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-55/ OUT 26

RA2025-PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro 2026

EQUIPE TÉCNICA

Jacqueline Albino (coordenadora)

Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima (coordenadora)

Karla Gonçalves da Costa (coordenadora)

Luiz Henrique Sielski

Branco Mateus Murata Eguchi

Denise de Sousa Paiva Tagliari

Lucas Bermudes de Castro

Maitê Noda Zanotti

Julyana Caprini Fardin

Luana Ferreira Dias

Maria Rita Rodrigues dos Santos

João Victor Baltus Barrocal Peres

Geisamanda Pedrini Brandão Athayde

Jefferson Rodrigues De Souza

Maiara Krause

Tiago Pereira Cunha

Larissa Dias Roriz

Suellen Geronimo Cordeiro

Livia Carvalho Ferreira

João Túlio Cruz

Miguel Abner Ferreira de Araújo Almeida

Wellinton Alvarenga Aragão

Vanessa Simão do Amaral

Gean Zanetti

Tathiana Guerra Sobrinho

Emanuely Ezidio da Silva

Isabela Jabour e Silva

Amanda Deolindo Moreira

Bruna Adenalian Coelho Teixeira

Gabriela Singulani de Brito

Lorena Andrade de Oliveira

Julia Ofrante dos Santos

Valeska Fernandes

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 5

2 METODOLOGIA 5

2.1 MORFODINÂMICA PRAIAL 6

2.1.1 Coleta 6

2.1.2 Análise 8

2.2 GEOQUÍMICA 14

2.2.1 Coleta 14

2.2.2 Análise 14

2.3 BENTOS 25

2.3.1 Coleta 25

2.3.2 Análise 26

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 29

2.5 ALTERAÇÕES NA MALHA, FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADAS EM OUTUBRO DE 2024: CONSEQUÊNCIAS PARA AS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES 31

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 31

3.1 MORFODINÂMICA 32

3.1.1 Presença de lama 32

3.1.2 Alteração morfológica da praia 38

3.2 GEOQUÍMICA 45

3.2.1 Concentração de elementos químicos no sedimento 45

3.2.2 Normalização de Elementos de Terras Raras (ETR) em sedimento 51

3.2.3 Concentração de elementos químicos na água 54

3.3 BENTOS 62

3.3.1 Parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica 62

3.3.2 Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica 81

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 99

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 107

6 REFERÊNCIAS 107

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e a frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest-UFES) passaram por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento aos objetivos do Programa. Estas alterações foram orientadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) e aprovadas pelo Comitê Interfederativo (CIF), por meio de: (1) Ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição), (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o "Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES" e (3) Ofício SEI Nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, Nota Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio e Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024.

As modificações implementadas encontram-se nos seguintes Materiais Suplementares, os quais contemplam todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES: 1) MS – Malha amostral, que apresentam as estações amostrais executadas ao longo do tempo por todos os Anexos/Temas, separados por cada marco temporal histórico mencionado acima ("Ano 1", "Transição", "Novo Ciclo" e "Deliberação 803"); 2) Frequência amostral, o qual contempla o histórico da periodicidade amostral (seguindo os mesmos Anexos/Temas contemplados no item 1) e 3) MS – Mapas históricos das malhas amostrais, que apresenta os mapas das malhas amostrais (incluindo as estações) executadas por todos os Anexos/Temas.

Segue o detalhamento temporal, como forma de esclarecer a execução dentro dos marcos históricos: "Ano 1" (setembro de 2018 e setembro de 2019); "Transição" (outubro de 2019 e julho de 2022); "Novo Ciclo" (agosto de 2022 a setembro de 2024) e "Deliberação 803" (outubro de 2024 a março de 2026). O grupo da Ecotoxicologia é uma exceção a esta historicidade, pois iniciou a amostragem referente ao "Novo Ciclo" em janeiro de 2023 e segue com a "Deliberação 803", na periodicidade já informada.

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/Fest-UFES 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) e na Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024. 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-UFES 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). Os dados de ondas da primeira campanha, em setembro de 2018, foram obtidos por meio de modelos de previsão, como os disponibilizados pelo portal Surfguru (www.surfguru.com.br). Os dados dos modelos de previsão foram validados para períodos posteriores, com dados de fundeios, e então integrados às análises da morfodinâmica praial. O clima de ondas foi avaliado com base nos dados de ondas do Fundeio F1 (Ambiente Marinho, Tema Hidrodinâmica), em conjunto com os dados de previsão, principalmente para comparação e validação dos dados da campanha de setembro de 2018, na qual ainda não havia dados de ondas disponíveis nos fundeios.

2.1.1.2 Topobatimetria

O levantamento topobatimétrico dos perfis praiais 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/Fest-UFES ainda constam neste relatório. Os perfis foram levantados a partir de um referencial fixo (marco geodésico), situado além do limite do pós-praia, e estenderam-se 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 livres de cobertura vegetal ou quaisquer outros obstáculos que impedissem a captura de sinais de satélites. Para a obtenção das coordenadas geodésicas dos marcos, foi realizado previamente um rastreio 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 praial 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 praial e suas posições e altimetrias foram coletadas. Simultaneamente, foi anotada a descrição da feição observada (por exemplo, duna, cordão, berma, face praial, 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 210 kHz e 33 kHz (dupla frequência), para a obtenção da profundidade e da 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 *offsets.* A aplicação dos *offsets* 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 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 praial 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 praial submerso (antepraia), foram coletadas amostras superficiais nas profundidades de 5 e 10 m, totalizando mais 2 amostras por estação, com auxílio de embarcação e de 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 determinado 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, identificação e determinação dos teores de 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-se nas imediações da foz do rio e estende-se até o limite sul, na estação amostral S6 Rebio de Comboios, e ao norte, na estação N2 Degredo. Este mapeamento teve como objetivo verificar a distribuição espacial dos depósitos de lama na antepraia.

O plano de sondagem nas áreas de influência da foz contou com espaçamento de cerca de 80 m entre as linhas de sondagem, traçadas paralelamente à costa, abrangendo desde a zona de arrebentação das ondas até cerca de 10 m de profundidade, buscando incluir a profundidade de fechamento do perfil praial. Durante o levantamento, foram coletados simultaneamente os dados batimétricos com ecobatímetro e sonar de varredura lateral, bem como os dados de posicionamento obtidos por meio de um receptor GNSS.

Após a definição dos diferentes tipos de fundo a partir do processamento do levantamento sonográfico, sedimentos foram coletados para verificar a interpretação do sinal acústico (*ground truthing*). Para tanto, os sedimentos foram coletados com amostrador de fundo do tipo Van Veen, em 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 Sistema Integrado e Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo – GEOBASES. Esta etapa envolveu a obtenção das imagens brutas necessárias à análise da variação da linha de costa. Em 2023 foram obtidas imagens de aerolevantamento por veículos aéreos não tripulados para uma extensão mais próxima da foz do rio Doce.

Especificamente para as imagens de 1970, foi realizado 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. As imagens de 2023, obtidas por aerolevantamento com drone, foram processadas em software proprietário de fotogrametria para a geração dos respectivos ortomosaicos.

2.1.2 Análise

2.1.2.1 Topobatimetria

Os dados brutos obtidos no levantamento do perfil praial 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 praial 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 a 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 maregráfico 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 *offset* 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 praiais 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, de modo a conectá-los para a obtenção do perfil topobatimétrico final.

2.1.2.2 Sedimentologia

- Granulometria

A determinação da granulometria dos sedimentos arenosos foi realizada por peneiramento a seco. Inicialmente, as amostras foram lavadas para a remoção do sal e colocadas na estufa para secar a 40 °C. Após a secagem, as amostras foram quarteadas no quarteador do tipo Jones até atingirem um peso aproximado de 50 g. Na sequência, a amostra quarteada foi submetida ao 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 a granulometria dos sedimentos lamosos, foi realizado, 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 (H_2O_2) 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 a remoção do peróxido, e sua granulometria foi determinada pelo granulômetro a laser *Malvern*.

Com base nos percentuais das frações granulométricas, os parâmetros estatísticos propostos por Folk & Ward (1957) foram calculados no programa GRADISTAT (Blott & Pye, 2001) para todas as amostras.

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 por queima com ácido clorídrico a 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 HCl até a completa dissolução dos carbonatos. O procedimento de queima foi realizado em chapa aquecedora na capela de exaustão de gases.

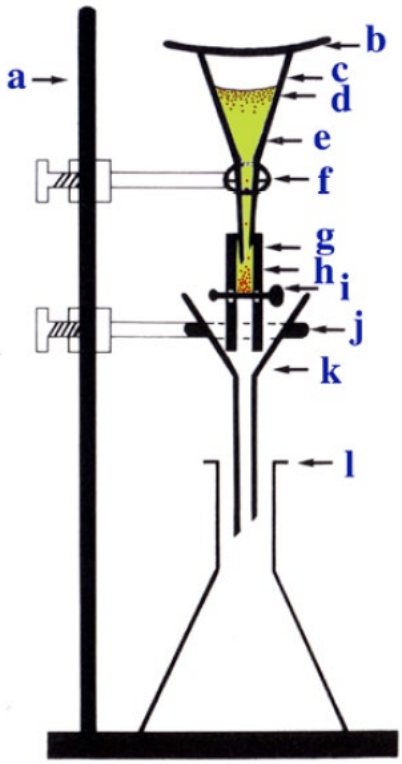
Na sequência, as amostras foram lavadas para remover o ácido e, em seguida, colocadas para secar na estufa a uma temperatura de aproximadamente 40 °C. O resíduo da lavagem foi acondicionado em um recipiente próprio para o descarte de reagentes. Após a secagem, as amostras foram pesadas para quantificar o 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 1c).

Decorridos alguns minutos, os minerais pesados se depositaram no tubo de borracha associado ao funil (Figura 1g). 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, I 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 quantificar o 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 com lupa binocular. Neste sentido, foram observados 300 grãos de minerais pesados em cada fração resultante do peneiramento a seco (GaleHouse, 1971). Nas amostras com número inferior a este, foram identificados todos os minerais pesados.

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 a 3,5 g/cm³ foram agrupados como menos densos, sendo estes: anfibólio, turmalina, sillimanita e epidoto. Minerais ultraestáveis são zircão, turmalina e rutilo, enquanto os minerais instáveis são 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 por 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, determinou-se o teor de matéria orgânica total.

2.1.2.3 Mapeamento de lama na antepraia

Os dados batimétricos foram processados conforme a seção 2.1.2.1. Já os dados sonográficos foram processados, corrigindo a geometria dos dados, executando o rastreamento do fundo e aplicando correções de ganho variáveis em função do tempo de retorno e da distorção decorrente da 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 a abrangência dos diferentes tipos de fundo.

As amostras de sedimento coletadas para verificar a interpretação do sinal acústico (*ground truthing)* foram processadas de acordo com a seção 2.1.2.2 para a obtenção dos parâmetros granulométricos e de acordo com as seções 2.2.2.1 e 2.2.2.3 para a 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. Para o período de 2020 a 2023, a análise foi realizada somente nas imediações da foz do rio Doce, na área coberta pelo levantamento com drones.

- Avaliação da mobilidade da linha de costa

Para analisar a variação da linha de costa, utilizou-se 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. 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. 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 específico. Essa taxa calcula a média anual de recuo ou avanço da linha de costa, em metros. O EPR fornece uma visão geral das mudanças ocorridas na linha de costa durante o período analisado.

LRR (*Linear Regression Rate*): A 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 de sedimento foi realizada concomitantemente ao estudo da morfologia e da sedimentologia das praias. As amostras de sedimento superficial foram coletadas nas praias (incluindo berma, face superior, face inferior e antepraia rasa) utilizando coletores de plástico para evitar contaminação. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos tipo Ziplock, previamente identificados, e mantidas sob refrigeração, em caixa térmica com gelo até o transporte para o laboratório. Nas isóbatas de 5 m e 10 m, as amostras de sedimento foram coletadas com o auxílio de um amostrador de fundo do tipo Van Veen. O sedimento dragado foi transferido para bandejas plásticas e porções de diferentes pontos do sedimento foram coletadas com uma colher de plástico e transferidas para sacos plásticos tipo ZipLock, previamente identificados. Durante a coleta, a camada superior do sedimento que entrou em contato com a superfície interna do amostrador foi descartada para evitar contaminação. 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 a coleta, 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 chegarem à superfície, as amostras de água foram transferidas para garrafas plásticas previamente descontaminadas e identificadas. As amostras de água destinadas à determinação do teor total de elementos químicos foram acidificadas com HNO_3 subdestilado até pH < 2. Para a obtenção da fração dissolvida, a amostra de água total foi filtrada em membrana de porosidade 0,45 µm, sendo a amostra filtrada recolhida e acidificada até pH < 2. O material particulado em suspensão retido no filtro foi acondicionado em tubos de polipropileno. Todas as amostras foram mantidas refrigeradas em caixa térmica.

Após a coleta, todas as amostras de sedimento e de água destinadas à determinação dos 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 foram armazenadas em freezer a -22 °C, respeitando os prazos de validade para as análises, que são de 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, até atingirem peso constante. Após o resfriamento em dessecador, as amostras foram peneiradas para obtenção da fração < 1 mm. Nessa fração, foi realizado o processo de quarteamento para garantir a obtenção de uma amostra 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, utilizou-se o método US EPA 3051A. Aproximadamente 250 mg da amostra de sedimento fino (com partículas < 1 mm e previamente seca) foram pesados em frascos de Teflon, específicos para uso em forno micro-ondas, aos quais foram adicionados 10 mL de HNO_3 concentrado destilado. As amostras foram mantidas em repouso à temperatura ambiente, dentro da capela de exaustão, por cerca de 15 minutos, para uma pré-decomposição. Após esse período, as amostras foram submetidas à decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas, seguindo um programa de aquecimento que consistiu em 5,5 ± 0,25 minutos de aquecimento até atingir 175 ± 5 °C, com permanência a essa temperatura por 4,5 minutos e resfriamento final por 10 minutos.

Após o processo, os frascos foram deixados à temperatura ambiente por 30 minutos para resfriamento antes de serem abertos. As soluções obtidas foram filtradas utilizando 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 com resistividade 18 MΩ cm.

Para o procedimento de decomposição total das amostras de sedimentos, visando à posterior determinação dos elementos terras raras, foi adotado o método US EPA 3052. Aproximadamente 200 mg da amostra de sedimento fino (com partículas < 1 mm e previamente seca) foram pesados em frascos de Teflon, adequados para uso em forno micro-ondas, aos quais foram adicionados 9 mL de HNO_3, 3 mL de HF e 1,2 g de H_3BO_3. O ácido bórico foi incorporado com o objetivo de promover a complexação do fluoreto remanescente. Após a etapa de pré-decomposição, que durou cerca de 15 minutos à temperatura ambiente dentro da capela de exaustão, os frascos foram devidamente fechados e a mistura foi submetida à decomposição assistida por radiação micro-ondas. O programa de aquecimento consistiu em elevar a temperatura para 180 ± 5 ºC em aproximadamente 5,5 minutos, com permanência a essa temperatura por 9,5 minutos, seguido de um resfriamento de 10 minutos. Concluído o ciclo de decomposição, o rotor do micro-ondas foi retirado e os frascos foram mantidos à temperatura ambiente, dentro da capela, por cerca de 30 minutos, para posterior abertura. A solução obtida foi filtrada utilizando funil de polipropileno e papel de filtro quantitativo de filtração rápida (faixa preta de 12,5 cm), sendo o filtrado transferido quantitativamente para um tubo de polipropileno e o volume aferido para 25 mL com água ultrapura.

A determinação de mercúrio (Hg) nas amostras foi realizada utilizando o analisador direto de mercúrio DMA-80. Essa técnica foi adotada por permitir a análise direta das amostras, sem a necessidade de etapas de pré-tratamento, requerendo apenas que as amostras sólidas estejam secas.

2.2.2.2 Preparo das amostras de água

Para a determinação dos elementos químicos na 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, apropriado para uso em forno micro-ondas, ao qual foram adicionados 4 mL de HNO_3 concentrado. Após a adição do ácido, os frascos foram devidamente fechados e a mistura submetida à decomposição assistida por radiação micro-ondas. O programa de aquecimento consistiu em aquecer a amostra a 175 ºC por 5,5 minutos, com permanência nessa temperatura por 4,5 minutos, seguido de um resfriamento

por 10 minutos. Após o resfriamento, a solução foi transferida quantitativamente para um tubo de polipropileno e o volume aferido para 25 mL com água ultrapura.

A determinação dos elementos químicos na fração dissolvida não exigiu pré-tratamento das amostras, pois estas foram analisadas diretamente no espectrômetro, utilizando o sistema de diluição por aerossol High Matrix Introduction (HMI), que permite a introdução direta de matrizes com alta concentração salina.

O preparo das amostras de material particulado em suspensão foi realizado conforme o método US EPA 3051A. O filtro seco contendo a amostra de MPS foi pesado em frascos de Teflon, aos quais foram adicionados 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, para a etapa de pré-decomposição. Após esse período, os frascos foram devidamente fechados e submetidos à decomposição assistida por radiação micro-ondas. O programa de aquecimento consistiu em elevar a temperatura para 175 ± 5 ºC em aproximadamente 5,5 ± 0,25 minutos, com permanência a essa temperatura por 4,5 minutos, seguido de um resfriamento por 10 minutos. Concluído o ciclo, o rotor do micro-ondas foi retirado e os frascos deixados por cerca de 30 minutos à temperatura ambiente dentro da capela para posterior abertura. Após o resfriamento, 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 transferida para um tubo de polipropileno e o volume aferido 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, selecionadas conforme a concentração dos analitos nas amostras e a capacidade de detecção de cada técnica. Devido às suas características de desempenho analítico, a espectrometria de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) foi utilizada para a quantificação dos elementos químicos em níveis de traço. Para os elementos minoritários e majoritários, foi empregada a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). 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, enquanto os valores para os elementos La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc e Y obtidos pelo método de decomposição total, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Detalhamento da técnica analítica empregada na determinação dos analitos na matriz de sedimento, utilizando o método de extração parcial (EPA 3051A), com os respectivos comprimentos de onda/isótopos e limites de quantificação (LQ).

Método	Elemento	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 empregada na determinação dos analitos na matriz de sedimento, utilizando o método de decomposição total (EPA 3052), com os respectivos comprimentos de onda/isótopo e limites de quantificação (LQ).

Método	Elemento	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg^{-1})
Decomposição 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 por meio da análise de materiais de referência certificados (MRC), especificamente o sedimento marinho NIST 2702 e o sedimento estuarino BCR – 667 (*European Commission*). Os valores obtidos pelo método US EPA 3051A foram comparados com os valores de recuperação da extração, conforme apresentado na Tabela 4. Os valores obtidos pelo método US EPA 3052 estão apresentados na Tabela 5.

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

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

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

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

A determinação de mercúrio foi realizada diretamente nas amostras de sedimento fino, com partículas < 1 mm e previamente 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 limite de quantificação obtido para as amostras de sedimento foi de 1,0 µg kg^{-1}. O CRM NIST 1547 foi analisado diretamente, e o valor obtido (25,5 ± 0,3 µg kg^{-1}) mostrou-se concordante com o valor certificado (31,7 ± 4,3 µg kg^{-1}).

2.2.2.4 Determinação elementar nas amostras de água

Os limites de quantificação e os respectivos isótopos (ou comprimentos de onda) obtidos para os elementos químicos, nos métodos de determinação 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 empregada na determinação dos analitos na matriz água, utilizando o método de decomposição total (EPA 3015A), com os respectivos comprimentos de onda/isótopo e limites de quantificação (LQ).

Método	Elemento	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (µg 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 empregada na determinação dos analitos na matriz água (fração dissolvida), por meio de análise direta com o sistema High Matrix Introduction (HMI), com os respectivos comprimentos de onda/isótopo e limites de quantificação (LQ).

Método	Elemento	Técnica analítica	Isótopo	LQ da amostra (µg L^{-1})
Análise direta HMI	Al	ICP-MS	27	2,61
	As	ICP-MS	75	0,204
	Cd	ICP-MS	114	0,027
	Co	ICP-MS	59	0,049
	Cr	ICP-MS	52	0,270
	Cu	ICP-MS	63	0,315
	Fe	ICP-MS	56	4,23
	Mn	ICP-MS	55	0,523
	Ni	ICP-MS	58	0,395
	Pb	ICP-MS	206	0,060
	Sn	ICP-MS	120	1,25
	V	ICP-MS	51	0,172
	Zn	ICP-MS	66	1,40

Tabela 8: Detalhamento da técnica analítica empregada na determinação dos analitos no material particulado em suspensão (MPS), com os respectivos comprimentos de onda/isótopo e limites de quantificação (LQ).

Método	Elemento	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

*$\mu g\ kg^{-1}$

A exatidão do método US EPA 3015A foi avaliada por meio da análise do MRC Trace Metals 1 in seawater – QC (LRAB2290, Sigma, Brasil). Para o método de análise direta com o sistema High Matrix Introduction (HMI), foram utilizados os materiais de referência certificados (MRC) de água marinha ERM-CA403 (European Commission – Joint Research Centre) e o CASS-6 (National Research Council Canada). Os valores obtidos pelo método US EPA 3015a estão apresentados na Tabela 9, enquanto os valores obtidos pelo método de coprecipitação estão na Tabela 10.

.

Tabela 9: Comparação entre os valores encontrados (µg L^{-1}) e os valores informados (µg L^{-1}) para o *Trace Metals 1 in seawater* – QC, utilizando o método US EPA3015A.

Elemento	Concentração (média ± desvio padrão)	
	Valor informado	Valor encontrado (n=3)
Al	1830 ± 32,6	2104 ± 3
As	584± 10,4	580 ± 25
Ba	-	-
Cd	609 ± 10,0	392 ± 7
Co	588 ± 10,5	575 ± 9
Cr	426 ± 7,60	403 ± 8
Cu	120 ± 2,15	111 ± 5
Fe	2340 ± 42,0	2375 ± 41
Mn	477 ± 851	473 ± 6
Ni	-	-
Pb	533 ± 7,60	375 ± 15
Sn	-	-
V	104 ± 1,85	69 ± 1
Zn	1420 ± 25,4	1022 ± 22

Tabela 10: Valores de recuperação (%) obtidos para os MRCs de água marinha ERM-CA403 e CASS-6, por meio de análise direta com o sistema High Matrix Introduction (HMI).

Elemento	Recuperação (%)	
	ERM-CA403	CASS-6
Al	-	-
As	104	103
Cd	104	91
Co	102	97
Cr	108	100
Cu	103	101
Fe	103	97
Mn	103	98
Ni	90	104
Pb	102	96
Sn	-	-
V	-	98
Zn	99	98

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

de onda utilizado foi de 253,65 nm, e o limite de quantificação obtido foi de 3,00 µg kg^{-1} para água total, 4,00 µg kg^{-1} para a fração dissolvida e 7,00 µg kg^{-1} para o MPS.

A determinação de Ba na fração dissolvida foi realizada diretamente no espectrômetro (ICP-OES), dispensando pré-tratamento. O comprimento de onda utilizado foi de 253,65 nm e o limite de quantificação obtido foi de 4,7 µg L^{-1}.

2.2.2.5 Cálculo do índice *Sediment Quality Guideline Quotients*

O SQG-q é calculado pela normalização das concentrações de cada elemento químico em relação aos seus respectivos valores de *Probable Effects Level* (PEL), os quais foram estabelecidos com base nos 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, considerando os prováveis efeitos adversos à fauna bentônica, a saber: 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, divididas pela concentração elementar do normalizador *Post Archean Australian Shale* (PAAS), com exceção de Sc e Y, uma vez que o normalizador não possui valores de referências para esses elementos. As anomalias de ocorrência do Ce/Ce* e Eu/Eu* foram calculadas conforme Taylor e McLennan (1995), a partir das concentrações normalizadas, utilizando as fórmulas:

$$Ce/Ce^* = [3 \times Ce_{normalizado}]/[2 \times La_{normalizado} + Nd_{normalizado}]$$

$$Eu/Eu^* = Eu_{normalizado}/\sqrt{(Sm \times Gd)}$$

2.2.2.7 Cálculo do Índice de Qualidade da Água - CWQI

O cálculo do Índice de Qualidade da Água (CWQI - *Canadian Water Quality Index*) envolve a avaliação de diferentes parâmetros da água, com o objetivo de fornecer uma medida geral da qualidade da água em uma determinada área.

O CWQI é baseado em três componentes principais:

- Escopo (F1): Representa o percentual de parâmetros que não atendem às suas diretrizes, pelo menos uma vez, durante o período em consideração.

$$F1 = \left(\frac{número\ de\ parâmetros\ não\ conformes}{número\ total\ de\ parâmetros}\right) \times 100$$

- Frequência (F2): Representa o percentual de ensaios individuais que não atendem às diretrizes.

$$F2 = \left(\frac{número\ de\ ensaios\ não\ conformes}{número\ total\ de\ ensaios}\right) \times 100$$

- Amplitude (F3): Representa a magnitude pela qual os valores dos ensaios não conformes não atendem às suas diretrizes. É calculado em três etapas:

$$excursão_i = \left(\frac{valor\ do\ ensaio\ não\ conforme}{diretriz}\right) - 1$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{n} excursão_i}{número\ de\ ensaios}$$

$$F3 = \frac{nse}{0{,}01nse + 0{,}01}$$

A pontuação final do CQWI é calculada através da combinação desses três fatores. O divisor 1,732 normaliza os valores resultantes para uma faixa entre 0 e 100, onde 0 representa a "pior" qualidade da água e 100 representa a "melhor" qualidade da água.

$$CWQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1{,}732}\right)$$

CQWI entre 95 e 100: A qualidade da água é excelente.

CQWI entre 80 e 94: A qualidade da água é boa.

CQWI entre 65 e 79: A qualidade da água é razoável.

CQWI entre 45 e 64: A qualidade da água é marginal.

CQWI entre 0 e 44: A qualidade da água é ruim.

Nos relatórios anteriores, o índice utilizado para avaliação da qualidade da água era o PLI (*Pollution Load Index*). O PLI foi empregado em substituição ao CWQI devido à insuficiência no número de campanhas de amostragem necessárias para o cálculo do CWQI. Este último exige, no mínimo, quatro campanhas para seu cálculo. Considerando que o monitoramento da qualidade da água não estava incluído no escopo inicial do projeto e passou a ser realizado apenas a partir de agosto de 2022, não foi possível calcular o índice CWQI até aquele momento. Contudo, com o número adequado de campanhas de amostragem agora disponível, o PLI foi substituído pelo CWQI para a avaliação da qualidade da água.

O cálculo do CWQI envolveu o uso das diretrizes da Resolução CONAMA n° 357 para águas salinas de classe 1 e da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Valores de referência para o índice CWQI.

Parâmetro	Concentração de referência (µg/L)		Parâmetro	Concentração de referência (µg/L)	
	CONAMA	NOAA crônico		CONAMA	NOAA (crônico)
tAl	-	-	dAl	1500	-
tAs	10	-	dAs	-	36
tBa	1000	-	dBa	-	200
tCd	5	-	dCd	-	7,9
tCo	-	-	dCo	-	1
tCr	50	-	dCr	-	-
tCu	-	-	dCu	5	3,1
tFe	-	-	dFe	300	50
tHg	0,2	-	dHg	-	0,94
tMn	100	-	dMn	-	100
tNi	25	-	dNi	-	8,2
tPb	10	-	dPb	-	8,1
tV	-	-	dV	-	50
tZn	90	-	dZn	-	81

t – total; d- dissolvido.

Ao combinar essas duas referências para o cálculo do CWQI, como o Cu e o Fe na fração dissolvida apresentam valores diferentes nas duas diretrizes, optou-se por adotar os valores da NOAA. O cálculo do CWQI para o tema Praias apresenta algumas diferenças em relação ao ambiente marinho. Aqui, o CWQI não inclui nem o elemento Ag nem Hg, pois o Hg é determinado em uma unidade diferente do valor de referência, enquanto a Ag não é analisada no contexto das praias.

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 10 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, nos quais 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, realizadas em triplicata, foram realizadas a partir da 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 a 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 Material Ligado ao Desastre (MLD). 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'.

Análise de Redundância (RDA) também foi realizada com o intuito de verificar se a estrutura das comunidades (abundância e composição) variam em relação as variáveis físico-químicos presentes no ambiente, como a granulometria e os principais elementos químicos advindos do Material Ligado ao Desastre (MLD). Para isso, os dados ambientais foram padronizados no método '*Standardize'*, com o fim de permanecerem em uma mesma escala e os dados da fauna foram transformados por meio da transformação de Hellinger, a fim de reduzir a influência de valores zero na análise (Legendre & Gallagher, 2001). Posteriormente, foi testada a significância estatística do modelo da RDA para verificar se as variáveis físico-químicas influenciam na estruturação da fauna. Além disso, foram identificadas quais variáveis contribuem significativamente para essa variação. Só foram plotados nos gráficos os táxons mais correlacionados com as variáveis físico-químicas e com os compartimentos.

Para Degredo, análises de ordenação multidimensional do tipo NMDS e ANOSIM foram realizadas com o intuito de verificar se a estrutura taxonômica (composição e abundância) varia entre as campanhas, 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. *variodentata*, 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 biologistas, 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-UFES (iniciado em agosto de 2022), devida à constância destas variáveis, que não apresentaram grandes variações ao longo do tempo de monitoramento, e à baixa correlação com o impacto do MLD de lama.

Inserção de 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-UFES (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-UFES (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 MLD 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-UFES), 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-UFES,com o intuito de obtermos um marcador geoquímico para chegada do MLD, de tal forma que, através do comportamento desses elementos nas amostras coletadas, seja possível tirar conclusões sobre a presença ou não do MLD.

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=2), 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=2), 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. De 2018 a 2024, utilizamos a técnica de ordenação não-métrica (NMDS) para explorar padrões de similaridade na composição faunística. A partir de 2025, adotamos a Análise de Redundância (RDA) por permitir a incorporação direta de variáveis ambientais como fatores explicativos, proporcionando uma interpretação mais robusta e quantitativa das relações entre fauna e ambiente.

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.

Exclusão na malha amostral – Bentos, Geoquímica e Morfodinâmica: a partir de agosto de 2022, após aprovação do novo acordo (Novo Ciclo PMBA/Fest-UFES) houve a exclusão das estações amostrais S4 – Barra do Riacho e N3 – Pontal do Ipiranga, a partir da Campanha de julho de 2024, houve a exclusão da estação amostral S1- Praia Mole, e da isóbata de 5m, em atendimento a Deliberação nº 803.

2.5 ALTERAÇÕES NA MALHA, FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADAS EM OUTUBRO DE 2024: CONSEQUÊNCIAS PARA AS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES

Considerando o OFÍCIO SEI Nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio e a Nota Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio da Câmara Técnica de Biodiversidade, que subsidiou a Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024, o Tema de Praias passou por alterações na malha amostral com a **exclusão da macroatividade de Monitoramento na Isóbata de 5 metros**, além da **retirada da estação Praia Mole (S1).**

As análises dos indicadores de morfodinâmica, comunidades bentônicas e geoquímica foram descontinuadas para todas as subestações de Praia Mole (S1) e para a isóbata de 5 m das demais estações mantidas no escopo. A supressão da isóbata de 5 m teve impacto significativo na análise e interpretação dos indicadores, pois essa feição corresponde à zona de transição entre o ambiente praial emerso e o submerso, sendo fundamental para a detecção da migração sazonal e interanual de lama entre esses dois subambientes. Ademais, os maiores impactos relacionados aos três subtemas têm sido recorrentemente registrados na isóbata de 5 m. Assim, sua retirada inviabiliza a continuidade do monitoramento justamente na região historicamente mais afetada pelo Material Ligado ao Desastre.

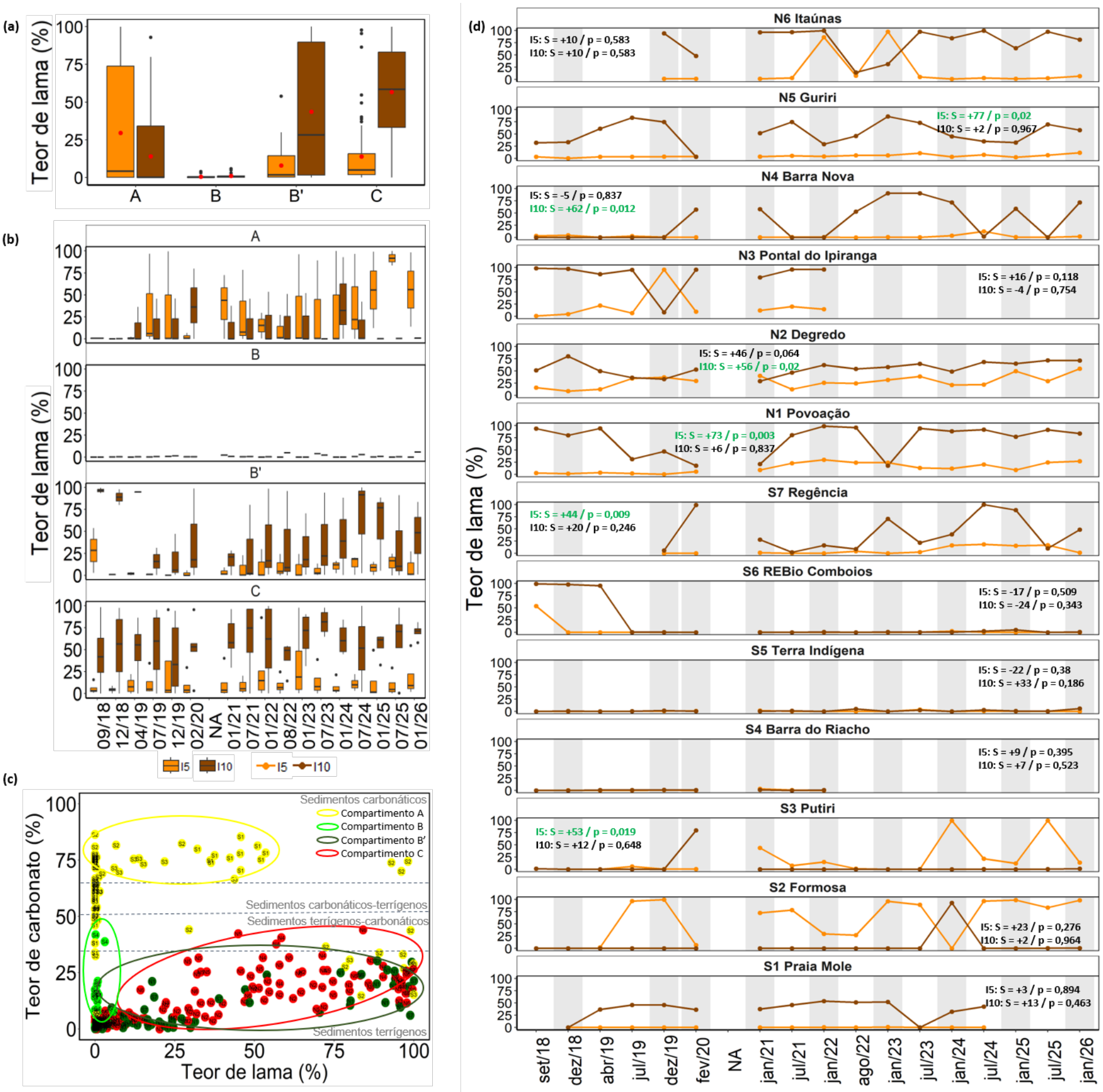
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest-UFES 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-UFES 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.

3.1.1 Presença de lama

Figura 2: Teor e composição da lama na antepraia, considerando as isóbatas de 5 m e 10 m. Os compartimentos englobam as seguintes estações: A (S1 a S3); B (S4 e S5); B' (S6, S7 e N1); e C (N2 a N6). **(a)** Variação espacial do teor de lama nos compartimentos e **(b)** Variação temporal dos teores de lama em cada compartimento, representadas por boxplots, com medianas (linhas pretas), médias (pontos vermelhos) e valores atípicos/outliers (pontos pretos), para as **isóbatas de 5 m (laranja) e 10 m (marrom)**. **(c)** Relação entre teor de lama e teor de carbonato dos sedimentos da antepraia, com delimitação das classes de composição sedimentar segundo a proveniência carbonática, terrígena ou mista, conforme Larsonneur (1977). As cores indicam **os compartimentos – amarelo: A, verde claro: B, verde escuro: B' e vermelho: C**. **(d)** Variação temporal do teor de lama por estação amostral, **nas isóbatas de 5 m (laranja) e 10 m (marrom)**, acompanhada dos resultados do teste de tendência monotônica de Mann-Kendall. S representa o parâmetro estatístico do teste, com valores positivos indicando tendência de aumento e valores negativos indicando tendência de redução; p representa o nível de significância, considerando confiança superior a 95%. Os dados abrangem o período de setembro de 2018 a janeiro de 2026. As faixas em cinza indicam períodos chuvosos. Períodos sem dados estão associados à interrupção das atividades de campo durante a pandemia de COVID-19 e às alterações na malha amostral ao longo do monitoramento.



O Compartimento A apresenta um teor médio de lama de 21,5 ± 33,8% na antepraia, entre as isóbatas de 5 e 10 metros, caracterizando-se como intermediário em relação aos demais compartimentos (Figura 2a). Os sedimentos exibem variações temporais nos teores de lama (Figura 2b) e são compostos majoritariamente por material carbonático (Figura 2c). Na estação **S1 Praia Mole**, os teores de lama são elevados e estáveis na profundidade de 10 m (36,7 ± 17,5%) e praticamente ausentes em 5 m (0,1 ± 0,2%) (Figura 2d), com predominância de composição carbonática (Figura 2c). Os maiores valores de lama no compartimento foram registrados na estação **S2 Formosa**, especialmente na profundidade de 5 m (65,0 ± 39,5%), enquanto a 10 m os teores são baixos em média (5,5 ± 22,5%), mas com ocorrência pontual de valor elevado em jan/24 (93,0%) (Figura 2d). A estação **S2 Formosa** apresenta alta variabilidade e a presença frequente de composições carbonático-terrígenas com várias ocorrências de lamas terrígenas puras (Figura 2c), o que pode indicar influência de aporte externo a essa região predominantemente carbonática. A estação **S3 Putiri** mostrou episódios de aumento nos teores de lama ao longo do monitoramento (Figura 2d), com destaque para três ocorrências a 5 m, jan/21 (43,8%), jan/24 (99,9%) e jul/25 (99,9%), e uma ocorrência a 10 m em fev/20 (79,9%). Em **S3 Putiri**, onde também há ocorrência pontual de sedimentos terrígenos (Figura 2c), foi identificada tendência temporal significativa de aumento dos teores de lama a 5 m (S = 53; p = 0,019), não sendo observadas tendências significativas nas demais séries do compartimento.

O **Compartimento B** apresenta os menores teores médios de lama na antepraia ao longo de todo o litoral monitorado, com valor de 0,8 ± 1,3% (Figura 2a), sem apresentar variações temporais expressivas (Figura 2b) e com predominância de sedimentos terrígenos (Figura 2c). Os valores de lama registrados nas estações deste compartimento permanecem, em geral, abaixo de 5% e apresentam pouca variação ao longo do tempo (Figura 2d). A estação **S4 Barra do Riacho** apresenta os menores teores de lama entre todas as estações analisadas, tanto a 5 m (0,5 ± 1,0%) quanto a 10 m (0,5 ± 0,4%) (Figura 2d). A estação **S5 Terra Indígena** também se destaca pelos baixos teores de lama, com valores de 0,5 ± 1,0% a 5 m e 1,3 ± 1,7% a 10 m (Figura 2d).

O **Compartimento B'** apresenta teor médio de lama de intermediário a alto na antepraia (25,7 ± 34,9%), quando comparado aos demais compartimentos (Figura 2a). Os sedimentos têm composição exclusivamente terrígena (Figura 2c), e os maiores valores de lama ocorrem, em geral, a 10 m de profundidade (Figura 2b). Na estação **S6 REBio Comboios**, foram registrados altos teores de lama a 10 m apenas nas três primeiras campanhas, entre set/18 e abr/19 (97,5 ± 1,9%), enquanto a média geral para essa profundidade foi de 18,0 ± 38,0%, refletindo a queda acentuada dos valores nas campanhas subsequentes. A 5 m, houve valor elevado somente em set/18 (53,8%), com valores baixos ou nulos nas campanhas subsequentes (Figura 2d). A estação **S7 Regência**, localizada imediatamente ao sul da foz do rio Doce, apresenta valores elevados, porém variáveis, de lama a 10 m (41,5 ± 36,3%) (Figura 2d), o que indica influência direta da descarga sedimentar fluvial nessa área. Em 5 m de profundidade, os teores são mais baixos (6,0 ± 7,6%), mas demonstram tendência de aumento (S = 44; p = 0,009), o que sugere possível migração de sedimentos mais finos para zonas rasas. A estação **N1 Povoação**, situada ao norte da desembocadura, contribui de forma consistente para os altos teores de lama observados neste compartimento, com valores expressivos a 10 m (70,8 ± 30,4%) e significativos

a 5 m (13,7 ± 10,3%) (Figura 2d). Observa-se uma tendência significativa de aumento da concentração de lama a 5 m de profundidade na estação N1 (S = 74; p = 0,003), o que reforça a hipótese de transporte de lama em direção a zonas menos profundas. A identificação desse padrão de incremento dos teores de lama a 5 m nas estações próximas à foz do rio Doce (**S7 Regência e N1 Povoação**) é relevante, pois esse acúmulo em áreas rasas pode ter implicações ecológicas importantes para a biodiversidade costeira, além de potenciais impactos sobre a saúde humana.

O **Compartimento C** apresenta teores médios de lama mais elevados e relativamente estáveis na antepraia (35,3 ± 34,3%), em comparação com os demais compartimentos (Figura 2a). Os altos teores são verificados tanto a 5 m quanto a 10 m de profundidade, com valores mais expressivos nesta última (Figura 2b), e a composição sedimentar é predominantemente terrígena (Figura 2c). A estação **N2 Degredo** destaca-se por apresentar os maiores e mais constantes teores de lama ao longo do monitoramento, alcançando até 54,6% a 5 m e 79,8% a 10 m com médias de 28,7 ± 12,9% e 55,5 ± 14,2%, respectivamente (Figura 2d). A estação **N3 Pontal do Ipiranga** apresenta valores muito elevados de lama a 10 m (83,7 ± 28,9%) e teores mais baixos, porém ainda relevantes, a 5 m (20,7 ± 28,8%) (Figura 2d). Na estação **N4 Barra Nova**, os teores a 5 m são baixos (1,9 ± 3,0%), enquanto a 10 m observam-se valores elevados e variáveis (32,5 ± 36,5%), com tendência significativa de aumento (S = 62; p = 0,012) (Figura 2d). A estação **N5 Guriri** apresenta teores de lama baixos, mas ainda atípicos a 5 m (5,0 ± 2,9%), com tendência significativa de crescimento (S = 78; p = 0,002), enquanto a 10 m os valores são consistentemente altos na maior parte do período analisado (52,2 ± 22,9%) (Figura 2d). Já na estação **N6 Itaúnas**, valores elevados de lama a 5 m foram registrados apenas em jan/22 (86,4%**)** e jan/23 (97,7%), enquanto a 10 m os teores são altos e mais regulares (77,3 ± 28,9%) (Figura 2d).

Nesta avaliação, com a inclusão dos dados de janeiro de 2026, observa-se a manutenção dos padrões temporais já identificados, com persistência de elevados teores de lama principalmente nos **Compartimentos B' e C**. No **Compartimento B'**, destacam-se **S7 Regência** e **N1 Povoação**, com teores elevados e variáveis, especialmente na isóbata de 10 m, enquanto no **Compartimento C** os maiores teores permanecem associados principalmente às estações **N2 Degredo, N4 Barra Nova, N5 Guriri e N6 Itaúnas**. A campanha de janeiro de 2026 reforça a persistência da lama na antepraia norte da foz do rio Doce, sobretudo na isóbata de 10 m, sem indicar tendência de redução do material lamoso ao longo do monitoramento. Destacam-se os teores elevados de lama nas isóbatas de 5 m em **S2 Formosa, N1 Povoação, N2 Degredo e N5 Guriri**.

Conforme já identificado em avaliações anteriores, a distribuição longitudinal da lama revela uma condição persistente de acúmulo predominantemente associado a sedimentos terrígenos no **Compartimento C.** Esse padrão ocorre tanto na isóbata de 5 m quanto, principalmente, na de 10 m, onde os valores são mais expressivos e recorrentes. Tais valores são considerados anômalos em ambientes praiais, sobretudo nas zonas mais rasas da antepraia. O **Compartimento B'** mostra-se fortemente influenciado pela descarga fluvial, o que explica os teores elevados e variáveis de lama, com destaque para a profundidade de 10 m e, em especial, para a estação **N1 Povoação**.

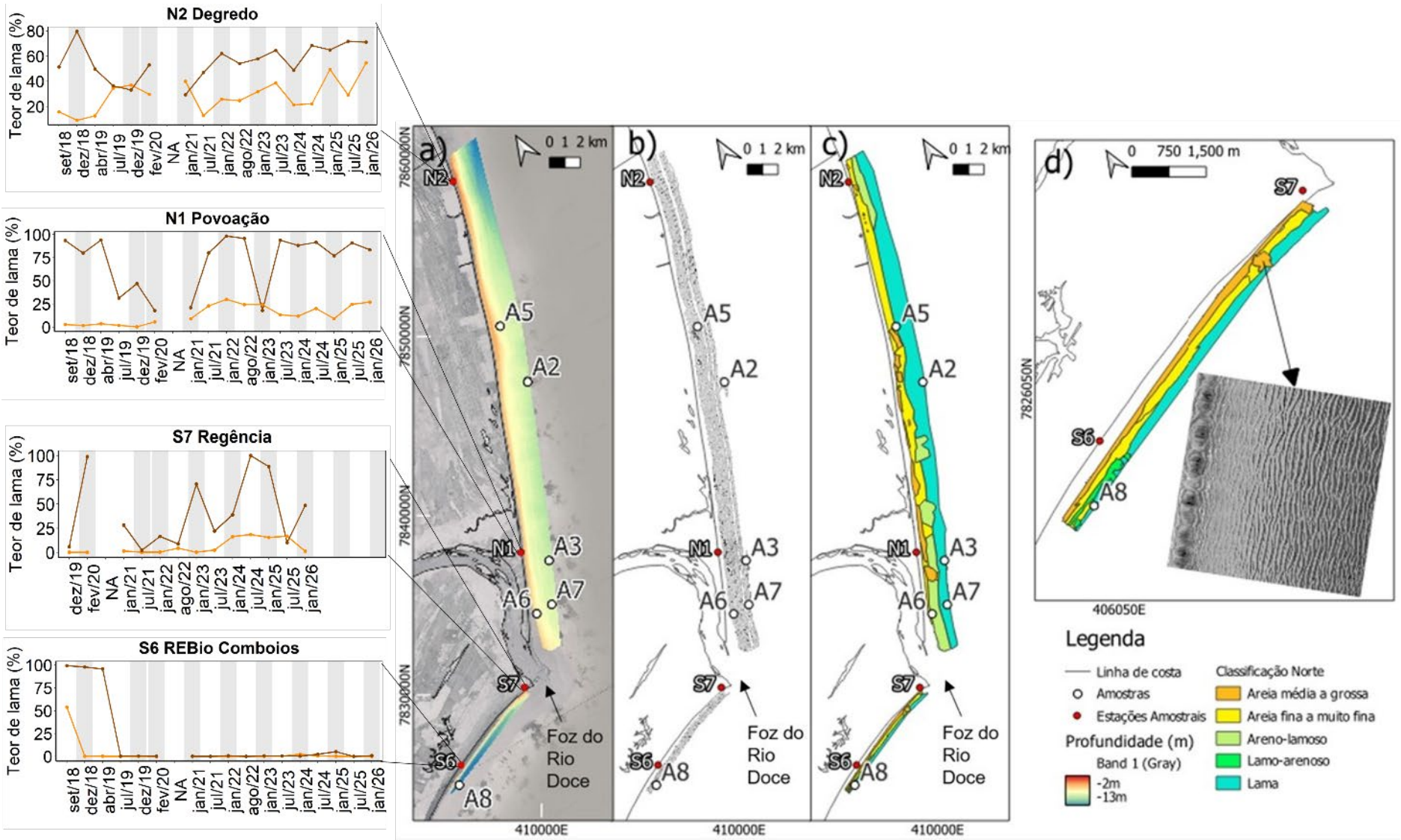
É relevante observar que as tendências significativas de aumento dos teores de lama ocorrem principalmente em estações situadas ao longo da planície costeira ao norte da desembocadura e próximas à foz do rio Doce, como **S7 Regência, N1 Povoação, N2 Degredo, N4 Barra Nova e N5 Guriri**. Esse padrão reforça a atuação do transporte preferencial de sedimentos finos para o norte pela deriva litorânea. No **Compartimento A**, também se verificam teores elevados de lama, particularmente a 5 m de profundidade na estação **S2 Formosa**, além de episódios pontuais em **S3 Putiri**. Apesar da composição sedimentar majoritariamente carbonática nesse compartimento, a ocorrência de sedimentos terrígenos, como observado nas estações **S2 Formosa** e **S3 Putiri**, sugere um aporte externo de lama, possivelmente relacionado à influência do MLD.

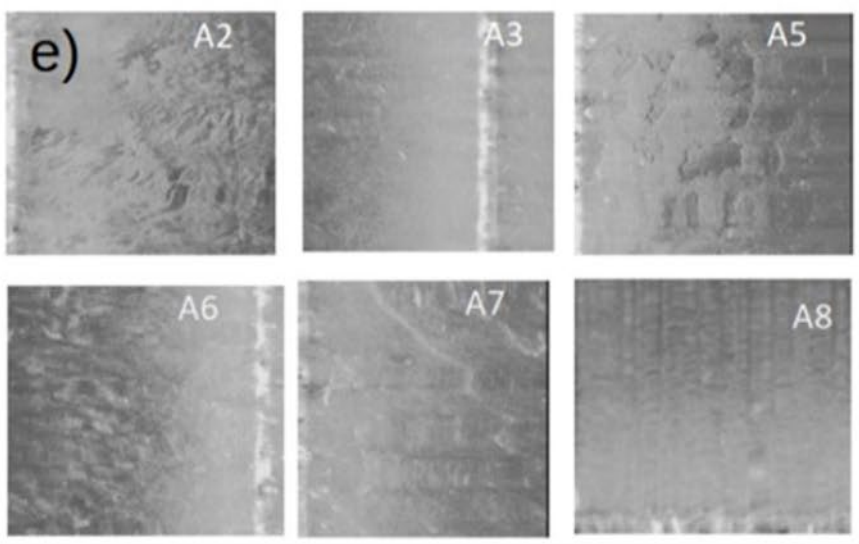
Em contraste, o **Compartimento B** não apresenta concentrações elevadas de lama, mantendo baixos teores ao longo do monitoramento. A incorporação crescente de lama em sistemas praiais naturalmente arenosos pode gerar transformações de médio e longo prazo, como o aplainamento do perfil praial e a elevação do risco de eventos de inundação costeira. Além disso, a deposição de partículas finas pode dificultar a remobilização das frações arenosas, restringindo o fluxo sedimentar da antepraia em direção à praia emersa e favorecendo processos erosivos em setores mais sensíveis.

Nas estações N2 Degredo e N4 Barra Nova, foram observadas tendências significativas de aumento dos teores de lama a 10 m, reforçando a persistência de sedimentos finos na antepraia submersa. Já o incremento dos teores de lama em regiões mais rasas da antepraia (5 m), como identificado nas estações **S3 Putiri, S7 Regência**, **N1 Povoação** e **N5 Guriri**, merece atenção especial. Esse padrão evidencia o transporte e a deposição de lama em setores mais dinâmicos do sistema costeiro, onde a presença de sedimentos finos não é comum, podendo representar riscos à biodiversidade local e ao equilíbrio ecológico dessas áreas.

.

Figura 3: Presença de lama na antepraia adjacente à desembocadura do rio Doce. Os gráficos laterais apresentam a variação temporal do teor de lama nas estações **S6 REBio Comboios**, **S7 Regência**, **N1 Povoação** e **N2 Degredo**, nas **isóbatas de 5 m (laranja)** e **10 m (marrom)**, ao longo do monitoramento (de setembro de 2018 a janeiro de 2026). **(a)** Mapeamento batimétrico do leito marinho realizado em março e em outubro de 2023. **(b)** Mapeamento sonográfico do leito marinho no mesmo período. **(c)** Classificação granulométrica do fundo marinho com base na interpretação sonográfica e nas análises granulométricas das amostras de sedimento de fundo. **(d)** Detalhe da classificação granulométrica no flanco sul da planície deltaica, com exemplo do padrão sonográfico associado aos depósitos lamosos. **(e)** Exemplos dos diferentes sinais acústicos associados aos depósitos lamosos e tabela com os teores de lama, de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e de matéria orgânica (M.O.) das amostras de sedimento de fundo.





Amostra	Lama (%)	$CaCO_3$ (%)	M.O. (%)
A2	95,7	24,92	4,71
A3	96,8	23,08	4,68
A5	49,1	8,87	2,77
A6	19,2	10,05	2,64
A7	43	6,02	1,99
A8	95,7	29,11	8,74

As imagens de batimetria e sonografia apresentadas na Figura 3 correspondem às mesmas utilizadas no Relatório Anual de 2023, visto que os levantamentos geofísicos realizados tiveram caráter pontual e, até o momento, não foram atualizados com novas aquisições na mesma extensão espacial. Dessa forma, as comparações temporais relacionadas à distribuição do MLD na região do rio Doce estão sendo conduzidas com base em dados pontuais de teor de lama obtidos nas isóbatas de 5 e 10 m, nas estações **S6**, **S7**, **N1** e **N2**, situadas na área dos levantamentos geofísicos.

A atualização dos gráficos temporais até janeiro de 2026 não altera a interpretação espacial obtida pelo mapeamento batimétrico e sonográfico de 2023, mas reforça a persistência de teores elevados de lama nas estações ao norte da foz, especialmente nas **N1 Povoação** e **N2 Degredo**. Em **S6 REBio Comboios**, os teores permanecem baixos após os registros elevados das primeiras campanhas, enquanto **S7 Regência** apresenta um comportamento mais variável, compatível com a influência direta da desembocadura do rio Doce.

Conforme discutido no relatório anterior, os dados batimétricos indicam contrastes marcantes na largura e declividade da antepraia entre os flancos sul e norte da planície do rio Doce, o que influencia diretamente a distribuição espacial dos sedimentos finos (Figura 3a, 3b e 3c). No flanco sul, próximo à foz e à estação **S7 Regência**, a antepraia é rasa, com profundidade em torno de 2 metros e declividade acentuada que atinge aproximadamente 4°, tornando-se mais suave na antepraia inferior, com valores médios de 1°. Mais ao sul, na estação S6 REBio Comboios, observa-se uma elevação abrupta do fundo marinho entre a praia e a antepraia, com inclinação próxima a 6°, caracterizando uma antepraia estreita, com largura inferior a 200 metros. No flanco norte, por sua vez, a antepraia é substancialmente mais larga, com cerca de 2.000 metros de extensão e declividade mais suave, em torno de 1°, com isóbatas mais espaçadas nas proximidades da foz e progressivamente mais próximas no setor norte, próximo à estação **N2 Degredo**. Essa configuração morfológica favorece a deposição de sedimentos finos transportados pelo rio Doce, que acompanham o sentido dominante da deriva litorânea para o norte, acumulando-se na antepraia (Oliveira *et al.*, 2015).

Na análise dos sinais de retroespalhamento acústico registrados no flanco sul, predominam feições associadas a marcas de ondas em substrato arenoso (Figura 3d), com padrões assimétricos, sinuosos ou lunares, simples ou compostos. Entre 5 e 10 metros de profundidade, as áreas com retroespalhamento mais claro e rugoso correspondem às areias finas e muito finas identificadas nas amostras das estações S6 e S7. Por outro lado, os sinais típicos de fundo lamoso — de textura lisa e coloração mais escura — aparecem de forma esporádica, concentrando-se nas imediações da foz e em profundidades superiores a 10 m, onde se alternam com bancos arenosos. No flanco norte, os registros sonográficos revelam maior ocorrência de sinais escuros e com textura variável, indicando sedimentos predominantemente lamosos, como observado nas amostras A3 e A5. Os dados granulométricos mostram teores de lama superiores a 80% em profundidades maiores que 8 m, especialmente nas amostras A2 e A3 (Figura 3c), enquanto valores abaixo de 30% predominam em águas rasas. A composição dos sedimentos aponta para baixos teores de matéria orgânica (<5%) e $CaCO_3$ (<30%), caracterizando uma lama de origem essencialmente terrígena, possivelmente associada ao MLD.

Ainda no flanco norte, a heterogeneidade dos padrões sonográficos lamosos é mais evidente, sugerindo uma maior mistura entre sedimentos arenosos e lamosos, possivelmente relacionada ao aporte recente do rio Doce. No flanco sul, por sua vez, a transição entre os tipos de sedimento é mais definida, marcada pela presença de uma elevação abrupta entre a antepraia superior e inferior e pela variação da profundidade.

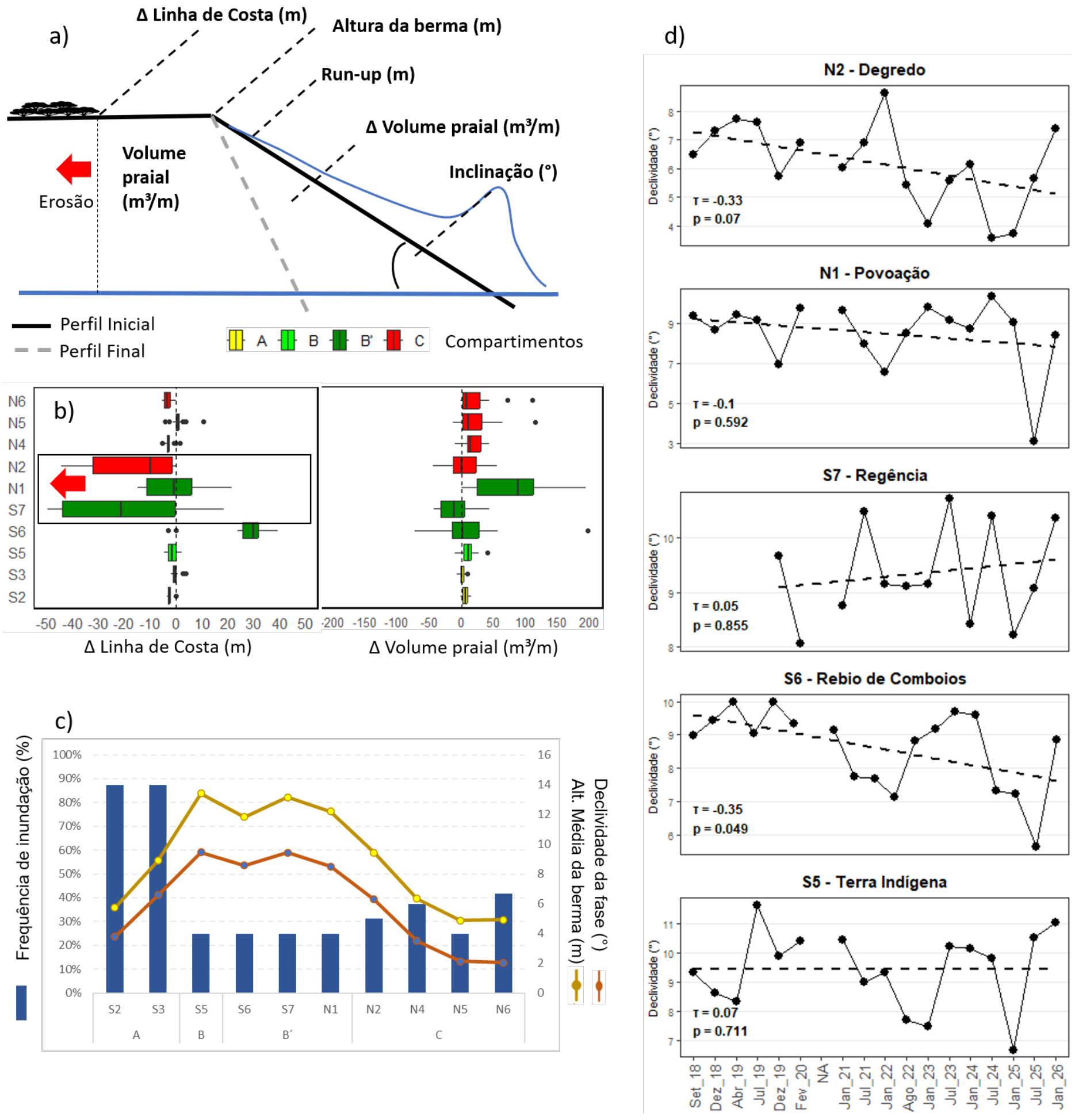
Essa distribuição é corroborada pela série temporal de monitoramento do teor de lama em 5 e 10 m nas estações mencionadas (Figura 3a). Em uma escala temporal ampliada, observa-se que as estações ao sul da foz apresentam teores de lama relativamente mais baixos e variáveis, especialmente em 5 m, enquanto ao norte da foz os teores são mais altos e constantes, inclusive na isóbata de 5 m.

Tanto os dados batimétricos quanto os registros sonográficos confirmam que a lama proveniente do rio Doce é transportada preferencialmente para o norte, seguindo o padrão das correntes costeiras, e se deposita de forma alternada entre bancos arenosos. No flanco sul, onde há maior incidência de energia de ondas provenientes do quadrante sul-sudeste, a deposição de lama é menos expressiva, ocorrendo principalmente em profundidades maiores e de forma intercalada com sedimentos arenosos. Esse acúmulo de lama na antepraia pode resultar no aprisionamento de sedimentos arenosos, dificultando seu transporte para a praia emersa, o que contribui para déficit sedimentar e intensificação de processos erosivos ao longo da costa.

.

3.1.2 Alteração morfológica da praia

Figura 4: Morfologia das praias, variação da linha de costa e frequência de inundação da berma devido à ação do espraiamento das ondas considerando os dados das campanhas de setembro de 2018 a janeiro de 2026. **(a)** Diagrama conceitual dos parâmetros morfológicos avaliados ao longo dessa seção, com destaque para a atuação da onda e do espraiamento da onda sobre a face (linha pontilhada azul). Δ **Linha de Costa (m):** variação da posição do contato entre a praia e a restinga. Δ **Volume Praial (m³/m):** variação do volume de sedimentos do perfil ativo emerso, entre o nível médio do mar (NMM) e a linha de costa, definida pelo contato praia/restinga. ***Run-up* (m):** a altura máxima do alcance do espraiamento da onda em relação ao NMM. **Altura da berma (m):** a altura correspondente à maior elevação da berma em relação ao NMM. **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, enquanto valores negativos de Δ **Volume Praial (m³/m)** indicam perda de sedimento na praia emersa ativa, com base na primeira campanha amostral. **(b)** Mobilidade do perfil praial baseada nos parâmetros Δ **Linha de Costa (m)** e **Volume Praial (m³/m). (c)** Frequência de eventos em que o *run-up* transpõe a berma praial, o que indica a chegada do espraiamento às feições superiores da praia, associada aos valores médios da inclinação da face praial (°) e da altura da berma (m) das estações amostrais. **(d)** Evolução temporal da declividade da face praial (°) nas estações S5 Terra Indígena, S6 REBio Comboios, S7 Regência, N1 Povoação e N2 Degredo, com os respectivos resultados do teste de tendência monotônica de Mann-Kendall. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19



* Os painéis (b) e (c) consideram apenas as estações com séries atualizadas e comparáveis até janeiro de 2026; por esse motivo, as estações S1 Praia Mole, S4 Barra do Riacho e N3 Pontal do Ipiranga não foram incluídas nesses painéis. As estações inativas foram excluídas do painel para evitar vieses temporais, pois seus dados não refletem eventos nem alterações recentes. Assim, todas as estações analisadas mantêm a atualização temporal, garantindo comparações mais precisas entre estações e compartimentos.

A atualização dos dados referentes à campanha de janeiro de 2026 confirma, de modo geral, os padrões já observados e discutidos em relatórios anteriores.

As praias do **Compartimento A** possuem volume de sedimento pouco expressivo e apresentam a menor variação nos parâmetros morfológicos analisados, tanto em Δ **Volume Praial (m³/m)** quanto em Δ **Linha de Costa (m),** podendo ser classificadas como temporalmente estáveis, com trocas sedimentares reduzidas (Figura 4b). Em relação à frequência de eventos de inundação (Figura 4c), quando o run-up ultrapassa a berma praial, essas praias registram as maiores incidências, com valores superiores a 80%. A baixa inclinação dos perfis, aliada à ausência ou ao escasso desenvolvimento das bermas e à presença de terraços de abrasão que impermeabilizam o leito marinho, favorece o empilhamento das ondas junto à costa e facilita o acesso de potenciais contaminantes. Apesar do espraiamento das ondas alcançar toda a extensão da praia, observa-se que o run-up não causa alterações significativas na posição da linha de costa.

No **Compartimento B**, a análise da variação dos parâmetros morfológicos da praia (Δ Volume Praial (m³/m) e Δ Linha de Costa (m) (Figura 4b)) indica baixa mobilidade do perfil e estabilidade da linha de costa. A estação **S5 Terra Indígena** apresenta frequência de inundação da berma pelo espraiamento de 25%, muito semelhante à das praias do compartimento B'.

Nas praias dos **Compartimentos B'**, características como a granulometria de areias médias a muito grossas com alta permeabilidade, faces praiais mais íngremes e bermas elevadas resultam em um estado morfodinâmico refletivo. Esse estado reduz o desenvolvimento do espraiamento e estabelece uma relação inversa entre a frequência de inundação e fatores como a granulometria, a inclinação e a altura da berma. Em outras palavras, praias com areias mais grossas, maior inclinação e bermas mais altas são menos suscetíveis a eventos de transposição de ondas sobre a berma (Figura 4c). Em relação à mobilidade do perfil, as praias desses compartimentos mostram alta mobilidade com tendência erosiva durante o monitoramento, mas apresentam grande capacidade de recuperação do volume de areia (Figura 4b). Uma exceção ao padrão erosivo observado nesse setor é a estação **S6 REBio de Comboios**, que apresenta tendência de avanço (balanço positivo) da linha de costa.

No **Compartimento B'**, a frequência média de inundação da berma é de 26% (Figura 4c), e os parâmetros de mobilidade são os mais elevados entre as estações analisadas, devido à proximidade da foz do rio. Isso expõe a região às variações sazonais nas cargas sedimentares do rio e ao alto impacto das ondas. A estação **S6 REBio de Comboios** apresenta balanço positivo da linha de costa, indicando tendência de acreção, enquanto **N1 Povoação** mostra inversão recente do padrão erosivo, com tendência estatisticamente significativa no teste de Mann-Kendall atualizado (Figura 5d). Já a estação **S7 Regência** permanece como um dos setores de maior recuo da linha de costa no monitoramento, embora o teste de Mann-Kendall atualizado não indique significância estatística para essa série (S = +4; p = 0,902) (Figura 5d).

No **Compartimento C**, a deriva litorânea predominante em direção ao norte transporta os sedimentos mais finos provenientes do rio Doce, que acabam sendo depositados na extremidade norte da planície costeira. Esses sedimentos finos resultam em praias de menor inclinação, bermas mais baixas e

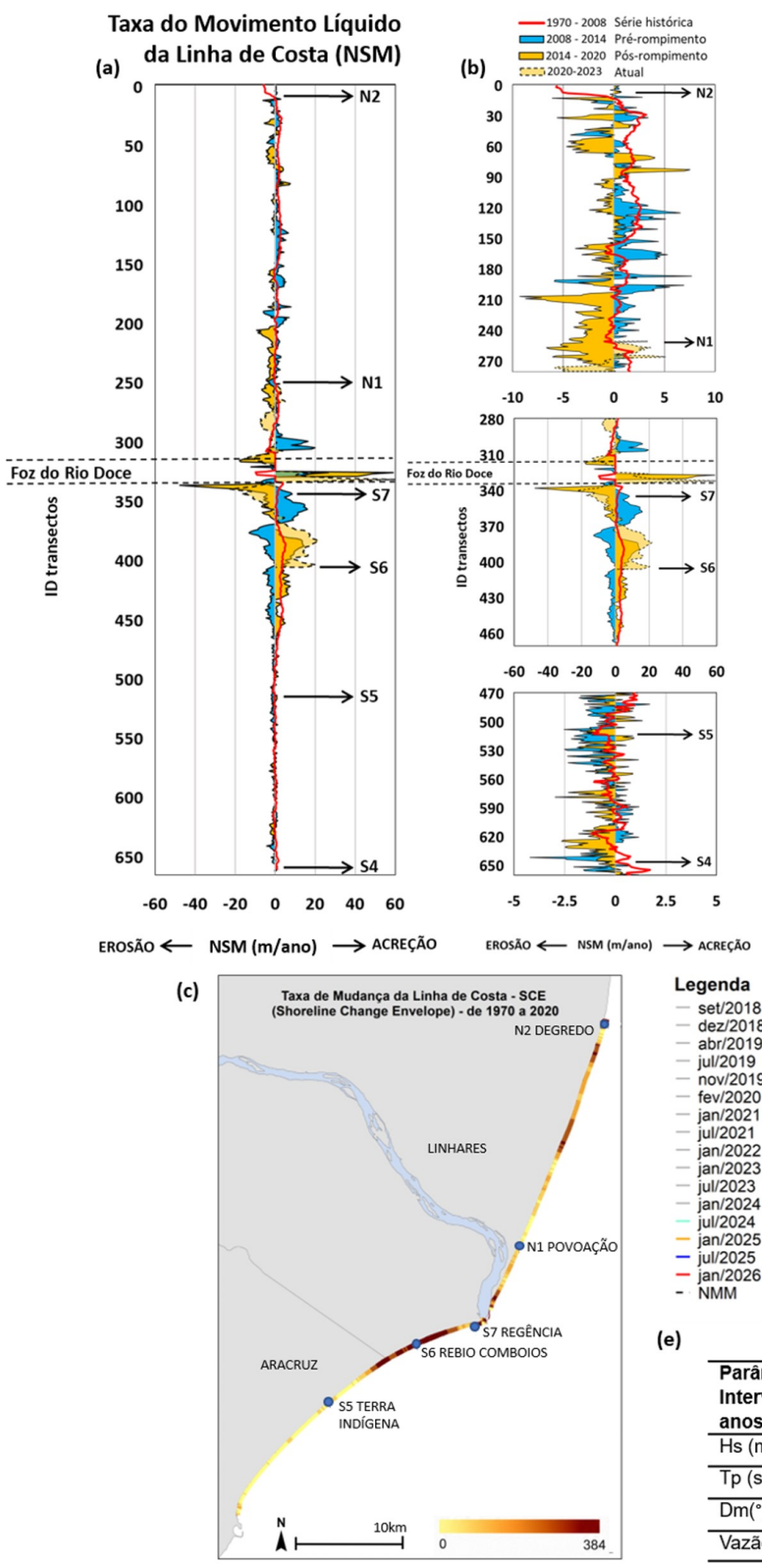
características dissipativas. Devido a essas condições, as praias apresentam uma média de 30% de eventos de inundação ao longo do período analisado. A mobilidade morfológica nessas praias é mais limitada, resultando em estabilidade temporal nos valores de Δ **Volume Praial (m³/m)**, com médias inferiores a 50 m³/m. Apesar dessa baixa mobilidade geral, a estação **N2 Degredo** registrou uma erosão significativa de -35,04 m ao longo de todo monitoramento (Figura 5d), destacando-se dentro do compartimento.

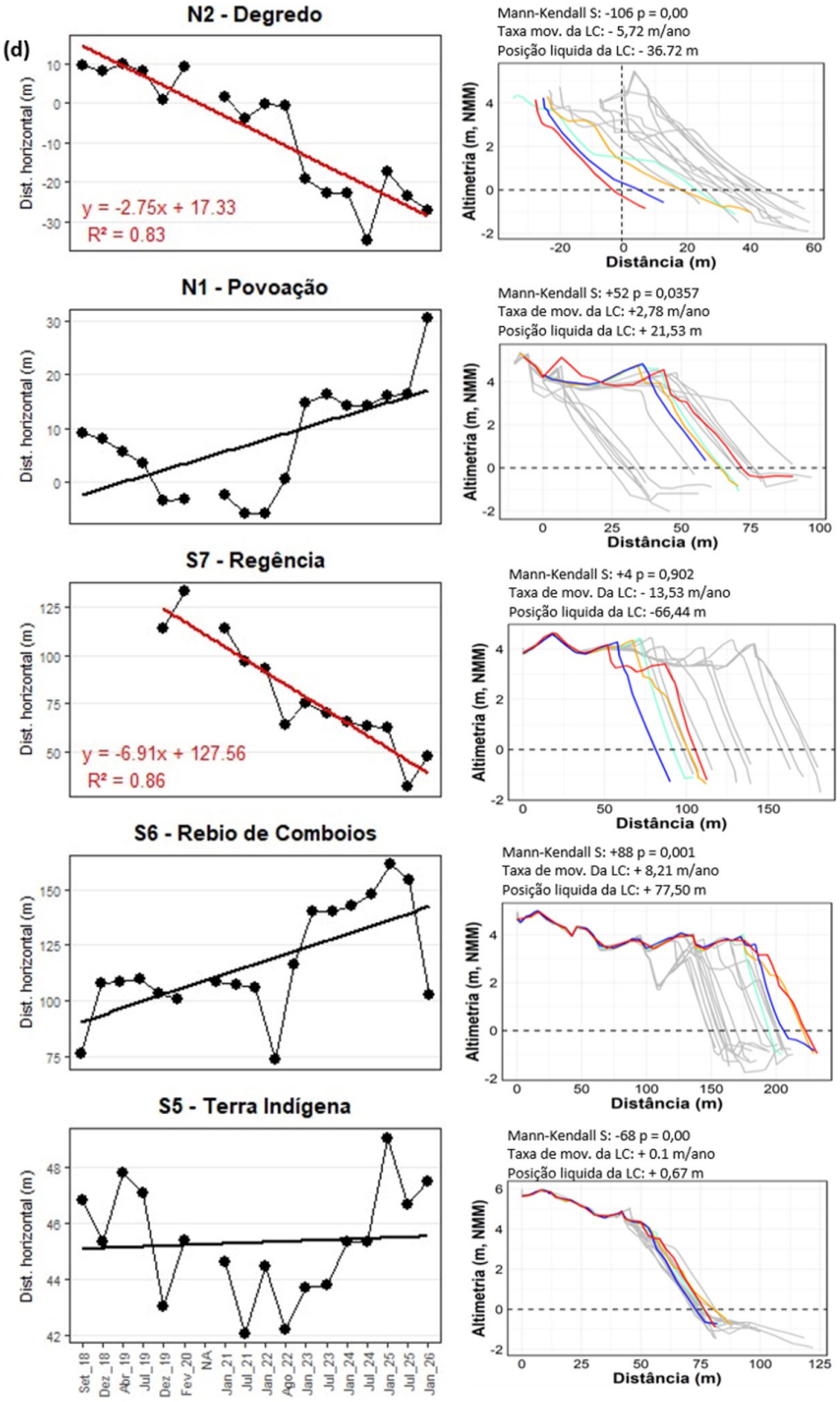
A Figura 4d ilustra a evolução temporal da declividade da face praial entre as estações **S5 Terra Indígena** e **N2 Degredo**. Com a inclusão dos dados de janeiro de 2026, nenhuma das séries apresenta tendência significativa de alteração da declividade. **N2 Degredo** mantém uma tendência negativa não significativa, sugerindo um possível aplainamento do perfil, compatível com sua condição erosiva, que permanece em torno de -5,72 m/ano (Figura 5d), e com altas concentrações de lama nas profundidades de 5 e 10 m (Figura 2d). O comportamento observado na estação S7 Regência apresenta variação temporal não significativa da declividade (Figura 4d), em um setor marcado por elevada mobilidade da linha de costa, erosão expressiva e aumento significativo dos teores de lama na isóbata de 5 m (Figura 2d).

Conclui-se que as praias próximas à foz do rio Doce apresentam maior mobilidade morfológica devido à influência direta das cargas sedimentares sazonais do rio. Em contrapartida, as praias de terraço e as com tendências dissipativas demonstram maior estabilidade morfodinâmica. De maneira geral, o litoral associado à foz do rio Doce exibe uma tendência erosiva, com variações de intensidade. Destacam-se, em particular, as erosões observadas nas estações **S7 Regência**, **N1 Povoação** e **N2 Degredo**.

.

Figura 5. Avaliação morfológica de meso e microescala da Linha de Costa (LC), definida pelo contato entre a vegetação e a praia, na planície do rio Doce. Os gráficos **(a)** e **(b)** representam a avaliação morfológica de mesoescala por meio da **Taxa do Movimento Líquido da Linha de Costa (*Net Shoreline Movement* – NSM)** para cada período sucessivo: 1970 a 2008, 2008 a 2014, 2014 a 2020 e 2020 a 2023: **(a)** com a mesma escala para todos os transectos e **(b)** com escalas diferentes dependendo da ordem de grandeza do NSM. Os valores positivos indicam acreção e os negativos, erosão durante o período especificado. O valor da taxa está expresso em metros por ano para cada período analisado. São 663 transectos espaçados a cada 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 se localiza próximo à estação N2 Degredo, o transecto 663 próximo à estação S4 Barra do Riacho e a foz está localizada no transecto 321. A análise do período de 2020 a 2023 foi realizada apenas na região da foz, entre S6 e N1, onde foi realizado o levantamento com imagens de drone. O mapa **(c)** apresenta a avaliação morfológica de mesoescala por meio da **Taxa de Mudança da Linha de Costa (*Shoreline Change Envelope* - SCE)**, que representa apenas a magnitude das alterações da LC entre 1970 e 2020, sem considerar se são positivas ou negativas. O gráfico **(d)** apresenta a avaliação de microescala da posição da **LC**, a partir do monitoramento dos perfis praiais com GNSS-RTK ao longo do período de setembro/2018 a janeiro/2026, com seus respectivos valores estatísticos referentes ao teste de tendência monotônica de Mann-Kendall (S é referente ao parâmetro estatístico do teste, que representa tendências de aumento quando positivo e diminuição quando negativo, da série de dados e sua magnitude; e p é referente ao nível de significância do teste, considerado aqui acima de 95%). 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 intervalos de tempo (1970–2008, 2008–2015 e 2015–2021)* considerados na avaliação da LC de mesoescala. A imagem em alta resolução mais próxima ao rompimento é de 2014, já para ondas e vazão foram utilizados os dados de 2015, ano do rompimento. São apresentados valores de significância do teste (p) ANOVA, entre cada intervalo de tempo, para avaliação de mudanças nas forçantes físicas que influenciam a movimentação da LC pré e pós-rompimento.





(e)

Parâmetro / Intervalo de anos	1970-2008	p	2008-2015	p	2015-2020	p	1970-2008
Hs (m)			1.63	**0.6124**	1.62		
Tp (s)			9.68	**0.5669**	9.71		
Dm(°)			115.48	0.0055	118.55		
Vazão (m³/s)	**888.33**	0.1321	772.45	5.21E-06	545.384	0.0123	888.33

*Os dados de 2020–2023 são apresentados apenas nas Figuras 4a e 4b, devido à menor abrangência espacial. Na tabela (e), o período de 1970–2008 aparece duas vezes por constituir a referência para as comparações com os períodos pré-rompimento (2008–2015) e pós-rompimento (2015–2020). A tabela (e) tem a função específica de verificar se ocorreram alterações nos padrões de ondas e de descarga fluvial entre os períodos pré e pós-rompimento. Por essa razão, ela mantém os intervalos históricos originalmente definidos e não incorpora os dados mais recentes.

Os indicadores de variação da linha de costa em macro e mesoescala mantêm o padrão já descrito no Relatório Anual de 2024, com agravamento de processos erosivos em alguns setores específicos. Os índices de NSM (*Net Shoreline Movement*) e SCE (*Shoreline Change Envelope*) mostram valores mais elevados nas proximidades da foz do rio Doce e no flanco sul da planície deltaica, com destaque para um deslocamento de até 383 metros, evidenciando alta mobilidade. À medida que se afasta da foz, tanto ao sul quanto ao norte, os valores de NSM e SCE diminuem (Figura 5a, 5b e 5c), comportamento que é reforçado pela análise em microescala (Figura 5d).

Quanto aos intervalos temporais analisados, o primeiro período compreendido entre 1970 e 2008 representa a série histórica (38 anos), com taxas máximas de variação da linha de costa de até 10 m/ano, geralmente próximas à estabilidade (NSM ≈ 0), como ilustrado pelas pequenas oscilações da linha vermelha nos gráficos (Figura 5a e 5b). No intervalo de 2008 a 2014, com 6 anos de dados anteriores ao rompimento da barragem, as taxas de variação aumentaram para valores próximos de 25 m/ano, já se diferenciando da série histórica. No período seguinte, de 2014 a 2020 (também com 6 anos), ocorreu um aumento expressivo na magnitude do recuo, alcançando quase 60 m/ano. O intervalo mais recente (2020–2023), com cobertura geográfica reduzida, mantém os padrões observados no período pós-rompimento.

As dinâmicas de avanço e recuo da linha de costa inverteram-se em diversos setores da planície deltaica, especialmente entre os períodos pré- e pós-rompimento da barragem. Ao norte da foz do rio Doce, cerca de 80% dos transectos apresentavam deposição antes do evento e, no período seguinte, aproximadamente 70% deles passaram a apresentar erosão. Destacam-se dois trechos críticos:

1. Entre os transectos 200 e 270, onde está a estação **N1 Povoação**, as taxas de recuo chegaram a -10 m/ano após o rompimento;

2. Entre os transectos 300 e 315, logo ao norte da foz, o recuo superou -15 m/ano.

No intervalo mais recente (2020–2023), a estação **N1 Povoação** voltou a apresentar tendência de deposição moderada, de cerca de +3 m/ano. A análise em microescala (set/2018 a jan/2026) corrobora este intervalo mais recente da análise de mesoescala, com taxa de aproximadamente +2,78 m/ano, mas sem tendência estatisticamente significativa (Figura 5d). O gráfico de dispersão da microescala mostra flutuações no comportamento do perfil, com recuo entre set/18 e jan/22, seguida de acreção entre jan/2022 e jan/2023, e uma certa estabilidade desde jan/23 até jan/25. A inclusão da campanha de janeiro de 2026 altera a interpretação anterior de relativa estabilidade recente, indicando um avanço expressivo da linha de costa na última campanha. Esse comportamento sugere elevada mobilidade morfológica no setor norte imediato à foz, com alternância entre fases erosivas e de deposição, possivelmente associada à redistribuição sedimentar próxima à desembocadura (Figura 5d).

Mais ao norte, a estação **N2 Degredo** apresenta tendência histórica significativa de recuo da linha de costa, segundo o teste de Mann-Kendall ($p<0,001$), com taxa de - 5,72 m/ano. Nessa taxa de recuo linear, nos próximos 5 anos, a praia experimentará um recuo adicional de 26,60 m, elevando o nível de alerta quanto à necessidade de monitoramento contínuo nesta área vulnerável.

No flanco sul da planície, observam-se dois padrões distintos de comportamento: 1) Entre os transectos 330 a 370, onde está localizada a estação **S7 Regência**, ocorreu uma inversão do padrão de deposição anterior para forte erosão, com taxas pós-rompimento de cerca de -20 m/ano (ante +7 m/ano no período anterior). Entre 2020 e 2023, esse padrão se mantém, e a análise em microescala (set/2018–jan/2025) revela uma tendência significativa de recuo da linha de costa (Mann-Kendall, $p < 0,005$), com taxa média de -8,56 m/ano. Em janeiro de 2026, o teste de Mann-Kendall não apresentou significância estatística. Porém, nota-se uma diminuição da taxa média, com valor de -13,53 m/ano. Essa taxa de recuo linear projeta, para os próximos 5 anos, um recuo adicional de -67,65 m, o que é preocupante, considerando a presença da Vila de Regência Augusta em área vulnerável, o que aumenta o risco para a população local frente a eventos erosivos intensos.

2) Entre os transectos 370 e 470, onde se encontra a estação **S6 REBio Comboios**, verificou-se uma mudança do padrão erosivo pré-rompimento para um comportamento agradacional nos períodos pós-rompimento e atual. Essa tendência coincide com a série histórica e apresenta magnitudes entre +5 e +20 m/ano. A análise em microescala (set/2018–jan/2025) também indica acreção significativa da linha de costa, com tendência positiva de Mann-Kendall ($p<0,05$) e taxa média de +11,81 m/ano. Na campanha de janeiro de 2026, observa-se uma diminuição na taxa de acresção (+8,21 m/ano). Isso indica que a linha de costa no setor, embora tenha avançado (balanço positivo) em escala temporal mais ampla, apresenta forte variabilidade entre campanhas.

Na porção mais ao sul da planície (transectos 470 a 650), os valores de NSM são baixos e a variabilidade espacial é elevada, sem indicar uma tendência definida. A estação **S5 Terra Indígena** também não apresentou tendência estatisticamente significativa em microescala, em concordância com a estabilidade observada em mesoescala.

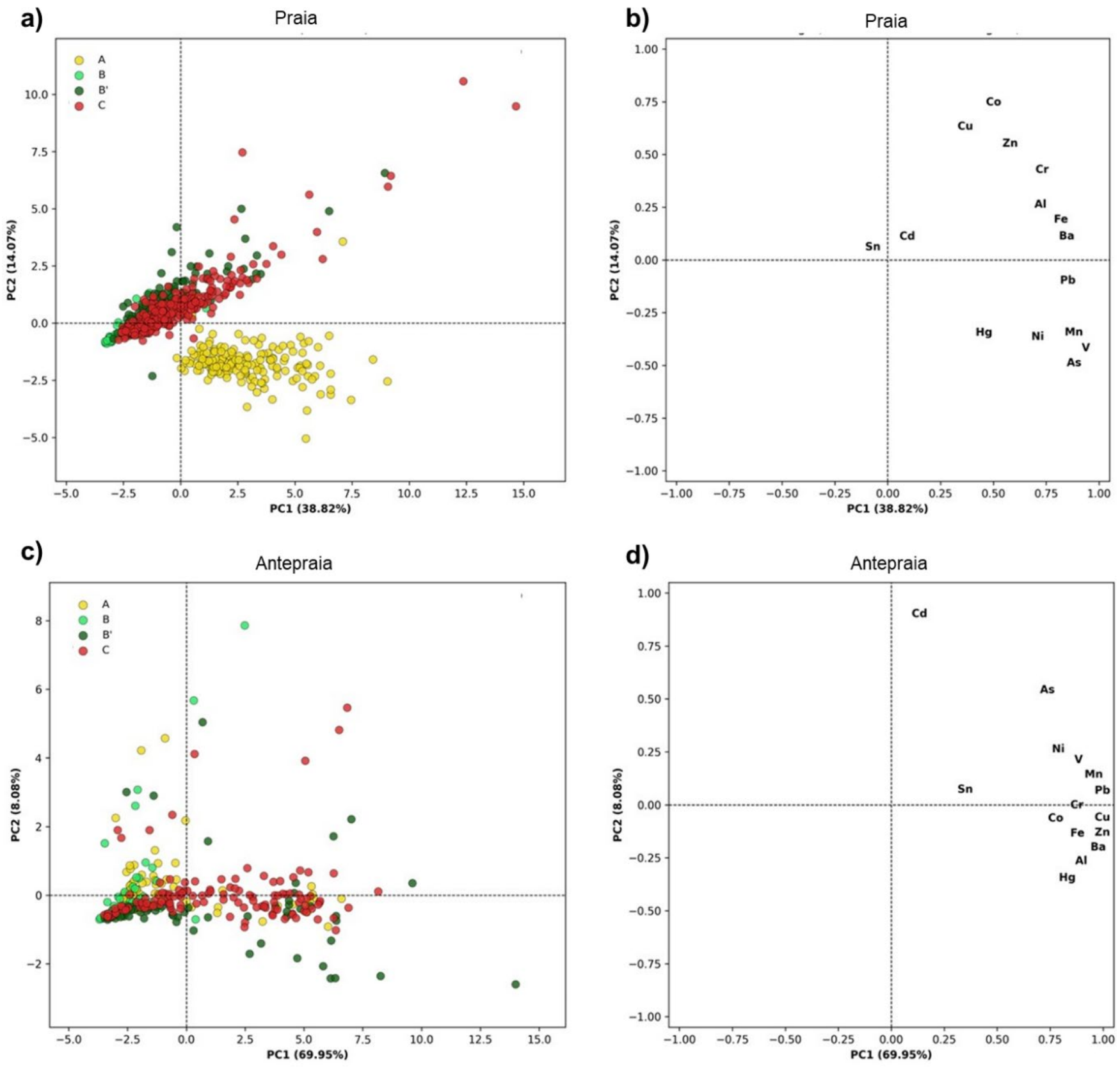
Quanto aos parâmetros ambientais, as análises indicam que a direção média das ondas (Dm) e a vazão do rio Doce apresentaram alterações entre os períodos pré- e pós-rompimento (Figura 5e). A Dm apresentou mudança significativa em sua distribuição, mas permaneceu predominantemente no quadrante leste, sem impacto relevante no transporte sedimentar. Os parâmetros Hs (altura significativa de onda) e Tp (período de pico) não apresentaram alterações relevantes, sugerindo que as mudanças na linha de costa não estão relacionadas a modificações no clima de ondas. Já a vazão média do rio Doce apresentou queda expressiva, passando de 888,3 m^3/s (pré-rompimento) para 545,38 m^3/s (pós-rompimento), indicando possível assoreamento da calha fluvial e redução da capacidade de transporte de sedimentos, cenário potencialmente agravado pela dispersão de lama associada ao MLD, que também pode ter interferido na mobilidade sedimentar da zona costeira.

Após o colapso da barragem, observou-se uma inversão na tendência da linha de costa na planície do rio Doce: o avanço anterior (balanço positivo) deu lugar a um recuo (balanço negativo). Esse fenômeno manifestou-se com maior intensidade na margem sul da foz e em extensas áreas do flanco norte da planície. A inversão dos padrões pode estar associada à redução da carga sedimentar fluvial, particularmente das frações mais grossas, ou à presença massiva do MLD, que compromete a redistribuição natural dos sedimentos na zona costeira. As tendências erosivas, sobretudo em **S7 Regência** e **N2**

Degredo, são alarmantes, com taxas que atingem até -9 m/ano, e representam risco real para populações costeiras, principalmente em áreas urbanizadas.

3.2.1 Concentração de elementos químicos no sedimento

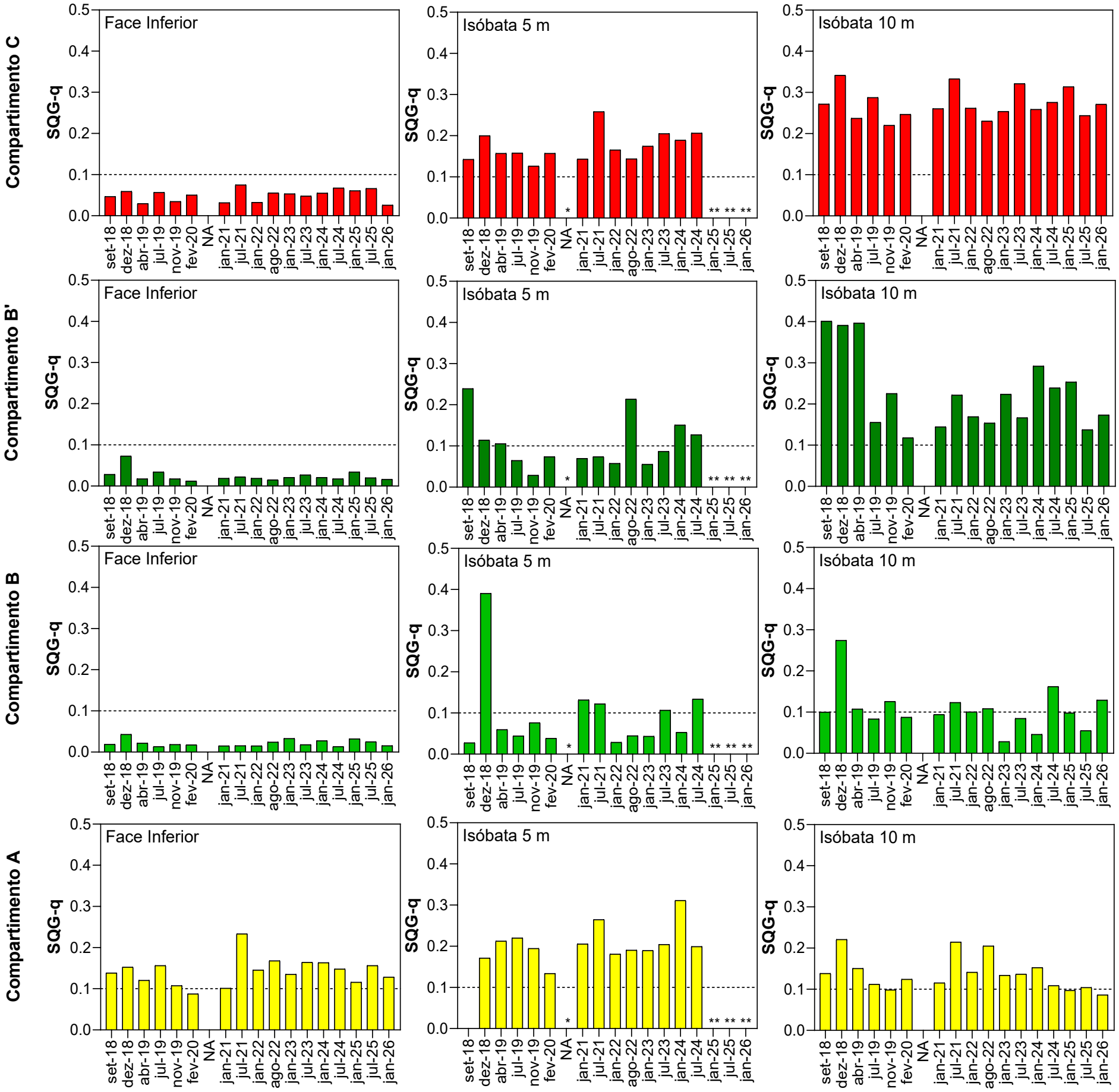
Figura 6: Gráfico de escores e pesos para PC1 e PC2 em função das concentrações dos elementos químicos nas amostras de sedimento da praia (***a*** e ***b***) e antepraia (***c*** ***e*** ***d***) ao longo de toda malha amostral; Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde claro, S4 a S5), B' (verde escuro, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6). Dados obtidos de setembro de 2018 a janeiro de 2026.



A análise de componentes principais (PCA), com a inclusão dos dados mais recentes da campanha de janeiro de 2026, confirma os padrões previamente reportados nos relatórios do PMBA/Fest-UFES quanto à distribuição espacial dos elementos químicos ao longo dos perfis praiais. Para a praia emersa (***a*** e ***b***), o Compartimento A apresenta maiores concentrações de As, Hg, Mn, Ni, Pb e V, enquanto, os Compartimentos B' e C apresentam teores mais expressivos dos elementos Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe e Zn.

Na antepraia (***c*** e ***d***), os Compartimentos B’ e C continuam exibindo teores expressivos de elementos químicos. Esse padrão é compatível com a influência da pluma do rio Doce, associada ao transporte litorâneo predominante para o norte. No Compartimento C, observa-se um agrupamento mais concentrado, indicando distribuição mais uniforme, associada aos processos de deposição e maior retrabalhamento dos sedimentos. Já no Compartimento B’, nota-se maior dispersão dos dados, sugerindo maior variabilidade na composição dos sedimentos, o que reflete a entrada direta de sedimentos contaminados, ainda pouco retrabalhados devido à proximidade imediata com a foz do rio.

Figura 7: Índice de contaminação do sedimento das praias baseado no SQG-q (do inglês *sediment quality guideline quotient*) obtido a partir das concentrações dos elementos químicos nos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde claro, S4 a S5), B' (verde escuro, 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 janeiro de 2026. *NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19. **NA: período não amostrado devido à exclusão da isóbata de 5 m após Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024, e sendo essa amostragem semestral, a última aconteceu em julho de 2024.



A avaliação espaço-temporal dos elementos químicos ao longo do período de monitoramento foi realizada por meio do índice *Sediment Quality Guideline Quotients* (SQG-q; Longhini *et al.*, 2022) que permite um diagnóstico qualitativo da condição de contaminação ambiental. A aplicação do SQG-q em ambientes praiais é relevante devido à ausência de valores de referência locais para a maioria dos elementos químicos, o que limita a utilização de índices consolidados.

Na **face praial**, os resultados obtidos ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES indicam que os sedimentos do Compartimento A mantém um padrão consistente ao longo da série temporal, com valores de SQG-q predominantemente acima de 0,1 sendo classificados como moderadamente impactados. Essa condição está fortemente associada aos elevados teores de As, elemento potencialmente tóxico cujos níveis são considerados críticos nesse ambiente. O compartimento A é caracterizado pela sua composição sedimentar predominantemente bioclástica, rica em carbonatos, além da ocorrência de afloramentos rochosos que limitam significativamente a troca de sedimentos. Essas particularidades morfodinâmicas e geoquímicas desempenham um papel determinante na retenção e acumulação de elementos químicos, contribuindo para a manutenção da classificação dos sedimentos como moderadamente contaminados. Em contraste, os Compartimentos B, B' e C apresentam maior mobilidade sedimentar e dinâmica costeira mais ativa, especialmente na zona emersa, favorecendo processos naturais de autodepuração. Essa maior capacidade de transporte e modificação do perfil praial atua como fator mitigador da concentração de contaminantes, justificando a classificação dessas áreas como não impactadas ao longo do período avaliado. Na campanha mais recente, realizada em janeiro de 2026, observa-se uma leve redução nos valores do índice em relação à campanha anterior (julho de 2025). No entanto, essa variação não altera o padrão de classificação do SQG-q ao longo da série temporal. Dessa forma, a campanha de janeiro de 2026 indica apenas oscilações pontuais dentro da variabilidade histórica do ambiente, sem alterações na tendência geral de contaminação.

Nas **isóbatas de 5 metros** do Compartimento A se observa uma persistência de valores de SQG-q acima de 0,1, classificando este setor como moderadamente impactado. Esse comportamento reflete condições semelhantes às da face praial em termos morfodinâmicos e geoquímicos. Os Compartimentos B e B' apresentam maior variabilidade nos valores de SQG-q, alternando entre as classificações de não impactado e moderadamente impactado. Esse padrão sugere um comportamento cíclico característico de uma contaminação crônica que pode ter origem na bacia hidrográfica do rio Doce. Essa dinâmica é mais evidente no Compartimento B', cuja proximidade com a desembocadura do rio o torna mais suscetível às variações hidrológicas e demais influências da bacia. O Compartimento C, por sua vez, permaneceu moderadamente impactado ao longo de todo o monitoramento, com valores de SQG-q consistentemente superiores a 0,1. Esse padrão indica uma condição estável, com menor amplitude de variação em comparação aos Compartimentos B e B', sugerindo processos contínuos de deposição e retrabalho sedimentar associados a dinâmica costeira. A ausência de dados da isóbata de 5 metros no período de 2025-2026 limita parcialmente a avaliação da evolução temporal desses padrões, podendo influenciar a interpretação dos processos dinâmicos e dos impactos na região.

Nas **isóbatas de 10 metros,** os Compartimentos A e B apresentam valores de SQG-q relativamente mais baixos, em geral próximos ao limiar de 0,1, com oscilações ao longo do tempo e sem tendência temporal bem definida. Esses compartimentos alternam entre as classificações de não impactado e moderadamente impactado, mantendo um comportamento variável ao longo do monitoramento. Em contraposição, os Compartimentos B' e C exibem valores significativamente superior em relação aos demais compartimentos. Ambos foram classificados como moderadamente impactados em 100% da série temporal, evidenciando um padrão persistente de contaminação. Os dados de janeiro de 2026, reforçam que esses dois compartimentos continuam representando as áreas com maiores níveis relativos de impacto em toda a área de estudo.

Quadro 1: 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). Dados obtidos de setembro de 2018 a janeiro de 2026. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19; ADP: Acima dos dados pretéritos. * A partir do Ano 7, a isóbata de 5 metros foi excluída do escopo de monitoramento e, portanto, não foi considerada no cálculo das médias.

a) Praia emersa	**Ano 1**				**Ano 2**			**Ano 3**		**Ano 4**		**Ano 5**		**Ano 6**		**Ano 7***		**Ano 8***
	Chuvoso		**Seco**		**Chuvoso**		**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**
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**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A																		
B																		
B'																		
C																		

b) Antepraia	**Ano 1**				**Ano 2**			**Ano 3**		**Ano 4**		**Ano 5**		**Ano 6**		**Ano 7***		**Ano 8***
	Chuvoso		**Seco**		**Chuvoso**		**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**
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**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A																		
B																		
B'																		
C																		

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

A avaliação da qualidade dos sedimentos utilizando o índice SQG-Q, embora seja uma ferramenta útil para a classificação da qualidade, apresenta algumas limitações, pois pode ser aplicada apenas a elementos com dados de PEL (Probable Effect Level), não abrangendo certos elementos associados ao MLD e desconsiderando valores de referência regionais. Como o ferro (Fe) não é contemplado por esse índice, foram utilizados dados regionais para avaliar a frequência de ocorrência de amostras com concentrações superiores aos dados pretéritos. Essa frequência foi estabelecida com base em dados de um estudo conduzido por Mirlean *et al.* (2013). As amostras de sedimentos analisadas foram coletadas pelos autores nos meses de outubro e dezembro de 2011, antes do Rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 2015. O valor de referência foi obtido a partir das medianas das concentrações desse elemento no litoral do estado do Espírito Santo, tanto na praia emersa quanto na antepraia.

Os sedimentos dos compartimentos foram classificados conforme a frequência de amostras com concentrações acima dos dados pretéritos (ADP), sendo agrupados nas seguintes categorias: não alterado; <25% ADP; ≥25% ADP; ≥50% ADP; ≥75% ADP; e 100% ADP. Nesse contexto, a categoria <25% ADP indica que menos de 25% das amostras do compartimento apresentam valores acima do valor de referência, e assim sucessivamente para as demais categorias. Essa análise permite avaliar a magnitude das alterações nas concentrações dos elementos em relação aos níveis observados antes do Rompimento da Barragem, proporcionando uma maior compreensão dos impactos ambientais na região.

Na **praia emersa** (a), de forma geral, os dados indicam diferenças marcantes entre os compartimentos. O Compartimento A apresenta, ao longo de praticamente todo o monitoramento, 100% das amostras com concentrações de Fe acima dos níveis pretéritos, evidenciando um padrão persistente de alteração. Em contraste, no Compartimento B predominam amostras sem alterações na maior parte das campanhas, exceto por um evento isolado em janeiro de 2025. Esse padrão indica baixa ocorrência de enriquecimento em relação ao dado pretérito, de caráter pontual e não persistente. O Compartimento B’ representa a condição mais intermediária e dinâmica da área de estudo, com oscilações frequentes entre ausência de alteração e alteração moderada (≥25% ADP), funcionando como um compartimento de transição, mais instável e variável ao longo do tempo. Já o Compartimento C também se destaca por manter amostras

persistentemente alteradas, semelhante ao padrão observado em A, embora com maior variabilidade relativa ao longo da série. Na campanha de janeiro de 2026, se observa, em parte, a manutenção desse padrão. No entanto, os Compartimentos B' e C apresentam redução expressiva na frequência de ocorrência (<25% ADP), indicando uma quebra pontual no comportamento historicamente elevado desses compartimentos.

Na **antepraia** (b), todos os compartimentos apresentam algum nível de alteração nas suas amostras. De forma geral, B' e C concentram as maiores frequências de alteração ao longo de toda a série. Na campanha de janeiro de 2026, os valores elevados em B' e C reforçam um impacto ambiental significativo e persistente nesses dois compartimentos. Em contraste, o Compartimentos A vem se mostrando sem alterações nas três campanhas mais recentes, fato que pode estar associado à não amostragem da isóbata de 5 m nesse período.

Quadro 2: 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). Dados obtidos de setembro de 2018 a janeiro de 2026. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19; ADP: Acima dos Dados Pretéritos. * A partir do Ano 7, a isóbata de 5 metros foi excluída do escopo de monitoramento e, portanto, não foi considerada no cálculo das médias.

a) Praia emersa	**Ano 1**				**Ano 2**			**Ano 3**		**Ano 4**		**Ano 5**		**Ano 6**		**Ano 7***		**Ano 8***
	Chuvoso		**Seco**		**Chuvoso**		**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**
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**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A																		
B																		
B'																		
C																		

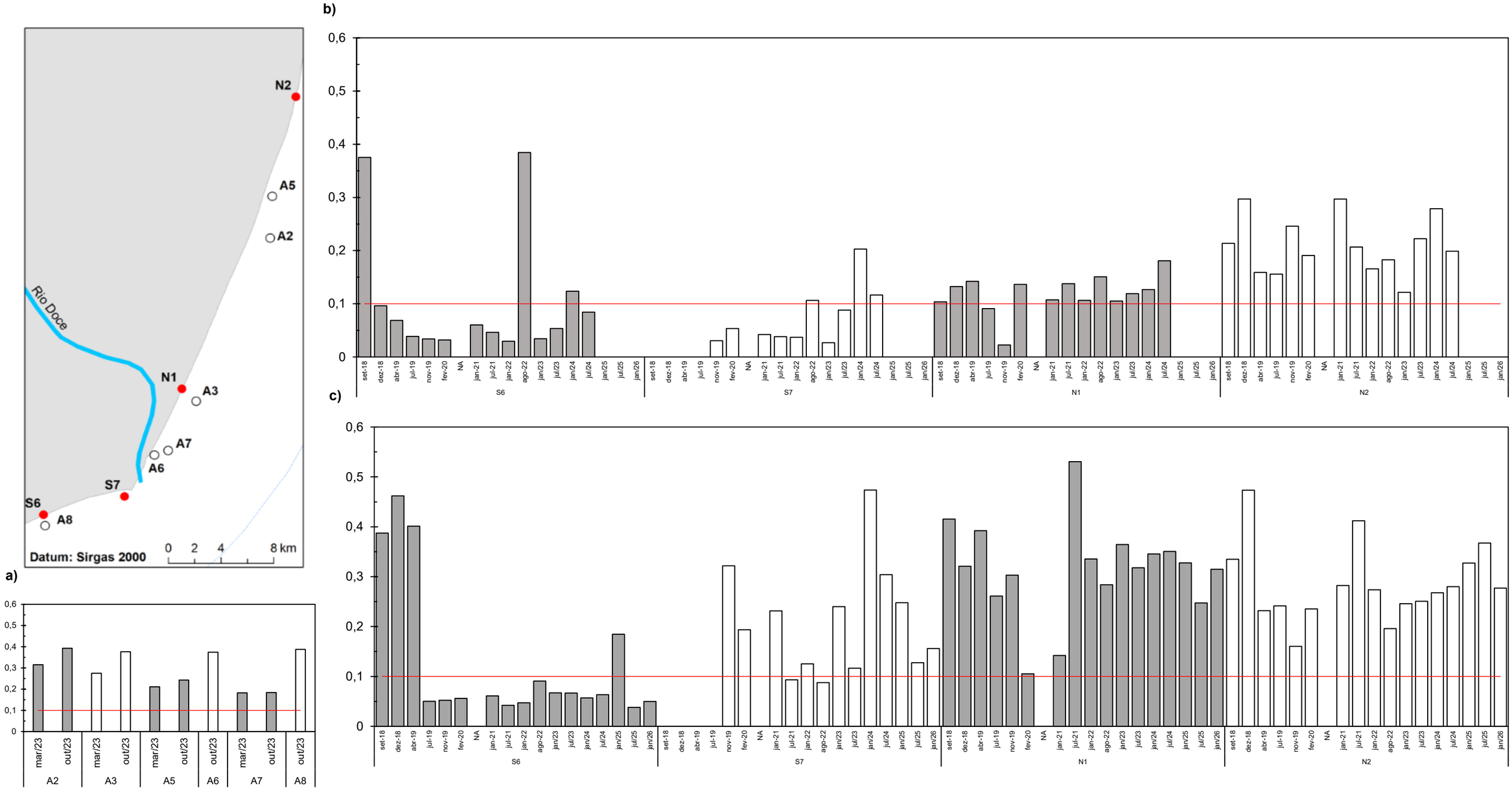
b) Antepraia	**Ano 1**				**Ano 2**			**Ano 3**		**Ano 4**		**Ano 5**		**Ano 6**		**Ano 7***		**Ano 8***
	Chuvoso		**Seco**		**Chuvoso**		**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**	**Seco**	**Chuvoso**
Compartimento	**set/18**	**dez/18**	**abr/19**	**jul/19**	**dez/19**	**fev/20**	**NA**	**jan/21**	**jul/21**	**jan/22**	**ago/22**	**jan/23**	**Jul/23**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A																		
B																		
B'																		
C																		

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

Considerando que o elemento As tem um peso significativo no cálculo do índice SQG-q e apresenta uma forte correlação com outros elementos relevantes, também foi realizada a comparação com os dados pretéritos para esse elemento, conforme detalhado na legenda expandida do Quadro 2. Na **praia emersa** (***a***), se observa um contraste entre os compartimentos em relação ao As. O Compartimento A apresenta, de forma consistente, concentrações de As no nível mais elevado da classificação de alteração (100% ADP), indicando que todas as amostras deste compartimento excedem os valores históricos de referência. Esse padrão indica um impacto ambiental significativo e persistente ao longo dos anos, corroborando as evidências previamente apontadas pelo índice SQG-q. Por outro lado, os Compartimentos B e B' permanecem predominantemente sem alterações ao longo de toda a série, com registros pontuais pouco expressivos. Já o Compartimento C apresenta oscilações no número de amostras alteradas ao longo do tempo, embora todas as campanhas indicaram a presença de alterações. Na campanha de janeiro de 2026, esse padrão se mantém, o Compartimento A 100% alterado, B e B' sem alterações, e C apresentando redução pontual (< 25% ADP), sem modificar a tendência geral observada ao longo do monitoramento.

Na **antepraia** (***b***), a maioria das amostras não apresenta alterações ao longo do tempo, apenas com variações pontuais observadas esporadicamente nos diferentes compartimentos. Como destaque, nas últimas três campanhas não foram registradas alterações em nenhum dos compartimentos.

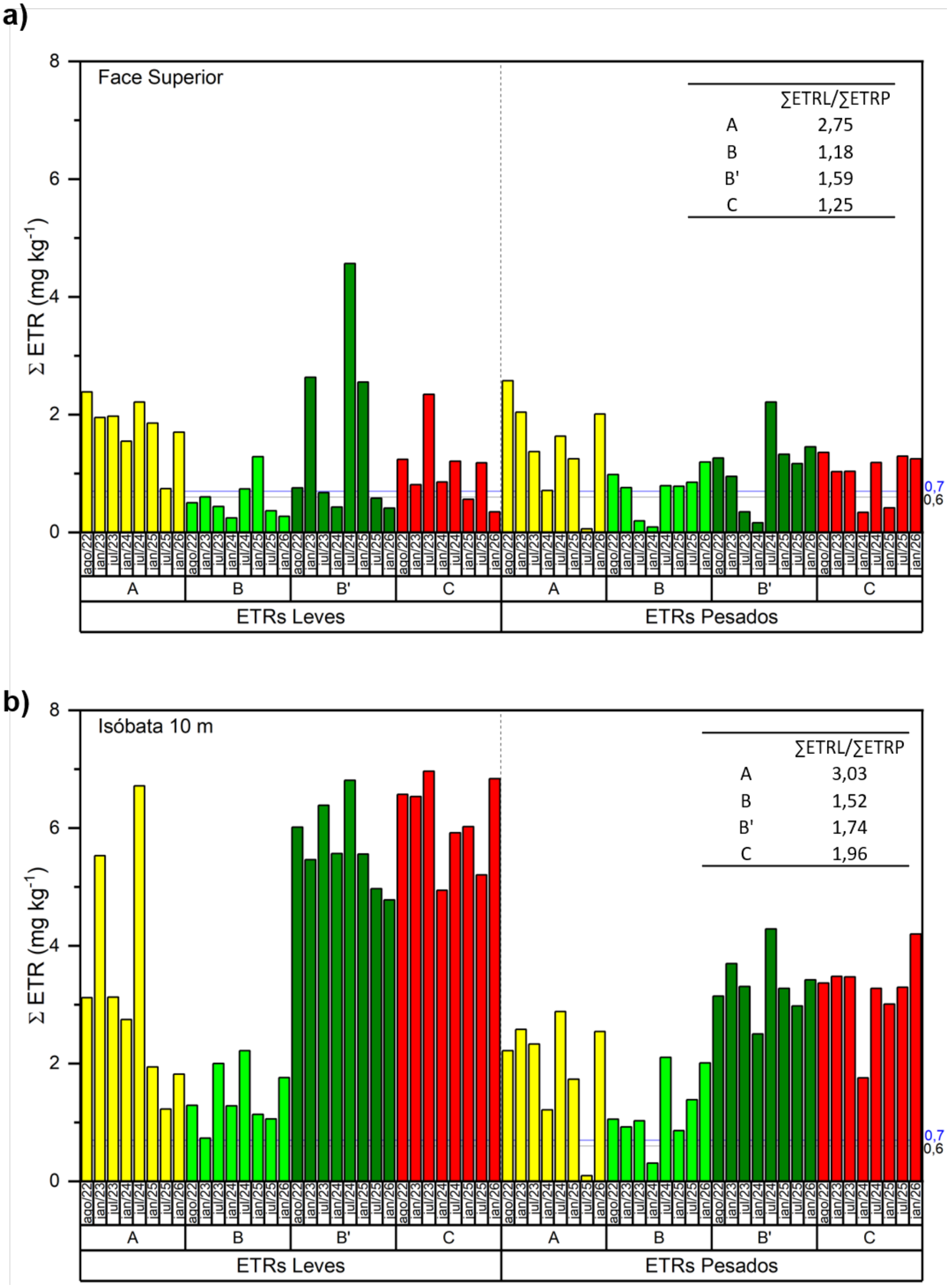
Figura 8: Índice de contaminação do sedimento das praias baseado no SQG-q (do inglês Sediment Quality Guideline Quotient), obtido para os sedimentos coletados na área de maior deposição de lama, região da antepraia adjacente à desembocadura do rio Doce. As amostras A2, A3, A5, A6, A7 e A8 foram coletadas excepcionalmente durante as campanhas de mapeamento batimétrico e distribuição de lama realizadas em março e outubro de 2023 **(a)**. As estações S6, S7, N1 e N2 fazem parte do monitoramento semestral das praias tanto a 5 metros **(b)** como a 10 metros **(c)** de profundidade no período de setembro de 2018 a janeiro de 2026.



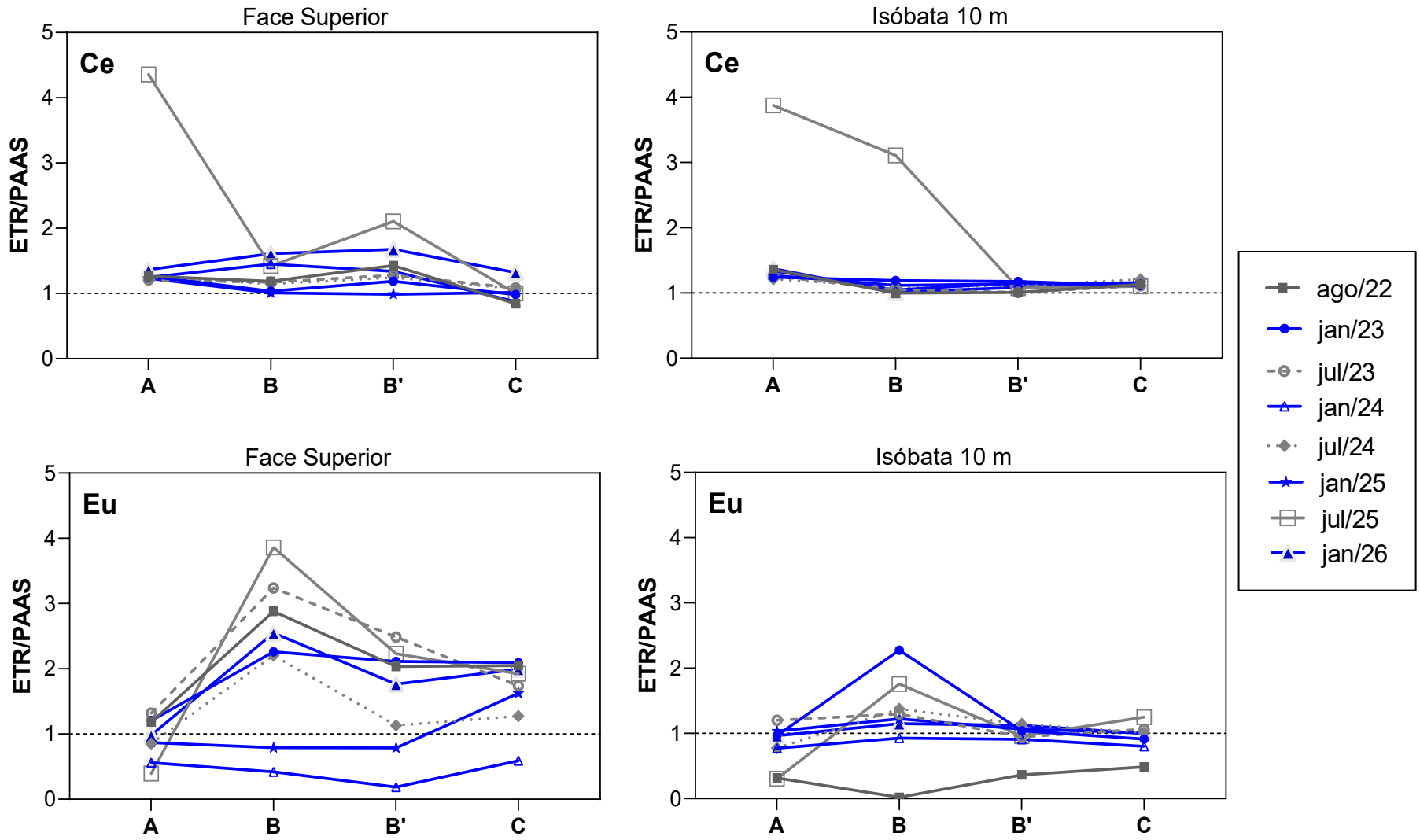
As amostras dos perfis que abrangem a área de maior concentração de lama nas adjacências da desembocadura do rio Doce (S6, S7, N1, N2) foram utilizadas para comparação com os resultados dos levantamentos realizados em março e outubro de 2023. As amostras coletadas durante o levantamento das áreas de maior concentração de lama (A2, A3, A5, A6, A7, A8) apresentam índices superiores a 0,1, indicando contaminação moderada. A amostra A8, localizada próxima à estação S6, encontra-se em área de ocorrência de fundo lamoso além da isóbata de 10 m (Figura 3) e apresenta valores de SQG-q mais altos que as observadas em S6 durante as campanhas semestrais. Os demais pontos apresentam índices compatíveis com os das estações amostrais do monitoramento semestral, sendo que os maiores valores de índice são encontrados em A2, A3, A6 e A8 em outubro de 2023. Nos anos de 2024 a 2026, não foram realizadas novas campanhas de coleta de sedimentos em conjunto com o mapeamento batimétrico.

3.2.2 Normalização de Elementos de Terras Raras (ETR) em sedimento

Figura 9: Perfil de distribuição do somatório dos elementos terras raras leves (∑ ETRL de La a Eu) e pesados (∑ ETRP de Dy a Lu) para face superior (***a***) e para a isóbata de 10 metros (***b***), normalizados pelo Folhelhos Pós Arqueano - PAAS (do inglês Post Archean Australian Shale), no sedimento marinho. O padrão de comportamento dos elementos terras raras (ETR) foi analisado nas estações amostrais dos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde claro, S5), B' (verde escuro, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6). Avaliação de ocorrência das anomalias de Cério (Ce) (***c***) e Európio (Eu) (***d***) ao longo das estações amostrais. Dados obtidos no período de agosto de 2022 a janeiro de 2026. Como referência regional, foram utilizados os valores reportados por Cagnin *et al.* (2024) para sedimentos do rio do Carmo (MG), correspondentes a 0,7 mg kg⁻¹ para ∑ETRL (La–Eu) e 0,6 mg kg⁻¹ para ∑ETRP (Dy–Lu).



c)



d)

O **somatório dos elementos terras raras (∑ETR)** constitui um importante indicador de variações nos fluxos sedimentares e na assinatura geoquímica ambiental. Os dados normalizados pelo PAAS indicam maiores concentrações de ETRs na isóbata de 10 m em comparação à face praial. Além disso, de forma geral, se observa o predomínio de ETRL em relação aos ETRP nos diferentes compartimentos, indicando enriquecimento em relação ao padrão da crosta e possível influência de aporte terrígeno. Esse padrão é ainda mais evidente nos compartimentos B' e C, que apresentam os maiores valores de ∑ETR, podendo estar associado à maior deposição de frações granulométricas finas, que favorecem a adsorção e coprecipitação dos ETRs em fases como oxi/hidróxidos de Fe e Mn.

Outra forma de evidenciar variações na distribuição dos ETR ao longo dos compartimentos é pela relação entre ETRL e ETRP, expressa pela razão ∑ETRL/∑ETRP. A razão desses elementos reflete a atuação conjunta da pluma fluvial e dos processos hidrodinâmicos costeiros na redistribuição dos sedimentos em toda a área de estudo. No compartimento A, ao sul da foz, observam-se os maiores valores de ∑ETRL/∑ETRP tanto na face quanto na isóbata, indicando forte enriquecimento em ETR leves em relação aos demais compartimentos. Esse padrão sugere que o setor atua como importante zona de retenção de sedimentos finos transportados pela pluma fluvial, favorecida pelas correntes atuantes e por menores trocas transversais. Neste compartimento, o enriquecimento de ETR leves pode também estar sendo influenciado pelo grupo barreiras, em razão da composição mineralógica desses depósitos e do aporte contínuo de material intemperizado. No compartimento B, as menores razões indicam possível empobrecimento em ETRL. Esse comportamento está associado à tipologia praial refletiva, caracterizada por sedimentos mais grossos, alta permeabilidade e elevada energia de ondas. Essas condições favorecem a retirada de frações finas e podem reduzir a disponibilidade de superfícies reativas, como oxi/hidróxidos de Fe e Mn, às quais os ETRL tendem a se associar. O compartimento B', localizado na foz do rio Doce, representa a principal zona de mistura entre aporte fluvial e retrabalhamento sedimentar costeiro, resultando em um perfil geoquímico menos contrastante entre face de praia e antepraia. A proximidade com a desembocadura implica aporte contínuo de sedimentos continentais com mistura de frações finas e minerais pesados transportados ao longo da bacia hidrográfica. No compartimento C, a razão ∑ETRL/∑ETRP indica um sistema fortemente controlado pela deriva litorânea e caracterizado por alta mistura sedimentar, porém com segregação entre a face de praia e a isóbata de 10 m. Os valores relativamente mais baixos observados na face de praia sugerem intensa troca transversal de sedimentos, na qual ocorre seleção hidráulica com remoção preferencial das frações mais finas geralmente associadas aos ETRL, enquanto o aumento na isóbata de 10 m pode indicar maior retenção dessas frações finas em ambientes de menor energia.

Uma outra forma de avaliar o aporte de ETR consiste na análise das variações em relação aos valores de referência, as quais podem indicar alterações naturais ou influências antrópicas recentes. Devido à ausência de séries históricas da área de estudo e de diretrizes normativas específicas para ETR em ambientes costeiros, utilizaram-se os dados de Cagnin *et al.* (2024) como referência. Os autores analisaram sedimentos de testemunhos do rio do Carmo (MG), importante fornecedor de água para o rio Doce. Foram reportados valores de 0,7 mg kg^{-1} para o somatório dos elementos terras raras leves (∑ETRL; La a Eu) e de 0,6 mg kg^{-1} para o somatório dos elementos terras raras pesados (∑ETRP; Dy a Lu). Esses dados fornecem um parâmetro de comparação relevante para a avaliação dos níveis de ETR no sistema costeiro estudado. De forma geral, os resultados indicam enriquecimento de ∑ETRL e ∑ETRP em relação a registros pretéritos, tanto na isóbata de 10 m quanto na face praial.

Além da avaliação das concentrações totais de ETR e das razões ∑ETRL/∑ETRP, a verificação das anomalias de Eu e Ce permitiu investigar possíveis variações geoquímicas nos compartimentos analisados. Com relação às anomalias de Ce, houve predominância de anomalias positivas (>1) em todas as campanhas, tanto na face superior quanto na isóbata de 10 metros. As anomalias positivas de Ce estão associadas a deposição desses elementos no

sedimento na forma de complexos de oxi/hidróxidos de ferro, manganês ou alumínio. Em relação as anomalias de Eu, houve a predominância de anomalias positivas (>1) na face superior dos compartimentos, enquanto em janeiro de 2024 e janeiro de 2025, as anomalias negativas (<1) foram mais prevalentes. Enquanto na isóbata de 10 m, entre agosto de 2022 e janeiro de 2026, as anomalias permaneceram predominantemente positivas e próximas de 1. Anomalias positivas de Eu podem estar associadas à contribuição de minerais ricos em feldspatos ou ao aporte de material terrígeno menos intemperizado. Já anomalias negativas podem indicar maior grau de intemperismo, retrabalhamento sedimentar ou fracionamento geoquímico dos ETR.

Esse comportamento geoquímico foi igualmente observado na campanha de janeiro de 2026, a qual manteve o padrão identificado ao longo da série temporal, sem alterações significativas na distribuição dos ETR e no comportamento das anomalias de Ce e Eu entre os compartimentos. Assim, os resultados reforçam a continuidade do comportamento geoquímico observado ao longo do monitoramento.

3.2.3 Concentração de elementos químicos na água

Quadro 3: Valores do Índice de Qualidade da Água (CWQI - Canadian Water Quality Index) para elementos químicos em água de fundo das isóbatas 5 e 10 m. Índice obtido a partir dos valores de referência da Resolução CONAMA n° 357 para águas salinas de classe 1 (***a***). Índice obtido a partir dos valores de referência da Resolução CONAMA n° 357, em conjunto com os dados da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) para todos os elementos químicos (***b)*** e apenas para os elementos Al, Cu, Fe e Mn (***c***). Dados obtidos no período de agosto de 2022 a janeiro de 2026. * A partir do Ano 7, a isóbata de 5 metros foi excluída do escopo de monitoramento e, portanto, não foi considerada no cálculo das médias.

a)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5		Ano 6		Ano 7*		Ano 8*
	Chuvoso		Seco		Chuvoso	Seco		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
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**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A											97,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100
B											100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100
B'											100,0	97,1	98,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100
C											98,1	98,0	97,9	94,6	100,0	100,0	100,0	100

b)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5		Ano 6		Ano 7*		Ano 8*
	Chuvoso		Seco		Chuvoso	Seco		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
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**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A											95,1	97,6	92,4	95,2	99,3	100,0	97,6	97,1
B											93,9	98,0	94,8	95,9	100,0	100,0	100,0	100
B'											96,1	94,2	92,0	98,4	100,0	98,6	100,0	100
C											92,3	91,0	89,1	88,0	96,6	94,5	96,0	93,8

c)	Ano 1				Ano 2			Ano 3		Ano 4		Ano 5		Ano 6		Ano 7*		Ano 8*
	Chuvoso		Seco		Chuvoso	Seco		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
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**	**jan/24**	**jul/24**	**jan/25**	**jul/25**	**jan/26**
A											76,8	90,3	70,3	79,1	96,6	100,0	88,3	87,1
B											74,1	89,8	75,8	79,4	100,0	100,0	100,0	100
B'											81,4	78,9	70,8	92,3	100,0	93,1	100,0	100
C											71,8	71,7	66,0	66,2	84,7	75,3	81,7	74,3

Pobre 0-44 | Marginal 45-64 | Razoável 65-79 | Bom 80-94 | Excelente 95-100 | Não amostrado

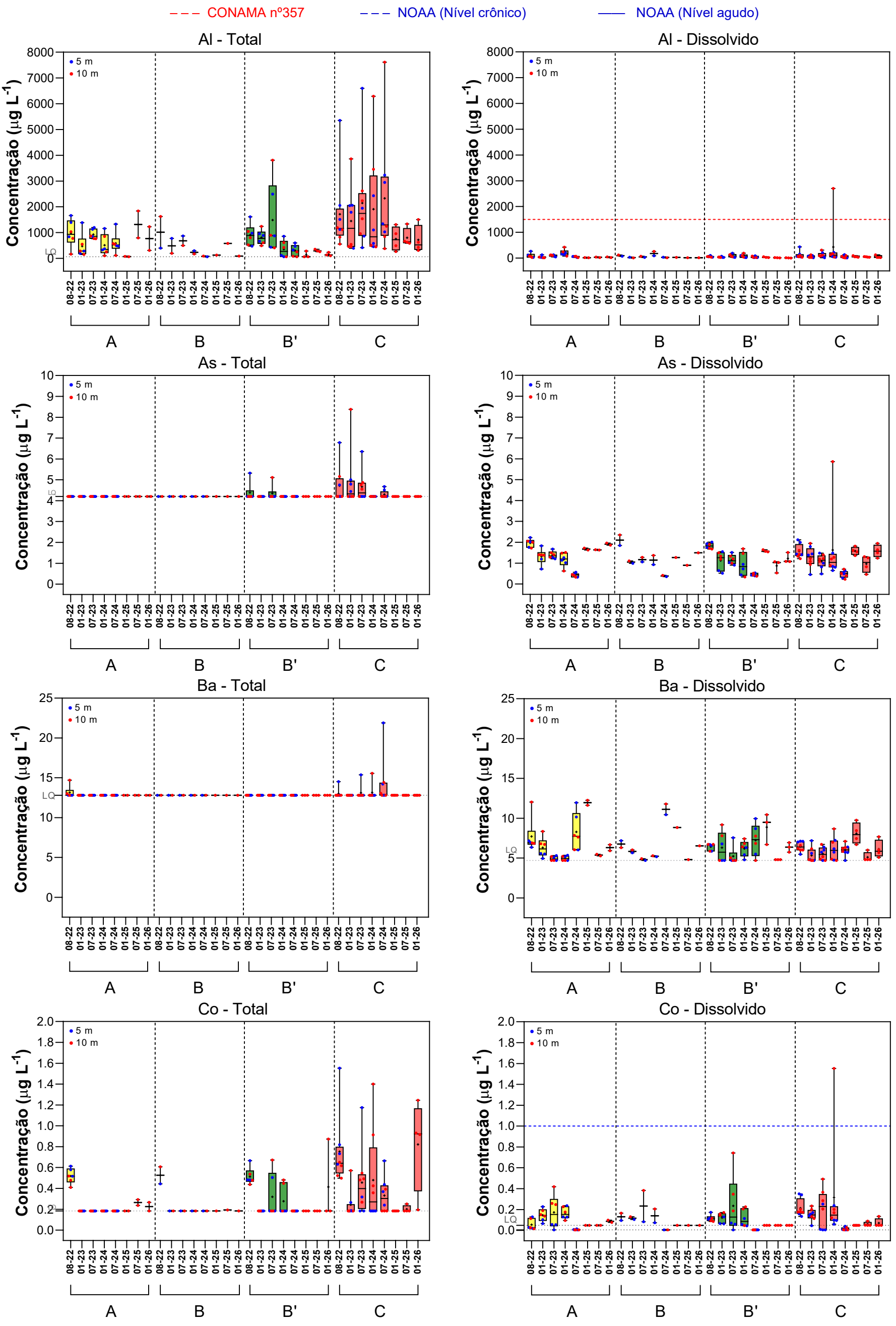
Com base nos valores do Índice de Qualidade da Água (CWQI - Canadian Water Quality Index) obtidos a partir da Resolução CONAMA n° 357 para águas salinas de classe 1 (***a***), se observa que todos os compartimentos mantiveram, ao longo de todas as campanhas, qualidade classificada como excelente (CWQI > 95). Apesar dessa classificação elevada e consistente, o compartimento C apresentou maior variabilidade nos valores do índice, com quedas mais acentuadas em relação aos demais, atingindo valor mínimo de 94,6 durante o período chuvoso do Ano 6. A partir desse período, é possível observar recuperação, com estabilização dos valores próximos de 100 nas campanhas subsequentes. Esse comportamento indica que, enquanto os compartimentos A, B e B’ apresentam elevada estabilidade na qualidade da água, o compartimento C demonstra maior sensibilidade às variações ambientais, embora sem comprometer sua classificação geral. Na campanha mais recente (janeiro de 2026), todos os compartimentos atingem valores de CWQI iguais a 100, reforçando a condição de excelente qualidade e a tendência de estabilização observada nos anos mais recentes.

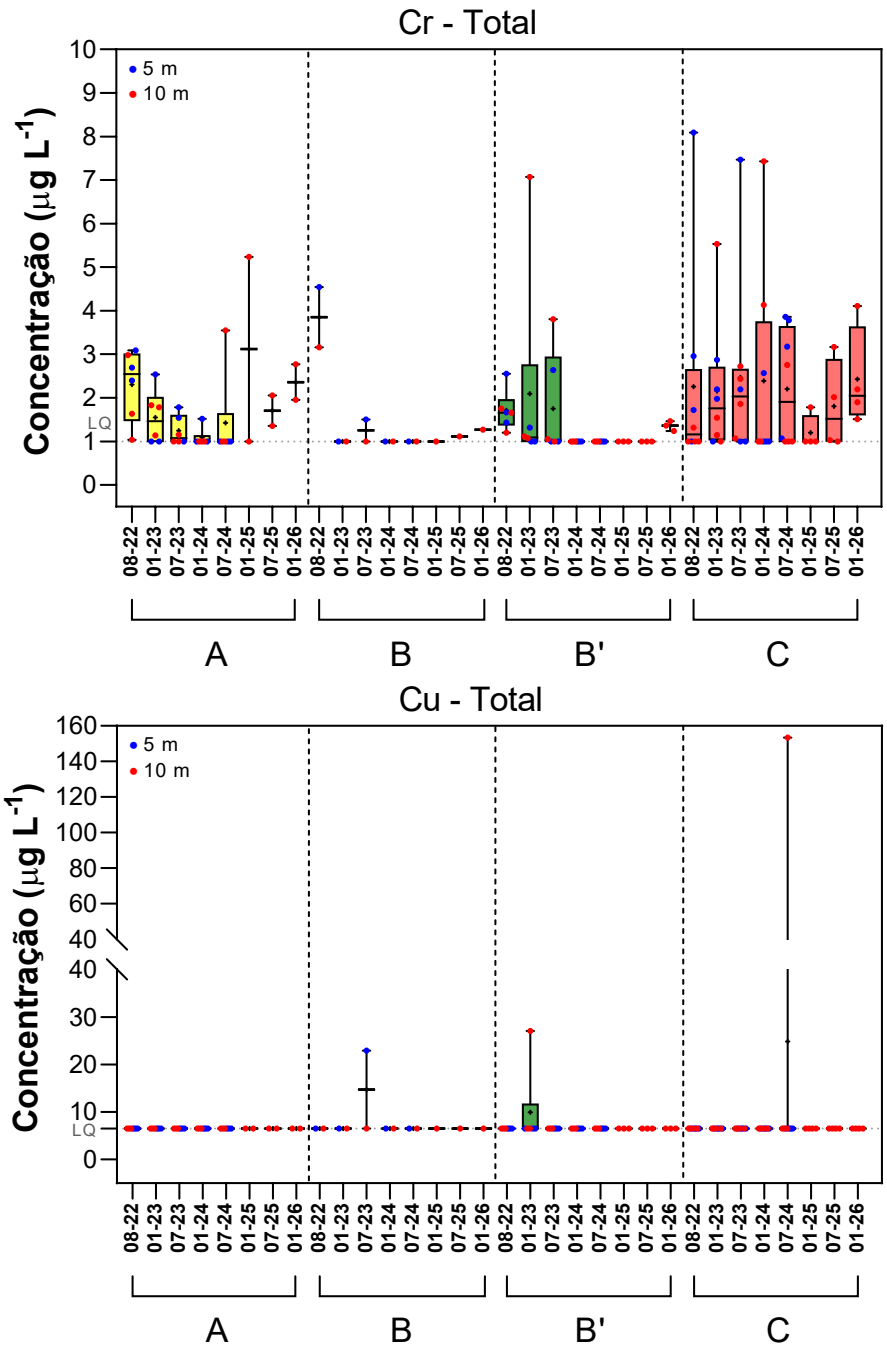
No quadro ***b***, o índice CWQI foi calculado a partir da integração das diretrizes da Resolução CONAMA com os parâmetros estabelecidos pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), resultando em uma avaliação mais abrangente da qualidade da água. De forma geral, todos os compartimentos permaneceram classificados entre boa e excelente qualidade ao longo das campanhas, porém com valores sistematicamente inferiores aos observados no quadro ***a***. Essa redução está associada ao maior número de parâmetros considerados, o que torna a análise mais criteriosa e, por consequência, pode gerar classificações mais restritivas. Nesse contexto, o compartimento C continua se destacando por apresentar os menores valores do índice ao longo do monitoramento, especialmente entre 2022 e 2024, evidenciando maior variabilidade e suscetibilidade ambiental. Ainda assim, os valores permanecem dentro de faixas consideradas satisfatórias (bom e excelente). Na campanha de janeiro de 2026, observa-se a manutenção desse padrão, com todos os compartimentos classificados como boa a excelente qualidade, destacando-se os compartimentos B e B’ com valores máximos (100), enquanto A e C apresentam valores ligeiramente inferiores (97,1 e 93,8, respectivamente), reforçando a maior variabilidade do compartimento C.

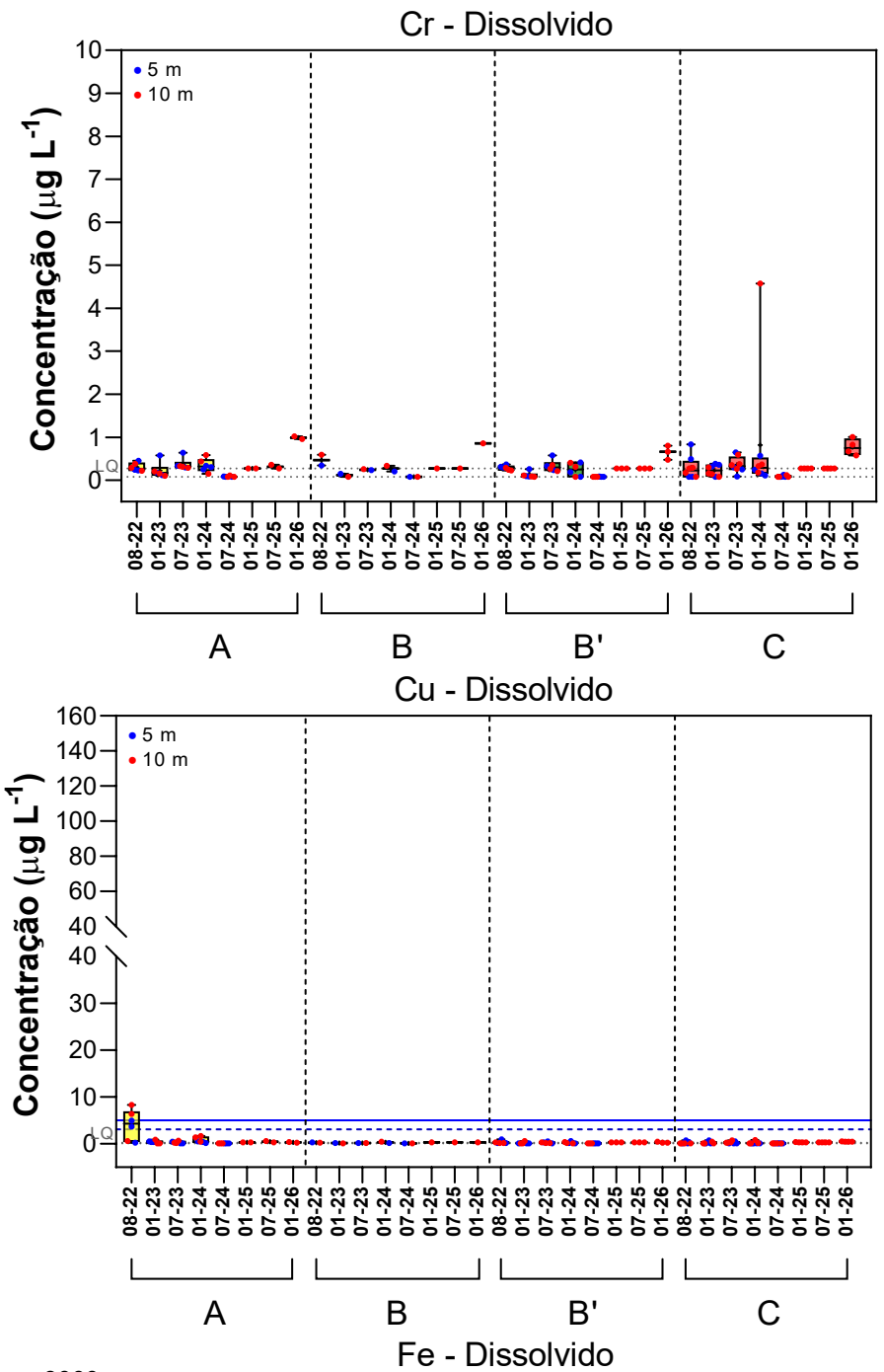
No quadro ***c***, quando apenas os elementos Al, Cu, Fe e Mn na fração dissolvida são considerados no cálculo, os padrões de qualidade podem sofrer alterações significativas. O CWQI, por ser sensível ao conjunto de parâmetros utilizados, tende a apresentar valores mais elevados quando um maior número de variáveis é incluído, podendo diluir o efeito de elementos importantes. Como resultado, os valores de CWQI são significativamente inferiores aos observados nos quadros anteriores, com classificações predominantes entre razoável e boa qualidade, especialmente nas campanhas iniciais. Observa-se também maior variabilidade temporal, com tendência de melhora a partir de 2024, embora sem completa estabilização. Os compartimentos A, B e B’ apresentam evolução mais evidente, alcançando valores elevados nas campanhas mais recentes. Em contraste, o compartimento C permanece como o mais crítico, com valores consistentemente

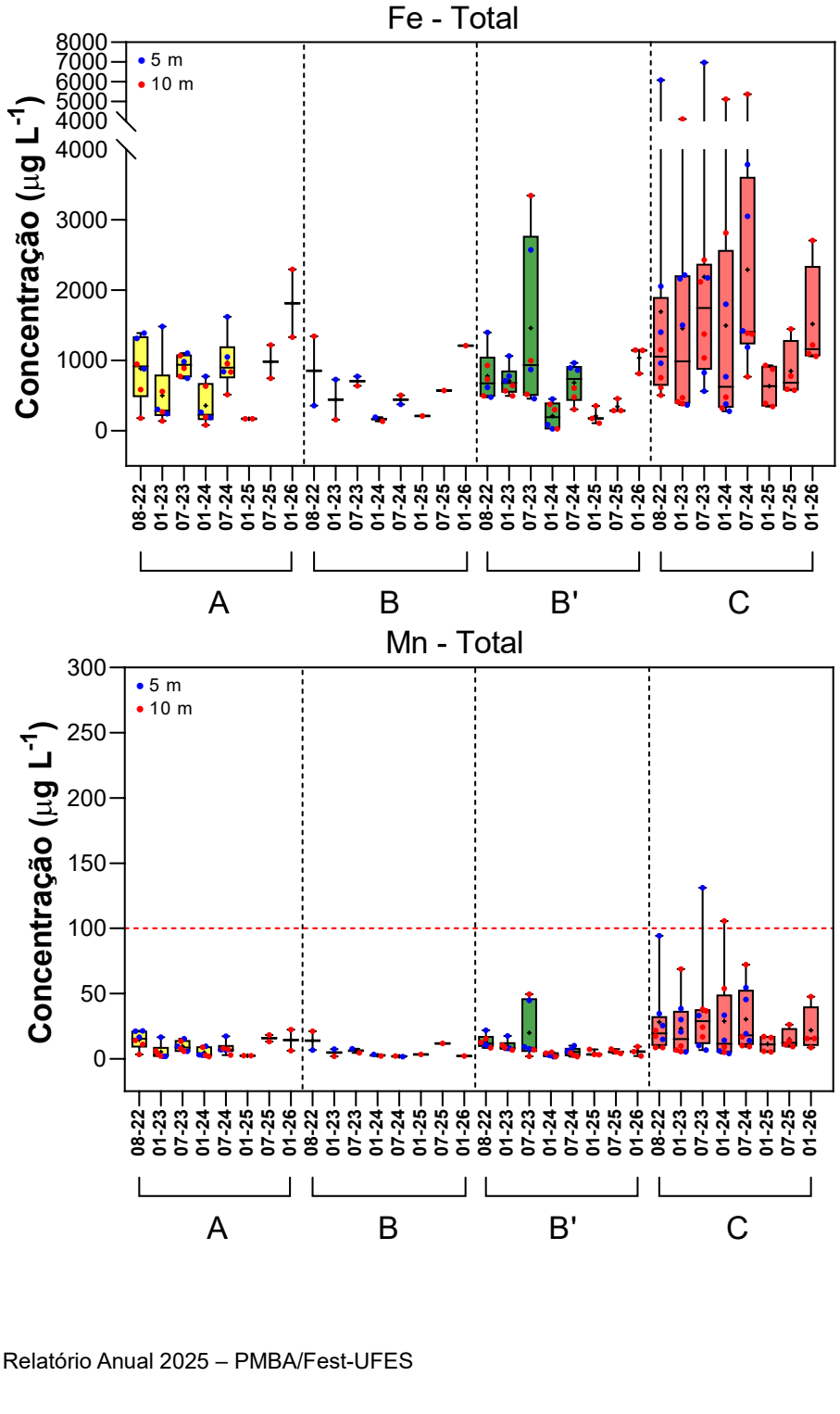
inferiores e maior amplitude de variação ao longo do período. Na campanha de janeiro de 2026, essa tendência se mantém, com os compartimentos A, B e B’ apresentando valores elevados, mantendo classificação entre boa e excelente, enquanto o compartimento C registra valor de 74,3, retornando à faixa de qualidade razoável e reforçando sua maior sensibilidade e persistência como área mais impactada.

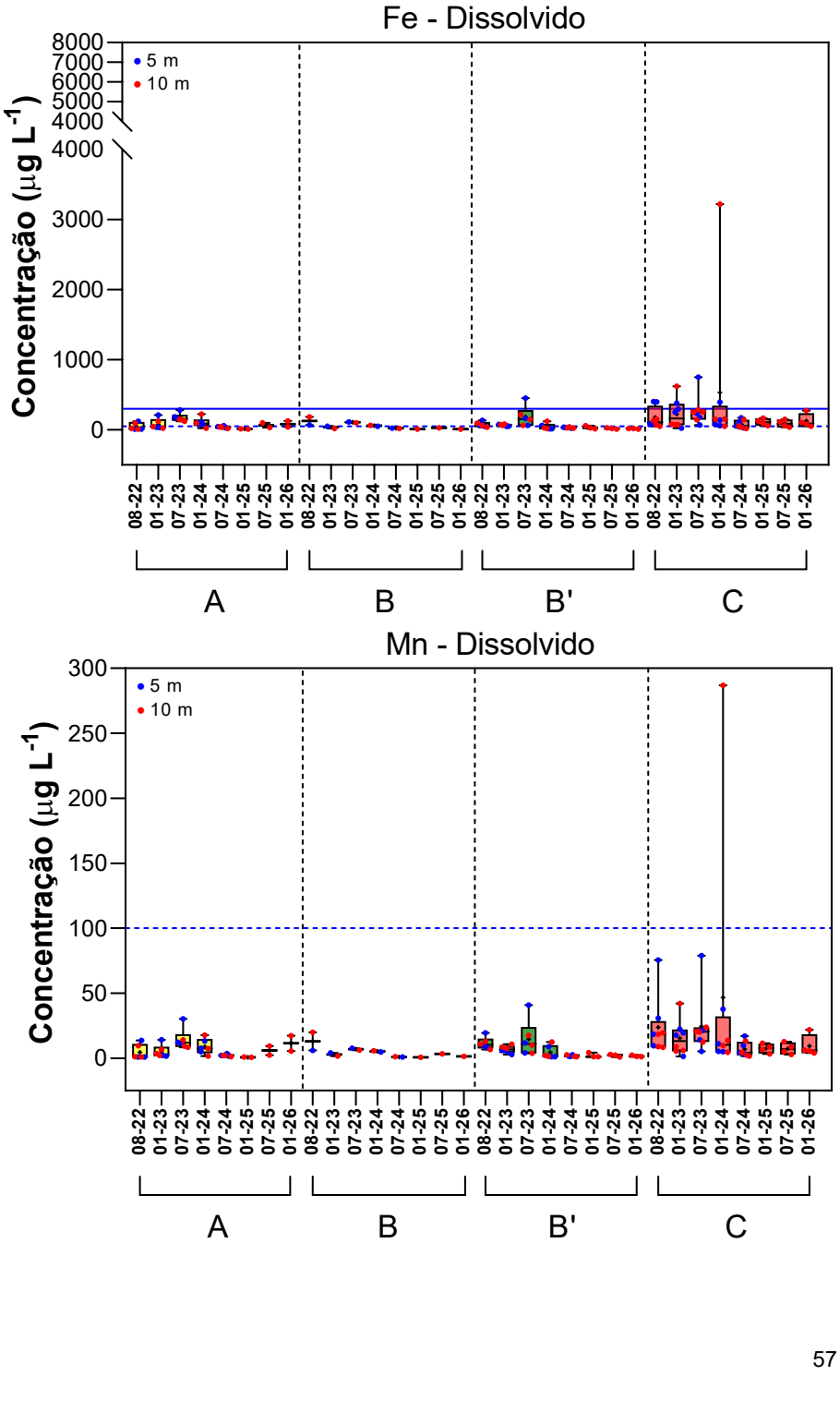
Figura 10: Distribuição das concentrações de elementos químicos, na fração total e dissolvida, nas amostras de água do mar coletadas nas estações amostrais dos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde claro, S5), B' (verde escuro, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6) para isóbata de 5 metros (5 m) e isóbata de 10 metros (10 m). Linha tracejada vermelha indica valor limite CONAMA n°357, linha tracejada azul indica limite crônico estabelecido pela NOAA e a linha contínua azul indica limite agudo estabelecido pela NOAA. Dados obtidos no período de agosto de 2022 a janeiro de 2026.




Cr - Total
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
LQ
08-22
01-23
07-23
01-24
07-24
01-25
07-25
01-26
A
B
B'
C


Cr - Dissolvido
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
LQ
A
B
B'
C


Cu - Total
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
LQ
A
B
B'
C


Cu - Dissolvido
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
LQ
A
B
B'
C

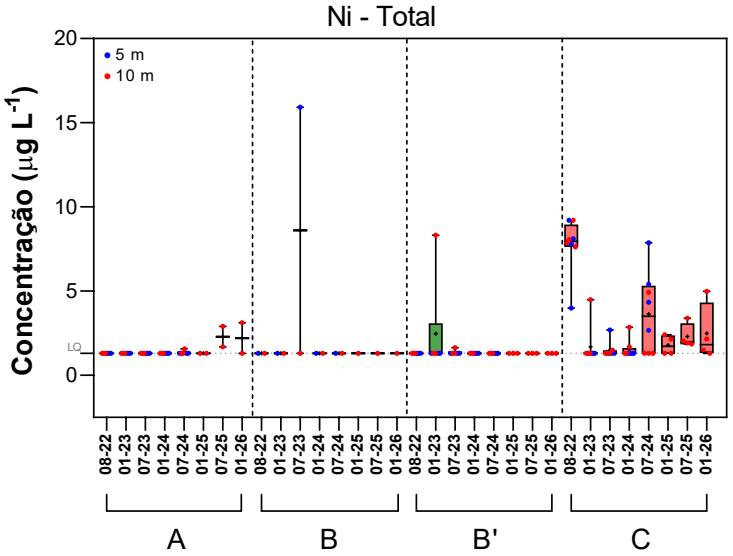
Fe - Total
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
A
B
B'
C

Fe - Dissolvido
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
A
B
B'
C

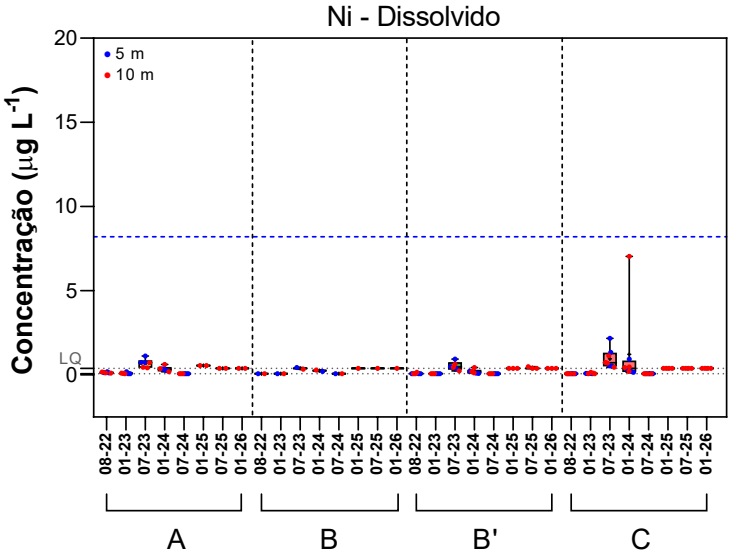
Mn - Total
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
A
B
B'
C

Mn - Dissolvido
Concentração (µg L-1)
5 m
10 m
A
B
B'
C

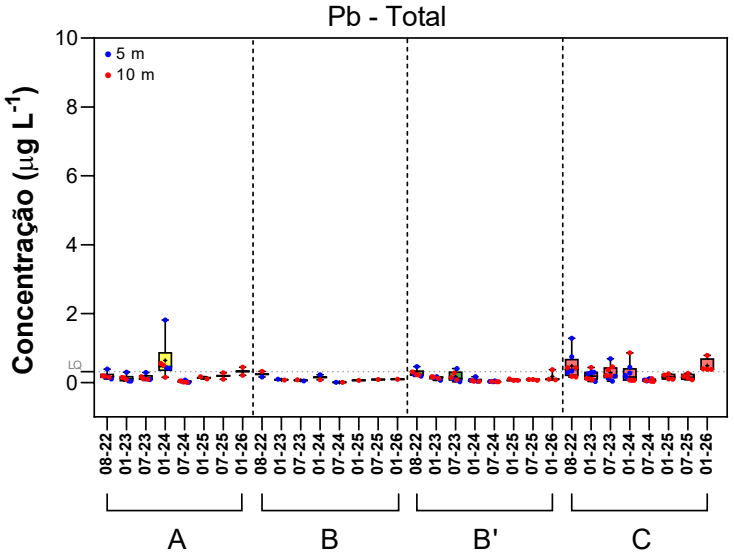
Ni - Total



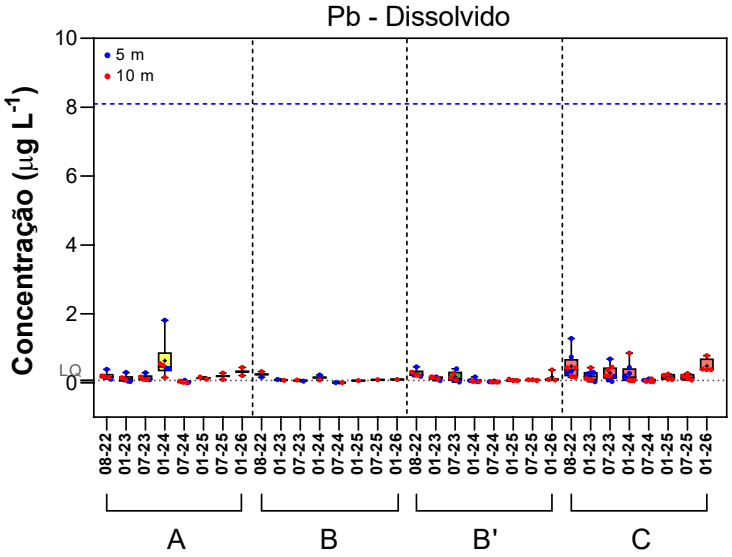
Ni - Dissolvido



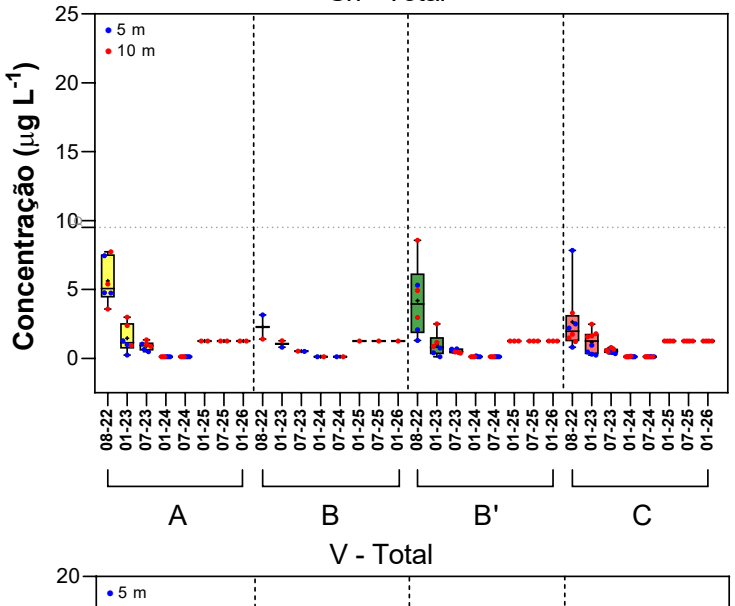
Pb - Total



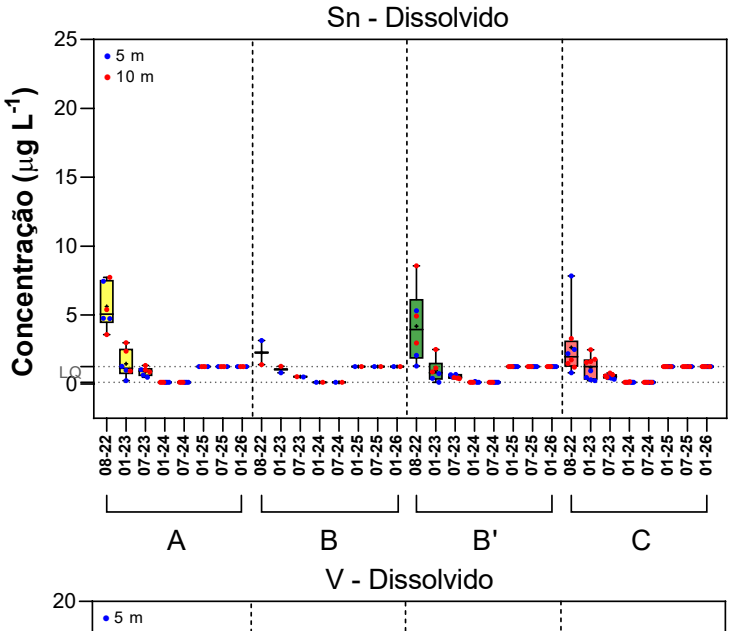
Pb - Dissolvido



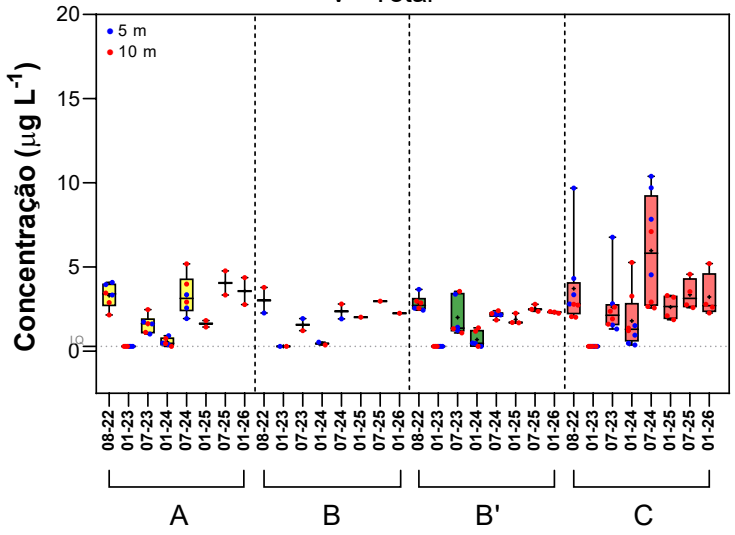
Sn - Total



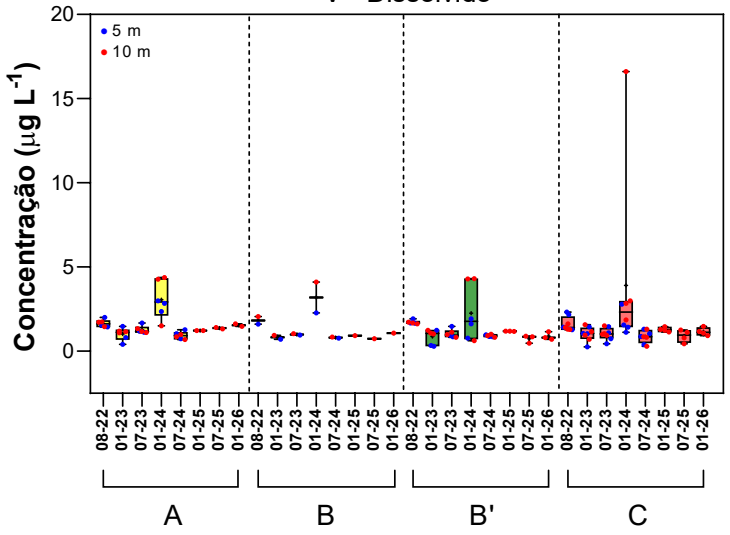
Sn - Dissolvido



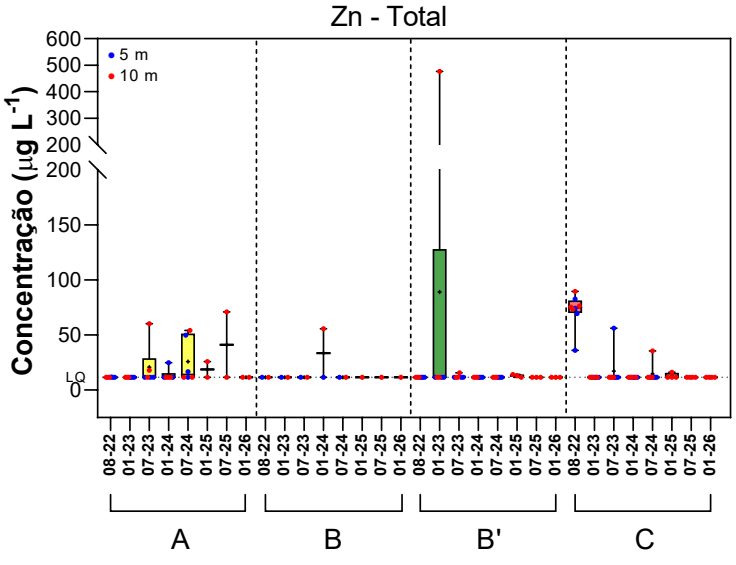
V - Total



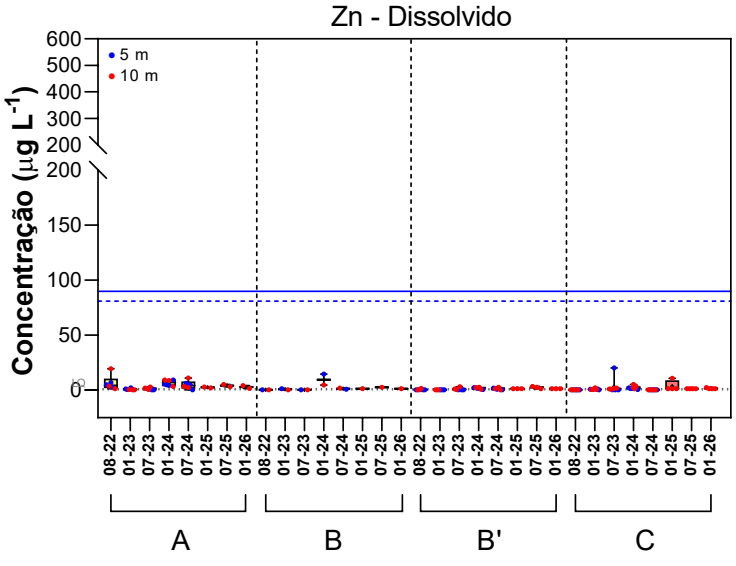
V - Dissolvido



Zn - Total



Zn - Dissolvido



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 dos elementos químicos, observou-se que todos os compartimentos se mantiveram abaixo das diretrizes. No entanto, a variação espacial e temporal do Fe dissolvido chama a atenção, devido à sua relevância na composição dos índices de qualidade da água. Em determinados momentos, os níveis de ferro ultrapassaram o valor crônico para águas salinas de 50 µg L^{-1} estabelecido pela NOAA (– –) e pela Resolução CONAMA (– –), além de excederem, em alguns casos, o limite agudo de 300 µg L^{-1}, estabelecido pela NOAA (——).

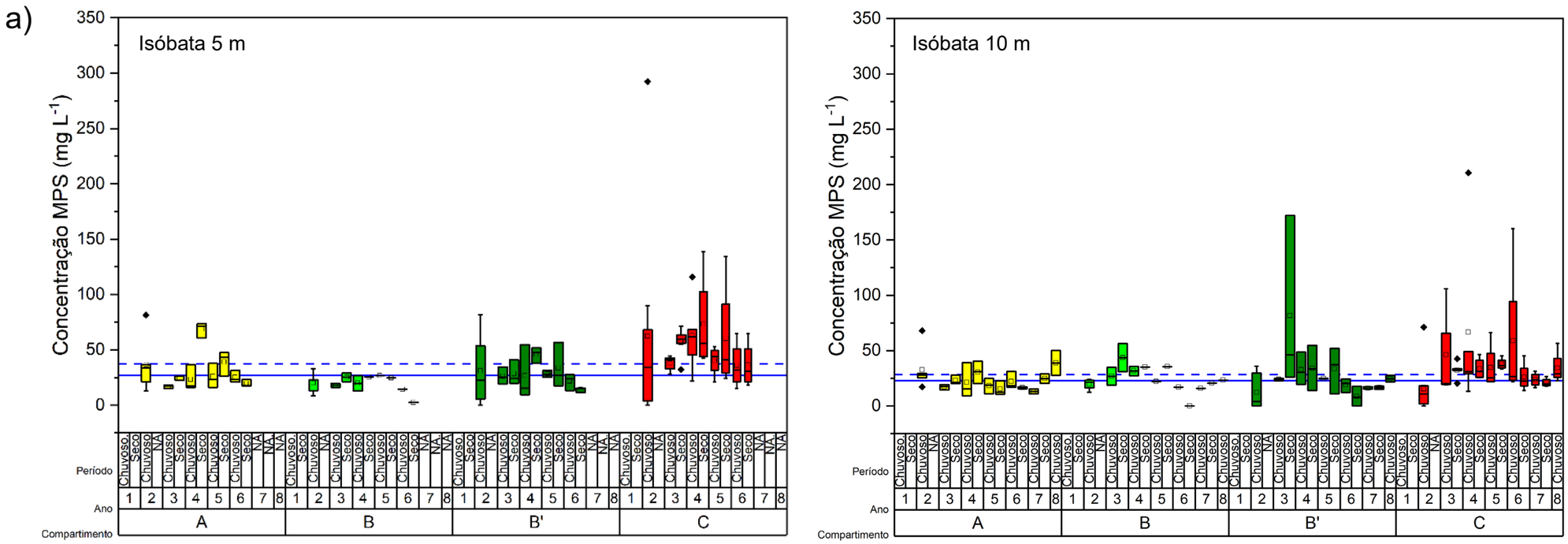
De forma geral, é possível observar que os compartimentos A, B e B' apresentam em torno de 50% ou mais das amostras com concentrações de Fe acima do limite crônico (50 µg L^{-1}), enquanto o Compartimento C se destaca de forma mais acentuada, com aproximadamente 90% das amostras excedendo esse limite, evidenciando uma condição persistentemente impactada.

Em relação ao limite agudo (300 µg L^{-1}), de forma pontual as concentrações foram excedidas em apenas uma amostra no Compartimento B' e em sete amostras no Compartimento C. Esse padrão reforça que, os eventos de maior intensidade concentram-se principalmente no Compartimento C.

As campanhas mais recentes (2025–2026) indicam uma redução pontual nas concentrações de Fe em alguns compartimentos, especialmente A, B e B'. O Compartimento C permanece como o setor mais impactado, sem evidência de melhora consistente, enquanto a área de estudo como um todo mantém elevada variabilidade temporal e sem tendências claras.

Além disso, as concentrações de Fe são mais elevadas na profundidade de 5 m, que apresenta maior frequência e magnitude de valores acima dos limites estabelecidos quando comparada à isóbata de 10 m. A alta frequência de amostras acima do limite crônico em praticamente todos os compartimentos e campanhas compromete a qualidade da água local e reforça o potencial risco ambiental associado à presença de ferro dissolvido na região.

Figura 11: **(a)** Concentração de material em suspensão (mg/L) na coluna d 'água e **(b)** concentração de ferro no material particulado em suspensão (mg/kg) para as concentrações dos elementos químicos presentes no material particulado em suspensão. Dados obtidos para as isóbatas de 5 e 10 metros ao longo dos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde claro, S4 a S5), B' (verde escuro, S6 a N1) e C (vermelho, N2 a N6) no período de dezembro de 2019 a janeiro de 2026 (Anos 1 a 8). NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19. Linha tracejada azul indica a média do conjunto de dados e a linha contínua azul indica a mediana do conjunto de dados.



De maneira geral, os compartimentos A e B apresentam as menores concentrações de material particulado em suspensão (MPS) ao longo da série temporal, enquanto os compartimentos B' e C concentram os maiores valores desse parâmetro (***a***).

No compartimento B', verifica-se uma tendência de concentrações mais elevadas durante os períodos secos, especialmente nas isóbatas de 10 metros nos anos 3, 4 e 5. Tal recorrência sugere a atuação de mecanismos de ressuspensão associados à maior energia de onda, mesmo na ausência de precipitação significativa. Nos períodos chuvosos, é possível observar uma leve redução nas concentrações, indicando a influência do regime hidrológico na diluição e dispersão do material particulado. No entanto, cabe ressaltar que, com o passar dos anos, especialmente a partir do ano 7, registra-se uma redução da variabilidade dentro das praias desse compartimento, com valores inferiores à média do período de monitoramento do PMBA/Fest-UFES.

No compartimento C, registram-se concentrações elevadas de MPS em ambos os períodos sazonais. Destacam-se, nesse contexto, a ocorrência de outliers associados a episódios de alta vazão fluvial, especialmente nos períodos chuvosos dos anos 2 e 4, nas profundidades de 5 e 10 metros, e os elevados valores observados também durante os períodos secos. O principal aspecto que caracteriza este compartimento é a persistência de altos teores de MPS ao longo da série temporal, independentemente da sazonalidade. A persistência dessas concentrações de MPS no compartimento C sugere influência contínua da pluma do rio Doce, em associação com condições hidrodinâmicas locais que favorecem tanto a retenção quanto a redistribuição dos sedimentos em suspensão. A tendência de aumento das concentrações em direção ao norte está relacionada à atuação da deriva litorânea, responsável pelo transporte longitudinal dos sedimentos, conforme descrito por Oliveira *et al.* (2015). Além disso, períodos de maior energia de onda demonstraram potencial para intensificar a ressuspensão do material particulado, que, uma vez em suspensão, pode ser redistribuído pela deriva, contribuindo para o incremento dos teores de MPS no compartimento C. Essa relação dinâmica é corroborada pelos resultados das concentrações de elementos químicos monitorados ao longo do estudo, representados aqui pelo Fe (***b***), devido à forte correlação observada entre esse elemento e o MPS nos compartimentos avaliados.

A campanha de janeiro de 2026 mantém o padrão previamente observado, com as maiores concentrações de MPS registradas nas isóbatas de 10 metros do compartimento C. Cabe destacar que os últimos anos têm sido marcados por maior influência do período chuvoso, além de maior homogeneidade entre as praias do compartimento, sem presença de outliers.

3.3 BENTOS

3.3.1 Parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica

Tabela 12: 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-UFES (set/2018 a jan/2026). 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. F: é um valor que mostra se o modelo (ou parte dele) explica bem os dados. Quanto maior esse valor, maior a chance de o modelo ser bom. p: é a chance de o resultado ter acontecido por acaso. Se for menor que 0,05, geralmente significa que o efeito é estatisticamente significativo.

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***
Praia emersa															
Compartimento	26,16	0,0	B' > A, C	7,67	0,00	A, B' > C		ns		16,00	0,0	A, C > B'	6,47	0,001	A, C > B'
Campanha	10,86	0,01	+	18,10	0,0	*Oscila*	369,75	0,0	*Oscila*		ns			ns	
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
Antepraia															
Compartimento		ns			ns			ns			ns			ns	
Campanha		ns			ns			ns			ns		7,18	0,00	*Oscila*
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			NA	

Durante todo o período de monitoramento, observa-se a consistência do padrão já descrito em relatórios anteriores, com maiores valores de densidade da macrofauna na porção emersa das praias do Compartimento B', associado a ambientes com características mais refletivas. Assim, esse resultado permanece em desacordo com o padrão reportado na literatura mundial para a distribuição da macrofauna bentônica (DEFEO *et al.*, 1992; HACKING, 1998; BRAZEIRO, 1999; MCLACHLAN & BROWN, 2006; MCLACHLAN *et al.*, 2013). O Compartimento C continua apresentando os menores valores de riqueza de espécies e densidade de organismos. Este compartimento é caracterizado por praias mais dissipativas, sendo influenciado pela deriva litorânea no sentido norte, que favorece a deposição de sedimentos finos 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). Nesse contexto, a persistência de baixos valores de riqueza e densidade no Compartimento C reforça a hipótese de que essa área permanece sob influência do MLD, indicando a continuidade de efeitos ambientais relacionados ao material de origem do rio Doce. De modo geral, desde a Campanha 8 (01/22), observa-se um aumento gradual e significativo na densidade da macrofauna na porção emersa das praias, padrão que se manteve mesmo com a inclusão das campanhas de 07/25 e 01/26. Esse comportamento parece indicar uma tendência de recuperação e/ou estabilização ao longo do tempo, sugerindo um possível reestabelecimento da comunidade bentônica. Por outro lado, na antepraia, a exclusão da isóbata de 5m suprime as diferenças significativas observadas anteriormente ao longo do monitoramento, indicando um padrão de homogeneização da fauna devido a redução da heterogeneidade amostral. Nesse contexto, reforça-se que a adequada representação da heterogeneidade ambiental nas estratégias amostrais constitui um pressuposto essencial para a robustez e confiabilidade de estudos ambientais e programas de monitoramento. Do ponto de vista metodológico, a inclusão de diferentes compartimentos ambientais, como as isóbatas, pode ampliar o poder de detecção de mudanças ecológicas, sejam elas naturais ou decorrentes de impactos. Em contraste, amostragens homogêneas ou espacialmente restritas reduzem a sensibilidade analítica, podendo mascarar gradientes ambientais e respostas biológicas relevantes, como variações nos composição da macrofauna e efeitos associados à presença de contaminantes. Quanto a diversidade beta total, para a praia emersa, a variação desse parâmetro, embora significativa, é de baixa magnitude, sendo o Compartimento B apresentando o menor valor do que os demais. Já na antepraia, a diversidade beta total apresentou variação significativa em relação ao tempo. No entanto, não foi observada uma tendência clara de aumento ou diminuição ao longo do período, indicando oscilações pontuais na composição das comunidades.

Tabela 13: 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-UFES (set/2018 a jan/2026). 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. F: é um valor que mostra se o modelo (ou parte dele) explica bem os dados. Quanto maior esse valor, maior a chance de o modelo ser bom. p: é a chance de o resultado ter acontecido por acaso. Se for menor que 0,05, geralmente significa que o efeito é estatisticamente significativo.

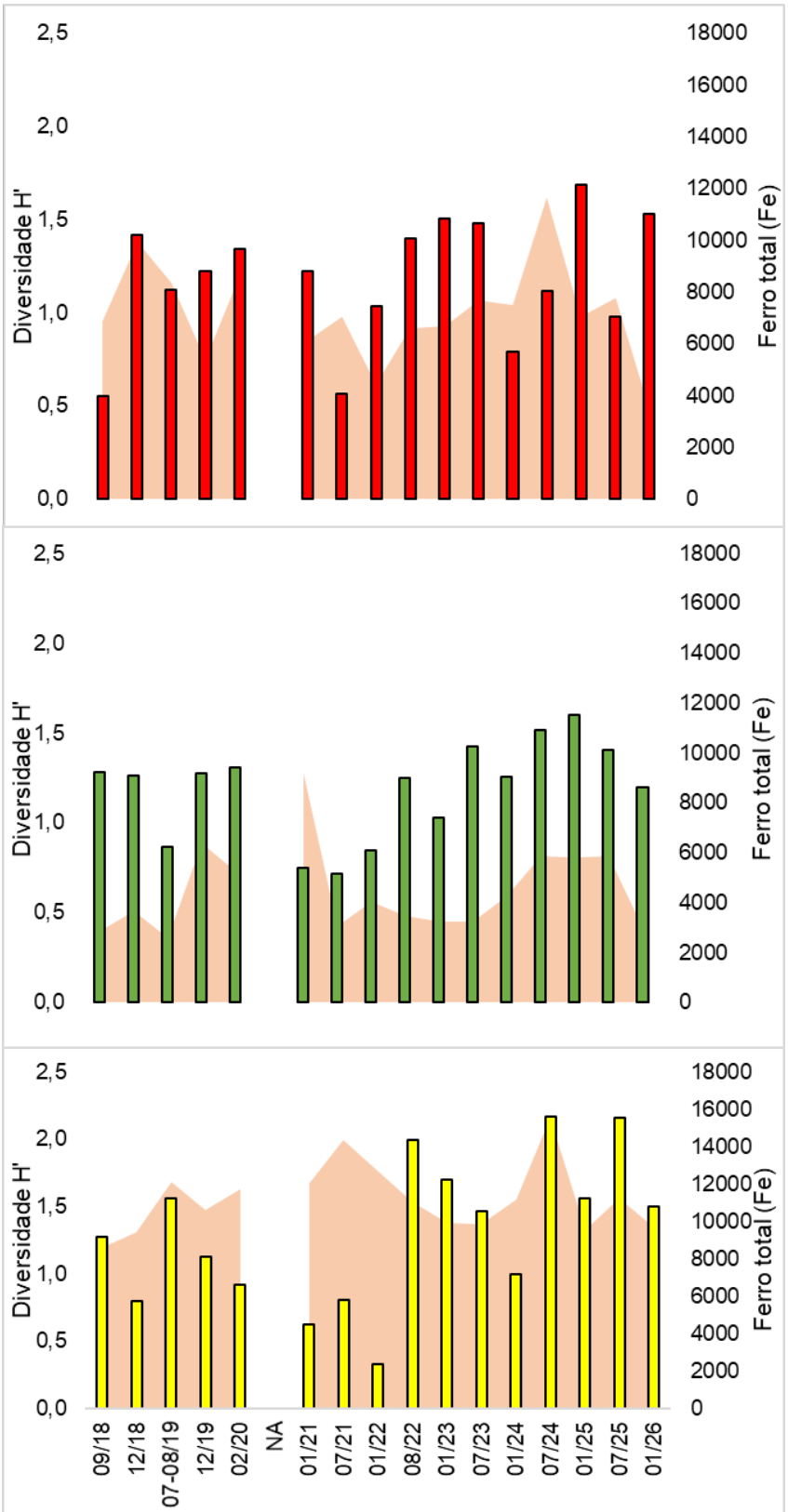
Variação espaço-temporal na densidade (ind/m2) dos Grupos-chave									
Variáveis	**Compartimento**			**Campanha**			**Compartimento x Campanha**		
	F	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***
Praia emersa									
Oligochaeta	33,44	0,00	B'> A, C		ns			ns	
S. pussicus	48,48	0,00	B' > C > A		ns			ns	
H. cf. variodentata	61,49	0,00	B' > C > A		ns			ns	
E. braziliensis	4,66	0,00	B' > C, A		ns			ns	
Amphipoda	6,17	0,00	A > B', C		ns			ns	
Antepraia									
Spionidae		ns			ns			ns	

A manutenção do padrão observado ao longo do monitoramento indica que os grupos-chave Oligochaeta, *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura* cf. *variodentata* continuam apresentando maiores densidades no Compartimento B' em relação aos demais. Como já discutido, as duas últimas espécies apresentam preferência por sedimentos com maior granulometria (VILLORA-MORENO, 1997; DI DOMENICO, 2012), característica marcante desse compartimento. Por sua vez, a elevada abundância de oligoquetas, especialmente na praia de Povoação (N1), pode estar associada ao enriquecimento orgânico e/ou ao aporte de larvas provenientes do rio Doce (SILVA, 2024). Com a inclusão das campanhas 07/25 (período seco) e 01/26 (período chuvoso), observa-se que *Excirolana braziliensis* passa a apresentar variação significativa entre compartimentos, com maiores densidades também no compartimento B'. No entanto, esse grupo não vem evidenciando um padrão consistente de distribuição ao longo do tempo, diferentemente dos demais grupos-chave. Em contrapartida, os crustáceos do grupo Amphipoda seguem apresentando maiores densidades no Compartimento A, onde a maior complexidade estrutural do ambiente favorece sua ocorrência, fornecendo abrigo e recursos alimentares. Considerando que os anfípodas são reconhecidos como bons bioindicadores (VELOSO *et al.*, 2009;

DEFEO *et al.*, 2009) e apresentam sensibilidade à presença de poluentes nos sedimentos (RÉ *et al.*, 2009; DE-LA-OSSA-CARRETERO *et al.*, 2012), sua maior abundância reforça a indicação de que as praias emersas do Compartimento A podem não ser impactadas pelo MLD.

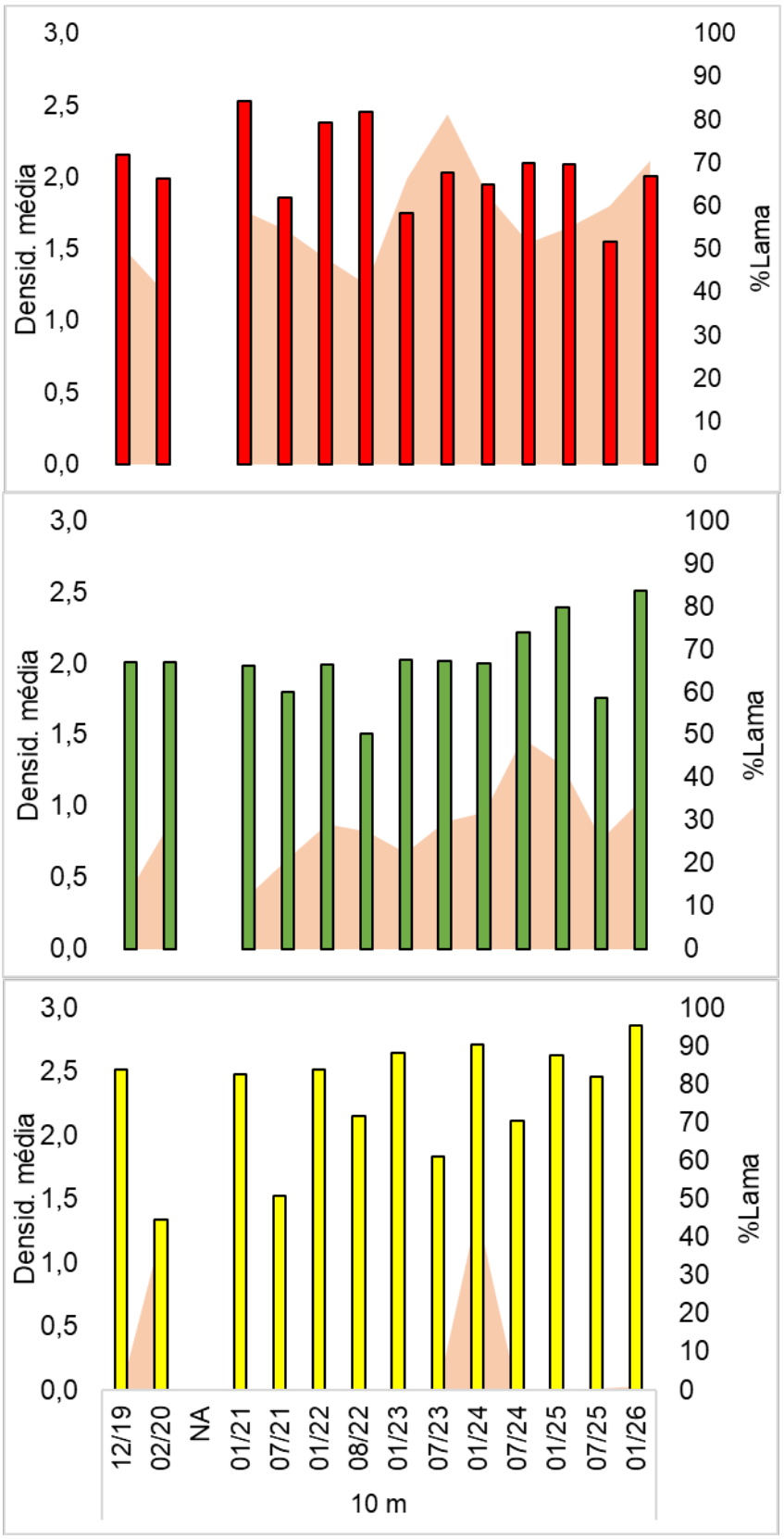
De modo geral, essa diferenciação entre compartimentos tem se mantido consistente ao longo do monitoramento (RT-46 FEST, 2024; RT-49 FEST, 2025; RT-52 FEST, 2025). Quanto a variação temporal, o poliqueta *S. pussicus* deixa de apresentar variação significativa entre as campanhas. Para a antepraia, o poliqueta da família Spionidae também deixa de variar de forma significativa com o tempo.

Figura 12: Diversidade de Shannon- Wiener (H') média da macrofauna bentônica da praia emersa em relação negativa com a concentração de Ferro (Fe) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam a diversidade H' média da macrofauna bentônica; área sombreada distribuição Ferro (Fe) (mg/kg); NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



As praias do Compartimento C são classificadas como dissipativas, o que, de acordo com a literatura global sobre praias arenosas, seria esperado encontrar elevadas densidades e riquezas da macrofauna (DEFEO & McLACHLAN, 2005; McLACHLAN & DORVLO, 2005; McLACHLAN & DEFEO, 2018). No entanto, desde o início do monitoramento, esses padrões não foram observados, possivelmente devido à maior presença de lama e elementos químicos nesse setor, associados à descarga do rio Doce (BRAHIM *et al.*, 2024). Principalmente nesse Compartimento, observa-se relação negativa entre a diversidade (H') e a concentração de Fe, que possivelmente é uma das causas da simplificação da comunidade nesta região. Na última campanha (01/26), a redução dos teores de ferro foi acompanhada por aumento da diversidade de Shannon (H'). Demais relações podem ser observadas no Quadro 4.

Figura 13: Densidade média (Log X +1) da macrofauna bentônica na antepraia em relação à distribuição de lama durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026). 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.



Na antepraia, a densidade de organismos no Compartimento B' permanece sendo afetada com o aumento da lama, padrão já relatado nos RT-49 FEST (2025) e RT-52 FEST (2025). A fauna bentônica desse compartimento continua sendo mais influenciada pela lama do que nos demais compartimentos, mesmo com o Compartimento C apresentando os maiores teores. Isso possivelmente ocorre devido a diferença na composição dos organismos entre esses compartimentos, onde no Compartimento C a fauna é composta por mais organismos tolerantes e oportunistas, enquanto no B os organismos são mais sensíveis (Figura 15). Aliado a isso, Silva (2024), em sua dissertação realizada na mesma área de estudo, concluiu que o aporte do sedimento lamoso, aliado aos contaminantes químicos, promove uma modificação na estrutura da fauna bentônica.

Quadro 4: Resultados das ANCOVAs (análises de covariância) realizadas com os parâmetros da macrofauna bentônica (Riqueza taxonômica (S), Densidade média (N), Diversidade de Shannon-Wiener (H') e Equitabilidade de Pielou (J)) (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 e antepraia amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026). 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			
	S	N	H'	J	S	N	H'	J	S	N	H'	J	S	N	H'	J	S	N	H'	J	S	N	H'	J
%Lama																								
Arsênio (As)																								
Alumínio (Al)																								
Bário (Ba)																								
Ferro (Fe)																								
Manganês (Mn)																								
Níquel (Ni)																								
Chumbo (Pb)																								

Para a praia emersa, a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26 faz com que a relação anteriormente marginalmente significativa (p = 0,09) entre a densidade da macrofauna e a variável lama deixe de ser observada. No entanto, novas relações negativas dos parâmetros da fauna aparecem com Al e Fe no Compartimentos C e Fe para o Compartimento B', indicando uma piora na qualidade desses ambientes. Já na antepraia, para o compartimento B', com a inclusão das novas campanhas e com a exclusão da isóbata de 5m do escopo, a relação negativa da riqueza com a lama deixa de acontecer. Ainda assim, a lama permanece afetando negativamente a densidade de organismos, assim como o Ba afeta negativamente tanto a densidade quanto a diversidade de Shannon-Wiener. Novas relações negativas são observadas na antepraia, como a diminuição da densidade com o aumento de As e Mn, o que pode indicar uma piora na qualidade do ambiente deste compartimento. No Compartimento C, a concentração elementar de Fe e Pb passam a afetar negativamente os parâmetros da fauna. De modo geral, as poucas respostas negativas registradas ainda demonstram sensibilidade da macrofauna aos elevados teores de lama e elementos químicos associados, como relatado por Silva (2024). Os resultados significativos reportados para o Compartimento A de modo geral, podem não ser consequência do MLD, uma vez que, nesse local, 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).

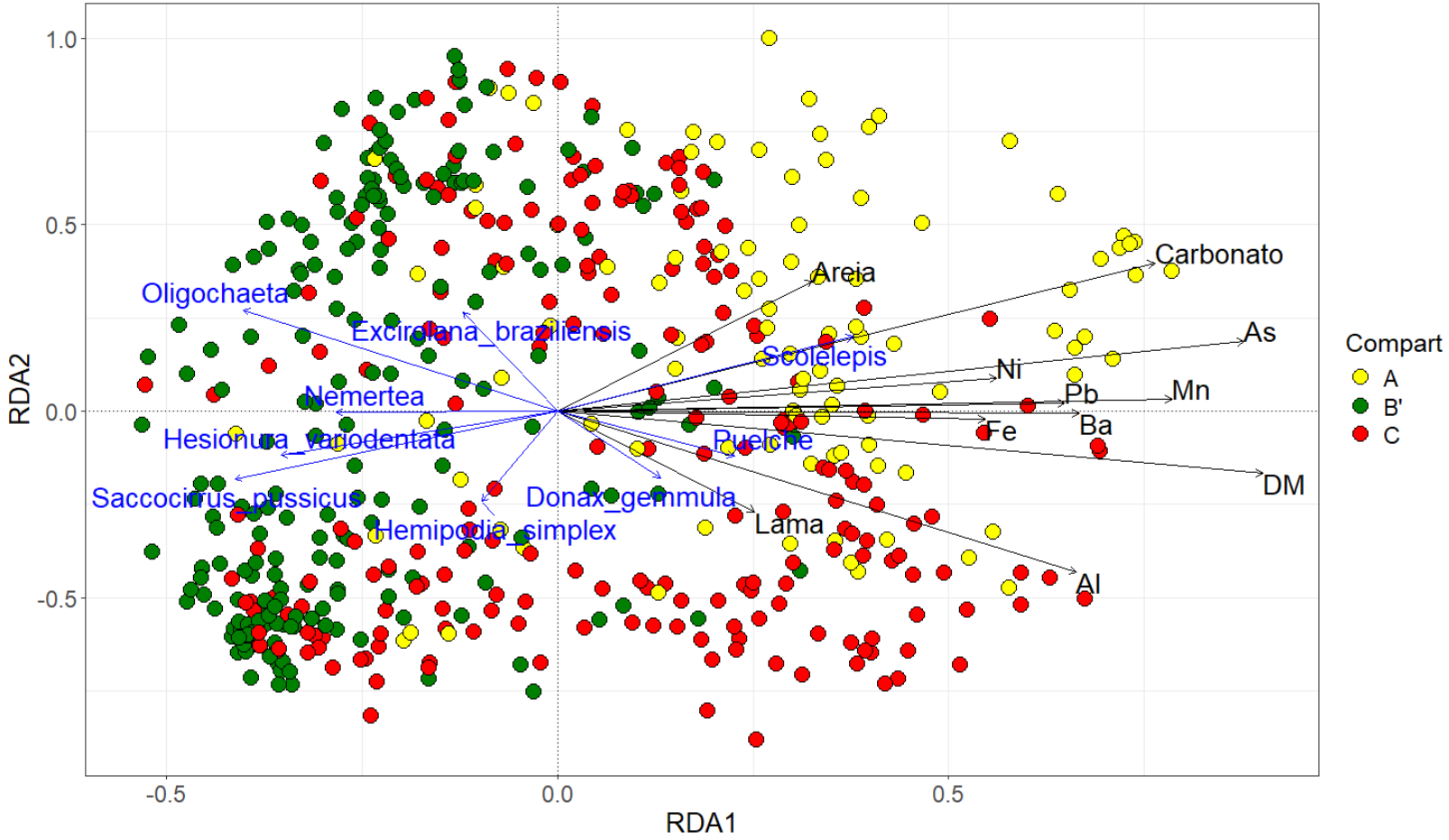
Quadro 5: Resultados das ANCOVAs realizadas com a densidade (ind/m^2) dos grupos chaves da macrofauna bentônica, (Tabela 13), em relação à porcentagem de lama, assim como à concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb da praia emersa amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026). 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**			***S. pussicus***			***H. variodentata***			**Amphipoda**			***E. braziliensis***		
	Com-part. A	**Com-part. B'**	**Com-part. C**	**Com-part. A**	**Com-part. B'**	**Com-part. C**	**Com-part. A**	**Com-part. B'**	**Com-part. C**	**Com-part. A**	**Com-part. B'**	**Com-part. C**	**Com-part. A**	**Com-part. B'**	**Com-part. C**
%Lama															
Arsênio (As)															
Alumínio (Al)															
Bário (Ba)															
Ferro (Fe)															
Manganês (Mn)															
Níquel (Ni)															
Chumbo (Pb)															

Na praia emersa, os grupos-chave Oligochaeta, *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura cf. variodentata* permanecem com suas maiores densidades no Compartimento B' e, com a inclusão de duas novas campanhas, o crustáceo isópoda *Excirolana braziliensis* também evidencia o mesmo padrão (Tabela 13). Neste compartimento ocorrem as menores porcentagens de lama e de elementos químicos no sedimento. Como já é de conhecimento, o Compartimento C vem retendo os elementos químicos provenientes do rio Doce (BRAHIM *et al.*, 2024). Com isso, as relações negativas observadas nesse compartimento indicam o efeito negativo do MLD, causando a redução da densidade da maioria dos grupos-chave macrofaunais. Com a inclusão das campanhas seca 07/25 e a chuvosa 01/26, o grupo chave Oligochaeta manteve sua densidade reduzida no compartimento C, por conta do aumento de As. A porcentagem de lama permanece afetando negativamente a densidade dos Amphipoda e, agora, passa a afetar o crustáceo *E. braziliensis*, reforçando os efeitos direto neste compartimento. Da mesma forma que o poliqueta *H. variodentata* segue sendo afetado negativamente por Mn nos compartimentos B' e C. A presença de diferentes elementos químicos nos ecossistemas pode gerar diversos impactos na fauna, influenciados pela concentração, toxicidade e condições ambientais,

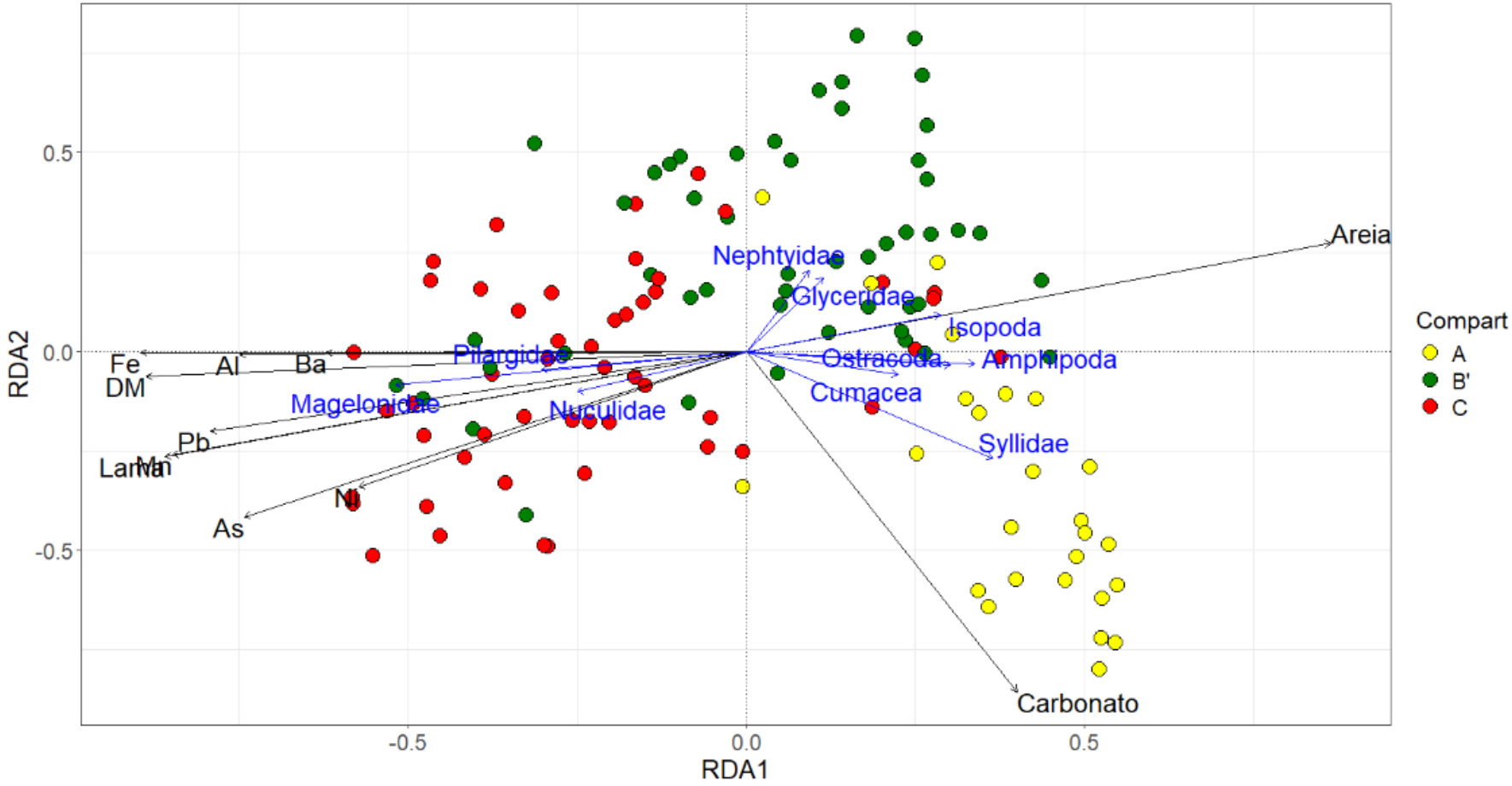
afetando processos biológicos como reprodução, crescimento e sobrevivência das espécies. A resposta dos Anfípodas, que é um dos organismos mais usados como bioindicadores e biomonitores ambientais (GESTEIRA & DAUVIN, 2000), já é um indicativo de impacto. O fato dos oportunistas e tolerantes Oligochaeta também estarem respondendo aos elementos do MLD, reforça a gravidade da retenção do MLD nos sedimentos das praias do Compartimento C. Quanto aos resultados mostrados para o Compartimento A, estes podem não ser consequência do MLD, uma vez que as altas concentrações de diferentes elementos químicos presentes no sedimento desse local são associações naturais que ocorrem no compartimento (SOUZA *et al.*, 2022).

Figura 14: Análise de redundância (RDA) da estrutura da macrofauna bentônica na praia emersa entre os compartimentos, ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026), em relação à porcentagem de lama, areia e carbonato, ao diâmetro médio (DM) dos grãos e às concentrações elementares de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb.



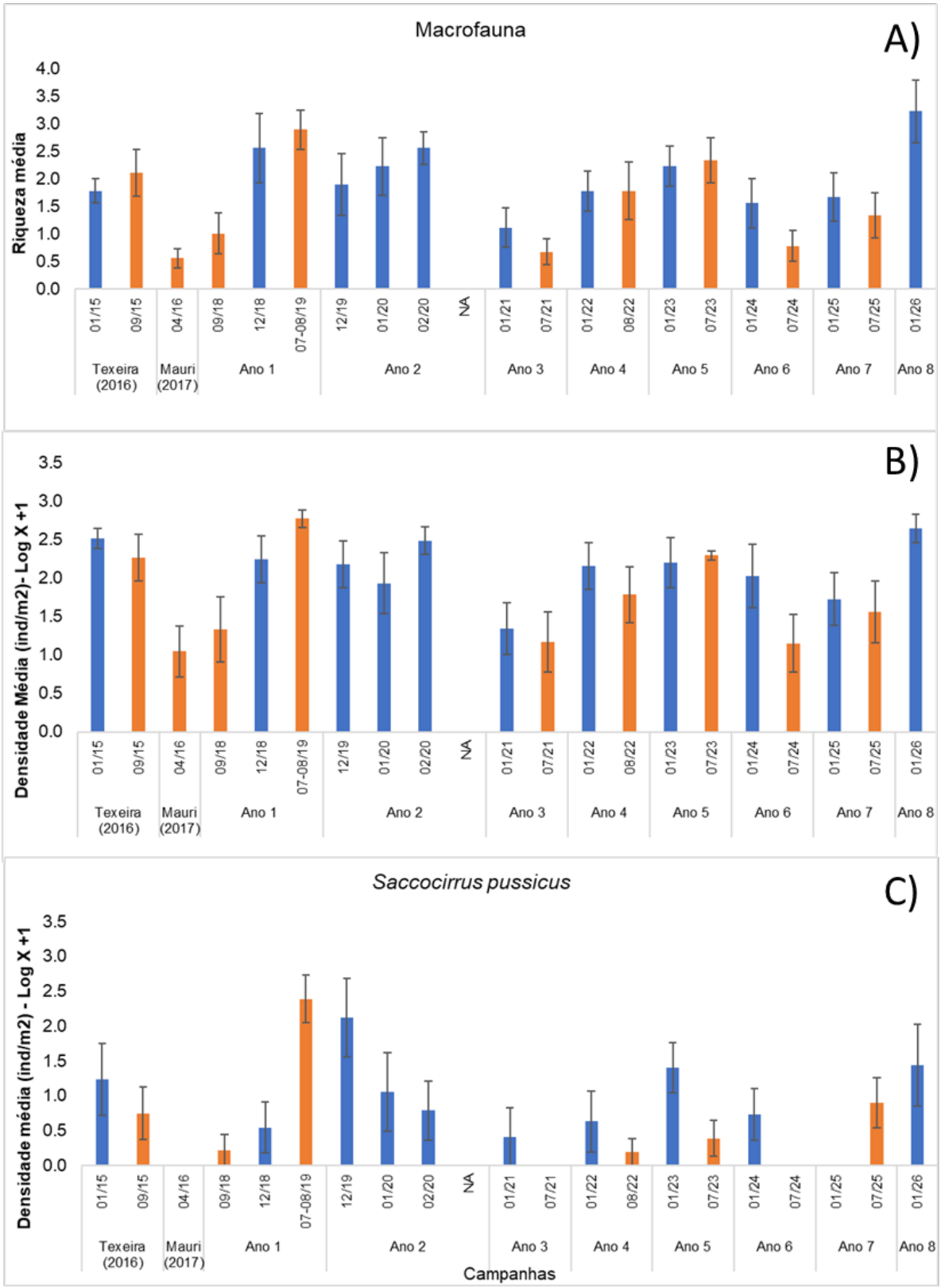
Para a praia emersa, o RDA evidenciou uma distinção da estrutura (abundância e composição) da macrofauna entre os Compartimentos A e C em relação ao B', mantendo-se o padrão já relatado no relatório no RT-52 FEST (2025). A influência das variáveis físico-químicas na estrutura da macrofauna foi confirmada estatisticamente (p = 0,001). Com a inclusão dos dados das campanhas de 07/25 e 01/26, o Ba, em conjunto com Al, As, Mn, teores de areia, carbonato e diâmetro médio granulométrico, passou a contribuir para a variação da composição faunística. Maior contribuição de carbonato permanece sendo registrado no Compartimento A, onde observa-se uma associação do teor de carbonato com a abundância do poliqueta *Scolelepis* sp. Nos Compartimentos A e C, em conformidade com o reportado no RT-52 FEST (2025), verificaram-se as maiores concentrações elementares. Tais Compartimentos apresentam sedimentos de granulometria fina, fator que favorece a retenção de elementos químicos (RAMIREZ *et al.*, 2005; BRAHIM *et al.*, 2024). Além disso, a abundância do anfípoda *Puelche* sp. continua positivamente associada às concentrações de Al, sugerindo uma tolerância desse táxon em relação a esse elemento. No Compartimento B', os táxons *Saccocirrus pussicus*, *Hesionura variodentata* e *Excirolana braziliensis* permanecem com maiores abundâncias. Tais táxons são reconhecidos na literatura por sua afinidade com sedimentos mais grossos (DI DOMENICO *et al.*, 2008; DEFEO & MCLACLAN, 2011), o que é coerente com a predominância dessa fração no Compartimento B'. Adicionalmente, verificou-se maior abundância de oligoquetas nesse Compartimento, possivelmente vinculado ao aporte de matéria orgânica e/ou ao carreamento de larvas provenientes do rio Doce (SILVA, 2024).

Figura 15: Análise de redundância (RDA) da estrutura da macrofauna bentônica na antepraia entre os compartimentos, ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026), em relação à porcentagem de lama, areia e carbonato, ao diâmetro médio (DM) dos grãos e às concentrações elementares de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb.



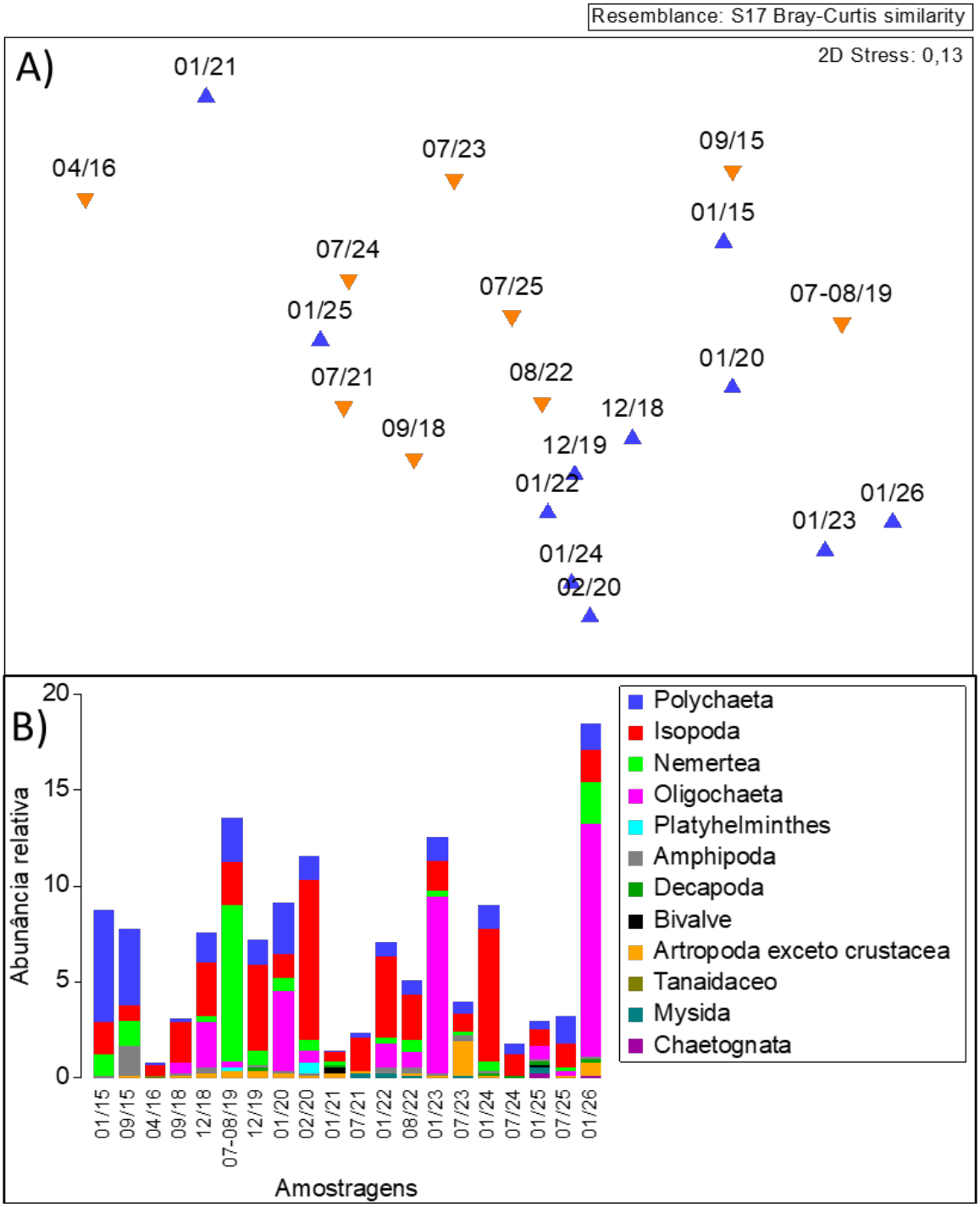
Para a antepraia, a RDA evidenciou uma diferenciação na estrutura (abundância e composição) da macrofauna entre os três Compartimentos, conforme apresentado no relatório RT-52 FEST (2025). A análise foi estatisticamente significativa (p = 0,001), confirmando a influência das variáveis físico-químicas na variação da composição da macrofauna. As variáveis que contribuem para essa variação são As, Al, Fe, Mn, Ni, teor de lama, carbonato e diâmetro médio do grão. Assim como observado na praia emersa, o Compartimento A apresentou maior contribuição de carbonato e continua tendo as maiores abundâncias de poliqueta Syllidae e dos crustáceos Amphipoda, Ostracoda e Cumacea. Estes táxons são descritos na literatura como sensíveis a perturbações, atuando como indicadores de qualidade ambiental (GIANGRANDE *et al.*, 2005; DE-LA-OSSA-CARRETERO *et al.,*2012; STĘPIEŃ *et al.,* 2021; SANTOS LIMA *et al.,* 2021). O Compartimento B' é caracterizado por amostras associadas aos maiores teores de areia que influenciam a abundância do crustáceo Isopoda. Nesse mesmo Compartimento, continua sendo registrado as maiores abundâncias das famílias de poliqueta Nephytidae e Glyceridae. Em relação ao Compartimento C, este permanece caracterizado por maiores concentrações elementares e teor de lama. Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26 observa-se maiores abundâncias do molusco Nuculidae nesse Compartimento. Somaram-se a este registro os poliquetas das famílias Pilargidae e Magelonidae, cujas altas abundâncias já haviam sido observadas no RT-52 FEST (2025). Esses táxons são reportados na literatura por habitar sedimentos contaminados por metais e ambientes lamosos, devido principalmente aos seus hábitos de vida e alimentação (HERRINGSHAW *et al.*, 2010; PIPPY *et al.*, 2016; KUZMANOVIC *et al.*, 2017; MOSBAHI *et al.*, 2019). Nascimento *et al.* (2022) registraram resultados semelhantes para a região, evidenciando que a lama, o índice IMS e metais como Al e Ba, associados ao rompimento da barragem, estruturaram a composição da macrofauna na área impactada, que passou a ser dominada por grupos resistentes como Nuculidae, Spionidae e Magelonidae.

Figura 16: Parâmetros ecológicos da macrofauna de Degredo (N2). **A)** Riqueza taxonômica; **B)** Densidade média (Log X +1) e; **C)** densidade do grupo chave *Saccocirrus pussicus*. Dados do pré-Rompimento referem-se aos dados pretéritos (jan/2015 e set/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Dados de 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-UFES (set/2018 a jan/2026). 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 oscilações temporais recorrentes nos parâmetros da macrofauna em Degredo, os dados da recente campanha chuvosa de 01/26 (Ano 8) indicam, de modo geral, acréscimo nos valores de densidade e riqueza da fauna bentônica em Degredo, sugerindo uma possível recuperação gradual desses parâmetros. No entanto, deve-se ter cautela quanto a esta conclusão (ver discussão da abaixo). Os resultados indicam que as variações temporais observadas nos parâmetros ecológicos da macrofauna podem estar associadas tanto a processos naturais quanto a respostas do sistema a perturbações passadas, reforçando a importância da continuidade do monitoramento para melhor compreensão dessas dinâmicas. Ao analisar os grupos-chave separadamente, observa-se que as respostas variam conforme o táxon. No caso de *Saccocirrus pussicus* (Figura 16c), a densidade média apresenta elevada variabilidade temporal, incluindo ausências em campanhas específicas, como nos períodos secos de 04/16, 07/21 e 07/24, além de ausência também no período chuvoso de 01/25. Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, a espécie novamente é registrada para a região. A frequência irregular dessa espécie em Degredo ao longo da série temporal indica que sua dinâmica populacional não segue um padrão sazonal definido.

Figura 17: **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-UFES (set/2018 a jan/2026) e dados pretéritos (jan/2015 e set/ 2015). Dados pretéritos retirados da dissertação de Teixeira (2016). Dados de abr/2016 referem-se aos dados pretéritos retirados do trabalho de conclusão de curso de Mauri (2017).



A) A análise de ordenação nMDS da estação amostral Degredo mostra um agrupamento das campanhas pré-Rompimento (01/15 e 09/15) bem distante da campanha 04/16 (pós-Rompimento). A Análise ANOSIM comprova esse resultado (Tabela 15), mostrando que a campanha realizada em 2016, poucos meses após a chegada do MLD, apresentou a estrutura da macrofauna bem dissimilar às campanhas realizadas antes do Rompimento. No entanto, ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-

UFES, algumas campanhas mostraram similaridades da estrutura da fauna com o período pré-Rompimento. Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, continua não sendo registrada variação significativa entre os períodos seco e chuvoso (R global = 0,005; p = 0,306), mantendo-se o padrão já relatado nos relatórios RT-46 FEST (2024) e RT-49 FEST (2025) e RT-52 FEST (2025). Além disso, a estrutura da macrofauna observada nas recentes campanhas (07/25 e 01/26) se mostrou semelhante àquelas registradas nas amostragens anteriores à chegada do MLD à praia (01/15 e 09/15), o que parece indicar uma recuperação da fauna. **B)** Na repartição de abundância é possível observar o resultado do SIMPER, onde logo após o Rompimento (04/16) ocorreram reduções das abundâncias ou desaparecimento de táxons da macrofauna. A partir daí, fica claro a troca de dominância de organismos, onde, nas campanhas pré-Rompimento, havia uma dominância dos poliquetas, que foram drasticamente reduzidos nas campanhas seguintes à chegada da lama e, até o momento, não mostrou recuperação. A campanha 07/25 mantem o número de organismos semelhante a 01/25. No entanto, a campanha 01/26 apresenta um aumento da abundância, com valores nunca registrados para o local. Porém, este resultado é promovido pela abundância dos oportunistas Oligochaeta, destacando que essa comunidade permanece sob estresse, devendo-se, assim, ter cautela quanto a esta indicação de recuperação.

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-UFES (set/2018 a jan/2026) 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 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	0,68	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-UFES	01/15, 07/25	-0,01	0,46	81,49
	01/15 x 01/26	0,03	0,27	83,02
	09/15 x 07/25	0,007	0,33	83,8
	09/15 x 01/26	-0,013	0,48	83,36
Mauri (2017) x PMBA/Fest-UFES	04/16, 07/25	0,003	0,37	91,33
	04/16, 01/26	**0,21**	**0,01**	**96,17**

Os dados apresentados nessa tabela foram interpretados em conjunto com as demais análises multivariadas, incluindo todas as campanhas amostrais, e comentados na legenda estendida da Figura 17.

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-UFES (set/2018 a jan/2026). 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. F: é um valor que mostra se o modelo (ou parte dele) explica bem os dados. Quanto maior esse valor, maior a chance de o modelo ser bom. p: é a chance de o resultado ter acontecido por acaso. Se for menor que 0,05, geralmente significa que o efeito é estatisticamente significativo.

Variáveis	N			S			H'			J			β		
	F	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***
Praia emersa															
Compartimento	19,20	0	A, C > B'	9,99	0,00	A, B' > C	110,9	0	B' > A > C	102,3	0	B' > C, A		ns	
Campanha	17,45	0,00	*Oscila*	9,68	0,00	*Oscila*		ns			ns		6,61	0,01	*Oscila*
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			NA	
Antepraia															
Compartimento	5,56	0,00	A > B', C	25,33	0	A > B', C	47,2	0,00	A > B', C	27,1	0,00	A > B', C	8,96	0,00	C > A
Campanha	12,14	0,00	+		ns			ns		14,3	0,00	-		ns	
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	

Para a praia emersa, os Compartimentos A e C permanecem apresentando as maiores densidades significativas da meiofauna (RT-44 FEST, 2023; RT-46 FEST, 2024; RT-49 FEST,2025; RT-52 FEST,2025) e o Compartimento C continua com os menores valores de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou (RT-46 FEST, 2024; RT- 49 FEST, 2025; RT-52 FEST,2025), padrão de resultados que vem se mantendo ao longo do monitoramento. Esse resultado do Compartimento C indica que há dominância de poucos táxons, possivelmente tolerantes e/ou oportunistas, justamente no compartimento onde é depositado o MLD provenientes do rio Doce (OLIVEIRA *et al.*, 2015; BRAHIM *et al.*, 2024). A oscilação temporal na densidade de organismos continua significativa. Assim como no RT-52 FEST (2025), com a inclusão da campanha 07/25 e 01/26, a riqueza varia significativamente, mas sem uma clara tendência de aumento e ou redução, o que aponta que a variação da densidade de organismos dominantes (possíveis tolerantes/oportunistas) em algumas campanhas está interferindo nesse resultado. A diversidade beta total apresentou variação significativa em relação ao tempo, no entanto, não foi observada uma tendência clara de aumento ou diminuição ao longo do período.

Na antepraia, os Compartimentos B' e C continuam apresentando os menores valores significativos de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou (RT-49 FEST, 2025; RT-52 FEST, 2025) mesmo após a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26. Assim como observado para a praia emersa, os menores valores desses parâmetros indicam um desequilíbrio na distribuição do número de organismos entre os poucos táxons registrados, possivelmente em resposta ao MLD depositado nesses locais. Além disso, o maior valor de diversidade beta total registrado no Compartimento C indica uma composição da meiofauna mais heterogênea, o que pode estar relacionado à distribuição em manchas característica dos organismos bentônicos (GIERE, 2009). Entretanto, a interpretação desses resultados deve ser realizada com cautela, uma vez que as análises de diversidade beta com os dados desse estudo não tem se mostrado um recurso relevante para tomada de decisão, possivelmente em função das particularidades da comunidade bentônica. Em relação à variação temporal, apenas a densidade da meiofauna continua apresentando tendência de aumento ao longo do tempo, padrão já reportado em relatórios anteriores (RT-44 FEST, 2023; RT-46 FEST, 2024; RT-49 FEST, 2025; RT-52 FEST, 2025). Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, também se mantém a tendência de redução da equitabilidade, conforme descrito nos RT-49 FEST (2025) e RT-52 FEST (2025). Possivelmente, o aumento da densidade de organismos oportunistas e tolerantes, distribuídos de forma mais homogênea na área de estudo, esteja contribuindo para a redução dos valores deste parâmetro.

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-UFES (set/2018 a jan/2026). "+" aumenta com o tempo. 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). F: é um valor que mostra se o modelo (ou parte dele) explica bem os dados. Quanto maior esse valor, maior a chance de o modelo ser bom. p: é a chance de o resultado ter acontecido por acaso. Se for menor que 0,05, geralmente significa que o efeito é estatisticamente significativo.

Densidade média (ind/10cm2) de Grupos Chave						
Variáveis	**Nematoda**			**Copepoda**		
	F	**p**	***tendência***	**F**	**p**	***tendência***
<u>Praia emersa</u>						
Compartimento	59,88	0,00	A, C > B'	4,30	0,01	A > B' > C
Campanha	15,7	0	*Oscila*	5,94	0,01	*Oscila*
Compartimento x Campanha		ns			ns	
<u>Antepraia</u>						
Compartimento	3,22	0,043	B', > A, C	79,38	0,00	A > B', C
Campanha	12,3	0,00	+	7,36	0,00	*Oscila*
Compartimento x Campanha		ns		6,73	0,00	

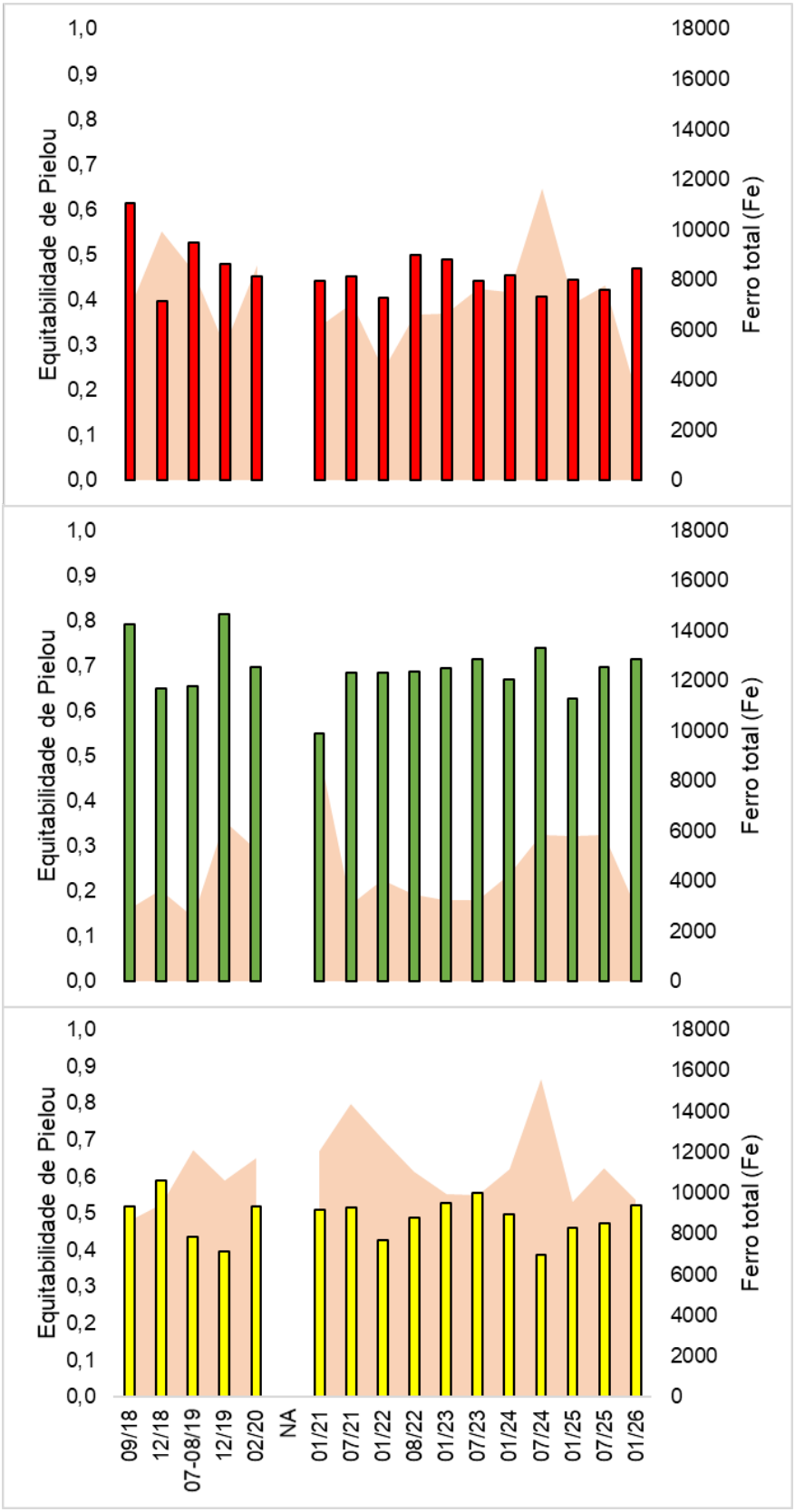
Para a praia emersa, com a inclusão das campanhas seca de 07/25 e 01/26, Nematoda permanece registrando maiores valores de densidades nos Compartimentos A e C. Em ambos os compartimentos, as praias são caracterizadas por serem dissipativas a intermediárias, com a granulometria do sedimento mais fina do que em B' e, por isso, promovem condições adequadas para sustentar uma maior abundância de Nematoda. Associado a isso, para o Compartimento C, onde tem maior retenção do MLD provenientes da descarga do rio Doce (BRAHIM *et. al*, 2024), a maior abundância de Nematoda possivelmente está relacionada a característica oportunista de muitas espécies desse grupo, uma vez que esses organismos apresentam elevada tolerância a diversos poluentes orgânicos e inorgânicos, além de outros tipos de distúrbios ambientais (THIERMANN *et al.,* 2000, WILSON & KAKOULI-DUARTE 2009, LOSI *et al.*, 2013, LOSI *et al.*, 2021). A alta densidade de Nematoda no compartimento A não parece ter implicação direta com o MLD, uma vez que, neste compartimento, as altas concentrações de elementos químicos presentes são associadas à presença de $CaCO_3$ que é abundante no local (SOUZA *et al.*, 2022).

Já para os copépodas, com a inclusão dos dados das últimas campanhas, esses passaram a apresentar menores densidades no Compartimento C, quando antes não havia diferenças espaciais significativas. Da mesma forma que ocorre para a antepraia, onde Copepoda permanece com menores densidades no compartimento C, essa redução da densidade pode 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).

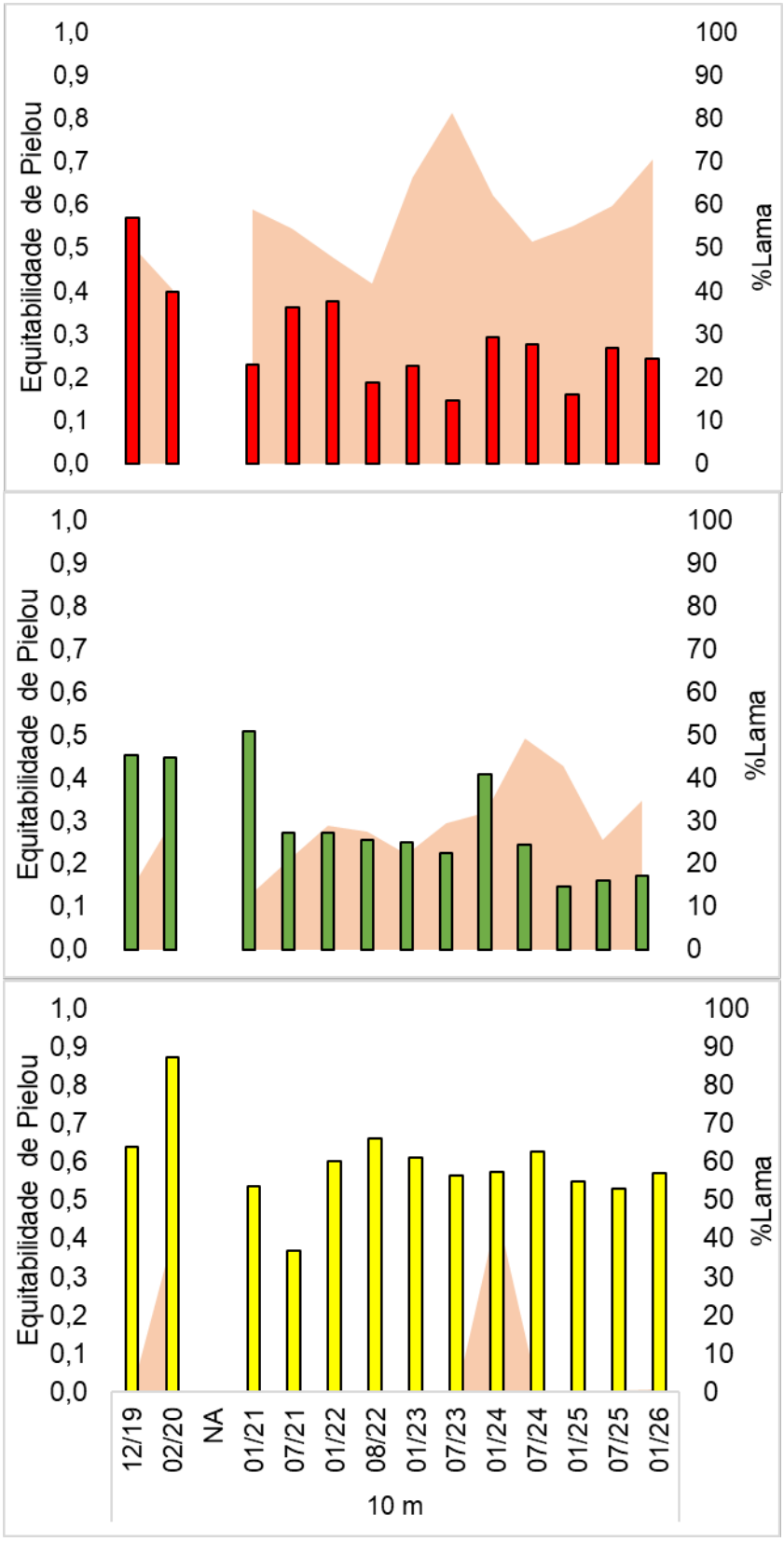
Quanto às variações temporais, ao longo de todo o monitoramento, incluindo as campanhas 07/25 e 01/26, foram registradas oscilações na densidade de Nematoda e, agora, também de Copepoda para a praia emersa, sem uma tendência consistente de aumento ou redução. Essas flutuações podem estar associadas a variabilidade natural das condições ambientais, como mudanças na dinâmica sedimentar, disponibilidade de recursos e demais fatores que podem influenciar na densidade desses organismos. Para a antepraia, o padrão anterior se mantém, onde a densidade do crustáceo Copepoda tem oscilação significativa ao longo das campanhas, enquanto Nematoda apresenta tendência de aumento ao longo do tempo.

Figura 18: 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-UFES (set/2018 a jan/2026). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam equitabilidade de Pielou da meiofauna bentônica; área sombreada distribuição de Ferro (Fe) (mg/kg) (%). NA – não amostrado devido à pandemia de COVID/19.



O aumento da concentração de ferro está associado à redução da equitabilidade da meiofauna, o que pode indicar exclusão de táxons sensíveis e maior predominância de organismos tolerantes, resultando em uma distribuição menos uniforme da comunidade. No compartimento C, são observados os menores valores de riqueza taxonômica e diversidade de Shannon-Wiener, o que continua evidenciando que, apesar da alta densidade de organismos, a distribuição ocorre de forma desigual, com poucos táxons dominando o ambiente. Essa dominância ocorre, provavelmente, em decorrência da elevada densidade de Nematoda presente nesses locais, que provavelmente inclui várias espécies com características tolerantes e oportunistas frente aos impactos ambientais.

Figura 19: Equitabilidade de Pielou (J) da Meiofauna bentônica da antepraia em relação negativa significativa à distribuição de %Lama durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026). Barras amarelas: Compartimento A, Barras verdes: Compartimento B', Barras vermelhas: Compartimento C. Barras representam a equitabilidade de Pielou da meiofauna bentônica; área sombreada distribuição de porcentagem de lama NA – não amostrado devido à pandemia de COVID/19.



Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26 e a exclusão da isóbata de 5m, as porcentagens de lama presentes na antepraia deixaram de apresentar efeito negativo sobre a equitablilidade de Pielou da meiofauna bentônica no Compartimento B', o que pode indicar maior tolerância dos táxons presentes na isóbata de 10m aos poluentes presentes na área. No entanto, observa-se na Figura 19 que o aumento da porcentagem de lama na campanha 07/24 coincidiu com a redução da equitabilidade. Nas campanhas subsequentes (01/25, 07/25 e 01/26), embora a porcentagem de lama tenha apresentado oscilações, a equitabilidade permaneceu em níveis baixos, correspondendo aos menores valores registrados ao longo do monitoramento, correspondendo aos menores valores registrados ao longo do monitoramento. Esse padrão indica uma comunidade dominada por poucos táxons, com distribuição desigual das abundâncias entre os organismos registrados.

Quadro 6: Resultados das ANCOVAs (análises de covariância) realizadas com os parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica (Riqueza taxonômica (S), densidade média (N), diversidade de Shannon-Wiener (H') 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-UFES (set/2018 a jan/2026). Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul – relação positiva; em vermelho – relação negativa.

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

Para a praia emersa, com a inclusão dos dados da campanha 07/25 e 01/26, diversos efeitos significativos permanecem sendo observados. Os resultados indicam que a lama permanece afetando negativamente a meiofauna, junto com As, Al, Fe e Ni. O As continua afetando negativamente a meiofauna dos compartimentos A, B' e C, sendo que este último também tem a meiofauna sendo afetada pelo Fe e Ni. Novamente, a meiofauna permanece se beneficiando com o aumento de alguns dos elementos químicos, o que provavelmente é uma resposta das espécies tolerantes de Nematoda.

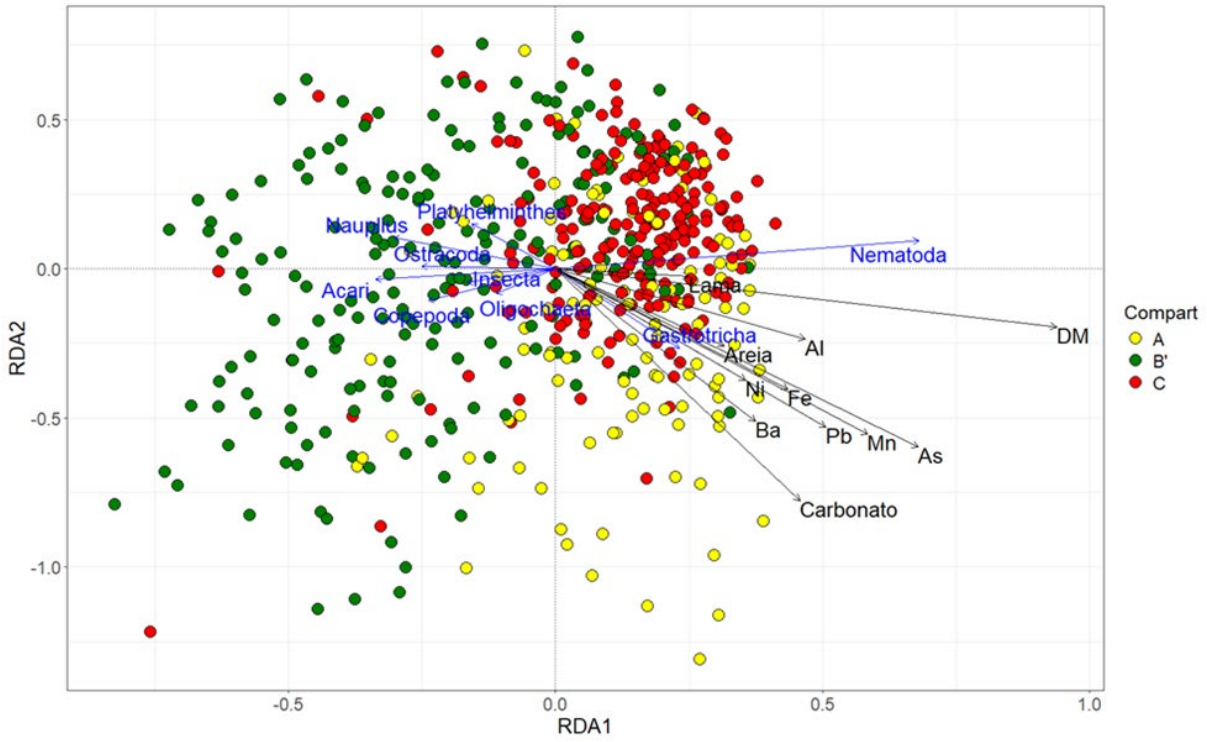
Em relação a antepraia, a lama permanece afetando negativamente a equitabilidade no Compartimento B', resultado que se manteve com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26. O efeito negativo das concentrações elementares, com exceção do Fe, já havia sido relatado no RT-52 FEST (2025). No entanto, novas relações foram identificadas, evidenciando associações significativas com a meiofauna para todos os compartimentos. Esses resultados acendem um alerta para uma possível piora nas condições do ambiente, reforçando a necessidade de continuidade do monitoramento na região, principalmente para o Compartimento A, uma vez que a área está inserida na Área de Proteção Costa das Algas (APA) e Refúgio de Vida Silvestre (REVIS) de Santa Cruz.

Quadro 7: Resultados das ANCOVAs realizadas com a densidade dos grupos chave da meiofauna bentônica (Nematoda e Copepoda) que apresentaram variações significativas entre os compartimentos 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-UFES (set/2018 a jan/2026). Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul: relação positiva; em vermelho: relação negativa.

Integração do indicador Meiofauna com porcentagem de lama e concentrações elementares												
Variáveis	Praia emersa						Antepraia					
	Nematoda			Copepoda			Nematoda			Copepoda		
	Compart A	Compart B	Compart C	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)												

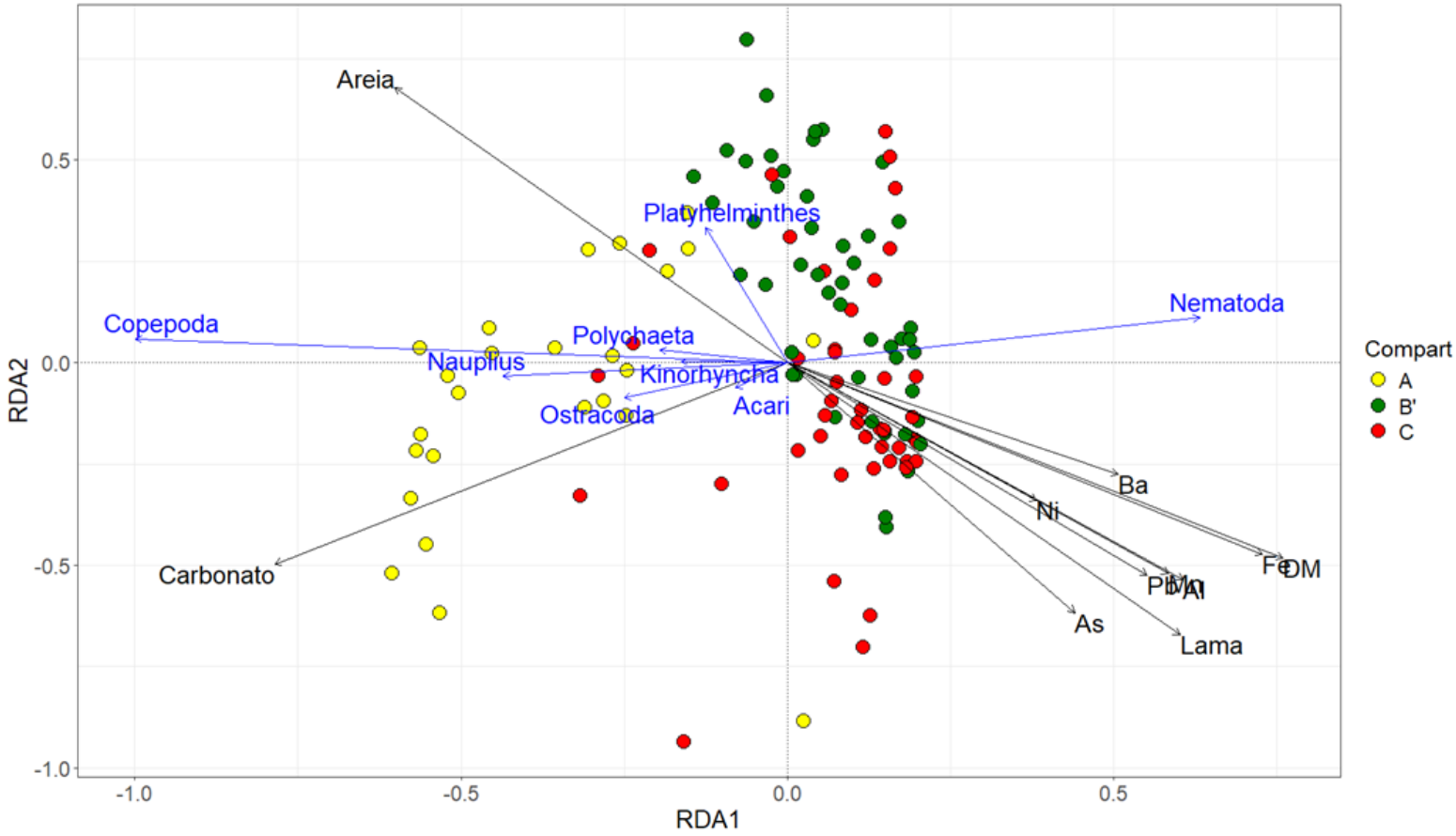
No compartimento A da praia emersa, com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, a lama deixa de afetar negativamente a densidade de Nematoda. Já para a densidade de Copepoda, o efeito negativo do Fe está presente agora em todos os compartimentos. O aumento das concentrações de As permanece favorecendo o aumento das densidades de Nematoda em todos os compartimentos e, também, de Copepoda no Compartimento C. Como já falado no relatório anterior, várias espécies de Nematoda são conhecidas por suas características tolerantes e oportunistas, mesmo em ambientes contaminados por metais (THIERMANN *et al.,* 2000, WILSON & KAKOULI-DUARTE, 2009, LOSI *et al.*, 2013, LOSI *et al.*, 2021), o que pode refletir as relações positivas observadas. Para a antepraia, com a inclusão das duas últimas campanhas, a lama permanece afetando Nematoda do Compartimento B', assim como relatado no RT-52 FEST (2025). A densidade de Copepoda na antepraia, nos compartimentos B' e C, apresentou relações negativas com as concentrações de As, Al, Ba, Mn, Ni e Pb, reforçando a piora da qualidade ambiental para esses organismos.

Figura 20: Análise de Redundância (RDA) da estrutura da meiofauna bentônica na praia emersa entre os compartimentos, ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026), em relação à porcentagem de lama, areia e carbonato, ao diâmetro médio (DM) dos grãos e às concentrações elementares de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb.



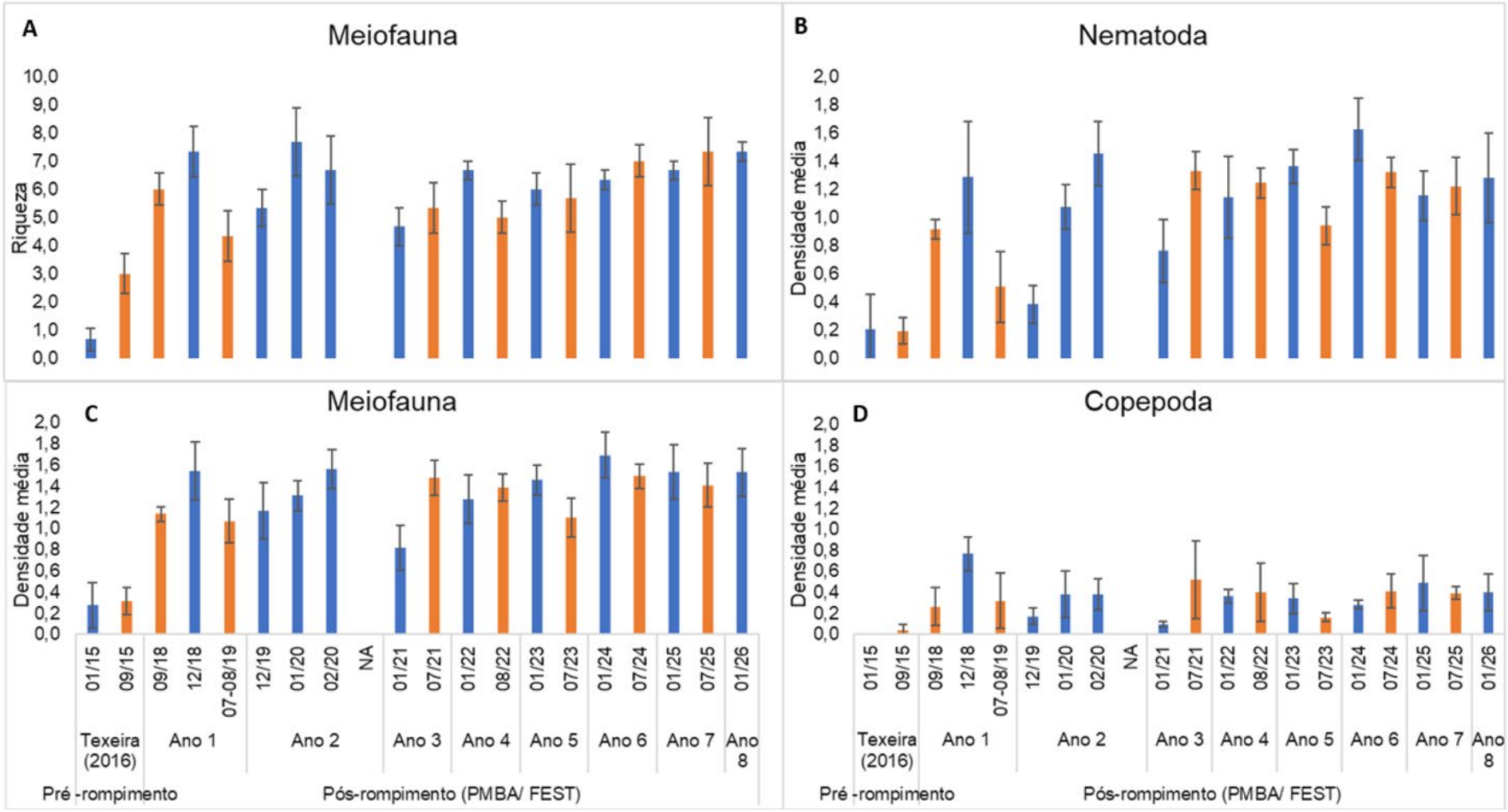
O RDA evidencia uma separação da estrutura da meiofauna do compartimento B' em relação aos demais, assim como apresentado no relatório no RT-52 FEST (2025). Os resultados demonstraram significância estatística (p = 0,001), confirmando que a variação na estrutura da meiofauna está associada à influência das variáveis físico-químicas. Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, o Ba passa a contribuir para a variação na composição, juntamente com Al, As, Mn, os teores de areia e carbonato e o diâmetro médio granulométrico. Como citado anteriormente, os Compartimentos A e C detêm os níveis mais elevados de concentrações elementares, o que se deve à predominância de sedimentos mais finos, que facilitam a retenção desses elementos (RAMIREZ *et al.*, 2005). Essa concentração elementar no Compartimento A é proveniente de processos naturais (SOUZA *et al.,* 2022). Em contrapartida, os valores observados no Compartimento C refletem a retenção dos elementos químicos transportados pelo rio Doce (BRAHIM *et al.,* 2024). Nesses compartimentos, o táxon Gastrotricha permanece em destaque, o que indica uma provável resistência a ambientes com elevados teores químicos. Adicionalmente, os maiores teores de lama favorecem a abundância de Nematoda, corroborando a afinidade desse táxon com substratos de granulometria fina (BROWN & MCLACHLAN, 1990). Já o Compartimento B', assim como apresentado no RT-52 FEST (2025), apresenta as abundâncias mais elevadas de diversos grupos, como Acari, Copepoda, Insecta, Nauplius, Oligochaeta, Ostracoda, Platyhelminthes.

Figura 21: Análise de redundância (RDA) da estrutura da meiofauna bentônica na antepraia entre os compartimentos, ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026), em relação à porcentagem de lama, areia e carbonato, ao diâmetro médio (DM) dos grãos e às concentrações elementares de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb.



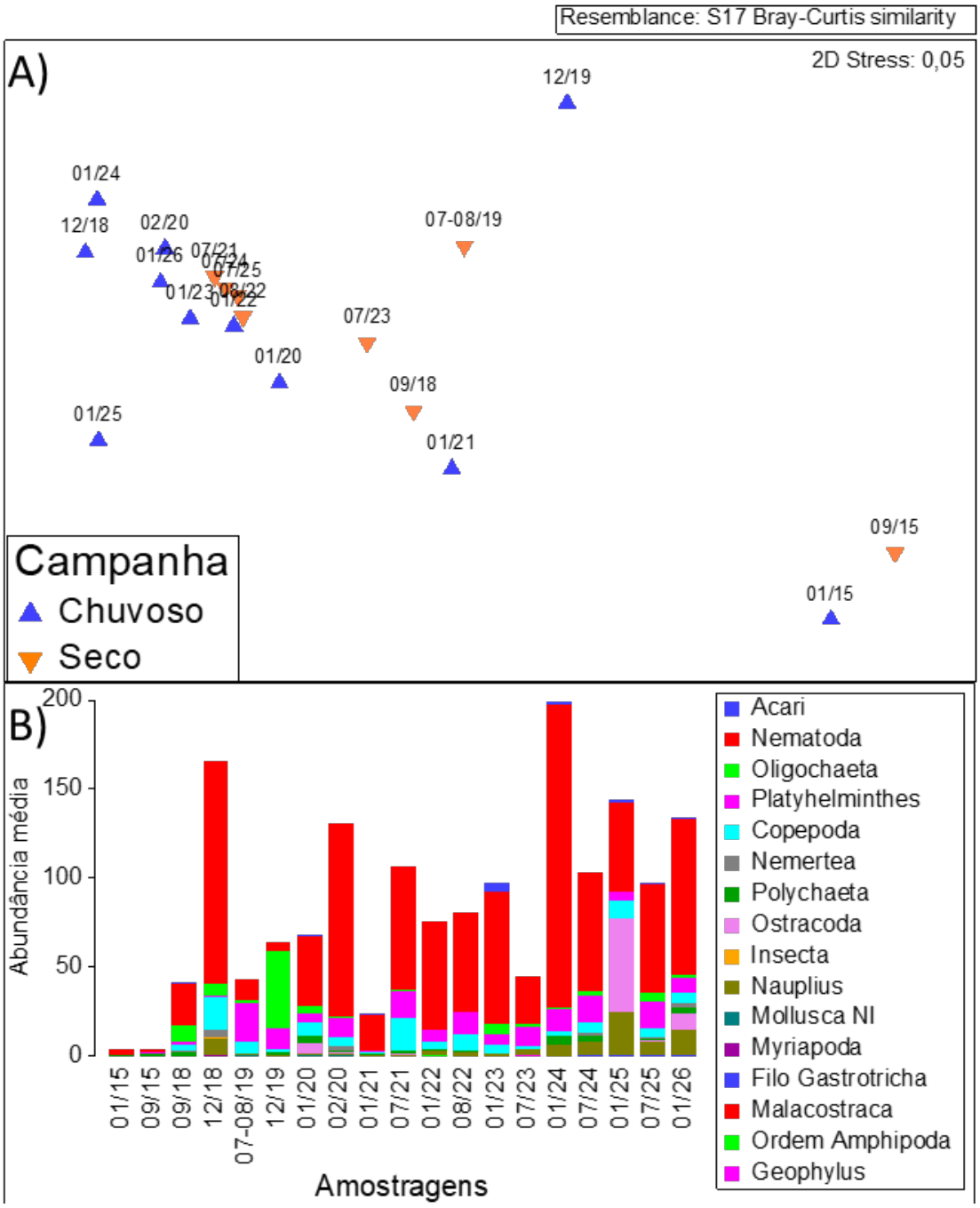
Para a antepraia, o RDA novamente evidenciou a separação da estrutura (abundância e composição) da meiofauna entre os Compartimentos B' e C em relação ao A, conforme apresentado anteriormente no RT-52 FEST (2025). A análise revelou significância estatística (p = 0,001), confirmando que as alterações na estrutura da meiofauna estão associadas aos parâmetros físico-químicos. As concentrações elementares de Al, Fe e Pb, juntamente com o teor de carbonato e o diâmetro médio granulométrico, atuam como os principais fatores determinantes para essa variação. Maior contribuição de carbonato continua sendo observada no Compartimento A, onde também se registrou maiores abundâncias dos táxons Acari, Copepoda, Kinorhyncha, Nauplius, Ostracoda, Polychaeta. A presença de crustáceos costuma estar vinculada a ambientes com menor nível de impacto (STĘPIEŃ *et al.,* 2021; SANTOS LIMA *et al.*, 2021). Os Compartimentos B' e C continuam a exibir maiores teores de lama e concentrações elementares, além de ocorrerem maiores abundâncias de Nematoda. A dominância desses organismos pode ser explicada pela natureza oportunista de diversos representantes do grupo, conhecidos pela elevada tolerância a contaminantes de origem orgânica e inorgânica (THIERMANN *et al.*, 2000, WILSON & KAKOULI-DUARTE, 2009, LOSI *et al.,* 2013, LOSI *et al.,* 2021).

Figura 22: Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica de Degredo (N2) durante todo o período do monitoramento. **A)** Riqueza taxonômica da meiofauna. **B)** Densidade média (ind/10cm2 – LogX+1) de Nematoda. **C)** Densidade média da meiofauna (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-UFES (set/2018 a jan/2026). 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 modificações nos parâmetros da diversidade ecológica da meiofauna bentônica, após o Rompimento da Barragem de Fundão, continuam indicando o impacto do MLD na praia. Os valores da densidade e riqueza da meiofauna não retornaram e nem apresentam tendência de se igualarem aos valores do período pré-Rompimento. Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, o grupo chave Nematoda continua apresentando tendência de aumento na sua densidade com o passar do tempo. O aumento da densidade de Nematoda pós-Rompimento possivelmente é uma resposta a entrada e retenção do MLD no sedimento, visto que diversas espécies desse filo são conhecidas por sua característica tolerante e oportunista.

Figura 23: **A)** Análise de ordenação da estrutura da meiofauna bentônica de Degredo (N2) entre as campanhas durante todo o monitoramento do PMBA/Fest-UFES (set/2018 a jan/2026). **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 grupo contendo as amostras do pré-Rompimento (01/15 e 09/15) (TEIXEIRA, 2016) e o outro com as amostras obtidas durante o PMBA/Fest-UFES, evidenciando a clara alteração na estrutura da meiofauna na praia de Degredo. A análise ANOSIM, da mesma forma, confirma essa distinção (R(global)= 0,24; p=0,001), onde as amostras do pré-Rompimento não diferem entre si, porém diferem de todas as outras campanhas, incluindo a de 07/25 e 01/26 (Tabela 17). No entanto, com a inclusão

das últimas campanhas, não foi registrada variação significativa entre os períodos seco e chuvoso (R global = -0,008; p = 0,644).

B) Na repartição de abundância, é possível notar o resultado apresentado pela análise de classificação (SIMPER), que mostra os altos valores das densidades de Nematoda, Copepoda, Platyhelminthes, Oligochaeta, além da presença de diferentes grupos taxonômicos não presentes antes do Rompimento. A partir de 01/24, observa-se um incremento na participação de náuplio na comunidade, sugerindo uma discreta elevação no recrutamento de formas larvais de crustáceos meiofaunais. 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 o aumento da frequência de ondas maiores, que ocorre no período seco, promovem a remobilização do MLD, que possivelmente continua afetando a meiofauna ao longo do monitoramento.

Tabela 17: 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-UFES (set/2018 a jan/2026). Fator: período de amostragem comparados. R: valor estatístico da ANOSIM, que varia de -1 a 1 e indica o grau de separação entre os grupos, sendo valores próximos de 1 indicativos de maior dissimilaridade. P: valor de significância (p), representando a probabilidade de o resultado ter ocorrido ao acaso; valores inferiores a 0,05 indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Dissi. Média: percentual médio de diferença na composição da comunidade entre os grupos comparados, quanto maior o valor, maior a distinção entre as comunidades.

N2 - Degredo				
Campanhas	**Fator**	**R**	**P**	**Dissi. Média**
Teixeira (2016)	01/15 x 09/15	0.105	0.08	-
Teixeira (2016) x PMBA/Fest-UFES	01/15 X 07/25	0,497	**0,001**	93,53
	01/15 X 01/26	0,478	**0,001**	95,23
Teixeira (2016) x PMBA/Fest-UFES	09/15 X 07/25	0,425	**0,001**	91,08
	09/15 X 01/26	0,362	**0,001**	91,91

Os dados apresentados nessa tabela foram interpretados em conjunto com as demais análises multivariadas, incluindo todas as campanhas amostrais, e comentados na legenda estendida da Figura 23.

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

1) Evolução temporal e espacial dos indicadores nos anos do PMBA/Fest-UFES

Conforme apontado em relatórios anteriores, as faixas submersas das praias situadas próximas à desembocadura e no flanco norte da planície do rio Doce (**Compartimentos B' e C**) continuam a registrar uma tendência significativa de aumento nos teores de lama, tanto na isóbata de 5 m quanto na de 10 m, ao longo do período de monitoramento. Esse material lamoso é majoritariamente de origem terrígena e apresenta concentrações elevadas de metais, o que reforça a hipótese de sua associação com o MLD. A distribuição espacial dessa lama se estende por toda a antepraia nesses compartimentos, com deposição restrita a maiores profundidades ao sul da foz, mas atingindo áreas mais rasas no setor norte da planície. Não há uma correlação direta com a sazonalidade, uma vez que diferentes forçantes físicas, como a vazão fluvial e a energia das ondas, atuam com intensidade variável ao longo do ano, influenciando a deposição de lama na antepraia.

Já no Compartimento B, a ausência de lama está relacionada ao seu estado morfodinâmico refletivo, alta mobilidade do perfil e presença de sedimentos grossos, características que favorecem a constante renovação das águas e dos sedimentos intersticiais e dificultam a deposição de materiais finos. **No Compartimento A**, por sua vez, a lama acumulada nas irregularidades dos terraços de abrasão apresenta natureza predominantemente carbonática, mas não se descarta a presença de frações terrígenas associadas ao MLD nas estações **S2 Formosa e S3 Putiri**. Este relatório semestral destaca a manutenção ou o incremento dos teores de lama em 10 m de profundidade nas estações **S7 Regência, N1 Povoação e N6 Itaúnas**, as quais apresentaram os maiores valores nas campanhas mais recentes.

No que diz respeito ao **indicador de alteração morfológica**, a mobilidade da linha de costa (interface praia-restinga) apresentou comportamentos distintos conforme a região e o período analisado, influenciada pelas características morfodinâmicas de cada praia, pelas variações nos teores de lama na antepraia e pela expressiva redução da vazão do rio Doce após o rompimento da barragem. Ainda que não se possa estabelecer uma correlação direta com os ciclos sazonais de chuva e seca, é possível observar que as praias mais próximas à foz demonstram maior instabilidade morfológica, sendo diretamente afetadas pelas variações sazonais da carga sedimentar fluvial. Em contrapartida, as praias sobre terraços de abrasão no **Compartimento A** e as mais dissipativas ao norte tendem a apresentar maior estabilidade.

Nos **Compartimentos B' e C**, observou-se uma inversão do comportamento histórico (1970–2015), que anteriormente era de deposição com baixa magnitude, para um padrão erosivo acentuado no período pós-rompimento da barragem, especialmente nas estações **S7 Regência, N1 Povoação e N2 Degredo**. As análises recentes em microescala indicam taxas de erosão significativas para essas estações, com recuos de -8,56 m/ano em **S7 Regência** e -1,7 m/ano em **N2 Degredo**, sugerindo tendências futuras preocupantes, com projeções de recuo entre 30 e 70 metros em um intervalo futuro

cinco anos. Dada a presença de comunidades instaladas nas áreas de retropraia dessas localidades, recomenda-se fortemente o monitoramento contínuo desses trechos. Essa mudança no padrão de mobilidade da linha de costa, com aumento do recuo após o rompimento da barragem, pode estar relacionada à redução do aporte de sedimentos arenosos pelo rio Doce, aliada ao incremento de material lamoso proveniente do MLD, o que altera significativamente a dinâmica sedimentar costeira. Em contrapartida, a estação **S6 REBio Comboios** apresentou avanço (saldo positivo) com média de +11,81 m/ano no mesmo intervalo, comportamento oposto ao observado historicamente. De maneira geral, o litoral sob influência da foz do rio Doce apresenta tendência erosiva, com variações espaciais na intensidade do recuo. As estações **S7 Regência, N1 Povoação e N2 Degredo** destacam-se por apresentarem os maiores índices de erosão costeira, o que demanda atenção prioritária nos esforços de monitoramento e mitigação.

Quanto ao indicador **concentração de elementos químicos nos sedimentos**, na praia emersa, o **Compartimento A** é caracterizado por suas elevadas concentrações de As, Hg, Mn, Ni, Pb e V. O índice SQG-q classifica esses sedimentos como moderadamente impactados (SQG-q > 0,1), evidenciando um padrão consistente ao longo do período analisado. Esse comportamento está associado à ocorrência de sedimentos bioclásticos e afloramentos rochosos, os quais limitam a dinâmica sedimentar e favorecem o acúmulo de elementos potencialmente tóxicos, como o arsênio. A comparação com dados pretéritos revela, ainda, variações nas concentrações de Fe e As, indicando a persistência de impacto ambiental significativo na área. Em contraste, os **Compartimentos B', B e C** apresentam maior mobilidade sedimentar e uma dinâmica costeira mais ativa, o que favorece processos naturais de autodepuração. Nesses compartimentos, os sedimentos são classificados como não contaminados com base no índice SQG-q. Contudo, a análise comparativa com dados pretéritos evidencia comportamentos distintos entre esses setores. No **Compartimento B**, predominam amostras sem alterações significativas na maioria das campanhas, com baixa frequência de enriquecimento em relação ao histórico. Por outro lado, os **Compartimentos B' e C** apresentam recorrência de amostras com alterações persistentes nas concentrações de Fe em relação aos dados pretéritos. Esse aspecto deve ser considerado na avaliação da qualidade ambiental dos sedimentos, uma vez que o Fe não é contemplado pelo índice SQG-q, apesar de sua relevância para a área de estudo. Nas isóbatas, podem ser observadas as maiores concentrações dos elementos químicos, com destaque para Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Pb e Zn. Nos **Compartimentos B’ e C**, esses resultados refletem a influência da pluma do rio Doce, que, ao alcançar a costa, é transportada pelas correntes de deriva litorânea predominantes, dispersando os sedimentos contaminados para o norte. Como resultado, ambos os compartimentos se apresentam moderadamente impactados segundo o índice SQG-Q, evidenciando a persistência de impacto ambiental na região. A comparação com dados históricos reforça essa condição, uma vez que a alta frequência de amostras com teores de Fe acima dos valores pretéritos confirma a existência de uma contaminação crônica, associada ao aporte e dispersão dos sedimentos ao longo da zona costeira. Na campanha de janeiro de 2026, os **Compartimentos B’ e C** mantiveram seus níveis historicamente elevados de contaminação, reafirmando que representam os setores mais afetados pela interação entre a descarga do rio e a dinâmica costeira.

Os resultados do somatório das **Concentrações dos Elementos Terras Raras (ETR)**, bem como de suas anomalias, indicam alterações significativas nos sedimentos das praias adjacentes à foz do rio Doce. O predomínio de ETRL em relação aos ETRP, associado ao enriquecimento em relação ao padrão da crosta, reforça a influência de material terrígeno e de frações sedimentares finas como principal fator de controle da distribuição dos elementos químicos no ambiente. A variabilidade espacial observada entre os compartimentos evidencia respostas distintas às condições morfodinâmicas locais. Os compartimentos B' e C destacam-se pelas maiores concentrações de ∑ETR, associadas à maior retenção de sedimentos finos e à atuação da pluma fluvial. O compartimento A apresenta enriquecimento relativo em ETRL em relação aos demais compartimentos, sugerindo uma zona preferencial de acumulação com menor troca transversal. Em contraste, o **Compartimento B** reflete condições de maior energia hidrodinâmica, com menor retenção de frações finas e, consequentemente, menores concentrações de ETR. Os valores obtidos também superam os dados históricos, tanto nas isóbatas de 10 metros quanto na face, em diversos compartimentos e campanhas. Esses resultados indicam que a área de estudo apresenta um sistema sedimentar fortemente influenciado pela interação entre aporte fluvial e dinâmica costeira, com redistribuição ativa de sedimentos finos e elementos associados ao MLD. Nesse contexto, observa-se uma assinatura geoquímica espacialmente heterogênea e persistentemente alterada ao longo do sistema costeiro, reforçando o caráter crônico da contaminação.

Com base nas **Concentrações dos Elementos Químicos na Água**, sua qualidade foi avaliada. De modo geral, os valores obtidos mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelas agências reguladoras. Além disso, a qualidade da água foi classificada como boa a excelente pelo Índice Canadense de Qualidade da Água (CWQI). A principal exceção observada refere-se ao ferro dissolvido (Fe), que apresentou concentrações acima do limite crônico (50 µg/L) em cerca de 50% das amostras dos **Compartimentos A, B e B'**, e em aproximadamente 90% das amostras do **Compartimento C**. Nesse último, em alguns casos, também foram registrados valores superiores ao limite agudo (300 µg/L). **O compartimento C**, portanto, mostra-se mais sensível às variações ambientais, apresentando maior amplitude de flutuação e elevada frequência de valores críticos ao longo das campanhas. As concentrações de MPS também permanecem altas nesse compartimento, independentemente da sazonalidade. Essa constância sugere a influência contínua da pluma do rio Doce, que, associada às condições hidrodinâmicas locais, favorece a retenção e a redistribuição de sedimentos nesse setor.

Quanto aos **parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica**, poucas modificações foram observadas desde o início dos estudos. Os maiores valores de densidade de organismos e riqueza taxonômica na praia emersa permanecem nos **Compartimentos B'**, onde as praias apresentam características mais refletivas, enquanto as praias do **Compartimento C**, com características mais dissipativas, continuam apresentando baixos valores, o que contraria a literatura mundial sobre padrões de distribuição de macrofauna bentônica. Devido à deposição do MLD no **Compartimento C**, diversos táxons da macrofauna continuam sendo afetados (Quadro 5). Mesmo que a lama tenha apresentado poucas relações significativas com os parâmetros ecológicos gerais da macrofauna, ela afeta negativamente a densidade de crustáceos, como Amphipoda e Isopoda. Os elementos Ba e As

promovem a redução da densidade de Oligochaeta, e o fato de os elementos do MLD causarem redução significativa na densidade desses organismos oportunistas e tolerantes (Oligochaeta) reforça a gravidade da retenção do MLD nos sedimentos das praias desse compartimento. Mesmo assim, observou-se um acréscimo nos valores de densidade e riqueza na campanha chuvosa de janeiro de 2026 (Ano 8), sugerindo uma possível recuperação gradual desses parâmetros. No entanto, tal resultado deve ser interpretado com cautela. Baseado nos dados de **Degredo (N2)**, embora a última campanha apresente uma recuperação da abundância, com valores inéditos para a área, esse aumento é impulsionado pelo domínio de Oligochaeta. Por serem organismos oportunistas, sua presença massiva reforça a hipótese de que a comunidade permanece sob estresse ambiental, indicando que a recuperação observada pode não refletir um restabelecimento do equilíbrio ecológico (Figura 22). Na antepraia, no Compartimento A, o As afeta negativamente a riqueza, densidade e a diversidade Shannon-Wiener, já o Ni afeta negativamente o a riqueza e a densidade. Já o **Compartimento B'** é afetado, com a lama, Ba, As e Mn causando a redução dos valores de densidade da macrofauna, além do Ba novamente afetar a diversidade de Shannon-Wiener e o As afetar a riqueza. Já no **Compartimento C**, o Pb passa a afetar negativamente a densidade e a diversidade (H'), enquanto o Fe aparece agora afetando a equitabilidade de Pielou, provavelmente eliminando os táxons sensíveis e mantendo os táxons tolerantes (Quadro 4). Nesse compartimento, foram registradas altas abundâncias do molusco Nuculidae e dos poliquetas das famílias Pilargidae e Magelonidae, organismos comuns por habitarem sedimentos contaminados por metais e ambientes lamosos. Essa resposta da macrofauna na antepraia pode ter relação com a sensibilidade dos organismos aos elevados teores de lama e de elementos químicos associados no local (Figura 15). E ainda, o desaparecimento de relações observadas anteriormente pode estar relacionado com a exclusão da isóbata de 5 m da malha amostral.

Quanto aos **parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica**, o **Compartimento C** continua apresentando os menores valores de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou da meiofauna na praia emersa, sendo que é justamente neste compartimento que ocorre a maior deposição do MLD (Tabela 15). Esses resultados, aliados a maior densidade de organismos encontrada, indicam uma possível dominância dos táxons tolerantes e/ou oportunistas de Nematoda.

Para a praia emersa, com a inserção dos dados da campanha 07/25 e 01/26, diversos resultados significativos continuam ocorrendo. A lama, As, Al, Fe e Ni permanecem afetando negativamente a meiofauna e ainda é observada uma relação negativa do As com a equitabilidade no **Compartimento B'**, onde as concentrações elementares ocorrem em menores quantidades (Quadro 6). A detecção recorrente de impactos químicos em um ambiente naturalmente e altamente estressante (como é o caso do **Compartimento B'**) requer atenção, especialmente em função da baixa diversidade e da reduzida complexidade da comunidade bentônica local. Novamente, diversos parâmetros da meiofauna permanecem se beneficiando do aumento de alguns elementos químicos nos **Compartimentos A e C**, o que provavelmente é uma resposta de táxons tolerantes de Nematoda e de Gastrotricha. A densidade de organismos continua mostrando oscilação temporal, provavelmente em resposta à variação da

densidade de Nematoda. Copepoda, por outro lado, deixou de apresentar tendência de aumento de sua densidade. No ponto amostral **N2 Degredo**, as alterações na diversidade ecológica da meiofauna bentônica continuam indicando o impacto do MLD na praia. Com a inclusão das campanhas 07/25 e 01/26, o grupo chave Nematoda permanece apresentando tendência de aumento na sua densidade, possivelmente devido aos táxons mais tolerantes (Figura 22).

Na antepraia, os **Compartimentos B' e C** continuam com os menores valores significativos de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou, indicando dominância de poucos organismos. A lama afeta negativamente a equitabilidade no **Compartimento B'**, resultado que se manteve com a inclusão das últimas campanhas. O As, no entanto, volta a afetar a meiofauna em todos os compartimentos. Além disso, as concentrações elementares de todos os elementos analisados (As, Al, Ba, Fe Mn, Ni e Pb) tiveram relações significativas com a meiofauna, principalmente no **Compartimento A** Quadro 6). Quanto à variação temporal, apenas a tendência de aumento da densidade da meiofauna continua se mantendo com a inclusão das últimas campanhas, além disso, foi detectada a tendência de redução da equitabilidade de Pielou. Neste contexto, os resultados reforçam a importância da continuidade do monitoramento, a fim de acompanhar possíveis alterações estruturais na comunidade ao longo do tempo.

2) Indicadores de destaque

Como destacado nos últimos relatórios, **presença de lama** na antepraia é um dos indicadores que mais se destacam, uma vez que sua concentração afeta diretamente e indiretamente outros indicadores como: alteração morfológica, concentração de elementos químicos no sedimento e na água e parâmetros ecológicos da macrofauna e da meiofauna bentônica. É provável que o MLD, que se encontra depositado ao longo da bacia do rio Doce e na plataforma continental adjacente, esteja recorrentemente se distribuindo ao longo da costa, por isso o monitoramento deste indicador é importante, uma vez que este material pode se acumular nos sistemas costeiros, gerando impactos na qualidade da água e do sedimento e na biodiversidade.

A alteração morfológica da praia é também um indicador de destaque, visto que o padrão de mobilidade da posição da linha de costa nos anos de monitoramento do PMBA/Fest-UFES 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, associada ao MLD, no sistema costeiro, tendências erosivas e de alta magnitude passaram a caracterizar os **Compartimentos B' e C**.

Como mencionado em relatórios anteriores, o principal indicador geoquímico é a **Concentração de Elementos Químicos nos Sedimentos**, pois reflete as alterações nos sedimentos em função da contaminação, permitindo identificar a magnitude dos impactos ao longo do tempo. Além disso, a análise das concentrações dos elementos nos sedimentos revela que os níveis atuais ultrapassam os

valores históricos e as diretrizes internacionais, fornecendo uma visão clara da persistência da contaminação, especialmente no **Compartimento C**.

Os indicadores **parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica** e **parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica** de modo geral mantêm os padrões observados anteriormente. A presença de lama e as concentrações elementares depositadas nos sedimentos das praias continuam associadas a efeitos negativos na estruturação da fauna bentônica, ainda que as respostas da macrofauna e da meiofauna ocorram de forma contrária (ex: redução da densidade da macrofauna e aumento da densidade da meiofauna). No entanto, permanecem evidentes os efeitos relacionados à manutenção e predominância de táxons tolerantes e/ou oportunistas, tanto nas praias emersas quanto na antepraia. Considerando as diferenças ecológicas, reprodutivas e/ou morfológicas desses grupos, estudos que envolvem essas duas comunidades podem gerar respostas distintas, mesmo quando submetidas às mesmas condições ambientais.

3) Considerações sobre o impacto do MLD sobre as praias

Como já apontado reiteradamente neste e em relatórios anteriores, a distribuição longitudinal dos teores de lama revela um quadro persistente de deposição intensa no **Compartimento C**, caracterizado por acúmulos expressivos de lama terrígena na antepraia, tanto na profundidade de 5 m quanto, sobretudo, em 10 m. Essa condição é incomum em ambientes praiais, especialmente nas zonas mais rasas, onde naturalmente se espera a predominância de sedimentos mais grossos. Os dados indicam que essa área representa a porção mais impactada da malha de monitoramento pelo aporte do MLD via rio Doce, sendo também a que apresenta as maiores concentrações dos elementos químicos analisados (Al, Ba, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e V), especialmente na isóbata de 10 metros.

Devido à dinâmica combinada entre a descarga fluvial do rio Doce e a remobilização de lama do MLD já depositada na antepraia e na plataforma continental adjacente, as praias localizadas nos **Compartimentos B' e C** continuam a ser afetadas por teores elevados de elementos químicos, sem indicação de redução desse impacto ao longo do tempo. Os efeitos sobre a fauna bentônica nessas áreas são particularmente relevantes, dado o suprimento contínuo de lama, transportada diretamente pelo rio ou redistribuída por correntes costeiras. Além disso, observa-se nesses compartimentos uma alteração marcante na evolução da linha de costa, que, no período anterior ao rompimento da barragem, apresentou comportamento deposicional, passando a uma tendência erosiva acentuada no período recente. As estações **S7 Regência e N2 Degredo** exibem os cenários mais críticos, com processos erosivos severos e persistentes, levantando preocupações significativas quanto à segurança das comunidades estabelecidas nas regiões de retropraia e de margem fluvial.

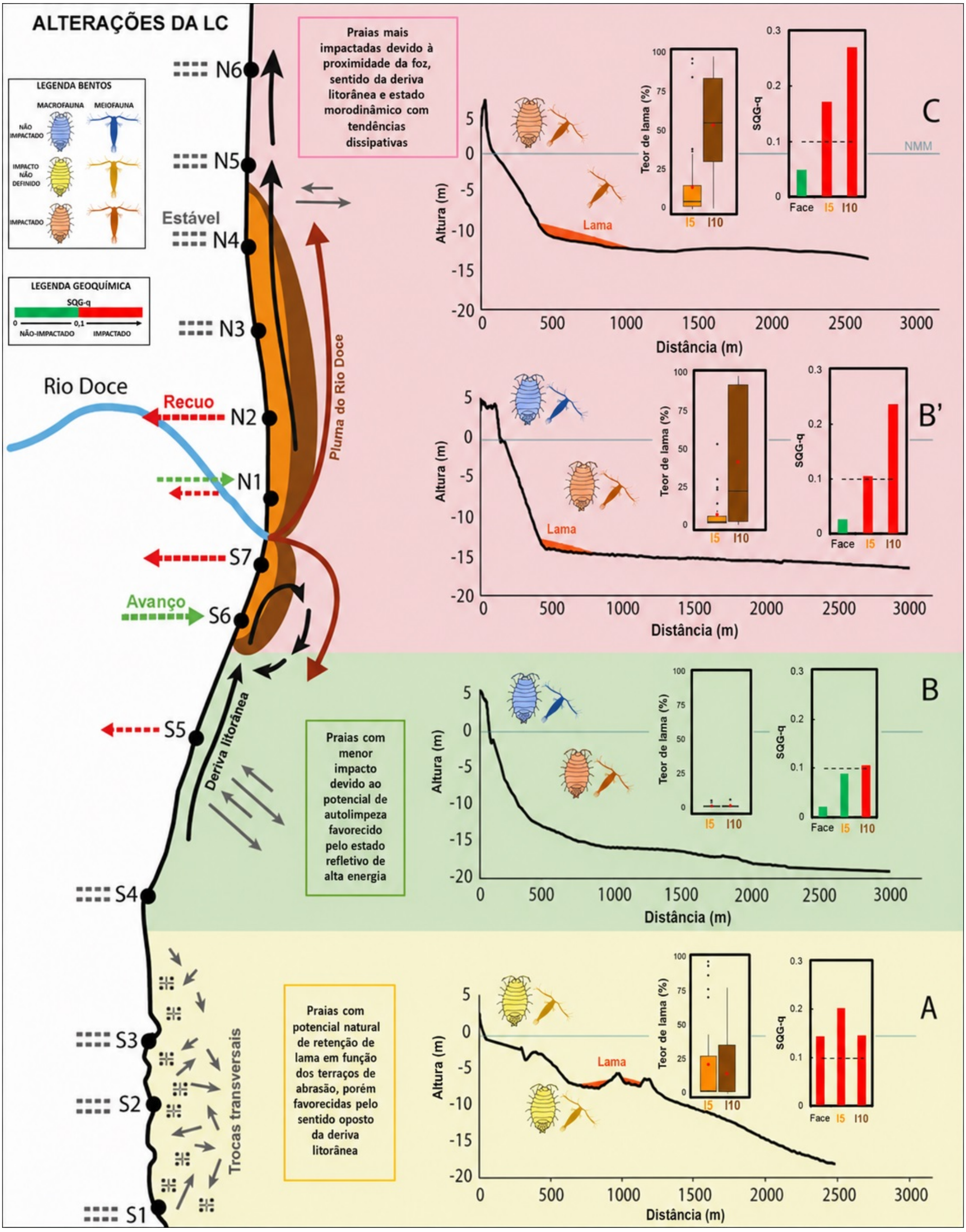
Como destacado em relatórios anteriores, o MLD continua sendo constantemente transportado até a zona costeira e redistribuído, principalmente entre os **Compartimentos B' e C**. As concentrações elevadas de elementos químicos associados ao MLD permanecem nos sedimentos da antepraia, que seguem classificadas como moderadamente impactadas. As praias do **Compartimento C** se destacam como as mais afetadas, apresentando valores de SQG-q ainda mais elevados em relação a outras áreas, com concentrações de ferro consistentemente superiores aos dados pretéritos. Além disso,

observam-se níveis de ferro dissolvido na água sistematicamente acima dos limites regulatórios, bem como concentrações de material particulado em suspensão (MPS) superiores à média histórica do PMBA/Fest-UFES. Esses dados confirmam a persistência e a intensidade do impacto ambiental nessa região, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo.

A fauna bentônica dos **Compartimentos B' e C** permanece como a mais afetada pelo MLD. Tanto a meiofauna quanto a macrofauna continuam apresentando respostas à deposição de lama e às concentrações elementares associadas ao sedimento da antepraia e praia emersa. Na praia emersa, as praias mais dissipativas do **Compartimento C** seguem apresentando baixas densidades da macrofauna, padrão contrário ao previsto na literatura de praias. Além disso, a praia de **Degredo (N2)** não mostra tendência de recuperação ou estabilização dos parâmetros ecológicos avaliados, mantendo evidentes alterações na dominância e na composição da fauna bentônica desde o Rompimento. Na antepraia, os baixos valores registrados para diversos parâmetros ecológicos nos **Compartimentos B' e C** parecem estar relacionados à tolerância dos organismos macrofaunais e meiofaunais às elevadas concentrações de lama e de elementos químicos associados ao sedimento. O predomínio desses organismos nesses compartimentos contribui para a manutenção de uma comunidade menos equilibrada e de composição faunística menos complexa.

4) Resumo gráfico

Figura 24: 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 macrofauna- e meiofauna**, 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 (impacto intermediário) e vermelho (maior impacto). NMM: Nível Médio do Mar; I5: isóbata de 5 m; I10: isóbata de10 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**, v.726 p.181 - 196. DOI: https://doi.org/10.3354/meps14480 2024

BIGARELLA, J.J., SALAMUNI, R., MARQUES FILHO, P.L. Método para avaliação de nível oceânico à época da formação dos terraços de construção marinha. Boletim Paranaense de Geografia. v. 4-5, p. 111-115. 1961

BLOTT, S.J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments.**Earth surface processes and Landforms**, v. 26, n. 11, p. 1237-1248, 2001.

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.

BROWN, A.C.; MCLACHLAN, A. **Ecology of Sandy Shores.** Amsterdam: Elsevier, 327 p. 1990.

BUCHMAN, M. F. NOAA Screening Quick Reference Tables, NOAA OR&R Report 08-1. , p. 34, 2008.

CAGNIN, R. C., COSTA, E. S., LONGHINI, C. M., DA SILVA, C. A., SÁ, F., & NETO, R. R. Rare earth elements as tracers of iron ore tailings on the Brazilian eastern continental shelf. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 20, n. 1, p. 179-188, 2024.

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

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário oficial [da] União**, n. 53, p. 58-63, 2005.

DEFEO, O., MCLACHLAN, A. Coupling between macrofauna community structure and beach type: a deconstructive meta-analysis. **Marine Ecology Progress Series** 433:29-41. https://doi.org/10.3354/meps09206. 2011.

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.

DHN, Diretoria de Hidrografia e Navegação. Tábua de Marés. Terminal de Barra do Riacho - Estado do Espírito Santo. Marinha do Brasil, 2021.

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

DI DOMENICO, M.; LANA, P.; GARRAFFONI, A. Distribution patterns of interstitial polychaetes in sandy beaches of southern Brazil. **Marine Ecology**, v. 30, p. 47-62, 2008.

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.

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

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. **Relatório Anual do PMBA/Fest-UFES-UFES–RT-46**, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 306 pag. 2024.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. **Relatório Anual do PMBA/FEST-UFES – RT-49**, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. p. 98. 2025.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. **Relatório Semestral do PMBA/FEST-UFES – RT-52**, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. p. 101. 2025.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research**, v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957.

GALEHOUSE, J.S. Sedimentation analysis.In: Caver, R. E (Ed). **Procedures in sedimentary petrology**, p. 69-94, 1971

GARZANTI, E. The maturity myth in sedimentology and provenance analysis. **Journal of Sedimentary Research**, v. 87, n. 4, p. 353-365, 2017.

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.

GIANGRANDE, A., LICCIANO, M., & MUSCO, L. Polychaetes as environmental indicators revisited. **Marine Pollution Bulletin**, *50*(11), 1153-1162. 2005.

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.

HERRINGSHAW, L. G., SHERWOOD, O. A., & MCILROY, D. U. N. C. A. N. Ecosystem engineering by bioturbating polychaetes in event bed microcosms. **Palaios**, *25*(1), 46-58. 2010.

HUSTON, M. A. General Hypothesis of Species 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 Cecilia Zacagnini Amaral, Silvana Aparecida Henriques Nallin. 2011.

KUZMANOVIC, M., DOLÉDEC, S., DE CASTRO-CATALA, N., GINEBREDA, A., SABATER, S., MUÑOZ, I., & BARCELÓ, D. Environmental stressors as a driver of the trait composition of benthic macroinvertebrate assemblages in polluted Iberian rivers. **Environmental research**, *156*, 485-493. 2017.

LEGENDRE, P., GALLAGHER, E. D. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data, **Oecologia**. https://doi.org/10.1007/s004420100716. v. 129, n. 2, p. 271-280. 2001.

LONGHINI, C. M., RODRIGUES, S. K., COSTA, E. S., DA SILVA, C. A., CAGNIN, R. C., GRIPP, M., ... & SÁ, F. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical approach. **Science of The Total Environment**, v. 803, p. 149883, 2022.

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.

MCLACHLAN, A.; DEFEO, O. **The Ecology of Sandy Shores** (third ed.), Academic Press, London, p. 560, 2018.

MIRLEAN, N., GARCIA, F., BAISCH, P., QUINTANA, G. C., & AGNES, F. Sandy beaches contamination by arsenic, a result of nearshore sediment diagenesis and transport (Brazilian coastline). Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 135, p. 241-247, 2013.

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.

MOSBAHI, N., SERBAJI, M. M., PEZY, J. P., NEIFAR, L., & DAUVIN, J. C. Response of benthic macrofauna to multiple anthropogenic pressures in the shallow coastal zone south of Sfax (Tunisia, central Mediterranean Sea). **Environmental Pollution,** *253*, 474-487. 2019.

NASCIMENTO, R. L.; ALVES, P. R.; DI DOMENICO, M.; BRAGA, A. A.; PAIVA, P. C.; ORLANDO, M. T. A.; CAVICHINI, A. S.; LONGHINI, L. M.; MARTINS, C.C.; NETO, R.R.; GRILO, C.F.; OLIVEIRA, K.S.S.; QUARESMA, V.S.; COSTA, E.S.; CAGNIN, R. C.; SILVA, C.A.; SÁ, F.; LONGO, L. L. The Fundão dam failure: Iron ore tailing impact on marine benthic macrofauna, **Science of The Total Environment**, Volume 838, Part 3, 156205, ISSN 0048-9697, 2022. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156205.

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.

PIPPY, B. A., KIDD, K. A., MUNKITTRICK, K. R., MERCER, A., & HUNT, H. Use of the Atlantic nut clam (Nucula proxima) and catworm (Nephtys incisa) in a sentinel species approach for monitoring the health of Bay of Fundy estuaries. **Marine pollution bulletin**, 106(1-2), 225-235. 2016.

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.

RAMIREZ, M. *et al.* Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile. **Marine Pollution Bulletin**, v. 50, n. 1, p. 62-72, 2005.

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.

SANTOS LIMA, J. C., MOREIRA, R. A., NETO, A. J. G., DE PÁDUA ANDRADE, D., FREITAS, E. C., DAAM, M. A., & ROCHA, O. Metal Toxicity Can Affect Dragonfly Nymphs and Ostracods Predation Rates and Food Selectivity: Ecological Implications on Food Webs. *Water, Air, & Soil Pollution*, *232*, 1-12. 2021

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

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

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.

SILVA, E.E. **Macrofauna Bentônica de Praias Arenosas Intermediarias nas Proximidades da Foz do rio Doce**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2024.

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.

SILVA, I.J. **Influência do sedimento lamoso e contaminantes químicos na montagem de comunidades da macrofauna bentônica da antepraia ao norte da foz do rio Doce, ES.** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2024.

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.

STĘPIEŃ, A., PABIS, K., SOBCZYK, R., & SERIGSTAD, B. High species richness and extremely low abundance of cumacean communities along the shelf and slope of the Gulf of Guinea (West Africa). **Frontiers in Marine Science**, *8*, 703547. 2021.

TAYLOR, S. R., MCLENNAN, S. M. The geochemical evolution of the continental crust, **Reviews of Geophysics**. https://doi.org/10.1029/95RG00262. v. 33, n. 2, p. 241-265. 1995.

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 E.R., HIMMELSTOSS E.A., ZICHICHI J.L., ERGUL A. 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 / An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. **US Geological Survey Report**: https://cmgds.marine.usgs.gov/publications/DSAS/of2008/1278/

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.

VAN GOSEN, B.S., FEY, D.L., SHAH, A.K., VERPLANCK, P.L., HOEFEN, T.M. Deposit model for heavy-mineral sands in coastal environments. **U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report**. v. 2010-5070-L, p. 1-51. 2014

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, ADRIANE P., GEORGE, KAI H., SANTOS, PAULO J. P. First record of the taxon Echinopsyllus (Copepoda, Harpacticoida, Ancorabolidae) from the deep sea of Campos Basin, Brazil, with the description of three new species and their contribution to phylogenetic analysis. **Zoological Journal of the Linnean Society** 156 (1): 52-78, 2009. https://doi.org/10.1111/j.1096-3642.2008.00479.x

WARTON, D. I., LYONS, M., STOKLOSA, J., IVES, A. R. Three points to consider when choosing a LM or GLM test for count data, **Methods in Ecology and Evolution**. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12552. 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.