o aumento da densidade desses organismos. Cabe ressaltar que diversas espécies de Nematoda apresentam alta capacidade de tolerância frente a contaminação por metais (THIERMANN *et al.*, 2000, WILSON & KAKOULI-DUARTE 2009, LOSI *et al.*, 2013, LOSI *et al.*, 2021) e é no Compartimento C que ocorre a deposição dos elementos químicos provenientes do Rio Doce (QUARESMA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2017; BRAHIM *et al.*, 2024). Na antepraia, apesar das maiores densidades de Nematoda ocorrer no Compartimento C e de Copepoda ocorrer no Compartimento A, de modo geral, em todos os compartimentos, as densidades desses organismos vêm sendo afetadas negativamente pela presença de lama, As, Al, além de Ba e Fe para os copépodos.

Figura 19: Análise de ordenação da estrutura da meiofauna bentônica entre os Compartimentos durante o monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). A) Praia emersa. B) Antepraia.



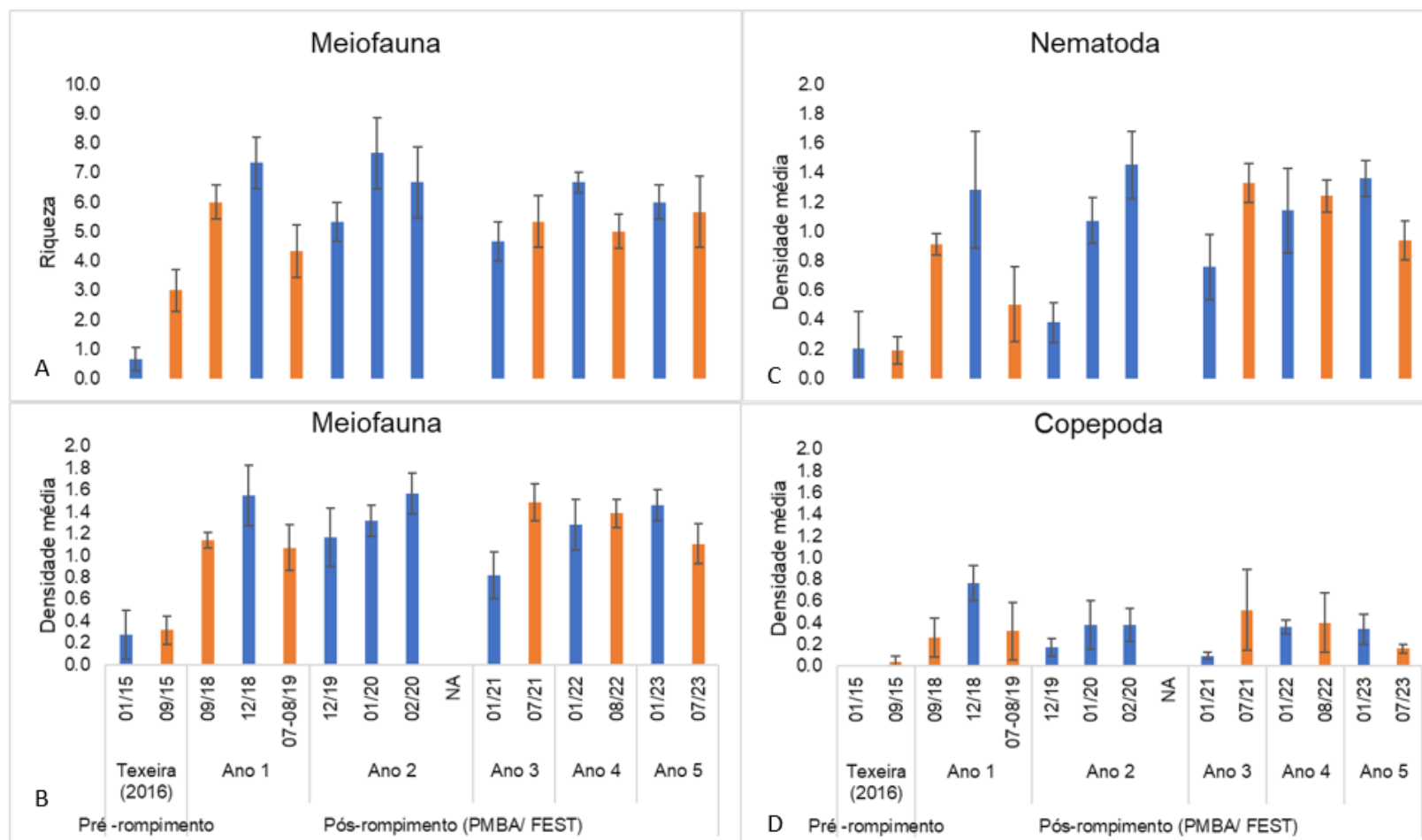
A) Praia emersa: A análise de ordenação nMDS mantém o resultado da meiofauna apresentado nos (FEST, 2023 a,b), com maior agrupamento das amostras do compartimento C. A análise ANOSIM demonstrou que há distinção da estrutura da meiofauna entre todos os compartimentos ($R(\text{global})=0,082$; $p=0,001$). A análise de classificação SIMPER revelou que as variações nas densidades de Nematoda e Copepoda, foram responsáveis pelas diferenças encontradas na praia emersa, onde Nematoda apresenta os maiores valores de densidade nos compartimentos A e C e Copepoda no compartimento A. Mesmo padrão já reportado nos RRDM (2020), RRDM (2022) assim como em FEST (2023a). O ANOSIM também registrou diferença significativa temporal ($R(\text{global})=0,02$; $p=0,005$), onde a última campanha (07/23) diferiu significativamente das campanhas do ANO 1 (09/18 e 12/18) assim como da campanha 12/19, do ANO 2 (Tabela 17). O SIMPER revela que as densidades de Nematoda, Copepoda e Platyhelminthes foram os responsáveis pelas diferenças observadas, onde a campanha 07/23 apresentou as maiores densidades desses organismos. **B) Antepraia:** A análise de ordenação nMDS mostra que a estruturação da meiofauna da antepraia do compartimento A tende a ser mais dispersas do que as demais. Padrão que vem sendo registrado nos RT39C-RRDM (2022), FEST (2023-a) e FEST (2023-b). A análise ANOSIM, confirma a dissimilaridade do compartimento A para os demais ($R(\text{global})=0,101$; $p=0,001$). Diferenças significativas entre as campanhas também foram registradas ($R(\text{global})=0,1$; $p=0,001$), onde a última campanha (07/23) diferiu significativamente das campanhas 12/19, 02/20 e 01/22, todas equivalentes ao período chuvoso. O resultado da análise de classificação SIMPER também mostra que estas diferenças (espacial e temporal) são resultantes das variações das densidades de Nematoda, que domina o Compartimento C, e Copepoda, com maior densidade no Compartimento A. Já entre as campanhas, as maiores densidades de Nematoda ocorreram na campanha 07/23. No que se refere às isóbatas de 5 m e 10 m, a análise ANOSIM não registra diferenças significativas da meiofauna entre elas ($R(\text{global})=-0,004$; $p=0,672$), assim como registrado em FEST (2023b).

Tabela 17: Resultado da análise de similaridade ANOSIM da Meiofauna de praias emersas e antepraia entre os compartimentos e entre as campanhas em todo o período do monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Apenas resultados significativos ($p > 0,05$) foram evidenciados na tabela abaixo. ns – não significativo.

	Praia emersa				Antepraia			
	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média
Compart.	A x B'	0,047	0,001	78,4	A x B'	0,192	0,001	63,3
	A x C	0,061	0,001	73,0	A x C	0,128	0,001	67,7
	B' x C	0,128	0,001	76,9	B' x C	0,021	0,052	58,7
Campanha	09/18 x 07/23	0,162	0,001	79,1	12/19 x 07/23	0,28	0,001	68,0
	12/18 x 07/23	0,064	0,01	75,5	02/20 x 07/23	0,201	0,0001	69,3
	12/19 x 07/23	0,046	0,024	76,2	01/22 x 07/23	0,092	0,012	60,8
Isóbatas	-	-	-	-	5m x 10m	-	ns	-

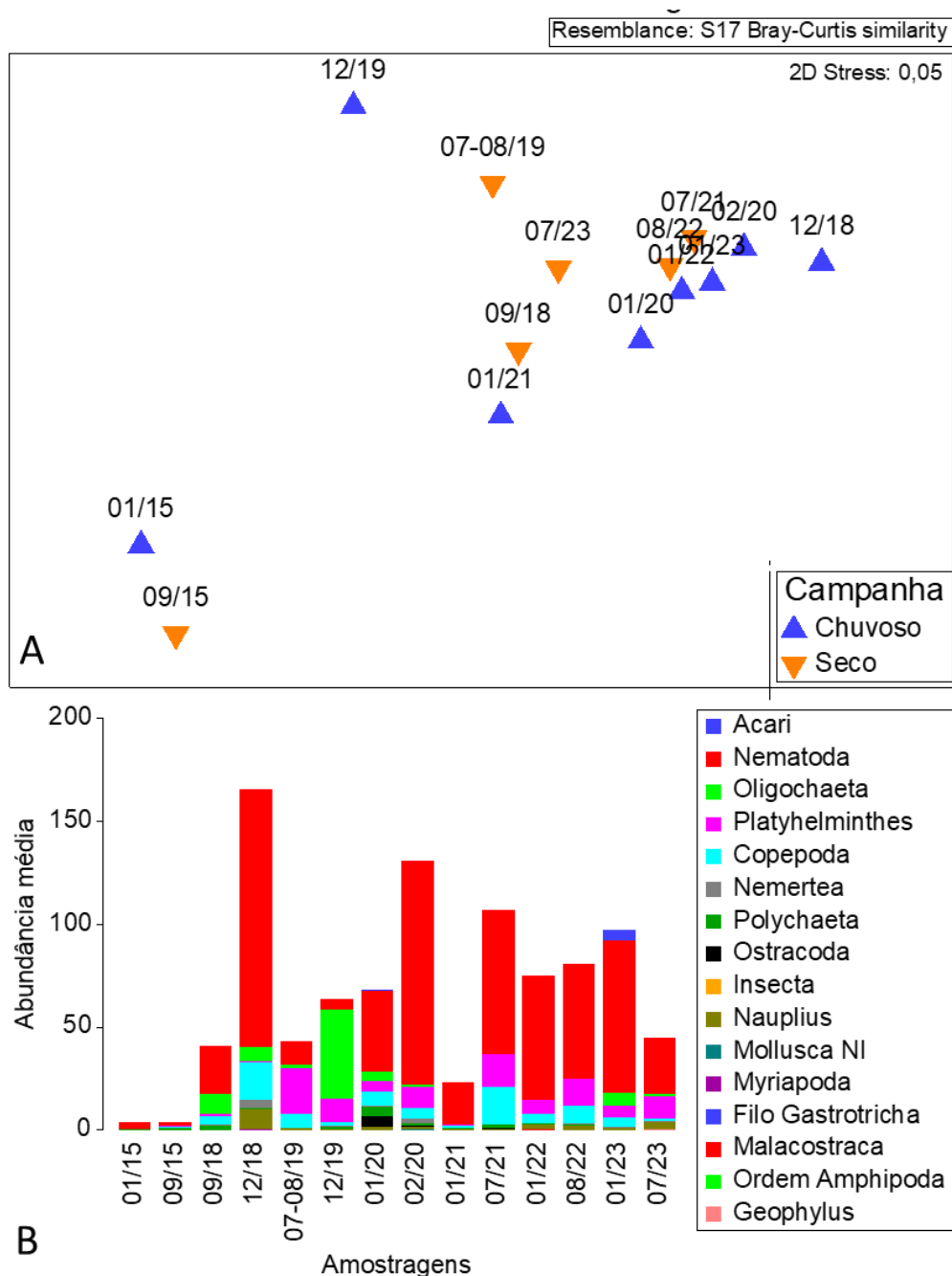
Os baixos valores de R indicam que variações nas densidades dos táxons contribuíram mais para as dissimilaridades do que diferenças na composição taxonômica. Os dados apresentados nessa tabela foram interpretados em conjunto com as demais análises multivariadas e comentados na legenda estendida da Figura 19.

Figura 20: Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica de Degredo (N2) durante todo o período do monitoramento. A) Riqueza taxonômica. B) Densidade média (ind/10cm² – LogX+1). C) Densidade média de Nematoda (ind/10cm² – LogX+1) D) Densidade média de Copepoda (ind/10cm² – LogX+1). Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (jan/2015 e set/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). Campanha jan/2020 realizada durante a cheia do Rio Doce; Campanha emergencial fev/2020 realizada pós cheia do Rio Doce. Barras em azul, período chuvoso; barras em laranja, período seco. NA – não amostrado devido à pandemia de Covid-19.



As alterações na diversidade ecológica da meiofauna bentônica, após o rompimento da Barragem de Fundão, continuam indicando o impacto do rejeito na praia. Os valores da densidade e riqueza da meiofauna continuam maiores que o período pré-rompimento. Com a inclusão da campanha 07/23, o grupo chave Nematoda que apresentava tendência de aumento ao longo do tempo, deixa de ser significativa, sugerindo uma estabilização. Contudo, esse resultado requer cautela. O aumento da densidade de Nematoda pós-rompimento pode ser uma resposta a entrada e permanência dos rejeitos no sedimento, visto que diversas espécies desse filo são conhecidas por sua característica tolerante e oportunista.

Figura 21: A) Análise de ordenação da estrutura da meiofauna bentônica entre as campanhas durante todo o monitoramento do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023). B) Repartição da abundância entre os anos coletados. Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (jan/2015 e set/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016).



A) A análise de ordenação nMDS divide as amostras da praia de Degredo em dois grupos, um contendo as amostras do pré-rompimento (TEIXEIRA, 2016) e o outro com as amostras obtidas durante o PMBA/FEST, evidenciando alterações significativas na estrutura da meiofauna na praia de Degredo. A análise ANOSIM, da mesma forma, confirma distinção da estrutura da meiofauna ($R(\text{global}) = 0,268$; $p = 0,001$), onde as amostras do pré-rompimento não diferem entre si, porém diferem de todas as outras campanhas. **B)** Na repartição de abundância, é possível notar o resultado expresso pela análise de classificação (SIMPER), que mostra o aumento das densidades de Nematoda, Copepoda,

Platyhelminthes e Oligochaeta, além da presença de diferentes grupos taxonômicos não presentes antes do rompimento. De acordo com a hipótese ecológica do distúrbio intermediário (HUSTON, 1979), as perturbações podem enriquecer, empobrecer ou devastar as assembleias da meiofauna e sua diversidade. A entrada de frentes frias, o aumento de volume da descarga do Rio Doce no período chuvoso e a frequência de ondas maiores que ocorre no período seco, causam um distúrbio, ou seja, a remobilização do sedimento e ressuspensão de elementos químicos provenientes do rejeito, que possivelmente são os responsáveis pela variação na densidade da fauna observada ao longo do monitoramento.

Tabela 18: Resultado da análise de similaridade ANOSIM da Meiofauna da estação amostral N2-Degredo entre as campanhas de todo o período do monitoramento em comparação com dados pretéritos. Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (01/2015 e 09/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest (set/2018 a jul/2023).

Campanhas	N2 - Degredo			
	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média
Teixeira (2016)	01/15 x 09/15	0,105	0,070	-
Teixeira (2016) x PMBA/FEST	01/15 x 09/18	0,454	0,001	92,9
	01/15 x 12/18	0,501	0,001	96,3
	01/15 x 07-08/19	0,545	0,001	97,8
	01/15 x 12/19	0,438	0,001	96,3
	01/15 x 01/20	0,464	0,001	93,0
	01/15 x 02/20	0,543	0,001	95,6
	01/15 x 01/21	0,466	0,001	92,9
	01/15 x 07/21	0,501	0,001	94,6
	01/15 x 01/22	0,481	0,001	93,1
	01/15 x 08/22	0,505	0,001	93,0
	01/15 x 01/23	0,532	0,001	94,1
	01/15 x 07/23	0,526	0,001	93,6
	09/15 x 09/18	0,256	0,001	86,1
	09/15 x 12/18	0,368	0,001	91,7
	09/15 x 07-08/19	0,353	0,005	90,0
	09/15 x 12/19	0,124	0,028	86,0
	09/15 x 01/20	0,367	0,001	89,2
	09/15 x 02/20	0,472	0,001	94,5
	09/15 x 01/21	0,191	0,005	80,8
	09/15 x 07/21	0,413	0,001	91,5
	09/15 x 01/22	0,359	0,002	88,6
	09/15 x 08/22	0,455	0,001	91,5
	09/15 x 01/23	0,49	0,002	93,6
	09/15 x 07/23	0,375	0,001	87,2

Os dados apresentados nessa tabela foram interpretados em conjunto com as demais análises multivariadas e comentados na legenda estendida da Figura 21.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

1) Evolução temporal e espacial dos indicadores nos 5 anos do PMBA

A porção submersa das praias (5 e 10 metros de profundidade), localizadas nas adjacências da desembocadura e flanco norte da planície do Rio Doce (Compartimentos B' e C'), registraram uma tendência significativa de **enriquecimento das concentrações de lama ao longo do período monitorado**. Este indicador evidencia que o aporte deste rio e a distribuição do material lamoso ao longo da região costeira são subordinados aos padrões hidrológicos e meteoceanográficos. Em uma escala sazonal, períodos chuvosos representam maior aporte lamoso pelo rio e aumento do teor de lama na antepraia. Entretanto, nos períodos secos, há maior probabilidade de eventos de maior energia das ondas, e consequentemente mobilização da lama depositada no fundo e transporte do material pelas ondas e correntes costeiras para as praias, especialmente as localizadas no flanco norte da planície devido à deriva litorânea no mesmo sentido. Assim, os teores máximos de lama na antepraia estão associados especialmente aos períodos chuvosos, mas podem estar associados também aos eventos de alta energia das ondas. No Compartimento B, a presença de lama é nula devido ao estado morfodinâmico refletivo, a alta mobilidade morfológica e a presença de sedimentos grossos na praia, que contribuem para a limpeza e renovação da água e sedimento intersticial, bem como evita a deposição de sedimentos lamosos. No Compartimento A, a presença de lama depositada nas irregularidades dos terraços de abrasão é predominantemente carbonática, mas sem excluir a possibilidade de lama terrígena proveniente do rejeito nas estações de Formosa (S2) e Putiri (S3).

Quanto ao indicador **alteração morfológica da praia**, a mobilidade da linha de costa (interface praia-restinga) mostrou padrões diferentes ao longo do período e região do monitoramento, atrelados ao estado morfodinâmico praiial, às diferenças nas concentrações de lama depositadas na antepraia e à redução significativa da vazão do Rio Doce registrada no período pós-Rompimento, sem, contudo, poder fazer correlação direta com os períodos secos e chuvosos. As praias localizadas nas proximidades da foz do Rio Doce apresentam maior mobilidade morfológica, pois são diretamente influenciadas pela carga sedimentar sazonal do rio, enquanto que as praias de terraço apresentam estabilidade morfológica, uma vez que na ocasião da chegada de contaminantes tendem a ficar retidos nesse compartimento. Os Compartimentos B' e C apresentaram inversão da tendência histórica (1970 a 2015), que se mostrava progradante e de baixa magnitude, para um padrão erosivo e de alta magnitude no período pós-Rompimento, especialmente as estações de Regência (S7) e Povoação (N1) e Degredo (N2). Essa inversão da mobilidade da linha de costa para um padrão retrogradacional e de maior magnitude após o Rompimento da Barragem, pode estar associada à diminuição no *input* de sedimentos grossos pelo Rio e ao aumento de sedimentos mais finos, especialmente as frações lamosas. O restante do Compartimento C, no extremo norte da planície, vem apresentando variações morfológicas mais frequentes no período chuvoso, porém insuficientes para causar a desestabilização da duna frontal e recuos significativos na linha de costa. O Compartimento B mostrou-se morfológicamente o mais dinâmico e assumiu um padrão progradante nos 5 anos do monitoramento,

diferentemente da tendência histórica retrogradante e de menor magnitude. O Compartimento A apresentou pequenas variações morfológicas típicas de praias precedidas por terraços de abrasão. De modo geral, o litoral associado à foz do Rio doce apresenta uma tendência erosiva, porém com intensidades diferentes. O destaque relevante é a erosão dos perfis nas estações S7 Regência, N1 Povoação, e N2 Degredo.

Quanto ao indicador **concentração de elementos químicos nos sedimentos**, a praia emersa, do Compartimento A apresenta os maiores teores dos elementos químicos As, Hg, Mn, Pb, Ni e V em relação aos demais compartimentos. Os resultados do SQG-q apontam que a praia emersa desse compartimento está moderadamente impactada, principalmente devido à alta concentração de As. Os níveis de As no sedimento superam os valores orientadores internacionais, assim como os dados prévios ao rompimento da barragem de Fundão. Além do As, outros elementos, como Mn e Ni, exibem concentrações acima das diretrizes internacionais, enquanto o Fe ultrapassa os dados pré-rompimento. Não se evidencia uma tendência temporal clara em relação aos períodos seco e chuvoso neste compartimento, assim como nos demais, devido à grande dinâmica do ambiente praias. Os Compartimentos B, B' e C, apresentam sedimentos da praia emersa classificados como não impactados. Entretanto, ao longo de todo o período de monitoramento, foram registrados valores acima dos dados pré-rompimento para As no Compartimento C, e para Fe em todos os compartimentos.

Na antepraia, o Compartimento A apresenta sedimentos moderadamente impactados e de uma forma mais pronunciada nas isóbatas de 5 metros, devido a presença de lama entre os terraços de abrasão. Os sedimentos do Compartimento B são majoritariamente classificados como não impactados, sendo este o compartimento menos afetado pelo aporte de sedimentos do Rio Doce. Os Compartimentos B' e C demonstram consistentemente as maiores concentrações de todos os elementos químicos nas isóbatas de 10 m durante todo o período de monitoramento, com destaque para Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Pb e Zn. O Compartimento B' tem se qualificado no limiar entre não impactado e moderadamente impactado, na isóbata de 5 metros (mais mobilizada). Na isóbata de 10 metros, sistematicamente, as praias do Compartimento B' se apresentam como moderadamente contaminadas. Para o Compartimento C um maior índice foi encontrado para as isóbatas de 5 e 10 m, revelando ser o setor mais impactado.

A análise da composição de **Elementos de Terras Raras (ETR) nos sedimentos** revela que as concentrações normalizadas obtidas para todos os compartimentos são superiores aos valores de referência pré-rompimento dos sedimentos de fundo do Rio Carmo. Isso pode sugerir o aporte desses elementos na área de estudo após sua dispersão através do rio Doce. Anomalias em Eu e Ce indicam alterações contínuas na composição dos sedimentos ao longo dos compartimentos e durante todo o período de monitoramento.

A concentração da maioria dos **elementos químicos nas amostras de água do mar** está abaixo dos valores orientadores nacionais e internacionais. No entanto, a concentração de ferro dissolvido excedeu os limites estabelecidos por órgãos ambientais em todos os compartimentos e durante todo o período de monitoramento. O Índice de Carga de Poluição (PLI) calculado para a água nos Compartimentos A,

B e B' classificou a área como não poluída. Entretanto, no Compartimento C, foram identificadas amostras com valores superiores a 1, sugerindo indícios de poluição nessa região, embora sem um padrão sazonal evidente. Em relação à concentração de material particulado em suspensão, observaram-se valores mais elevados durante o período chuvoso na isóbata de 10 metros do Compartimento C, reforçando o impacto presente nessa área quando a qualidade da água é avaliada.

Quanto aos **parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica**, durante os 5 anos de estudos a densidade de organismos na praia emersa se manteve maior nos Compartimentos B e B', onde as praias apresentam características mais refletivas. Por outro lado, as praias do Compartimento C, com características mais dissipativas, continuamente apresentaram baixos valores de densidade e riqueza da macrofauna, o que está em desconformidade com a literatura mundial para padrões de distribuição de macrofauna bentônica, visto que é esperado maiores valores em praias mais dissipativas. Devido à deriva litorânea sentido norte, que favorece a deposição do rejeito trazido pelo Rio Doce para o Compartimento C, diversos parâmetros da macrofauna foram afetados pela presença de lama e elementos químicos. A presença de lama, por exemplo, acarreta a redução da densidade da macrofauna na praia emersa, enquanto que os crustáceos Amphipoda são afetados pelo aumento de Arsênio (As), Ferro (Fe) e Chumbo (Pb), reforçando o indicativo que essa área está impactada. Além disso, o ponto amostral N2-Degredo possui dados pré-rompimento e foi possível observar reduções das abundâncias de todos os táxons da macrofauna nas campanhas realizadas após o rompimento. A partir daí, ficou claro a troca de dominância de organismos, onde, nas campanhas pré-rompimento, havia uma dominância de poliquetas, que foram drasticamente reduzidos nas campanhas seguintes à chegada da lama e, até o momento, não mostrou recuperação. Após o rompimento, os isópodes e, eventualmente, as oligoquetas tem dominado a macrofauna no local.

Já na antepraia, o Compartimento B' é o mais afetado, apresentando os menores valores de densidade, riqueza e diversidade de Shannon-Wiener, com relação direta ao aumento da porcentagem de lama e do teor de chumbo (Pb). Esses resultados possivelmente são respostas ao aporte direto de sedimentos do Rio Doce nesse compartimento, seja por alterar a granulometria do local e/ou devido aos elementos químicos associados. De modo geral, as tendências temporais para a macrofauna bentônica não são bem definidas.

Quanto aos **parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica**, também no Compartimento C, foram registrados os menores valores de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou na praia emersa, o que indica uma dominância de poucos organismos, possivelmente tolerantes e/ou oportunistas, como é o caso do grupo chave Nematoda. O aumento na concentração de Fe nos Compartimentos A e C reduz o valor da equitabilidade de Pielou, ou seja, causa mais diferenças na distribuição das densidades dos diferentes táxons. No Compartimento A, além da relação com o Fe, alguns parâmetros ecológicos da meiofauna também apresentam relações negativas com a porcentagem de lama, As, Al e Mn, e positivas com As, Al, Ba e Ni. Enquanto que no Compartimento C, a meiofauna, principalmente Nematoda, parece se beneficiar da presença de As e Al, promovendo o aumento da densidade e riqueza. A densidade de Nematoda reduz na presença de lama no Compartimento A. Cabe ressaltar que diversas espécies de Nematoda apresentam alta

capacidade de tolerância frente a contaminação por metais. Ao final de 5 anos de monitoramento, deixaram de ocorrer oscilações temporais significativas da riqueza e diversidade de Shannon-Wiener, mostrando uma tendência de estabilização desses parâmetros. No entanto, a densidade de organismos ainda mostra oscilação temporal, o que significa que a variação da densidade de grupos, como Nematoda e/ou Copepoda, em algumas campanhas interfere nesse resultado. O ponto amostral N2-Degredo possui dados pré-rompimento. Foi possível observar alterações na diversidade ecológica da meiofauna bentônica, após o rompimento da Barragem de Fundão, que indicam o impacto do rejeito na praia. Os valores da densidade e riqueza da meiofauna continuam maiores que o período pré-rompimento. Nota-se o resultado expresso pela análise de classificação (SIMPER), que mostra o aumento das densidades de Nematoda, Copepoda, Platyhelminthes e Oligochaeta, além da presença de diferentes grupos taxonômicos não presente na condição anterior ao rompimento.

Na antepraia, os Compartimentos B' e C obtiveram os menores valores significativos de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener, equitabilidade de Pielou e as maiores dissimilaridades entre as espécies presentes nas amostras (diversidade beta), indicando dominância de poucos organismos, que parece ser uma resposta aos rejeitos presentes no sedimento desses locais. Todos os parâmetros ecológicos acima citados apresentaram relações negativas com a porcentagem de lama, o que evidencia o efeito deletério da lama na meiofauna, atuando no desaparecimento ou evitando a chegada e/ou permanência de novos táxons no local. Também ocorreram relações negativas dos parâmetros ecológicos da meiofauna com o aumento de As, Al, Ba, Fe. A maior densidade de Nematoda no Compartimento C pode ter relação com as características oportunistas/tolerantes de várias espécies desse grupo. Por outro lado, as menores densidades de Copepoda nos Compartimentos B' e C podem ter relação com a sensibilidade desses organismos para distúrbios. Quanto à variação temporal, a riqueza e densidade da meiofauna apresentam uma tendência de aumento ao longo do tempo, que pode ser decorrente de animais oportunistas e tolerantes, visto que o índice de equitabilidade (J) está reduzindo, assim como a diversidade beta.

2) Indicadores de destaque

É provável que o material oriundo do rompimento da barragem de Fundão, que se encontra depositado ao longo da bacia e na plataforma, esteja recorrentemente se distribuindo ao longo da costa, por isso a **presença de lama** na antepraia é um dos indicadores que mais se destacam, pois sua concentração afeta diretamente outros indicadores como: alteração morfológica; concentração de elementos químicos no sedimento e na água; e parâmetros ecológicos da macrofauna e da meiofauna bentônica.

A **alteração morfológica da praia** é também um indicador de destaque, visto que o padrão de mobilidade da posição da linha de costa nos 5 anos do PMBA nos compartimentos mais impactados mostrou-se inverso ao padrão geral histórico. Ou seja, após o Rompimento da Barragem de Fundão, quando houve incremento significativo de lama no sistema costeiro, tendências erosivas e de alta magnitude passaram a caracterizar os Compartimentos B' e C.

O principal indicador geoquímico é a **Concentração de Elementos Químicos no Sedimento**, principalmente devido à presença de concentrações elementares que ultrapassam os valores

orientadores internacionais, e, em alguns casos, excedem os dados pré-rompimento da barragem de Fundão.

Ambos os indicadores **parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica e parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica** vem apresentando resultados consistentes, uma vez que ambos vem apresentando efeitos negativos com a presença de lama, assim como com a concentração elementar. Os componentes bentônicos, macro e meiofauna, diferem entre si, além do tamanho corporal, incluindo diferenças em aspectos ecológicos, reprodutivos e na alimentação. Devido a estas diferenças estudos com essas duas comunidades podem resultar em diferentes respostas em um mesmo habitat.

3) Considerações sobre o impacto do rejeito sobre as praias

A distribuição longitudinal da lama parece indicar uma situação crônica no Compartimento C, com altas quantidades de lama terrígena na antepraia, em 5 m e principalmente 10 m, o que não é esperado para um ambiente praiar, especialmente nas porções mais rasas da antepraia. Os resultados indicam que o Compartimento C tem se apresentado como a região da malha amostral mais severamente impactada pelo aporte do Rejeito pelo Rio Doce, onde maiores concentrações dos elementos químicos (Al, Ba, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e V) são encontradas na isóbata de 10 metros.

Devido às alternâncias entre aportes fluviais do Rio Doce e mobilidade do material do rejeito depositado na antepraia e plataforma continental, as praias dos Compartimentos B' e C não apresentam tendência de diminuição do impacto causado pelas altas concentrações de elementos químicos, exceto a estação REBio Comboio (S6). 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.

O Compartimento B' (estações S7 Regência e N1 Povoação) é influenciado diretamente pela proximidade da foz do rio e, devido o sentido preferencial da deriva longitudinal o Compartimento C também é influenciado pela vazão do rio. Por isso, são os Compartimentos que recebem e depositam os maiores teores de lama e de contaminantes na antepraia e, em menor quantidade, na praia emersa. Nestes compartimentos observa-se também a mudança de linha de costa de um padrão anteriormente progradante (antes do Rompimento da Barragem) para retrogradante.

As concentrações mais elevadas de elementos químicos relacionados ao rejeito de mineração são identificadas nos sedimentos da antepraia dos Compartimentos B' e C. Ao longo do período de monitoramento, os sedimentos das isóbatas de 10 m desses compartimentos foram consistentemente classificados, de acordo com o índice SQG-q, como moderadamente impactados. No caso específico do Compartimento C, foram observados índices ainda maiores, tanto nas isóbatas de 5 metros quanto nas de 10 metros, sugerindo que este é o setor mais impactado. As concentrações de muitos dos elementos químicos determinados excedem os valores orientadores internacionais. No caso do Fe, os resultados mostram-se, de forma consistente, superiores aos dados pretéritos em todas as campanhas realizadas. No Compartimento C, também são evidenciadas concentrações mais elevadas de ferro

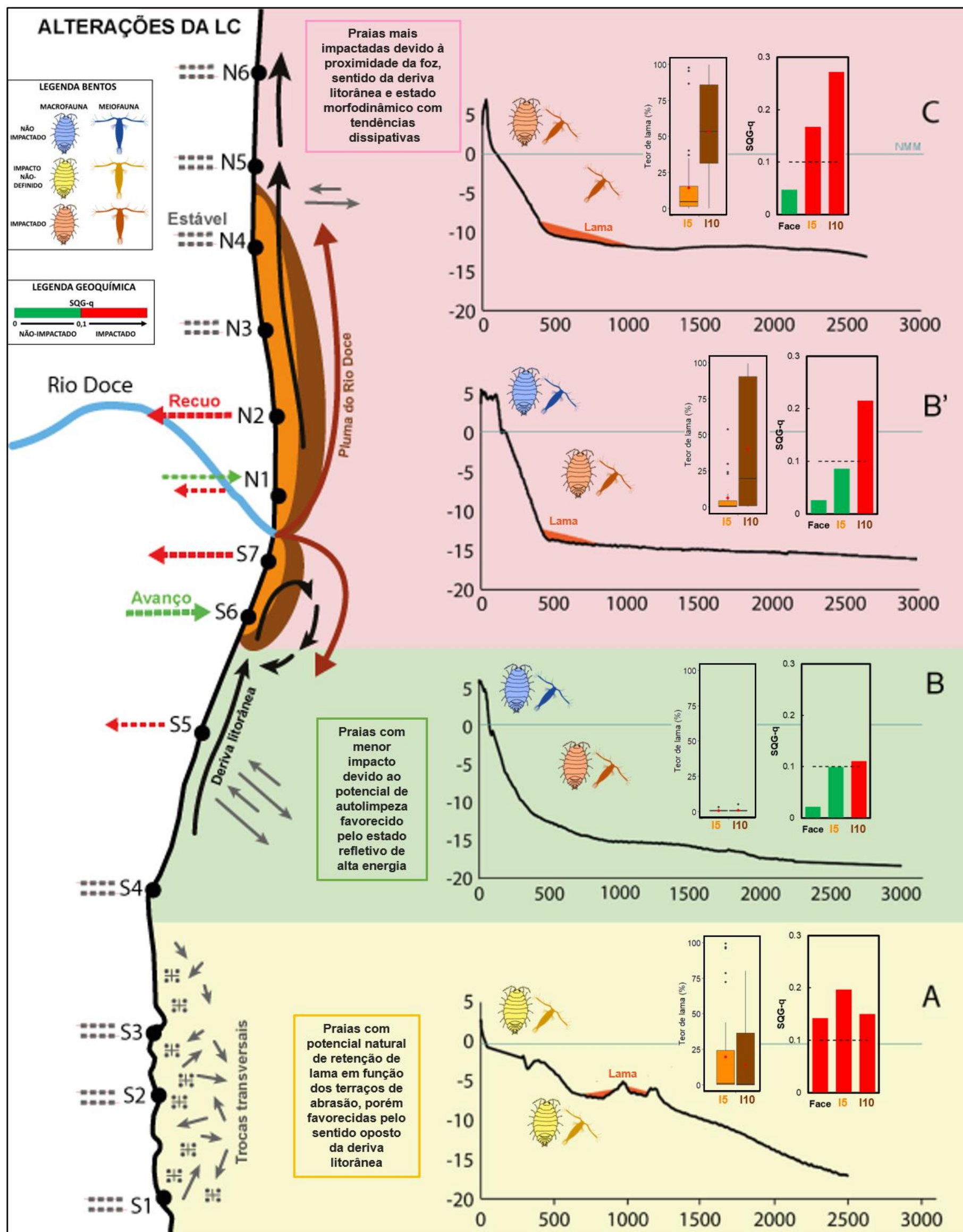
dissolvido na água e maiores valores de material particulado em suspensão durante os períodos chuvosos, reforçando a evidência do impacto nessa área quando a qualidade da água é avaliada.

A meiofauna e macrofauna bentônica são afetadas pela lama e concentração elementar, tanto na antepraia quanto na praia emersa dos Compartimentos B' e C. Nas praias emersas do Compartimento C, a densidade da macrofauna apresentou valores reduzidos ao longo dos 5 anos de monitoramento, onde deveriam ser altos, como previsto na literatura para praias com características mais dissipativas. Na estação amostral N2-Degredo, as alterações de dominância e composição da fauna registradas após o rompimento, assim como oscilações nos parâmetros ecológicos ao longo do monitoramento não foram restabelecidas.

.

4) Resumo gráfico

Figura 22: Figura síntese da distribuição espacial dos indicadores do tema Praias. A Morfodinâmica é representada pelos indicadores Teor de lama, nas isóbatas de 5 e 10 m, e Alterações morfológicas da praia (aqui representado como LC: Linha de Costa). A Geoquímica está representada pelo indicador SQG-q (Sediment Quality Guideline quotient), calculado para a face praial e isóbatas de 5 e 10 m. A Fauna Bentônica está representada qualitativamente através dos ícones de macro- e meio-fauna, que integram os indicadores Riqueza e Densidade, para representar níveis de impacto na comunidade de maneira mais acessível. Através da avaliação conjunta dos indicadores do Tema, foi gerada a ordem de impacto dos Compartimentos, representada na figura por meio de um gradiente crescente das cores no fundo da imagem: verde (menor impacto), amarelo e vermelho (maior impacto). NMM: Nível Médio do Mar; I5: isóbata de 5 m; I10: isóbata de 10 m



5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todas as metas do Tema Praias foram cumpridas.

6 REFERÊNCIAS

BRAHIM, S., SOBRINHO, T. G., ALBINO, J., ZANETTI, G., AMARAL, V.S., CARNEIRO, M. T. W. D., SOUZA, J. R., CASTRO, L. C., MUEHE, D., SOUZA, B. S., BRANDÃO, G. P., KRAUSE, M., OLIVEIRA, L. H. S., COELHO, U. P., SILVA, E. E., SILVA, I. J., NEVES, J. A., PAIVA-TAGLIARI, D., COSTA, K.G. Benthic fauna along sandy beaches enriched by metals after mining disaster. **Marine Ecology Progress Series**. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps14480>. 2024.

BRAZEIRO, A., Community patterns in sandy beaches of Chile: richness, composition, distribution and abundance of species. **Revista Chilena de História Natural**, v. 72, p. 93–105. 1999.

CLARKE, K.R. & GORLEY, R.N. PRIMER v7: User Manual/Tutorial. PRIMER-E Plymouth. 2015.

DEFEO, O. & MCLACHLAN, A. Patterns, processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: A multi-scale analysis. **Marine Ecology-progress Series**. 10.3354/meps295001. 295, 1-20. 2005.

DEFEO, O.; JARAMILLO, E., AND LYONNET, A. Community structure and intertidal zonation of the macrofauna on the Atlantic coast of Uruguay. **Journal of Coastal Research**, v. 8, p. 830–839. 1992.

DEFEO, O., MCLACHLAN, A., SCHOEMAN, D. S., SCHLACHER, T.A., J. DUGAN, JONES, A., LASTRA, M., SCAPINI, F. Threats to sandy beach ecosystems: a review. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* v. 81, p. 1-12. 2009.

DE-LA-OSSA-CARRETERO, J.A., DEL-PILAR-RUSO, Y., GIMÉNEZ-CASALDUERO, F., SÁNCHEZ-LIZASO, J.L., DAUVIN, J.C. Sensitivity of amphipods to sewage pollution. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v. 96, p. 129-138. 2012.

DI DOMENICO, M. **Poliquetas intersticiais da costa sul e sudeste do Brasil**. Tese de doutorado UFPR. 226p. 2012.

ESTEVES, A. M.; ABSALÃO, R. S.; SILVA, V. M. A. P. Padronização e avaliação da eficácia da técnica de flotação na extração da meiofauna em uma praia de areia grossa (Praia Vermelha, RJ). **Publicação Especial do Instituto Oceanográfico**, v. 11, p 223-227.1995.

GESTEIRA, J. L. & DAUVIN, JEAN-CLAUDE. Amphipods are Good Bioindicators of the Impact of Oil Spills on Soft-Bottom Macrobenthic Community. **Marine Pollution Bulletin**. 10.1016/S0025-326X(00)00046-1. v. 40, p. 1017-1027. 2000.

GIERE, O. **Meiobenthology: The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments**. 2ª ed. Berlin: Springer-Verlag. v.527. 2009.

HACKING, N. Macrofaunal community structure of beaches in northern New South Wales, Australia.

Marine and Freshwater Research. p. 47-53.1998.

HUSTON, M. A. General Hypothesis of Diversity. **American Naturalist.**

<http://dx.doi.org/10.1086/283366>. v.113, p. 81-101. 1979.

KIHARA, T., ROCHA, C., JR., R., AMARAL, A., ESTEVES, A. Meiofauna de praia arenosa. In book: Biodiversidade e Ecossistemas Bentônicos Marinhos do Litoral Norte de São Paulo - Sudeste do Brasil Chapter: Meiofauna de praia arenosa **UNICAMP**. Editors: Antonia Cecília Zacagnini Amaral, Silvana Aparecida Henriques Nallin. 2011.

LOSI, V., FERRERO, T., MORENO, M., GAOZZA, L., ROVERE, A., FIRPO, M. MARQUES, J., ALBERTELLI, G. The use of nematodes in assessing ecological conditions in shallow waters surrounding a Mediterranean harbour facility. **Estuarine, Coastal and Shelf Science.** v.130, p. 209-221. 2013.

LOSI, V., GRASSI, E., BALSAMO, M., ROCCHI, M., GAOZZA, L., & SEMPRUCCI, F. Changes in taxonomic structure and functional traits of nematodes as tools in the assessment of port impact. **Estuarine, Coastal and Shelf Science.** v. 260. 2021.

LOTUFO, G. R.; ABESSA, D. M. S. Testes de toxicidade com sedimento total e água intersticial estuarinos utilizando copépodos bentônicos. **Nascimento, IA.** p. 151-162. 2002.

MAURI, G. **Macrofauna bentônica da praia de Degredo (Linhares, Es) após a chegada da lama com rejeitos de mineração.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Programa de Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus. 2017.

MCLACHLAN A., BROWN, A.C. **The ecology of sandy shores.** 2ª ed. New York. Academic Press, 2006.

MCLACHLAN, A. *et al.* Sandy beach conservation and recreation: Guidelines for optimising management strategies for multi-purpose use. **Ocean & Coastal Management.** v. 71, p. 256-268. 2013.

MCLACHLAN, A.; DORVLO, A. Global patterns in sandy beach macrobenthic communities. **Journal Coastal Research.** p.674–687. 2005.

MOELLMANN, A. M., CORBISIER, T. N. Does tourist flow affect the meiofauna of sandy Beaches? Preliminary results. **Journal Coastal Research.** v. 35, p. 590-598. 2003.

OLIVEIRA, T.C.A, ALBINO, J., VENANCIO, I.D. Littoral longshore sediment transport along the deltaic plain of Rio Doce. **Quaternary Environmental Geosciences.** v. 6, n. 1, p. 20–25. 2015.

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.** <https://doi.org/10.1590/2317-488920150030274>. v.45(4), p. 635–644. 2015.

R. CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**. Austria: Vienna, 2023.

RÉ, A., FREITAS, R., SAMPAIO, L., RODRIGUES, A.M., QUINTINO, V., Estuarine sediment acute toxicity testing with the European amphipod *Corophium multisetosum* Stock, 1952. **Chemosphere**. v. 76, p. 1323–1333. 2009.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. **Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Ambiente Costeiro. RT-36C**, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. p. 422. 2020.

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

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. **Relatório Anual do PMBA/Fest – RT-43**, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. p. 193. 2023a.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. **Relatório Semestral de Evolução do PMBA/Fest – RT-44**, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. p. 79. 2023b.

SANTOS, P. M. L., FONSÊCA-GENEVOIS, V. G. Meiofauna como vetor de impacto ambiental na Baía de Suape-PE: estimativa do índice Nematoda/Copepoda. **Rev Nord Zoo** v.1, p.15–29.1994.

SANTOS, P. J. P, CASTEL, J., SOUSA-SANTOS, L. P. Spatial distribution and dynamics of microphytobenthos biomass in the Gironde estuary (France). **Oceanologia Acta**. v. 20(3), p. 549-556. 1997.

SANTOS, P. J. P, CASTEL, J., SOUSA-SANTOS, L. P. Microphyrobenthic patches and their influence on meiofaunal distribution. **Cahiers de Biologie Marine**. v. 36, p. 133-139. 1995

SOUZA, J.S., SIELSKI, L.H., KRAUSE, M., SOUZA, B.S., BRANDÃO, G. P., ALBINO, J., CARNEIRO, M. T. W. D.The influence of beach geology and morphodynamics on chemical pollution assessments following a mining accident, **Marine Pollution Bulletin**. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113230>. v. 174, 113230. 2022.

SILVA, E.F.F., Mendonça, B.B., Noernberg, M.A. The Mariana dam's disaster: quantifying turbidity changes and behavior of the River Doce plume in Brazil. In: **An. do XVIII Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto -SBSR**, p. 462–469. 2017.

TEIXEIRA, B. A. C. **Estrutura da fauna bentônica de duas praias do norte do Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus. 2016.

THIELER ER, HIMMELSTOSS EA, ZICHICHI JL, ERGUL A. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 / An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. Open/File Report. **US**

<https://cmgds.marine.usgs.gov/publications/DSAS/of2008/1278/>. 2009.

THIERMANN, F. & VISMANN, BENT & GIERE, O. Sulphide tolerance of the marine nematode *Oncholaimus campylocercoides* - A result of internal sulphur formation? **Marine Ecology Progress Series**. 10.3354/meps193251. v. 193, p. 251-259. 2000.

VANOSMAEL, C.; WILLEMS, K., CLAEYS, D.; VINCX, M.; HEIP, C. H. R. Macrobenthos of a Sublittoral Sandbank in the Southern Bight of the North Sea. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 62, p. 521 – 534. 1982.

VELOSO, V. G.; SALLORENZO, I. A.; FERREIRA, B. C. A & NEVES, G. *Atlantorchestoidea brasiliensis* (Crustacea: Amphipoda) as an indicator of disturbance caused by urbanization of a beach ecosystem. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58(1), p. 13-21. 2009.

VILLORA-MORENO S. Environmental heterogeneity and the biodiversity of interstitial polychaeta. **Bulletin of Marine Science**. v. 60, p. 494–501. 1997.

WANDENESS, A. P. **Ecologia e Taxonomia da associação de copepoda Harpacticoida no Talude da Bacia de Campos, RJ, Brasil**. Tese (Doutorado em Oceanografia). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. p. 155. 2009.

WARTON, D. I. *et al.* Three points to consider when choosing a LM or GLM test for count data. **Methods in Ecology and Evolution**; v. 7, n. 8, p. 882-890. 2016.

WESTHEIDE, W. **Polychaetes**: Interstitial families. Shrewsbury: Field Studies Council. p. 169. 2008.

WILSON, M. & KAKOULI-DUARTE, T. **Nematodes as Environmental Indicators**. Hardcover, 352 Pages, Cabi. ISBN-13: 978-1-84593-385-2, ISBN: 1-84593-385. 2009.