

**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-43/JUN 23

RA2022 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	METODOLOGIA	3
2.1	MORFODINÂMICA PRAIAL.....	3
2.1.1	Coleta	3
2.1.2	Análise	6
2.2	GEOQUÍMICA	9
2.2.1	Coleta	9
2.2.2	Análise	9
2.3	BENTOS.....	17
2.3.1	Coleta	17
2.3.2	Análise	18
2.4	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	20
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	21
3.1	MORFODINÂMICA.....	23
3.1.1	Teor de lama	23
3.1.2	Alterações morfológicas da praia	25
3.2	GEOQUÍMICA	27
3.2.1	Concentração de elementos químicos no sedimento	27
3.2.2	Normalização de Elementos de Terras Raras (ETR) em sedimento.....	29
3.2.3	Concentração de elementos químicos na água	31
3.3	BENTOS	34
3.3.1	Indicador macrofauna	34
3.3.2	Indicador Meiofauna	44
4	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	56
5	REFERÊNCIAS	56

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

O histórico de malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) abrange informações de suma importância para o balizamento do presente programa, uma vez que passou por modificações ao longo do tempo, visando melhor atender aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuação do monitoramento, apresentada no primeiro semestre de 2022 visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) **MS - Malha e frequência amostrais**, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) **MS – Mapas das malhas amostrais**, com a espacialização referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais coletadas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais coletadas a partir de agosto de 2022.

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento da entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em 31 de agosto de 2022. Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

2.1 MORFODINÂMICA PRAIAL

2.1.1 Coleta

2.1.1.1 Clima de ondas

Informações sobre os parâmetros de ondas para períodos de média e curta duração foram obtidas por meio de modelagem numérica através do modelo de ondas *Wavewatch III* (WW3). Os resultados são disponibilizados livremente pelo portal de previsões Surfguru (www.surfguru.com.br). O portal Surfguru realiza a modelagem para uma malha regional com resolução de 15 km, a partir de dados de vento de superfície, gerados pelo modelo atmosférico *Global Forecasting System* (GFS) e disponibilizados pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), dados de ondas gerados pela versão 4 do modelo WW3 e dados batimétricos do modelo *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO). Os dados de onda foram reanalisados e validados por fundeios locais (Ambiente Marinho) para, então, serem integrados às análises da morfodinâmica praial.

2.1.1.2 Topobatimetria

O levantamento topobatimétrico dos perfis praias foi realizado nas 11 estações amostrais distribuídas ao longo da área de estudo. Os resultados das demais 2 estações (S4 e N4) estão incluídos neste relatório. Os perfis foram levantados a partir de um referencial fixo (marco geodésico), situado além do limite do pós-praia, e se estenderam até o limite da antepraia média, correspondente à profundidade de fechamento (isóbata de 10 m).2r

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

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

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

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

Com o intuito de garantir a precisão dos dados, antes da realização do levantamento foi planejado o posicionamento do transdutor e da antena GNSS/GPS na embarcação. Na sequência, com o auxílio de uma trena rígida, determinou-se a distância entre a origem do sistema (transdutor) e a antena do GNSS/GPS. Esse processo de determinação das distâncias entre os sensores é chamado de medição dos *off-sets*. A aplicação dos *off-sets* foi realizada antes do início dos levantamentos batimétricos e os parâmetros medidos foram inseridos no programa *Hypack*.

Para a coleta de dados batimétricos utilizou-se, mais especificamente, a ferramenta *Hypack Survey* do programa *Hypack*. Esta ferramenta auxilia na navegação sobre o perfil planejado e integra os dados de

posição fornecidos pelo GNSS/GPS e o valor de profundidade registrado pelo ecobatímetro. Os dados brutos foram salvos na memória do computador portátil para posterior processamento.

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 são extraídas com a finalidade de verificar a qualidade dos dados. Os dados foram planilhados e processados em Excel, verificando a consistência dos valores de latitude, longitude e altimetria para a área de estudo. A partir do horário do término de cada levantamento, foi realizado o ajuste altimétrico de cada perfil ao nível médio do mar local, segundo técnica sugerida por Bigarella et al. (1961). Como referência maregráfica foram utilizados os dados de maré disponíveis no site da Marinha do Brasil, referentes ao Terminal de Barra do Riacho, o referencial mareográfico mais próximo da área de estudo (DHN, 2021).

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

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

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

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

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

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

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

2.1.2 Análise

2.1.2.1 Granulometria

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

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

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

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

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

2.1.2.2 Teor de carbonato no sedimento

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

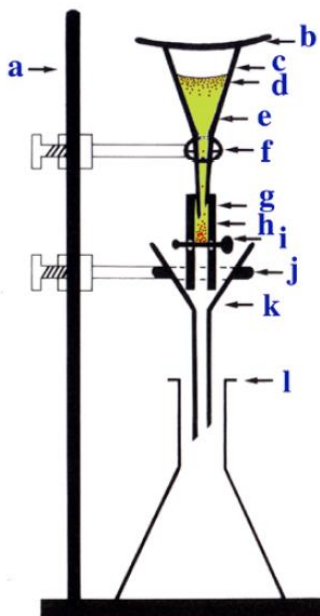
Na sequência, as amostras foram lavadas para a retirada do ácido e, então, colocadas para secar na estufa a uma temperatura em torno de 40 °C. O descarte do resíduo da lavagem foi realizado em um recipiente próprio para o descarte de reagentes. Após a secagem, as amostras foram pesadas para quantificação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

2.1.2.3 Teor e identificação de minerais pesados no sedimento

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

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

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



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

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

2.1.2.4 Teor de matéria orgânica total no sedimento

O teor de matéria orgânica total foi quantificado para as amostras lamosas por meio de sua queima em forno mufla a 450°C durante 4 horas. Para este procedimento foram separados cerca de 2 g da amostra em cadinhos de cerâmica que foram colocados na mufla. A partir da diferença entre o peso inicial da amostra e o peso final, após a queima, foi determinado o teor de matéria orgânica total.

2.2 GEOQUÍMICA

2.2.1 Coleta

A coleta de amostras de água e sedimento foi realizada concomitantemente ao estudo da morfologia e sedimentologia das praias. A coleta das amostras de sedimento superficial na praia (berma, face superior, face inferior e antepraia rasa) foi realizada com coletores de plástico, a fim de evitar a contaminação das amostras. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos (tipo Ziplock) previamente identificados e mantidas sob refrigeração, em caixa térmica com gelo, para a sua preservação até o laboratório. Nas isóbatas de 5 m e 10 m, a coleta de sedimento foi realizada com auxílio de um amostrador de fundo do tipo Van Veen. O sedimento dragado foi transferido para bandejas plásticas e amostrado, com o auxílio de uma colher de plástico, coletando porções de diferentes pontos do sedimento e as transferindo para sacos plásticos (tipo ZipLock) previamente identificados. Vale destacar que, durante a coleta das amostras, o sedimento que entrou em contato com a superfície interna do amostrador Van Veen não foi amostrado, para tanto, a camada superior do sedimento foi descartada antes da amostragem. O amostrador Van Veen foi lavado abundantemente com água do próprio ponto de coleta para evitar contaminação cruzada entre as amostras coletadas em diferentes pontos. Após o procedimento de amostragem, as amostras de sedimento foram mantidas sob refrigeração, em caixa térmica com gelo, para a sua preservação até o laboratório.

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

No laboratório, as amostras de sedimento e água foram armazenadas em freezer a -22°C observando os prazos de validade para as análises (6 meses a partir do momento da coleta).

2.2.2 Análise

2.2.2.1 Preparo das amostras de sedimento

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

Para a decomposição parcial (pseudo total) das amostras de sedimento foi utilizado o método US EPA 3051A. Uma massa de aproximadamente 250 mg da amostra de sedimento fino (\varnothing partículas $< 1 \text{ mm}$)

e seco foi pesada em frascos de Teflon para uso em forno micro-ondas seguindo-se a adição de 10 mL de HNO_3 concentrado destilado. As amostras foram mantidas em repouso à temperatura ambiente dentro da capela por aproximadamente 15 minutos para uma pré-decomposição. Ao final desse período, as amostras foram submetidas à decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas utilizando um programa de aquecimento que consiste no aquecimento por $5,5 \pm 0,25$ min até atingir a temperatura de $175 \pm 5^\circ\text{C}$, com permanência nessa temperatura por 4,5 min. Em seguida, os frascos foram deixados por 30 min à temperatura ambiente para resfriamento e posterior abertura. As soluções obtidas foram filtradas com papel de filtro quantitativo de filtração rápida (faixa preta de 12,5 cm), transferidas para um tubo de polipropileno e o volume aferido para 25 mL com água ultrapura de resistividade 18M Ω .

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

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

2.2.2.2 Preparo das amostras de água

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

Para a obtenção da fração dissolvida, a amostra de água total foi filtrada em membrana de porosidade 0,45 μm . A amostra filtrada foi recolhida e acidificada utilizando HNO_3 subdestilado até pH <2. Uma

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

Para o preparo das amostras de MPS foi utilizado o método US EPA 3051a. O filtro seco contendo a amostra de MPS foi pesado em frascos de Teflon para o uso em forno micro-ondas seguindo-se a adição de 10 mL de HNO_3 concentrado destilado. Após a adição do ácido, as amostras foram mantidas em repouso por aproximadamente 15 minutos à temperatura ambiente dentro da capela (etapa de pré-decomposição). Ao final desse período, os frascos foram fechados adequadamente e submetidos à decomposição assistida por radiação micro-ondas. Foi utilizado um programa de temperatura que consiste em aquecimento à 175 ± 5 °C em aproximadamente $5,5 \pm 0,25$ min e permanência nesta temperatura por 4,5 minutos; foi utilizado um tempo de resfriamento de 10 min. Concluído o ciclo, retirou-se o rotor do micro-ondas deixando-o por cerca de 30 min à temperatura ambiente dentro da capela para posterior abertura dos tubos. Ao final, a amostra decomposta foi filtrada utilizando funil de polipropileno e papel de filtro quantitativo de filtração lenta (faixa azul de 12,5 cm). A solução obtida foi acondicionada em tubo de polipropileno e avolumada para 25 mL com água ultrapura.

2.2.2.3 Determinação elementar nas amostras de sedimento

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

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

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

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
Extração parcial (EPA 3051A)	Al	ICP OES	396,153	-	3,45
	As	ICP-MS	-	75	0,19
	Ba	ICP-MS	-	137	0,12
	Cd	ICP-MS	-	114	0,07
	Co	ICP-MS	-	59	0,11

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
	Cr	ICP-MS	-	53	0,32
	Cu	ICP-MS	-	63	0,7
	Fe	ICP OES	259,939	-	8,89
	Mn	ICP OES	257,610	-	0,13
	Ni	ICP-MS	-	60	0,17
	Pb	ICP-MS	-	208	0,12
	Sn	ICP-MS	-	120	0,21
	V	ICP-MS	-	51	0,12
	Zn	ICP OES	206,200	-	2,5

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

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
	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
Total (EPA 3052)	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 através da análise dos materiais de referência certificados (MRC) de sedimento marinho NIST 2702 e de sedimento estuarino BCR – 667 (*European Commission*). Os valores obtidos pelo método US EPA 3051A foram comparados por recuperação da extração e estão apresentados na Tabela 4. Os valores obtidos pelo método US EPA 3052 estão apresentados na Tabela 5.

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

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

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

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

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

de amostra de sedimento, acondicionada em barcas de níquel, foi introduzida no equipamento. O comprimento de onda utilizado foi de 253.65 nm e o LQ obtido nas amostras de sedimentos foi de 1,0 $\mu\text{g kg}^{-1}$. O CRM foi analisado diretamente e o valor obtido ($0,4510 \pm 0,0028 \mu\text{g kg}^{-1}$) foi concordante com o valor certificado ($0,4474 \pm 0,0069 \mu\text{g kg}^{-1}$).

2.2.2.4 Determinação elementar nas amostras de água

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

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

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

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

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

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

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

Método	Elementos	Técnica analítica	Comprimento de onda (nm)	Isótopo	LQ da amostra (mg kg ⁻¹)
MPS (EPA 3051A)	Al	ICP OES	396,153	-	15,9
	As	ICP-MS	-	75	0,67
	Ba	ICP-MS	-	137	2,00
	Cd	ICP-MS	-	114	0,10
	Co	ICP-MS	-	59	0,12
	Cr	ICP-MS	-	53	3,00
	Cu	ICP-MS	-	63	0,90
	Fe	ICP OES	259,939	-	42,1
	Hg	DMA	253,65	-	0,91
	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

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

Tabela 9: Comparação entre os valores (µg L⁻¹) encontrados e informados para o *Trace Metals 1 in seawater* – QC (n=3) pelo método US EPA3015.

Elementos	Concentração (média ± desvio padrão)	
	Valor certificado	Valor encontrado
Al	1830 ± 32,6	2024
As	584 ± 10,4	545
Ba	-	-
Cd	609 ± 10,	351
Co	588 ± 10,5	538
Cr	426 ± 7,60	378
Cu	120 ± 2,15	88

Elementos	Concentração (média ± desvio padrão)	
	Valor certificado	Valor encontrado
Fe	2340 ± 42,0	2186
Mn	477 ± 851	449
Ni	-	-
Pb	533 ± 7,60	320
Sn	-	-
V	104 ± 1,85	66
Zn	1420 ± 25,4	958

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

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

A determinação de mercúrio foi realizada diretamente nas amostras de água total e da fração dissolvida utilizando o analisador direto de mercúrio (DMA-80). Para isso, uma massa de 100 mg de amostra de água, acondicionada em barcas de quartzo, foi introduzida no equipamento. O comprimento de onda utilizado foi de 253.65 nm e o LQ obtido nas amostras de sedimentos foi de $0,19\mu\text{g kg}^{-1}$ para água total e $0,046\mu\text{g kg}^{-1}$ para a fração dissolvida.

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

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

2.3 BENTOS

2.3.1 Coleta

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

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

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

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

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

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

2.3.2 Análise

2.3.2.1 Análise em laboratório

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

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

2.3.2.2 Análise dos dados

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 a diversidade de invertebrados bentônicos responde às concentrações de tais elementos. As variáveis resposta (dependentes) num primeiro momento foram os parâmetros de diversidade básicos da comunidade: riqueza e densidade de espécies observada, Diversidade de Shannon-Wiener (H' , \log_2), equitabilidade (J' de Pielou), e as variáveis explicativas (independentes) foram os tipos morfológicos das praias, bem como o período de amostragem (seca ou chuvosa), além das concentrações dos principais elementos químicos advindos do rejeito. Para tais testes foram realizadas análises de covariância (ANCOVA), adequadas quando existem variáveis X tanto categóricas quanto contínuas nos modelos. Além disso, os mesmos protocolos de análises descritos para os parâmetros da diversidade bentônicas também foram realizados para 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 (riqueza, densidade, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade) 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, 2018). Todas as análises foram

submetidas à análise de resíduos para verificação das distribuições de erro utilizadas, adequação dos modelos e retirada de possíveis 'outliers'.

Primeiramente, análises de ordenação multidimensional do tipo NMDS e PERMANOVA foram realizadas com o intuito de verificar se as composições de espécies variam entre as estações amostrais, bem como entre os períodos (seco/chuvoso). Nas análises de PERMANOVA, as concentrações dos elementos químicos mais abundantes nas praias foram usadas como variáveis ambientais discriminantes, a fim de verificar se ocorrem agrupamentos de diferentes espécies em locais mais ou menos impactados pela pluma de rejeito.

Uma outra abordagem utilizada para verificação dos impactos sobre as comunidades bentônicas foi a decomposição da diversidade beta em seus dois componentes: 'aninhamento' e 'turnover', conforme proposto por Baselga (2010). A decomposição da diversidade beta em seus dois componentes: 'aninhamento' e 'turnover', foi realizada conforme proposto por Baselga (2010). Os valores de beta 'turnover' e 'aninhamento' foram relacionados com as concentrações dos diferentes tipos de contaminantes; e o esperado foi que em locais mais impactados encontremos maiores valores de 'aninhamento' do que de 'turnover', uma vez que a troca natural de espécies por turnover é esperada quando se tem ambientes menos perturbados ou que estejam sofrendo estresses naturais. Por outro lado, impactos severos e antropogênicos tendem a levar a uma perda de espécies nas comunidades, gerando altos valores de 'aninhamento' na decomposição da diversidade beta.

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 composição de espécies também foram realizadas na plataforma R, utilizando os pacotes necessários para cada uma delas.

Apesar do tamanho macrofaunal dos poliquetas intersticiais *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura* cf. *variodontata*, 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. variodontata* foram retirados das análises dos descritores desse grupo e tratados separadamente como grupos chave.

2.3.2.3 Coleção

Uma coleção biológica pode ser entendida como um conjunto de organismos, ou partes destes, preservados fora do ambiente natural, isto é, de seu sítio de coleta. Seus componentes são preparados e organizados de modo a informar a procedência e identificação taxonômica de cada um dos espécimes, o que lhe confere status científico. Tais acervos, muito mais que servirem como repositórios de material biológico à pesquisa científica, subsidiam atividades de ensino e importante prestação de

serviços, além de apresentarem valioso material de importância histórica. Sumarizando, organizar, qualificar e disseminar a informação taxonômica e biogeográfica, além de promover a conservação ex situ de exemplares da biodiversidade são os maiores objetivos de uma coleção biológica.

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

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

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

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

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

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

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

hidrogeoquímica do ambiente, é possível obtermos conclusões mais precisas e um estudo mais completo do meio.

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

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

Adaptações na metodologia da análise estatística – Bentos: a descrição da fauna bentônica na avaliação espaço-temporal foi realizada considerando as características sedimentológicas das praias, mantendo o agrupamento original das praias do Compartimento B. O subprojeto Bentos não adotou a subdivisão do Compartimento B em dois (B e B'), como abordados pelos subprojetos Morfodinâmica e Geoquímica, devido à semelhança dos parâmetros ecológicos da fauna bentônica entre as praias desse setor. Dessa forma, para as análises estatísticas, a variável categórica "Compartimento" é formada por três setores, sendo o Compartimento A (n=3), o B (n=4) e o C (n=4). Essa diferença no n amostral no modelo apresenta um pequeno desequilíbrio amostral. Ao subdividir o Compartimento B em dois, este desequilíbrio se torna mais acentuado, tornando o modelo ainda mais desbalanceado, tendo o Compartimento A (n=3), B (n=1), B' (n=3) e o C (n=4), reduzindo o poder estatístico ao observar as diferenças reais do ambiente. Comparar duas categorias em que uma tem uma amostra e outra três é desaconselhável estatisticamente, porém, discussões pontuais, como ocorre na integração dos dados bióticos e abióticos de praia, foram feitas com base em resultados exploratórios. Para o relatório e análises da fauna bentônica, utilizamos a nomenclatura B' para esse compartimento.

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

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

3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – setembro/2022) 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

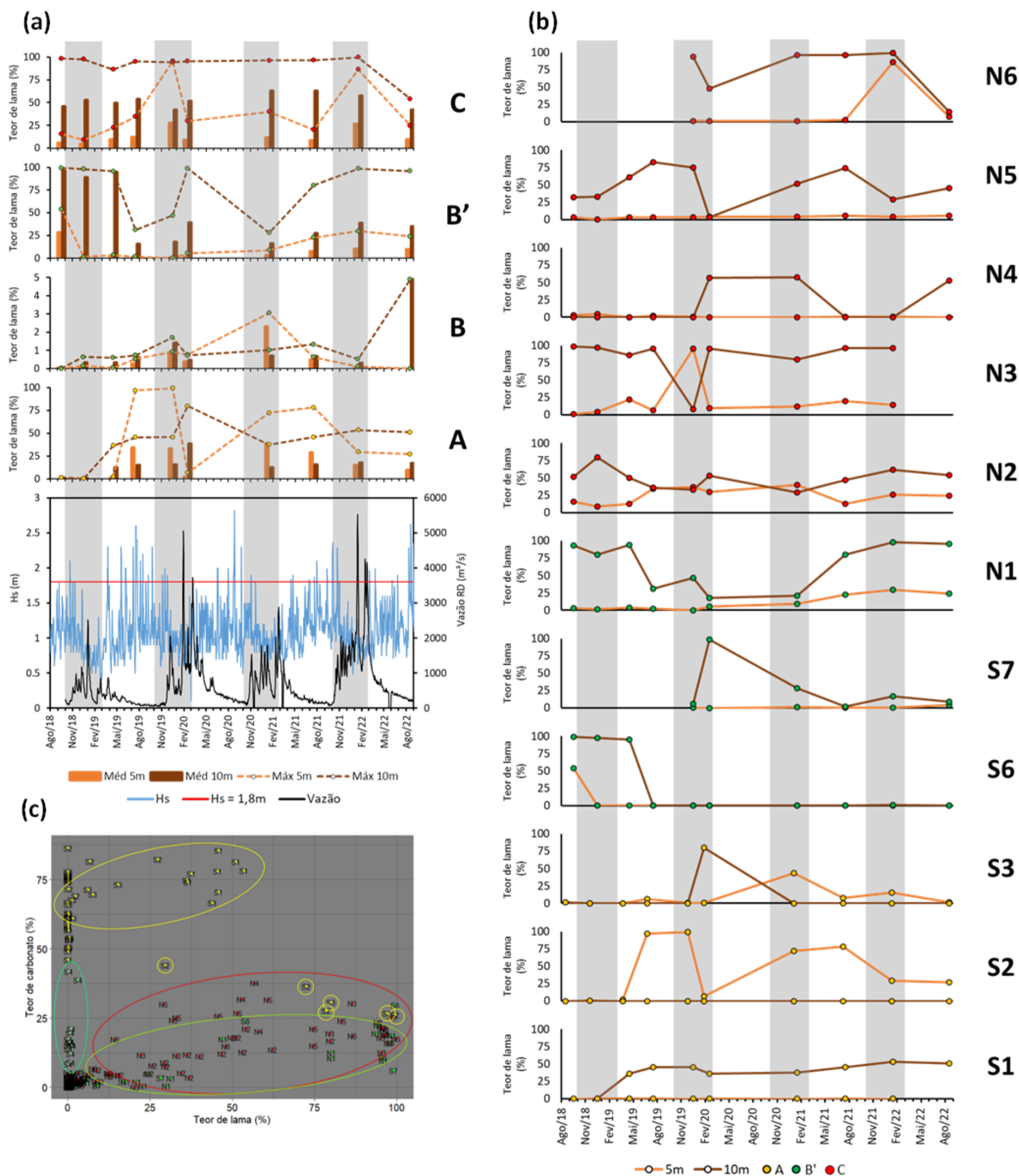
qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte a gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo de quatro anos de monitoramento, onde seus principais resultados foram discutidos em todos os relatórios técnicos entregues até o presente, entretanto a partir do novo modelo de relatório solicitado via ofício SEI nº 85/2022-CTBio/DIBIO/ICMBio, proposto via ofício FR.2023.0214 (SEI13515133) e aprovado via ofício SEI nº4/2023-CTBio/DIBIO/ICMBio, a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

3.1 MORFODINÂMICA

3.1.1 Teor de lama

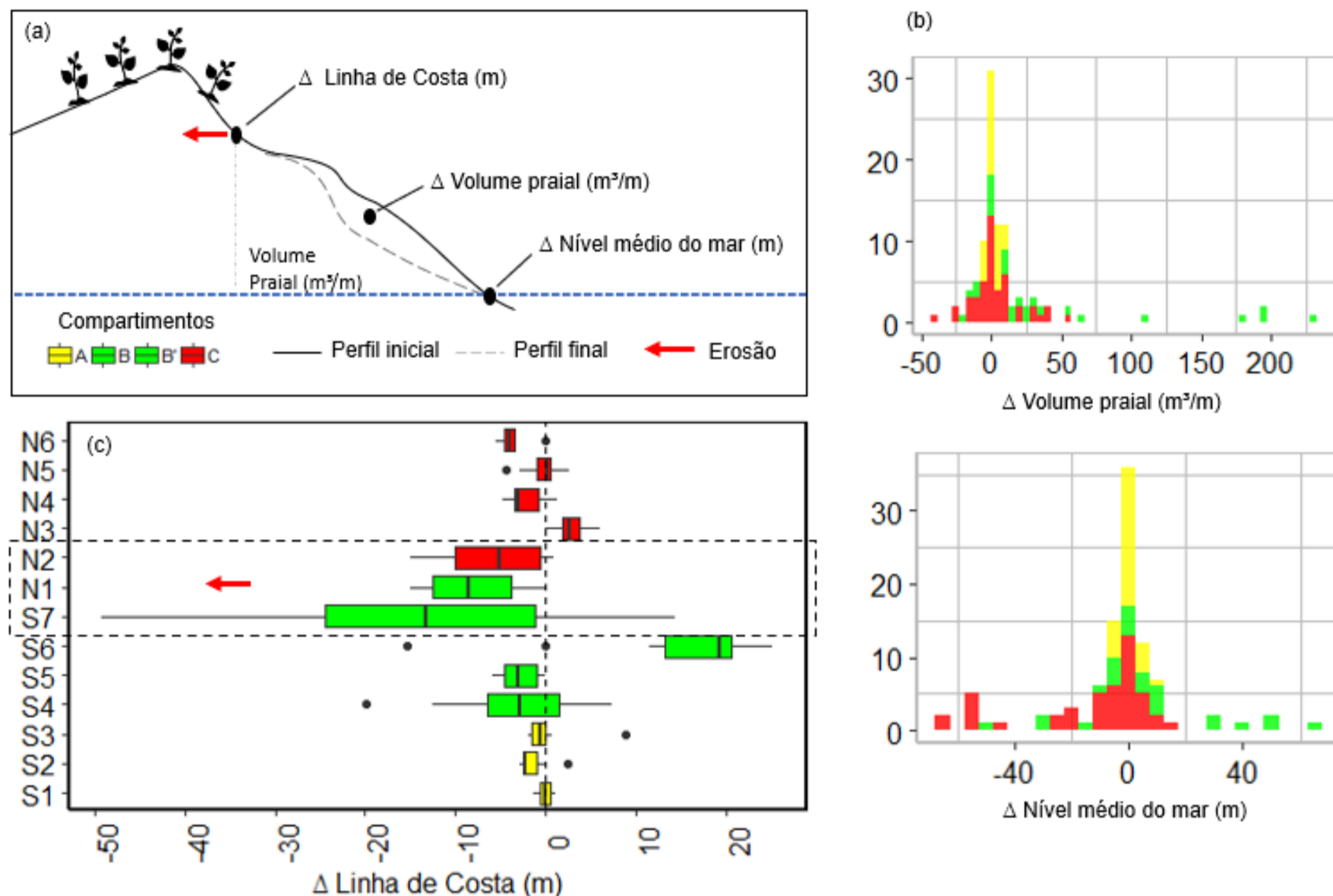
Figura 2: Indicador Teor e composição da lama na antepira. Para este indicador, utilizou-se dados somente da antepira, uma vez que na praia emersa os teores de lama são nulos ou muito baixos. Destaques em cinza representam os períodos chuvosos. O gráfico (a) mostra a variação temporal dos teores de lama médios e máximos para cada Compartimento (atenção para escala do teor de lama reduzida para o Compartimento B), associados à variação temporal das condições físicas de onda (altura significativa – Hs) e vazão do Rio Doce. O gráfico (b) apresenta a variação temporal para as estações de cada Compartimento, para um maior detalhamento espacial deste indicador em regiões com maior potencial de impacto. O gráfico (c) apresenta uma regressão linear entre o teor de lama e de carbonato do sedimento da antepira, destacando as características semelhantes dentro de cada Compartimento.



O Compartimento A (c - elipse amarela) apresenta sedimentos predominantemente carbonáticos (>50% CaCO_3), com exceções de S2 e S3, que eventualmente, apresentam altos teores de lama terrígena (c - círculos amarelos); os Compartimentos B' (c - verde) e C (c - vermelho) são os que apresentam maiores ocorrências de altos teores de lama, majoritariamente terrígena (<40% CaCO_3). Em relação à variação espacial, o Compartimento A apresenta teor médio de lama (17,4%) intermediário em comparação com os demais, com composição predominantemente carbonática (c), sendo que temporalmente, seus teores de lama são variados e não aparentam responder linearmente as forçantes físicas, com maiores teores de lama na profundidade de 5 metros do que em 10 m na maior parte do período (a). Dentro deste Compartimento, a estação S1 apresenta teores altos em 10 m, mas com composição majoritariamente carbonática (c). S2 (b) possui teores de lama nulos em 10 m e os maiores e mais variados teores do Compartimento A em 5 m, sendo que a maioria apresenta baixo teor carbonático/alto teor terrígeno (c). S3 (b) apresenta dois picos de lama ao longo do monitoramento, nas profundidades de 5 (jan/21) e de 10 m (fev/20), com grande teor de sedimentos terrígenos no pico de fevereiro de 2020 (c), o que pode estar relacionado às altas condições de vazão do Rio Doce neste período chuvoso (a). O Compartimento B apresenta os menores teores de lama ($0,7\% \pm 1,1\%$) ao longo do recorte espacial do monitoramento, sem grandes variações temporais também (a), dispensando uma análise espacial mais detalhada. O Compartimento B' apresenta valores intermediários de lama (26,7%), com maiores teores em 10 m, com picos associados à eventos de alta vazão do Rio Doce (fev/20; jan/21) (a). Dentro deste Compartimento, a estação N1 (b), à norte da desembocadura, é a que mais contribui para os teores de lama altos, principalmente em 10. Observa-se um aumento de lama na em 5 m nesta estação, que tem se mantido significativo nas últimas 3 campanhas. S7 (b) apresentou valores altos de lama somente em 10 m nos períodos chuvosos (fev/20, jan/21 e jan/22), evidenciando a contribuição direta da carga de sedimentos do Rio Doce nesta estação. S6 (b) apresentou altos valores de lama em 10 m, somente nas três primeiras campanhas (set/18; 97,9% em dez/18; abril/19), com valores permanentemente nulos após. O Compartimento C é o que apresenta maiores e mais constantes teores médios de lama (32,1%), com maiores teores em 10 m, mas também altos teores em 5 m (a). Na análise espacial mais detalhada deste Compartimento, a estação N2 (b) apresenta valores significativos e alta constância nos teores de lama em ambas profundidades de 5 e 10m, com picos em 10 m nos períodos chuvosos (dez/18 e jan/22). N3 apresenta os maiores e mais constantes valores de lama em 10 m e menores, mas ainda significativos, em 5 m, contribuindo significativamente para os altos teores de lama do Compartimento C. N4 e N5 (b) apresentam valores de teor de lama próximos a zero em 5 m, sem variações temporais, enquanto na de 10 m, N4 apresenta apenas 3 momentos em que os valores foram significativos (fev/20, jan/21 e ago/22) e N5 apresenta variações periódicas. A estação N6 (b) apresenta valores baixos de lama em 5m, com exceção a jan/22, enquanto em 10 m os valores são altos. As estações ao norte da desembocadura (Compartimento C + N1) parecem apresentar uma presença crônica de altas quantidades de lama na antepraia, principalmente em 10 m, mas também em 5 m, especialmente em N1, N2 e N3. A presença de altos valores de lama terrígena parecem ocorrer eventualmente em no Compartimento A (S2 e S3) e B' (S6 e S7) em ambas profundidades. O Compartimento B e a estação S1 parecem não apresentam valores significativos de lama terrígena.

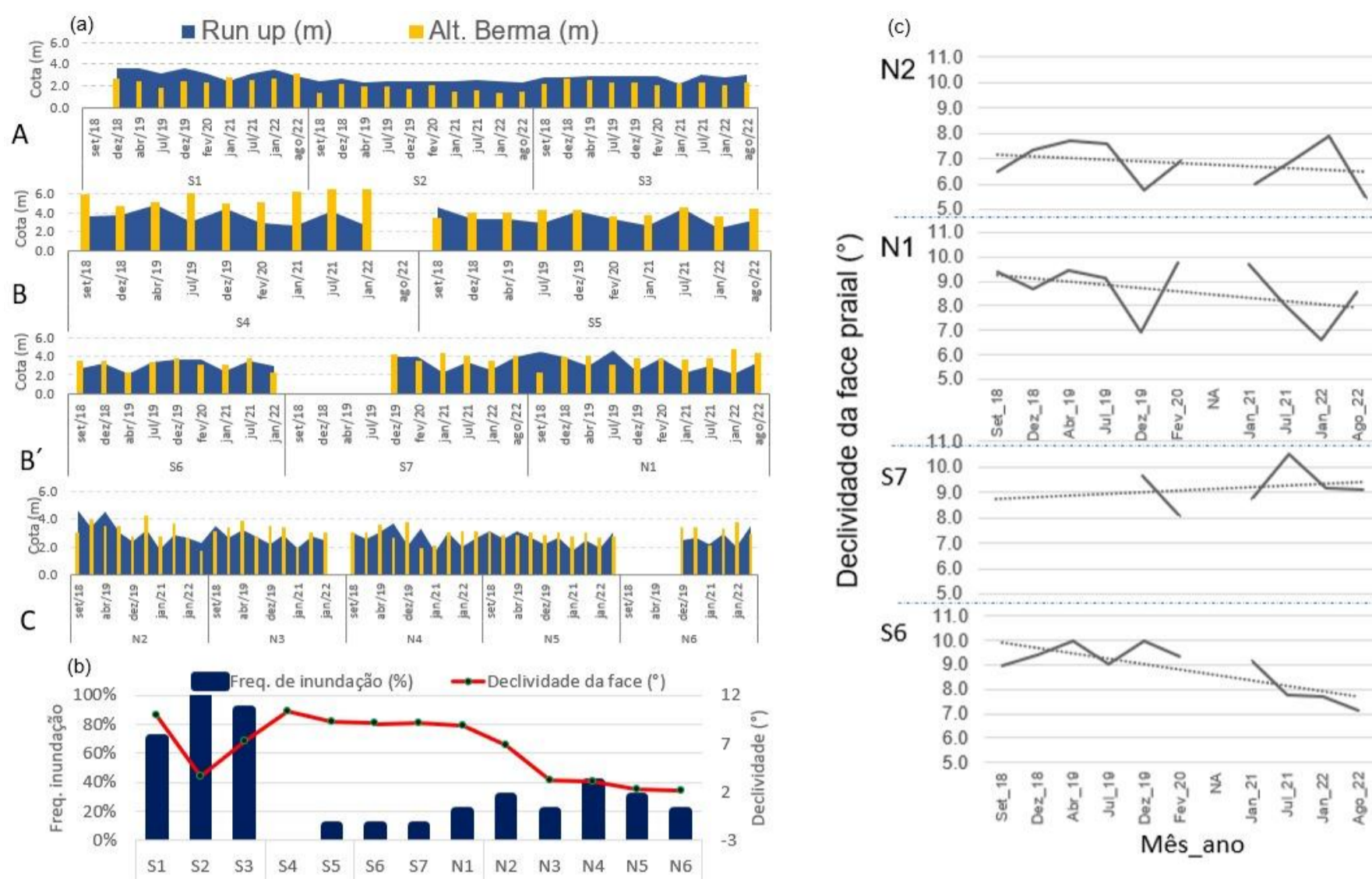
3.1.2 Alterações morfológicas da praia

Figura3: Alteração morfológica da praia. (a) diagrama conceitual da mobilidade de um perfil praial ilustrando os parâmetros morfológicos avaliados no presente estudo, sendo: Δ **Linha de Costa (m)** a variação da posição no contato da praia com a restinga; Δ **Volume Praiaal (m³/m)** a variação de volume de sedimentos, abaixo do perfil ativo emerso, entre o NMM e linha de costa (contato praia/restinga); e Δ **NMM (m)** a variação da posição do contato entre a face praial e o NMM. A variação desses parâmetros tem como base a primeira campanha amostral (Agosto2018) em comparação com as campanhas subsequentes. Os valores negativos de Δ **Linha de Costa (m)** e Δ **NMM (m)** representam a retração do perfil rumo ao continente, e para Δ **Volume (m³/m)** representa a redução do volume de areia da praia emersa ativa. (b) histograma de frequência das variáveis morfológicas agrupadas a partir da compartimentação sugerida para a costa em estudo (Compartimentos A, B e C). (c) indica a mobilidade (erosão e progradação) da Δ **Linha de Costa (m)** e o destaque (retângulo pontilhado) para as estações amostrais com tendência erosiva.



As estações S7 Regência, N1 Povoação e N2 Degredo apresentam tendências erosivas, alcançando uma retração máxima na ordem de 50m na estação S7 (c). É possível verificar a estabilidade morfológica das praias do Compartimento A em todos os três parâmetros analisados (b e c), e uma alta mobilidade nas praias dos Compartimentos B e B', com uma tendência erosiva, porém com recuperação do volume de areia no Compartimento B'. No Compartimento C a mobilidade morfológica é mais restrita, enquanto experimenta uma retração aproximada de 15m na estação N2 Degredo (c).

Figura 4: Eventos de inundação por ondas sobre a berma. (a) Evolução temporal comparativa entre a altura da berma (m) e do run-up (m) para cada estação dos Compartimento A, B, B' e C ao longo do monitoramento. (b) Distribuição espacial da frequência de eventos em que o runup transpõe a berma praial, o que indica a chegada do espraçamento até as feições superiores da praia. (c) Registro das declividades da face da praia ao longo do monitoramento nas estações com maior mobilidade morfológica e/ou tendências erosivas.

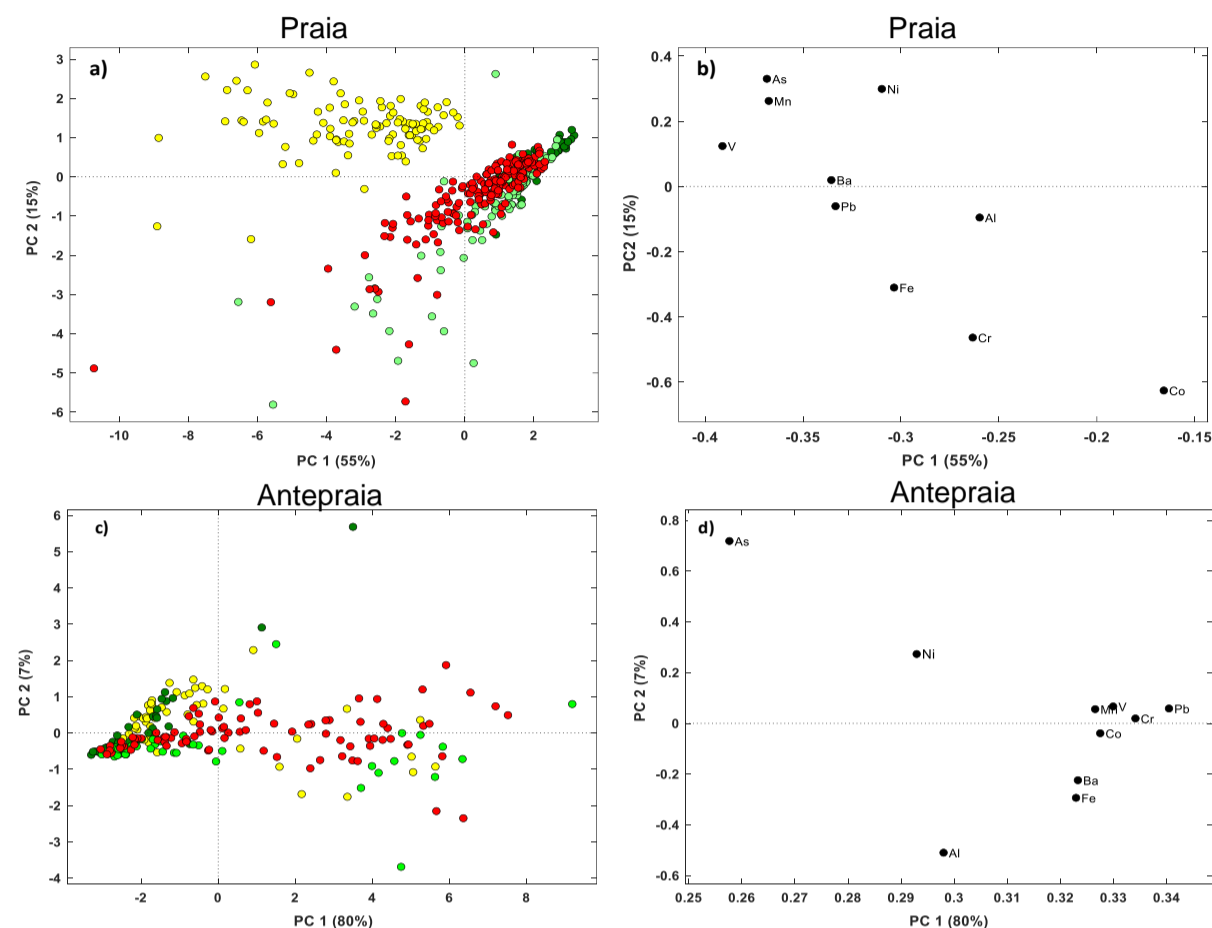


Nas praias do Compartimento A há uma maior frequência de eventos inundacionais, superior a 85%, fato que pode estar associado à baixa declividade dos perfis, com bermas ausentes ou pouco desenvolvidas, e à impermeabilização do fundo marinho devido à presença de couraças lateríticas na antepraia, que potencializam o empilhamento da onda junto a costa e também de possíveis contaminantes. Nos Compartimentos B e B', a areia grossa com alta permeabilidade, a alta inclinação da face e berma alta, restringem o desenvolvimento do espraçamento, com ocorrências inferiores a 15% ao longo do monitoramento. No Compartimento C, a menor declividade e afinamento da areia, potencializam o efeito do espraçamento, com frequência média de 25% de ocorrência de transposição da berma pelo espraçamento das ondas. Observa-se pela linha de tendência (c) uma redução da declividade em todas as estações destacadas, exceto S7 Regência, podendo sugerir uma disposição para o aplainamento do perfil topográfico e consequentemente aumento dos eventos inundacionais e erosivos.

3.2 GEOQUÍMICA

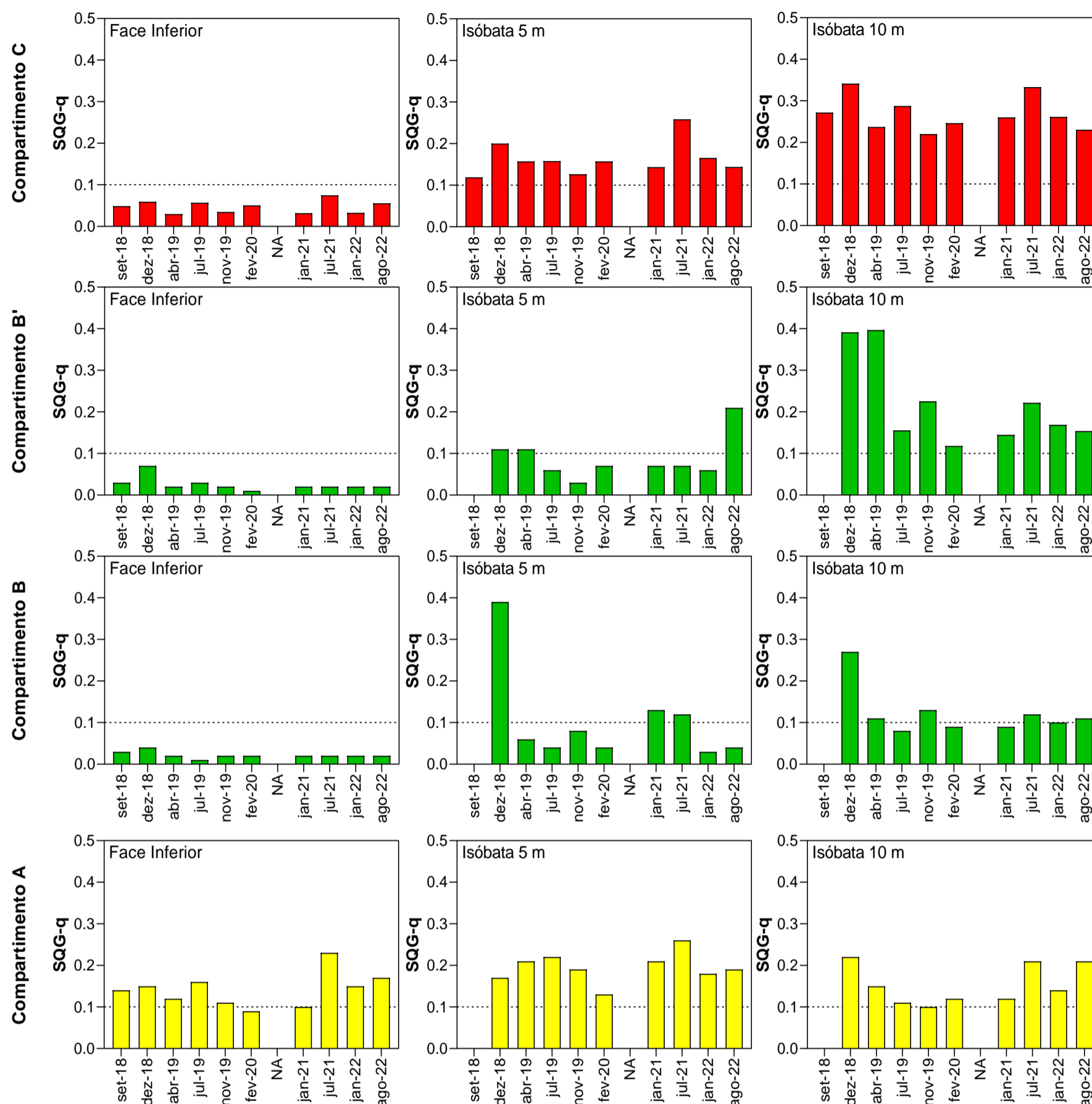
3.2.1 Concentração de elementos químicos no sedimento

Figura 5: Gráfico de escores (**a** e **c**) e pesos (**b** e **d**) para PC1 e PC2 em função das amostras da praia emersa e antepraia rasa (**a** e **b**) e praia submersa isobátas de 5 e 10 m (**c** e **d**); Compartimento A (amarelo); o Compartimento B (verde escuro); Compartimento B' (verde claro) e Compartimento C (vermelho).



Quanto à distribuição dos elementos químicos ao longo das praias, é possível observar pela análise de componentes principais (PCA) que na parte emersa do perfil praiar, o Compartimento A se destaca por apresentar as maiores concentrações dos elementos químicos, principalmente, As, Mn, Ni e V (**a** e **b**). Com relação aos Compartimentos B' e C, os elementos que merecem destaque na parte emersa são Al, Ba, Co, Cr, Fe e Pb. Na parte submersa do perfil praiar, os Compartimentos B' e C se destacam pelos maiores teores de elementos químicos (**c** e **d**). Essas observações corroboram com os dados de anos anteriores que demonstram que a descarga do Rio Doce e o sentido da deriva litorânea, majoritariamente para o Norte, resulta na maior concentração de elementos químicos nas praias do Compartimento C. Apesar da descarga do Rio Doce influenciar significativamente a concentração dos elementos químicos nas praias do setor norte (N2 Degredo até N6 Itaúnas), é relevante destacar que as praias do Compartimento B' (S6 Regência até N1 Povoação), localizadas nas proximidades da desembocadura, também apresentam altos teores dos elementos químicos, em função do aporte direto de sedimentos do Rio Doce.

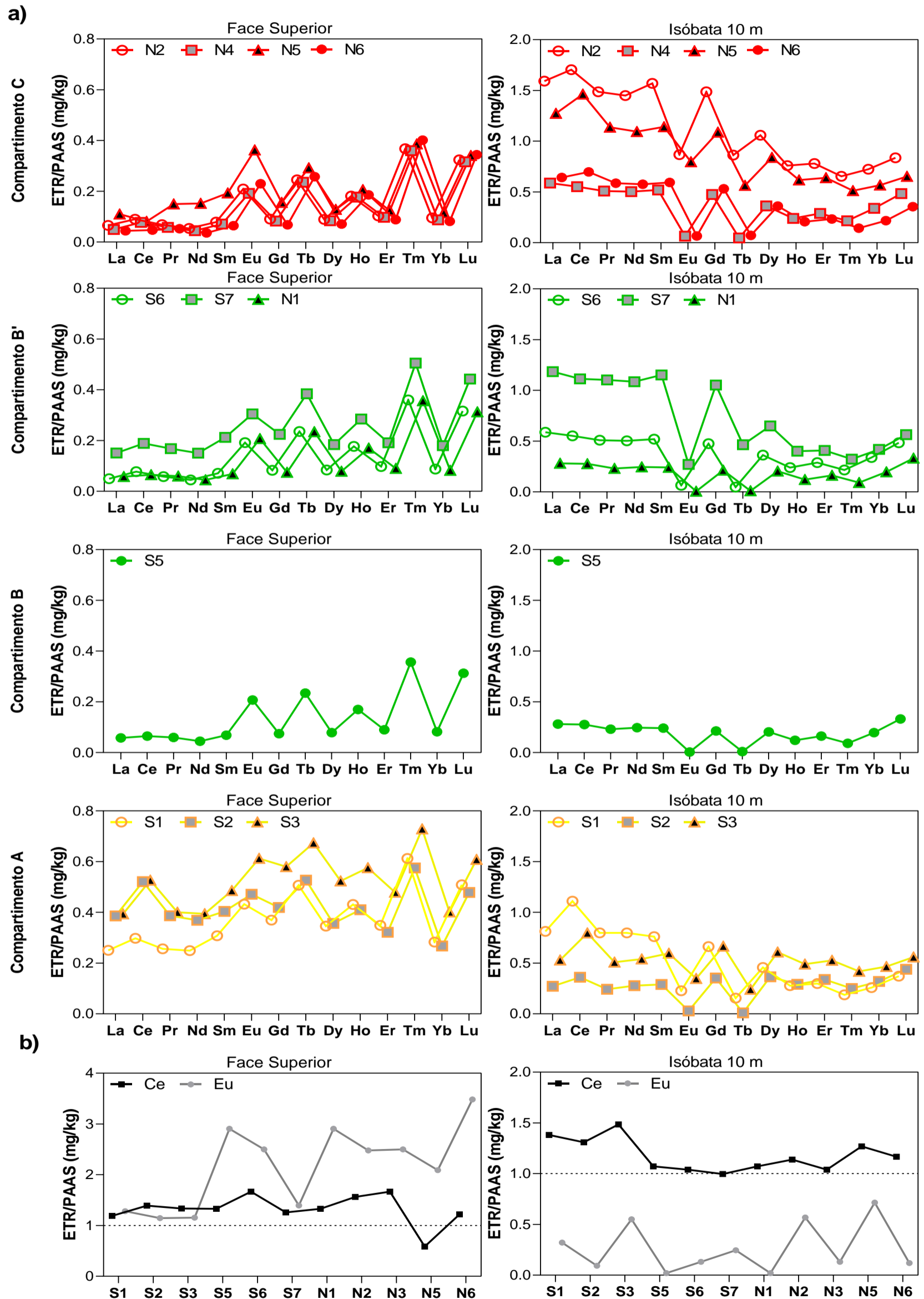
Figura 6: Índice de contaminação do sedimento das praias baseado no SQG-q (do inglês *sediment quality guideline quotient*) obtidos para os Compartimentos A (amarelo); B - B' (verde) e Compartimento C (vermelho), na face inferior, isóbata 5m e isóbata 10 m.



A avaliação espaço-temporal dos elementos químicos ao longo do período de monitoramento permitiu a realização de um diagnóstico qualitativo sobre a condição de contaminação ambiental quando foi utilizado SQG-q (Longhini et al., 2022), que classifica o sedimento praiar, em função das concentrações dos elementos químicos. A utilização do SQG-q para o ambiente praiar é importante devido, principalmente, à falta de valores de referência locais para a concentração dos elementos químicos, que inviabiliza o emprego de índices consolidados como o índice de geoacumulação (I_{geo}), por exemplo. De acordo com SQG-q, o ambiente praiar pode ser classificado como não contaminado para valores de SQG-q < 0,1; moderadamente impactado para valores entre 0,1 e 1 e fortemente impactado para valores superiores a 1. Como pode ser observado o Compartimento A, independente da feição coletada, vem apresentando-se como moderadamente contaminado ao longo do monitoramento. Esse comportamento ressalta a influência das características geológicas e morfodinâmicas sobre a composição química das praias desse compartimento. Os Compartimentos B' e C apresentaram SQG-q superior a 0,10 ao longo de todo o período de monitoramento, principalmente na isóbata de 10 m sendo classificado como moderadamente contaminado. O Compartimento C merece destaque por apresentar os maiores índices de contaminação. A zona emersa dos Compartimentos B, B' e C, representada pela face inferior, pode ser classificada como não impactada ao longo da série histórica.

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

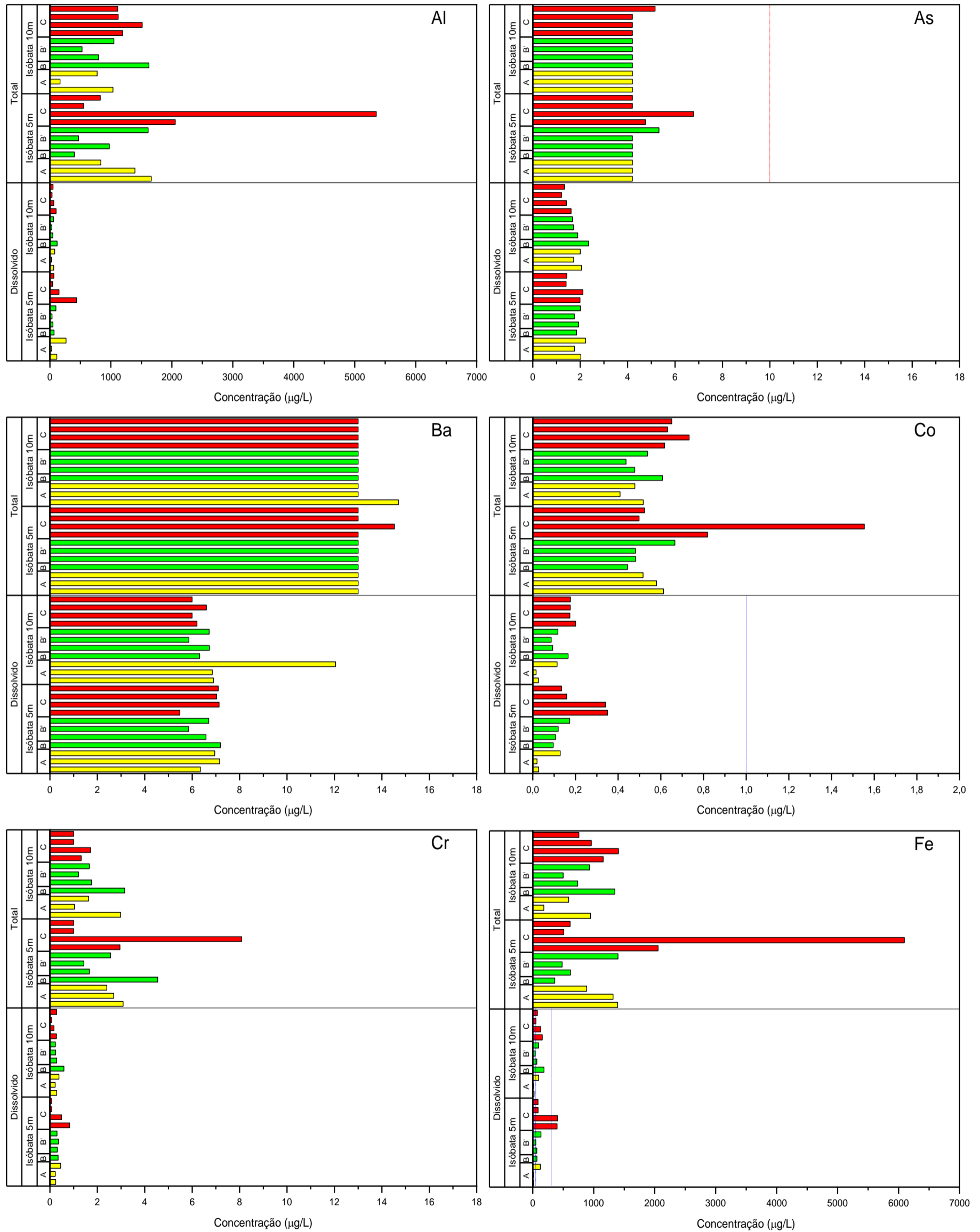
Figura 7: (a) Perfil de distribuição dos elementos terras raras, normalizados pelo Folhelhos Pós Arqueano - PAAS (do inglês *Post Archean Australian Shale*), no sedimento marinho coletado na face superior e na isóbata de 10 m ao longo das estações amostrais; (b) Avaliação de ocorrência das anomalias de Cério (Ce) e Európio (Eu) ao longo das estações amostrais. O Padrão de comportamento dos elementos terras raras (ETR) normalizados foi analisado nas estações amostrais dos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde, S5), B' (verde, S6 a N1) e C (verde, N2 a N6) para face superior e isóbata de 10 m.

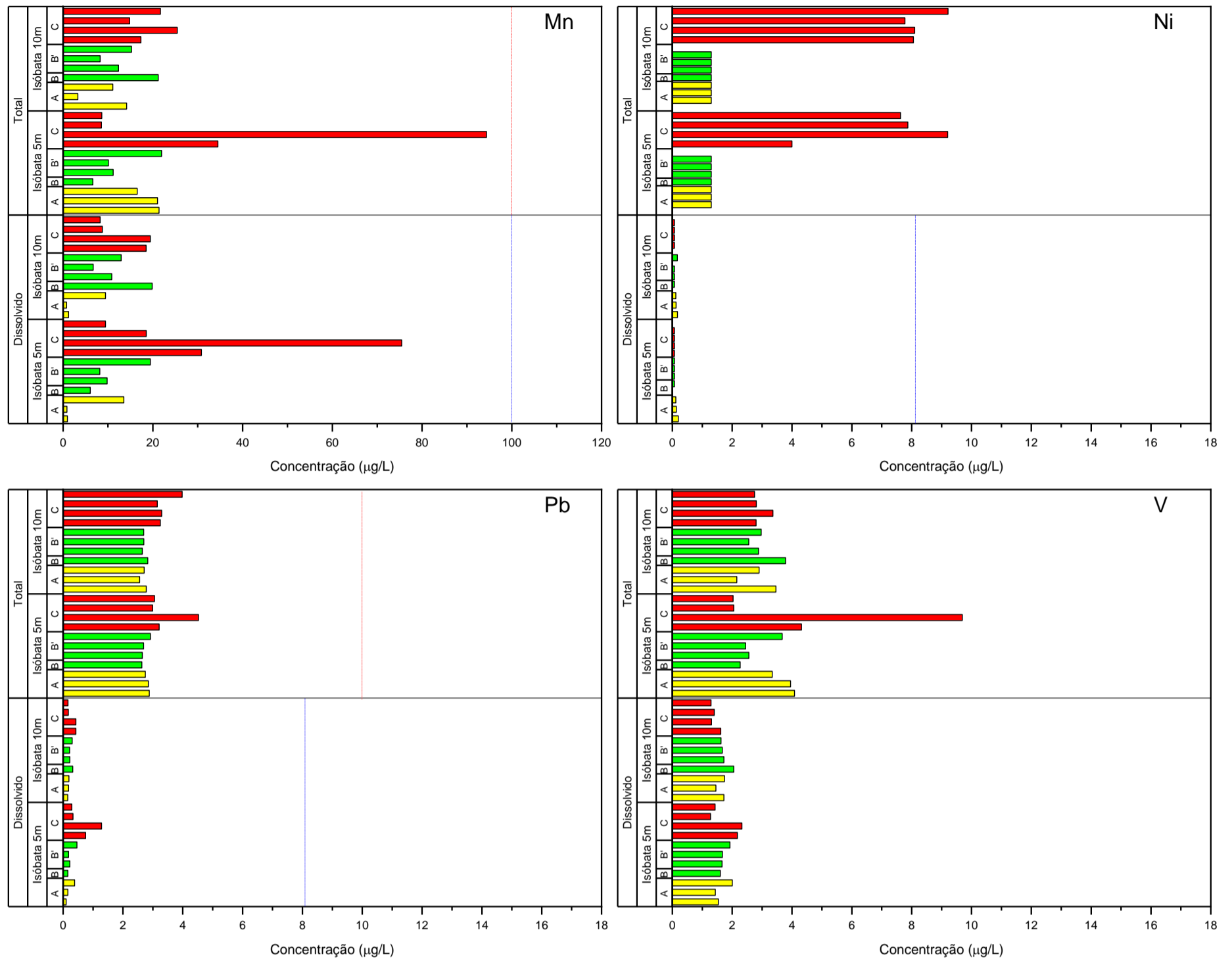


Na face superior, observou-se que a distribuição dos elementos terras raras normalizados apresentou um comportamento semelhante em todos os compartimentos com razões de normalização para todos os ETR menores que 1, indicando um esgotamento desses elementos. Na isóbata de 10 m não foi observado um padrão de distribuição. Os elementos La, Ce, Pr, Nd, Sm e Gd apresentaram razões de normalização maior que 1 nas estações amostrais S7 (B'), N2 e N5 (C), indicando um enriquecimento. Na estação S2 (A) apenas Ce apresentou razão maior que 1. Anomalias de Eu e Ce positivas (>1) na face superior foram encontradas em todas as estações amostrais, com exceção da estação N5 para Ce. Na isóbata de 10 m, anomalias positivas (>1) de Ce são observadas em todas as estações amostrais, sendo anomalias mais expressivas em S1, S2 e S3. Anomalias negativas de Eu são encontradas em todos os compartimentos, sendo que nas estações amostrais S2, S5 e N1 as anomalias de Eu estão bem próximas de 0. A presença das anomalias de Ce/Ce* são sugestivas de variações nas condições redox do ambiente, sendo anomalia positiva relacionada a deposição destes elementos no sedimento como complexo de oxi-hidróxidos de ferro, manganês ou alumínio e anomalias negativas relacionadas ao esgotamento desses elementos sedimento. As anomalias negativas de Eu/Eu* na isóbata de 10 m são sugestivas de variações nas características litológicas. Tendo em vista a presença de anomalias de Ce e Eu nas estações amostrais, pode-se inferir que variações nas características do ambiente estão ocorrendo, contudo, uma avaliação mais assertiva não pode ser feita com apenas uma campanha amostral.

3.2.3 Concentração de elementos químicos na água

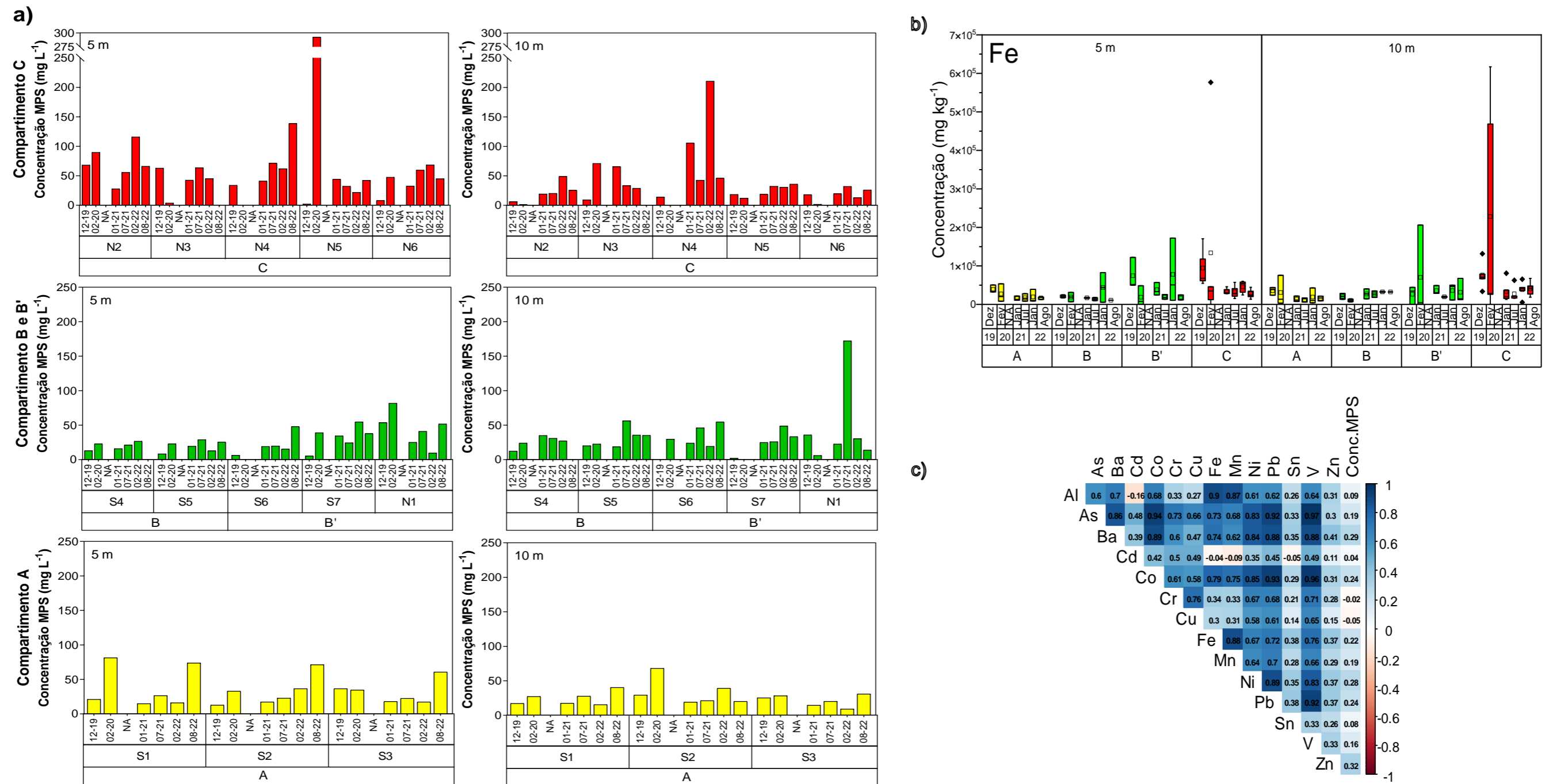
Figura 8: Concentração (µg/L) dos elementos químicos totais e dissolvidos em amostras de água do mar (fundo) coletadas nas isóbatas de 5 e 10 m (campanha 08/22) ao longo das estações amostrais.





A qualidade da água foi avaliada com base nos limites estabelecidos pela Resolução do CONAMA nº357 e pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Buchman, 2008) para níveis agudos e crônicos em águas marinhas. Observando os limites da Resolução do CONAMA nº357 (---) para concentração total em águas salinas classe 1, verificou-se para todos os Compartimentos A (amarelo) e B-B' (verde) e Compartimento C (vermelho) que as concentrações obtidas ficaram abaixo dos valores limites. Para Fe dissolvido, os valores ficaram acima do nível crônico (- - -) estabelecido pelo NOAA para praticamente todas as estações amostrais. Cabe ressaltar que o Compartimento C apresentou em duas estações amostrais (N2 e N4 - isóbatas de 5m) concentração de Fe (dissolvido) superior ao nível agudo estabelecido pelo NOAA (—). Destacamos a estação N4, que além de ter apresentado Fe (dissolvido) superior ao estabelecido apresentou as maiores concentrações totais de todos elementos na isóbata de 5 m. Utilizando o índice PLI (*PollutionLoad Index*) que avalia o nível de poluição das águas, foi verificado, considerando todos os elementos, valores de PLI < 1 sugerindo área não poluída; porém, utilizando somente os elementos Fe e Mn mais expressivos (Longhini et al., 2022) obteve-se PLI > 1 para as estações N2 e N4, na isóbata de 5 m, inferindo área poluída.

Figura 9: (a) Concentração de material em suspensão (mg/L) na coluna d'água, (b) concentração de ferro no material particulado em suspensão (mg/kg) obtida para as isóbatas de 5 e 10 metros ao longo dos Compartimentos A, B, B' e C. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid-19, (c) correlação de Spearman (rS) para as concentrações dos elementos químicos presentes no material particulado em suspensão.



Durante o período de monitoramento, as estações ao norte da desembocadura do Rio Doce apresentaram um maior aporte de material em suspensão, especialmente nas isóbatas de 5 metros. No entanto, a concentração de ferro no MPS é maior na isóbata de 10 m em todos os compartimentos, não sendo possível observar uma forte correlação positiva entre o teor de MPS e a concentração de elementos químicos, o que pode estar relacionado com a natureza do material em suspensão. Esse material pode ser resultado de ressuspensão de sedimentos antes depositados, de aporte sedimentar recente ou ainda, da presença de organismos e biodetritos (Costa et al., 2017). Em profundidades menores, como em 5 metros, uma maior atuação das ondas pode remobilizar o fundo e colocar materiais mais finos em suspensão. De modo temporal, as estações amostrais não apresentam um padrão bem definido de distribuição do MPS relacionados aos períodos amostrais seco e chuvoso. Como exceção, em momentos de elevadas vazões do Rio Doce, ocorrido em fevereiro de 2020, podemos observar maiores concentrações dos elementos químicos nas isóbatas de 10 m dos compartimentos B' e C devido ao aporte de sedimento fino proveniente do rio. Esse padrão de distribuição em direção ao norte, ocorre devido à atuação da deriva litorânea no transporte de sedimentos, relatado anteriormente por Oliveira et al. (2015). Esse comportamento é observado para os diferentes elementos investigados, uma vez que apresentam altas correlações positivas entre si.

3.3 BENTOS

3.3.1 Indicador macrofauna

Tabela 11: Resultados das ANOVAs (Análises de variância) realizadas com os parâmetros da diversidade da macrofauna bentônica para praia emersa e antepraia entre os compartimentos e campanhas durante todo o período de realização do PMBA/FEST. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. 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. ns – não significativo.

Variação espaço-temporal do indicador Macrofauna																
Variáveis	GL	Densidade (ind/m2)			Riqueza taxonômica			Diversidade Shannon			EquitabilidadePielou			Diversidade Beta		
		F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>																
Compartimento	2	8,99	0,00	B > A, C	2,51	ns		1,50	ns		8,2	0,00	C > A, B	1,84	ns	
Campanha	1	7,89	0,00	-	6,55	ns		0,73	ns		7,51	0,00	+	2,52	ns	
Compartimento x Campanha	2	2,71	ns		1,94	ns		0,67	ns		1,67	ns		0,002	ns	
<u>Antepraia</u>																
Compartimento	2	5,48	0,00	A, C > B	9,79	0,00		5,76	0,00	C >A, B	0,5	ns		0,03	ns	
Campanha	1	0,25	ns		0,1	ns		0,54	ns		0,02	ns		1,80	ns	
Compartimento x Campanha	2	0,49	ns		0,04	ns		0,67	ns		0,63	ns		0,003	ns	
Isóbatas	1	0.79	ns		1.35	ns		0.44	ns		0.28	ns		-	-	

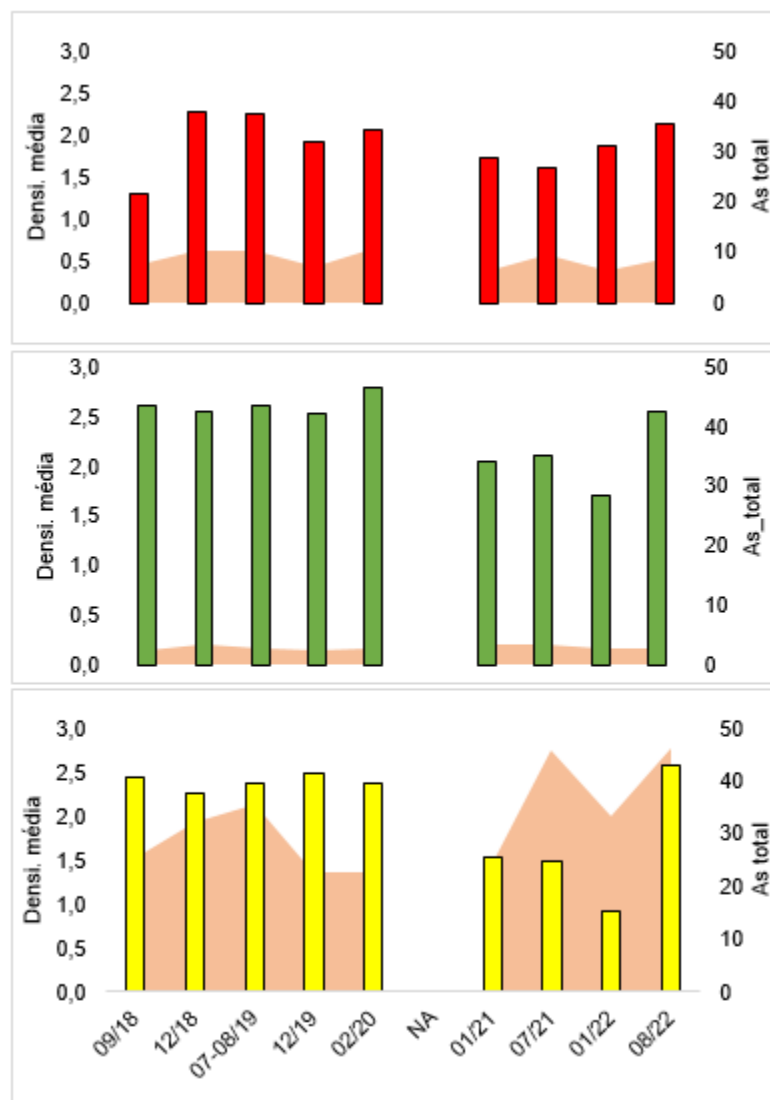
A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de dezembro/19. Como resultados principais, é possível ver que a densidade da macrofauna na praia emersa é maior no Compartimento B. No entanto, ela se comporta de forma contrária na antepraia, onde este compartimento apresenta os menos valores. Na antepraia os maiores valores de densidade são observados no Compartimento A, favorecidos pela maior heterogeneidade espacial devido a presença das couraças lateríticas na região. Não há um padrão entre períodos secos e chuvosos, porém, de modo geral, ocorre uma tendência de redução da densidade de organismos e aumento da Equitabilidade de Pielou com o tempo nas praias emersas.

Tabela 12: Resultados das ANOVAs realizadas com os grupos chave da macrofauna bentônica da praia emersa e da antepraia entre os compartimentos e campanhas amostradas durante todo o período de realização do PMBA/FEST. A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de dezembro/19. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. 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. NA – Não se aplica.

Variação espaço-temporal dos Grupos-chave da praia emersa												
Variáveis	Compartimento			Campanha			Compartimento x Campanha			Isóbatas		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>												
Oligochaeta	10,71	0,00	B > A, C	10,3	0,001	oscila	0,64	ns		NA	NA	NA
<i>S. pussicus</i>	21,33	0,00	B > C, A	4,16	0,04	oscila	0,20	ns		NA	NA	NA
<i>H. cf. variodentata</i>	22,64	0,00	B > C > A	9,51	0,002	oscila	0,06	ns		NA	NA	NA
<i>E. brasiliensis</i>	2,26	ns		2,98	ns		0,49	ns		NA	NA	NA
Amphipoda	2,87	0,05	A > B e C	0,02	ns		3,98	0,01		NA	NA	NA
<u>Antepraia</u>												
Spionidae	125,3	ns		124,4	ns		124,1	ns		124,5	ns	

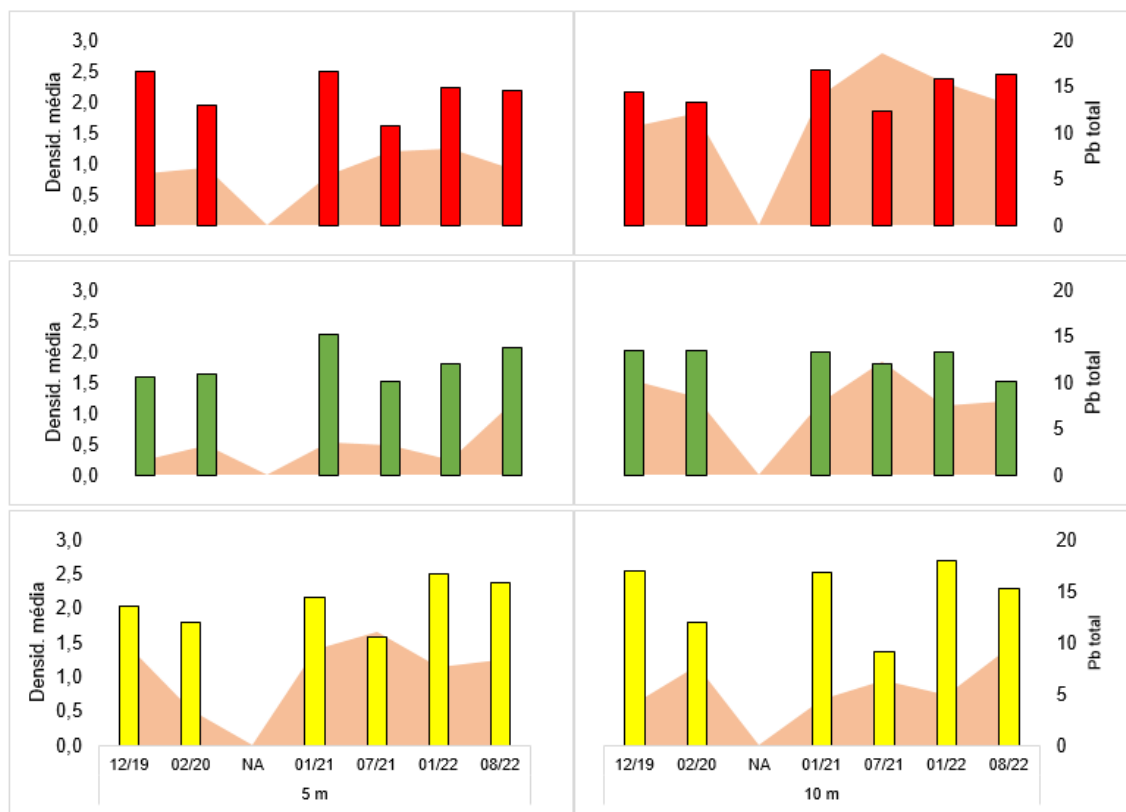
Os grupos chaves, *Oligochaeta*, *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura cf. variodentata* apresentam maiores densidades no Compartimento B do que nos demais. Cabe ressaltar que as duas últimas espécies preferem regiões com sedimentos com areia grossa, característica presente nesse compartimento. Já o crustáceo *Amphipoda* tende a ter seus maiores valores no Compartimento A, região onde a complexidade estrutural do ambiente promove abrigo a alimento de forma proporcional. Assim como a macrofauna, as densidades destes organismos não apresentam uma clara variação sazonal (seco/chuvoso), no entanto seus valores oscilam durante o monitoramento.

Figura 10: Densidade (ind/m²) da macrofauna bentônica da praia emersa em relação à distribuição de Arsênio (As) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest. Barras amarelas - Compartimento A, Barras verdes- Compartimento B', Barras vermelhas - Compartimento C. NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



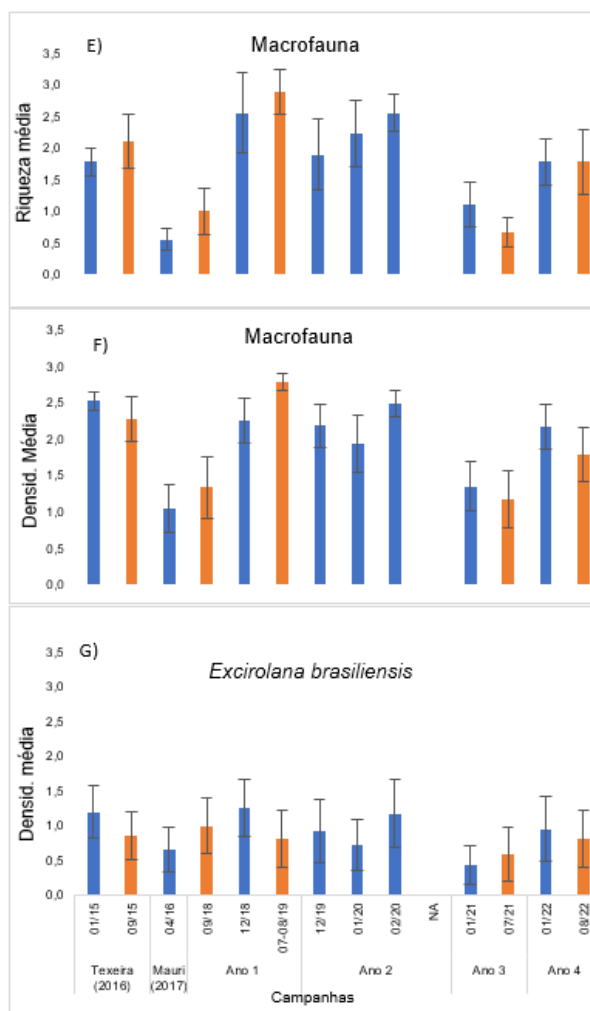
Cabe ressaltar que o As no Compartimento A apresenta outras fontes de enriquecimento e no Compartimento C é proveniente da deriva litorânea de sul para norte. É possível observar uma tendência de redução da densidade no Compartimento C ao longo do tempo ($F=7.8984$; $p=0.005$). No entanto, na campanha do chuvoso (agosto/22) do Ano 4 a densidade voltou a aumentar. As praias deste compartimento são do tipo dissipativa e, de acordo com a literatura mundial de praias arenosas, era esperado altos valores de densidade e riqueza da macrofauna, o que não está ocorrendo. Embora outros parâmetros da macrofauna apresentem diferenças significativas entre os compartimentos, não é possível observar estabilidade ou alguma tendência ao longo do tempo. Além do Arsênio, os parâmetros da macrofauna apresentam relações com Alumínio (Al), Bário (Ba), Ferro (Fe), Níquel (Ni) e Manganês (Mn) conforme sumarizado na Tabela 13. Em relação aos Grupos-chave listados na Tabela 14, esses apresentaram relações com As, Al, Fe, Mn e Ni. O crustáceo *Excirolana braziliensis* e o anelídeo *Oligochaeta* apresentaram relações negativas com a porcentagem de lama.

Figura 11: Densidade (ind/m²) da macrofauna bentônica na antepraia em relação à distribuição de Chumbo (Pb) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest. Barras amarelas - Compartimento A, Barras verdes- Compartimento B', Barras vermelhas - Compartimento C. NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



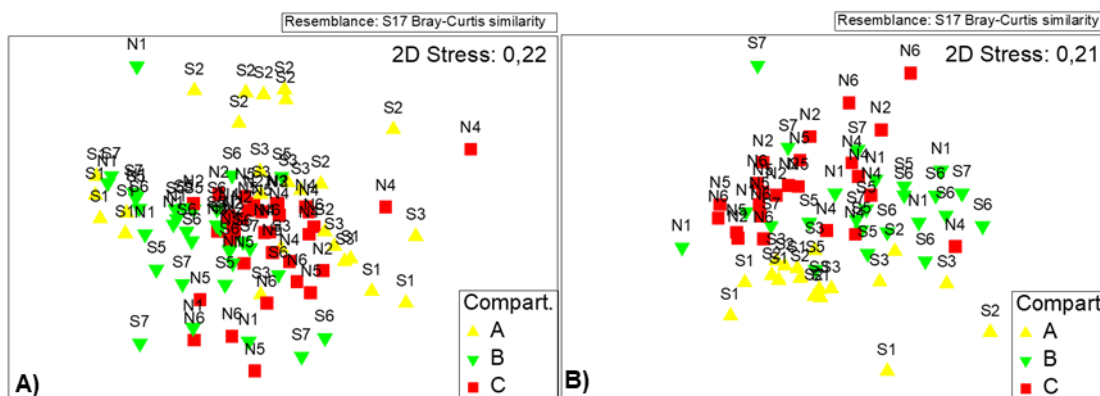
Na antepraia, os menores valores de densidade foram registrados no Compartimento B, enquanto que na praia emersa esse compartimento obteve os maiores valores (Tabela 11). Além da relação com o Pb, a macrofauna da antepraia apresenta relação com o Bário (Ba), conforme apresentado na Tabela 13. Em relação aos grupos-chave, o anelídeo da família Spionidae apresentou relação negativa com Pb e Ferro (Fe) (Tabela 14).

Figura 12: Parâmetros ecológicos da (A) macrofauna de Degredo (N2) durante todo o período do monitoramento. Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (01/15 e 09/15) da dissertação de Teixeira (2016). Dados do período Chuvoso de 2016 (04/16) referem-se aos dados pretéritos do trabalho de conclusão de curso de Mauri (2017). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest. Campanha janeiro/2020 realizada durante a cheia do Rio Doce; Campanha emergencial fevereiro/2020 realizada pós cheia do Rio Doce. Barras em azul, período chuvoso; barras em laranja, período seco. NA – não amostrado devido à pandemia de Covid-19.



As alterações na diversidade ecológica da fauna bentônica, após o rompimento da Barragem de Fundão, continuam demonstrando o impacto do rejeito na praia. Nas campanhas do Ano 4, foi possível observar uma recuperação dos valores dos parâmetros ecológicos em relação ao Ano 3 para a macrofauna bentônica. No entanto, esses continuam instáveis, sem apresentar tendência de aumento ou redução ao longo do tempo ($p > 0,05$).

Figura 13: Análise de ordenação da estrutura da macrofauna bentônica entre os Compartimentos durante o monitoramento do PMBA/Fest. **A)** Praia emersa. **B)** Antepraia.



A) Praia emersa - A análise de ordenação (nMDS) evidencia agrupamentos entre os Compartimentos. A análise ANOSIM, confirma a diferenças significativas ($R(\text{global}) = 0,051$; $p = 0,001$), onde todos se diferem entre si. Apesar do nMDS não apresentar um claro padrão de segregação entre as campanhas, a análise ANOSIM evidencia diferenças ($R(\text{global}) = 0,019$; $p = 0,001$), onde a campanha agosto/22 não difere significativamente das campanhas do início de monitoramento, porém difere das três campanhas anteriores (janeiro/21, julho/21, janeiro/22) (Tabela 7). **B)** Antepraia - A análise de ordenação nMDS mostra claro padrão de agrupamento das amostras por compartimentos. A análise ANOSIM confirma a diferença significativa entre os compartimentos ($R(\text{global}) = 0,089$; $p = 0,001$) também revelando que todos os compartimentos diferem entre si ($p < 0,05$). Apesar do nMDS para as campanhas não apresentar uma clara separação, a análise ANOSIM evidencia diferenças significativas ($R(\text{global}) = 0,047$; $p = 0,001$), onde a campanha 08/22 difere de todas as demais. A análise ANOSIM também detectou diferenças significativas entre as isóbatas ($R(\text{global}) = 0,015$; $p = 0,001$).

Tabela 13: Resultados das ANCOVAs (análises de covariância) realizadas com os parâmetros da macrofauna bentônica (Densidade média, riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener, equitabilidade de Pielou e diversidade beta) em relação às variáveis morfodinâmicas (%areia, %carbonato, %lama, diâmetro médio e seleção), 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. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. Resultados com relações negativas (-), resultados com relações positivas (+) entre o parâmetro da fauna e a variável ambiental. ns - não significativo.

Integração do indicador Macrofauna com os parâmetros sedimentares e concentrações elementar										
Variáveis	Densid. Média(ind/m2)		Riqueza taxonômica		Diversidade Shannon		Equitabilida de Pielou		Diversidade Beta	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Praia emersa										
%Areia	0,72	ns	1,25	ns	237,3	ns	0,03	ns	0,004	ns
%Carbonato	0,11	ns	0,75	ns	233,6	ns	3,12	ns	0,67	ns
%Lama	3,35	ns	0,91	ns	237,3	ns	3,10	ns	2,34	ns
Diâmetro Médio (Phi)	3,99	0,04(-)	0,16	ns	235,6	ns	9,67	0,00(-)	2,08	ns
Seleção	6,23	0,01(-)	3,89	0,04(-)	232,9	ns	5,28	0,02(+)	0,03	ns
Arsênio (As)	3,67	0,05 (-)	0,55	ns	1,34	ns	1,80	ns	3,36	ns
Alumínio (Al)	0,27	ns	5,89	0,01(+)	8,21	0,00(+)	2,74	ns	0,81	ns
Bário (Ba)	0,92	ns	12,88	0,00(+)	0,31	ns	2,98	ns	2,12	ns
Ferro (Fe)	2,53	ns	4,05	0,04(-)	1,27	ns	0,03	ns	2,6	ns
Manganês (Mn)	1,96	ns	2,69	ns	4,98	0,02(-)	0,18	ns	0,38	ns
Níquel (Ni)	7,07	0,008 (-)	12,12	0,00(-)	0,61	ns	0,76	ns	0,15	ns
Chumbo (Pb)	0,73	ns	3,64	ns	0,60	ns	0,56	ns	2,29	ns
Antepraia										
%Areia	1,10	ns	0,17	ns	0,99	ns	0,06	ns	1,75	ns
Antepraia										

Integração do indicador Macrofauna com os parâmetros sedimentares e concentrações elementar										
Variáveis	Densid. Média(ind/m2)		Riqueza taxonômica		Diversidade Shannon		Equitabilida de Pielou		Diversidade Beta	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
%Carbonato	6,65	0,01(+)	7,51	0,007(+)	1,88	ns	1,43	ns	1,76	ns
%Lama	1,28	ns	1,28	ns	0,16	ns	1,20	ns	0,27	ns
Diâmetro Médio (Phi)	0,24	ns	0,42	ns	0,08	ns	0,12	ns	3,38	ns
Seleção	4,82	0,02(-)	3,15	ns	0,46	ns	5,73	0,01(+)	0,04	ns
Arsênio (As)	0,0	ns	0,05	ns	0,18	ns	0,49	ns	0,09	ns
Alumínio (Al)	2,6	ns	1,11	ns	1,71	ns	0,24	ns	0,20	ns
Bário (Ba)	0,32	ns	0,67	ns	0,07	ns	4,66	0,03(-)	0,49	ns
Ferro (Fe)	0,003	ns	0,03	ns	0,11	ns	0,32	ns	0,11	ns
Manganês (Mn)	0,05	ns	1,9	ns	2,13	ns	0,76	ns	1,65	ns
Níquel (Ni)	0,03	ns	0,27	ns	0,58	ns	0,33	ns	0,48	ns
Chumbo (Pb)	8,05	0,00(-)	5,54	0,02(-)	3,41	ns	2,01	ns	0,99	ns

Tabela 14: Resultados das ANCOVAs realizadas com a densidade (ind/m²) dos grupos chaves da macrofauna bentônica da praia emersa e da antepraia em relação às variáveis morfodinâmicas (%areia, %carbonato, %lama, diâmetro médio e seleção), assim como a concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. Resultados com relações negativas (-), resultados com relações positivas (+) entre o parâmetro da fauna e a variável ambiental. ns - não significativo.

Densidade média (ind/m ²) de Grupos-chave												
Variáveis	Praia emersa										Antepraia	
	Oligochaeta		<i>S. pussicus</i>		<i>H. cf. variodentata</i>		<i>E. brasiliensis</i>		Amphipoda		Spionidae	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
%Areia	3,8	ns	4,53	0,03(+)	3,89	0,04(+)	5,69	0,017(+)	2,35	ns	127,2	ns
%Carbonato	0,86	ns	16,99	0,00(-)	19,57	0,00(-)	1,48	ns	3,56	ns	113,1	0,04(-)
%Lama	8,27	0,004(-)	1,44	ns	0,93	ns	19,72	0,00(-)	0,004	ns	126,9	ns
Diâmetro Médio (Phi)	42,82	0,00(-)	27,39	0,00(-)	11,45	0,000(-)	1,77	ns	2,57	ns	116,9	0,001(+)
Seleção	1,3	ns	0,57	ns	2,05	ns	7,7	0,005(-)	0,151	ns	112,8	ns
Arsênio (As)	3,37	ns	37,92	0,00(-)	42,99	0,00(-)	5,11	0,02(-)	3,81	0,05(+)	126,20	ns
Alumínio (Al)	6,08	0,01(-)	3,06	ns	1,11	ns	16,00	0,00(-)	9,10	0,002(+)	126,11	ns
Bário (Ba)	0,74	ns	1,31	ns	0,15	ns	0,14	ns	2,28	ns	123,45	ns
Ferro (Fe)	0,77	ns	3,45	ns	1,31	ns	0,13	ns	0,04	ns	117,50	0,02(-)
Manganês (Mn)	0,23	ns	0,08	ns	1,34	ns	8,16	0,004(-)	0,00	ns	117,48	ns
Níquel (Ni)	8,94	0,003(-)	2,48	ns	0,00	ns	0,10	ns	2,22	ns	117,45	ns
Chumbo (Pb)	3,53	ns	1,57	ns	2,03	ns	0,39	ns	0,96	ns	11,88	0,01(-)

Tabela 15: Resultado da análise de similaridade ANOSIM da Macrofauna de praias emersas e antepraia entre os compartimentos e entre as campanhas de todo o período do monitoramento. Apenas resultados significativos ($p > 0,05$) foram evidenciados na tabela abaixo.

	Praia emersa				Antepraia			
	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média
Compartimento	A x B	0,118	0,001	96,87	A x B	0,08	0,001	93,32
	A x C	0,039	0,001	97,3	A x C	0,11	0,001	92,99
	B x C	0,03	0,001	94,74	B x C	0,07	0,001	92,68
Campanha	01/21 x 08/22	0,035	0,001	96,74	12/19 x 08/22	0,03	0,002	90,7
	07/21 x 08/22	0,034	0,001	95,63	02/20 x 08/22	0,066	0,001	92,28
	01/22 x 08/22	0,036	0,001	96,71	01/21 x 08/22	0,047	0,002	90,19
	-	-	-	-	07/21 x 08/22	0,099	0,001	94,64
	-	-	-	-	01/22 x 08/22	0,048	0,001	89,22
Isóbatas	-	-	-	-	5m x 10m	0.015	0,001	92.29

Os baixos valores de R Global indicam que variações nas densidades dos organismos contribuíram mais para as dissimilaridades do que diferenças na composição taxonômica. Para a praia emersa, todos os compartimentos diferem entre si e a última campanha amostra (08/22) diferiu das campanhas realizadas no Ano 3 (01/21 e 07/21) e da campanha do período chuvoso do Ano 4 (01/22). A análise SIMPER indicou que as diferenças entre os compartimentos ocorreram devido, principalmente, às variações nas densidades de Oligochaeta e do isópode *Excirolana braziliensis*. No que se refere às campanhas, as variações nas densidades de *E. braziliensis*, Oligochaeta e Nemertea são responsáveis por estas diferenças. Na antepraia, também foi registrada diferenças significativas na estrutura da macrofauna entre todos os compartimentos e a última campanha foi diferente de todas as demais campanhas. A análise SIMPER mostra que, de modo geral, as variações nas densidades do crustáceo Amphipoda e dos poliquetas Spionidae e Magelonidae foram as principais responsáveis pelas diferenças encontradas entre os compartimentos na antepraia. Entre as campanhas, a análise de classificação SIMPER demonstra que variações nas densidades de Spionidae e Amphipoda são os responsáveis por estas diferenças. A análise ANOSIM também detectou diferenças significativas entre as isóbatas. A análise de classificação SIMPER detectou que as maiores densidades de Spionidae e Amphipodana isóbata de 10 m são as responsáveis por esta dissimilaridade.

3.3.2 Indicador Meiofauna

Tabela 16: Resultados das ANOVAs realizadas com os parâmetros da diversidade da meiofauna bentônica entre os compartimentos e campanhas amostradas durante todo o período de realização do PMBA/FEST. A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de 12/19. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. 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. ns – não significativo.

Variação espaço-temporal do indicador Meiofauna																
Variáveis	GL	Densidade (ind/10cm ²)			Riqueza taxonômica			Diversidade Shannon			Equitabilidade Pielou			Diversidade beta		
		F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>																
Compartimento	2	5,74	0,00	A, C > B	8,31	0,00	B > A, C	44,7	0,00	B > A, C	39,0	0,00	B > A, C	0,98	ns	
Campanha	1	3,50	ns		2,84	ns		10,4	0,00	-	4,28	0,03	-	2,16	ns	
Compartimento x Campanha	2	1,19	ns		0,55	ns		0,33	ns		0,10			1,47	ns	
<u>Antepraia</u>																
Compartimento	2	0,74	ns		4,72	0,01	A > B, C	60,07	0,02	A > B, C	6,5	0,002	A > B, C	3,35	0,04	B, C > A
Campanha	1	25,35	0,00	+	0,31	ns		67,2	ns		11,85	0,00	-	0,97	ns	
Compartimento x Campanha	2	2,55	ns		1,48	ns		58,94	ns		0,62	ns		1,55	ns	
Isóbata	1	0,76	ns		0,11	ns		67,9	ns		0,69	Ns		-	-	

Para a praia emersa, os Compartimentos A e C apresentam as maiores densidades significativas da meiofauna. No entanto, esses mesmos compartimentos possuem os menores valores de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener e equitabilidade de Pielou. Tanto a diversidade quanto a equitabilidade mostram uma tendência de redução dos seus valores ao longo do tempo. Na antepraia, os Compartimentos B e C foram os que obtiveram os menores valores significativos de riqueza taxonômica, diversidade de Shannon-Wiener, equitabilidade de Pielou e as maiores dissimilaridades entre as espécies presentes nas

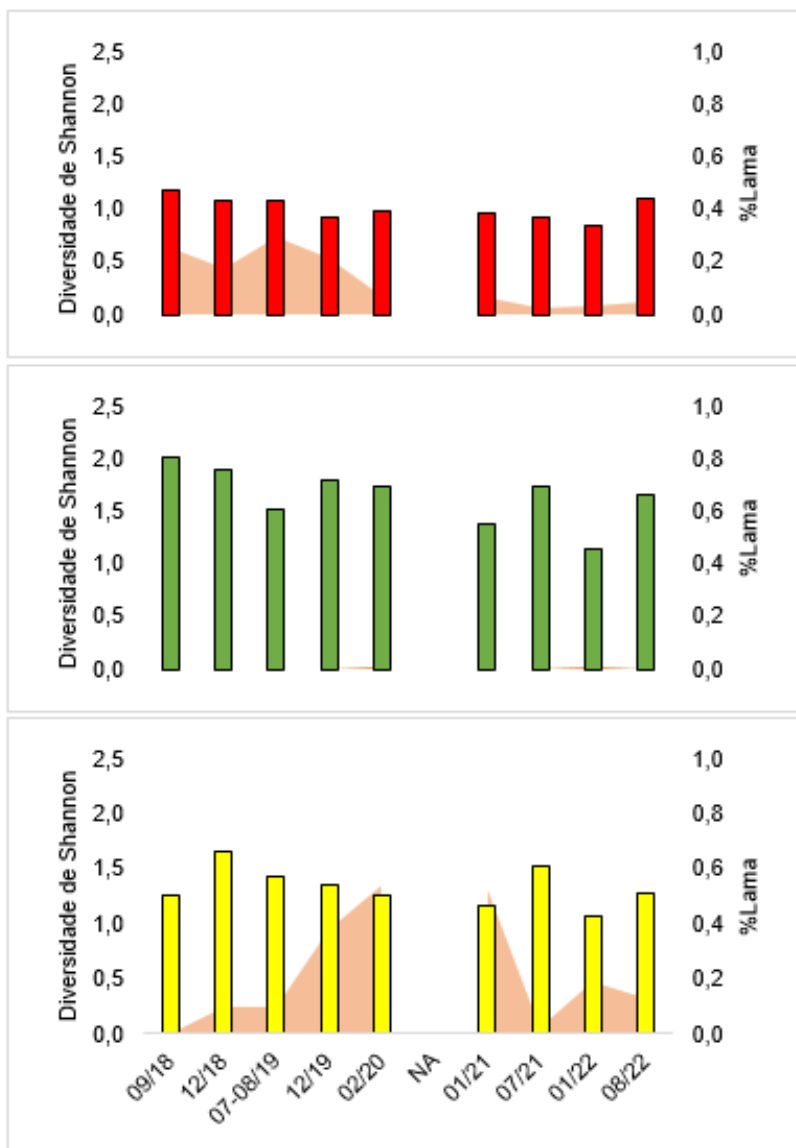
amostras (diversidade beta). No entanto, a densidade da meiofauna apresenta uma tendência de aumento ao longo do tempo. Esse aumento pode ser decorrente de animais oportunistas e tolerantes, visto que o índice de equitabilidade de Pielou está reduzindo ao longo do tempo.

Tabela 17: Resultados das ANOVAs realizadas com os grupos chave da meiofauna bentônica entre os compartimentos e campanhas amostradas durante todo o período de realização do PMBA/FEST. “+” aumenta com o tempo. ns – não significativo. A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de 12/19. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). *No Compartimento C houve tendência de aumento da densidade de Copepoda ao longo do tempo $p < 0,05$.

Densidade média (ind/10cm2) de Grupos Chave							
Variáveis	GL	Nematoda			Copepoda		
		F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>							
Compartimento	2	17,8	0,00	C, A > B	1,8	ns	
Campanha	1	5,6	ns		3,2	ns	
Compartimento x Campanha	2	0,6	ns		1,9	ns	
<u>Antepraia</u>							
Isobata	1	0,69	ns		0,01	ns	
Compartimento	2	1,6	ns		25,0	0,00	A > B, C
Campanha	1	26,9	0,00	+	3,0	ns*	
Compartimento x Campanha	2	2,6	ns		4,9	0,008	

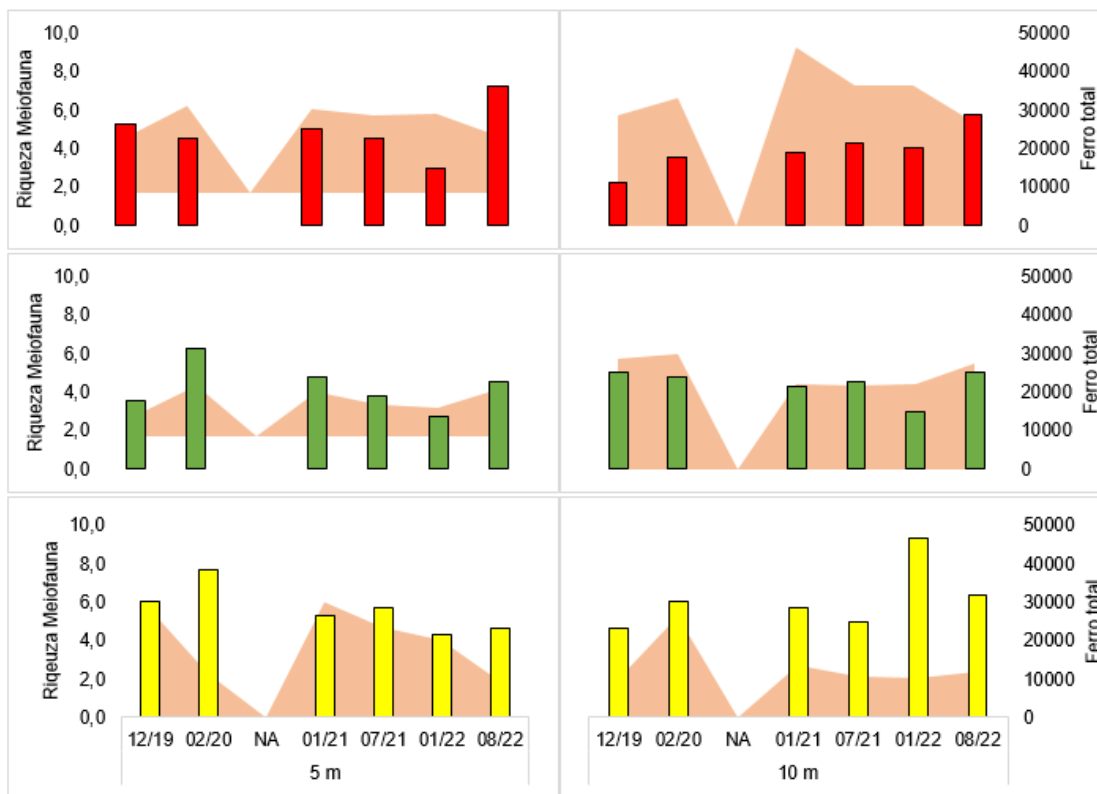
Na praia emersa, Nematoda apresenta maiores densidades nos compartimentos C e A. Para a antepraia, o crustáceo Copepoda tende a ter seus maiores valores no compartimento A, não variando espacialmente na praia emersa. Ambos organismos não têm apresentado variação sazonal (seco/chuvoso) tanto pra praia emersa quanto pra antepraia. No entanto, na antepraia há uma tendência de aumento da densidade de Nematoda ao longo do tempo e, para Copepoda, esta tendência é observada apenas no compartimento C.

Figura 14: A) Diversidade de Shannon-Wiener (H') da Meiofauna da praia emersa em relação negativa significativa à presença de lama (%) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest. Barras amarelas - Compartimento A, Barras verdes - Compartimento B', Barras vermelhas - Compartimento C. NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



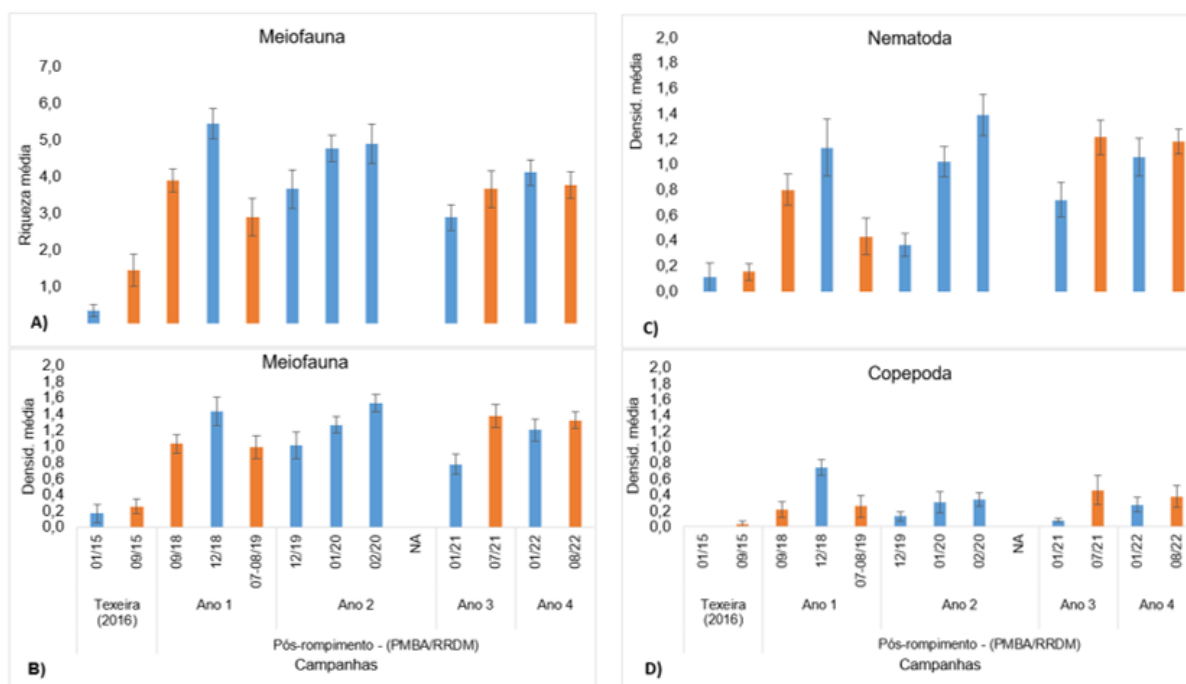
Menores valores da diversidade de Shannon-Wiener da meiofauna, assim como de riqueza e equitabilidade de Pielou, são registrados no Compartimento C (Tabela 16). Além da lama, a meiofauna também apresenta relações negativas com Arsênio (As) e Alumínio (Al). Em relação aos grupos-chaves meiofaunais, Nematoda e Copepoda, apresentam relações negativas com As, Al, Bário (Ba), Níquel (Ni) e porcentagem de lama. A presença da lama, mesmo em baixa quantidade observada na porção emersa, e de elementos químicos afetam negativamente e continuamente todos os componentes da fauna bentônica. Os valores de diversidade de Shannon-Wiener (H') e equitabilidade de Pielou da Meiofauna da praia emersa apresentam tendência de redução ao longo do tempo no compartimento C, assim como ocorre na densidade da macrofauna (ver Figura 11). Todos os resultados das ANOVAs e ANCOVAs para a meiofauna estão sumarizados nas Tabela 16 e Tabela 18, respectivamente.

Figura 15: Riqueza da Meiofauna bentônica da antepraia em relação negativa significativa à distribuição de Ferro (Fe) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest. Barras amarelas - Compartimento A, Barras verdes- Compartimento B', Barras vermelhas - Compartimento C. NA – não amostrado devido à pandemia de COVID-19.



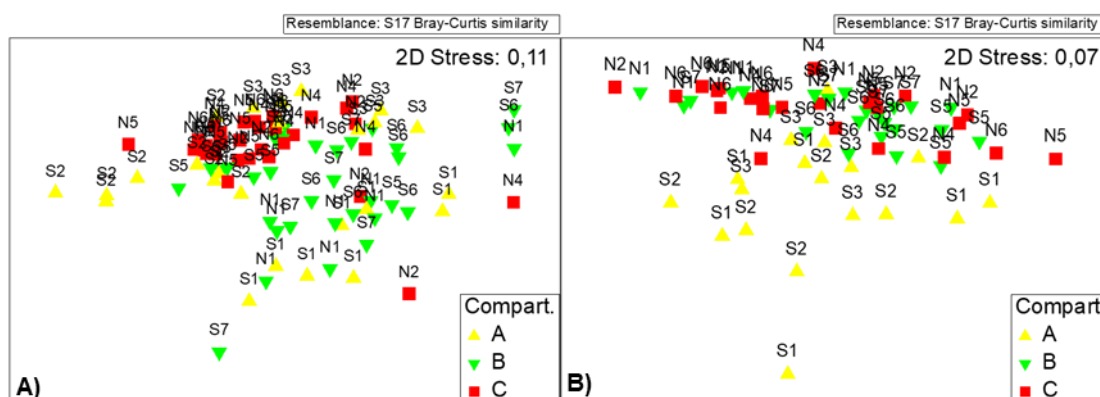
Menores valores de riqueza são registrados nos Compartimentos B e C. Além da relação com o Fe, os parâmetros ecológicos da meiofauna na antepraia apresentam relações negativas com Alumínio (Al), Arsênio (As), Ferro (Fe) e teor de lama (%), conforme sumarizado na Tabela 18. Os grupos chave, Nematoda e Copepoda, também apresentam relações negativas com Al, Bário (Ba) e Fe (Tabela 19).

Figura 16: Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica de Degredo (N2) durante todo o período do monitoramento. Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (01/15 e 09/15) da dissertação de Teixeira (2016). Dados do período Chuvoso de 2016 (04/16) referem-se aos dados pretéritos do trabalho de conclusão de curso de Mauri (2017). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest. Campanha janeiro/2020 realizada durante a cheia do Rio Doce; Campanha emergencial fevereiro/2020 realizada pós cheia do Rio Doce. Barras em azul, período chuvoso; barras em laranja, período seco. NA – não amostrado devido à pandemia de Covid-19



As alterações na diversidade ecológica da fauna bentônica, após o rompimento da Barragem de Fundão, continuam demonstrando o impacto do rejeito na praia. Para a meiofauna, os valores da densidade e riqueza continuam maiores que o período pré-rompimento. Além disso, o grupo chave Nematoda apresenta tendência de aumento ao longo do tempo ($p < 0,05$). Contudo, esses resultados requerem cautela, visto a oscilação que os dados vêm apresentando ao longo do monitoramento.

Figura 17: Análise de ordenação da estrutura da meiofauna bentônica entre os Compartimentos durante o monitoramento do PMBA/Fest. **A) Praia emersa. B) Antepraia.**



A) Praia emersa - A análise de ordenação nMDS evidenciou agrupamentos principalmente das amostras dos compartimentos C. A análise ANOSIM, no entanto demonstra que todos os compartimentos diferem entre si ($R(\text{global}) = 0,052$; $p = 0,001$). Embora o nMDS não deixe claro uma ordenação entre as campanhas, o ANOSIM registra diferenças significativas ($R(\text{global}) = 0,029$; $p = 0,001$), onde a última campanha (08/22) não difere significativamente somente das campanhas de monitoramento do ano 3 (01/21 e 07/21) (Tabela 10). **B) Antepraia** - A análise de ordenação nMDS mostra a estrutura da meiofauna das praias do compartimento A tendem a ser mais dispersas do que as demais, padrão já registrado no RA2021. A análise ANOSIM, no entanto, confirma que todos os compartimentos diferem entre si ($R(\text{global}) = 0,059$; $p = 0,001$). Diferenças significativas entre as campanhas também foram registradas ($R(\text{global}) = 0,068$; $p = 0,001$). No que se refere as isóbatas de 5m e 10m, a análise ANOSIM não registra diferenças significativas entre elas ($R(\text{global}) = 0,001$; $p = 0,246$).

Tabela 18: Resultados das ANCOVAs realizadas com os parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica (Densidade média, riqueza taxonômica, diversidade de Shannon, equitabilidade de Pielou e diversidade beta) na praia emersa e na antepraia em relação às variáveis morfodinâmicas (%areia, %carbonato, %lama, diâmetro médio e seleção), assim como a concentração elementar de As, Al, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb amostrados durante toda a realização do PMBA/Fest. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. Resultados com relações negativas (-), resultados com relações positivas (+) entre o parâmetro da fauna e a variável ambiental. ns – não significativo.

Integração do indicador Meiofauna com os parâmetros sedimentares e concentrações elementar										
Variáveis	Densid. média (ind/10cm ²)		Riqueza taxonômica		Diversidade Shannon		Equitabilidade Pielou		Diversidade Beta	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
Praia emersa										
%Areia	10,44	0,00(+)	2,12	ns	0,76	ns	12,7	0,00(-)	0,1	ns
%Carbonato	0,17	ns	4,04	0,04(+)	1,22	ns	2,16	ns	1,21	ns
%Lama	3,18	ns	0,00	ns	3,56	0,05(-)	24,8	0,00(+)	6,29	0,01(+)
Diâmetro Médio (Phi)	38,18	0,00(-)	0,17	ns	7,66	0,00(-)	57,2	0,00(+)	0,21	ns
Seleção	1,57	ns	7,59	0,00(-)	0,64	ns	0,01	ns	4,9	0,02(+)
Arsênio (As)	3,67	0,05(-)	0,55	ns	1,34	ns	1,8	ns	0,06	ns
Alumínio (Al)	0,27	ns	5,89	0,01(+)	8,21	0,00(+)	2,74	ns	0,39	ns
Bário (Ba)	0,92	ns	12,88	0,00(+)	0,31	ns	2,98	ns	1,49	ns
Ferro (Fe)	2,53	ns	4,05	0,04(-)	1,27	ns	0,03	ns	0,39	ns
Manganês (Mn)	1,96	ns	2,69	ns	4,98	0,02(-)	0,18	ns	1,26	ns
Níquel (Ni)	7,07	0,008(-)	12,12	0,00(-)	0,61	ns	0,76	ns	1,05	ns
Chumbo (Pb)	0,73	ns	3,64	ns	0,6	ns	0,56	ns	0,87	ns
Antepraia										
%Areia	30,78	0,00(+)	23,3	0,00(-)	16,72	0,00(+)	0,15	ns	18,4	0,00(+)
Antepraia										

Integração do indicador Meiofauna com os parâmetros sedimentares e concentrações elementar

Variáveis	Densid. média (ind/10cm ²)		Riqueza taxonômica		Diversidade Shannon		Equitabilidade Pielou		Diversidade Beta	
	F	p	F	p	F	p	F	p	F	p
%Carbonato	3,04	ns	2,83	ns	1,35	ns	0,12	ns	6,62	0,01(-)
%Lama	0,66	ns	1,71	ns	3,88	0,05(-)	1,65	ns	0,06	ns
Diâmetro Médio (Phi)	0,34	ns	13,9	0,00(-)	23,25	0,00(-)	12,8	0,00(-)	0,66	ns
Seleção	0,21	ns	0,1	ns	0,01	ns	0	ns	0,04	ns
Arsênio (As)	4	0,04(-)	2,22	ns	66,35	ns	0,58	ns	0,35	ns
Alumínio (Al)	38,8	0,00(-)	12,06	0,00(-)	64,82	ns	1,06	ns	7,13	0,01(+)
Bário (Ba)	0,02	ns	2,18	ns	63,53	ns	1,2	ns	0,86	ns
Ferro (Fe)	2,52	ns	4,91	0,02(-)	60	ns	6,02	0,02(-)	7,14	0,09(+)
Manganês (Mn)	0,02	ns	0,03	ns	59,99	ns	0,23	ns	0,64	ns
Níquel (Ni)	0,06	ns	0,43	ns	59,98	ns	0,41	ns	0,03	ns
Chumbo (Pb)	0,81	ns	0,1	ns	59,97	ns	0,12	ns	4,98	0,02(+)

Tabela 19: Resultados das ANCOVAs realizadas com a densidade dos grupos chave da meiofauna bentônica (Nematoda e Copepoda) em relação às variáveis morfodinâmicas (%areia, %carbonato, %lama, diâmetro médio e seleção), 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. Valores em negrito evidenciam diferenças significativas com $p < 0,05$. Resultados com relações negativas (-), resultados com relações positivas (+) entre o parâmetro da fauna e a variável ambiental. ns – não significativo.

Densidade média (ind/10cm ²) de Grupos Chave				
Variáveis	Nematoda		Copepoda	
	F	p	F	p
<u>Praia emersa</u>				
%Areia	14,08	0,00(+)	0,74	0,38
%Carbonato	1,11	ns	2,82	ns
%Lama	7,8	0,00(-)	3,72	0,054(-)
Diâmetro Médio (Phi)	90,18	0,00(+)	0,32	ns
Seleção	0,9	ns	3,22	ns
Arsênio (As)	15,69	0,00(+)	1,38	ns
Alumínio (Al)	28,84	0,00(+)	3,52	ns
Bário (Ba)	1,04	ns	3,96	0,04(-)
Ferro (Fe)	1,67	ns	0,51	ns
Manganês (Mn)	1,39	ns	0,54	ns
Níquel (Ni)	0,25	ns	4,81	0,02(-)
Chumbo (Pb)	0,53	ns	0,01	ns
<u>Antepraia</u>				
%Areia	19,02	0,00(+)	19,38	0,00(+)
%Carbonato	0,40	ns	16,82	0,00(+)

Densidade média (ind/10cm2) de Grupos Chave				
Variáveis	Nematoda		Copepoda	
	F	p	F	p
Antepraia				
%Lama	1,90	ns	1,83	ns
Diâmetro Médio (Phi)	5,48	0,02(-)	62,23	0,00(-)
Seleção	0,06	ns	0,98	ns
Arsênio (As)	3,35	ns	0,53	ns
Alumínio (Al)	20,50	0,00(-)	17,51	0,00(-)
Bário (Ba)	0,56	ns	6,38	0,01(-)
Ferro (Fe)	0,00	ns	18,45	0,00(-)
Manganês (Mn)	0,01	ns	1,21	ns
Níquel (Ni)	0,01	ns	0,58	ns
Chumbo (Pb)	0,71	ns	0,00	ns

Tabela 20: Resultado da análise de similaridade ANOSIM da Meiofauna de praias emersas e antepraia entre os compartimentos e entre as campanhas em todo o período do monitoramento.

Apenas resultados significativos ($p > 0,05$) foram evidenciados na tabela abaixo. ns – não significativo.

	Praia emersa				Antepraia			
	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média
Compartimento	A x B	0,02	0,006	78,64	A x B	0,116	0,001	62,96
	A x C	0,045	0,001	73,83	A x C	0,07	0,001	66,27
	B x C	0,081	0,001	77,03	B x C	0,01	0,034	58,12
Campanha	09/18 x 08/22	0,138	0,001	77,82	12/19 x 08/22	0,234	0,001	70,15
	12/18 x 08/22	0,06	0,001	73,97	02/20 x 08/22	0,163	0,001	69,03
	12/19 x 08/22	0,032	0,001	74,97	01/21 x 08/22	0,028	0,013	53,58
	01/21 x 08/22	0,029	0,002	74,32	07/21 x 08/22	0,063	0,001	58,2
	-	-	-	-	01/22 x 08/22	0,074	0,001	60,64
Isóbatas	-	-	-	-	5m x 10m	ns	ns	-

Nas praias emersas, há diferenças significativas entre todos os compartimentos e a última campanha (08/22) foi diferente das campanhas do Ano 1 (09/18 e 12/18) e das campanhas 12/19 e 01/21. A análise de classificação SIMPER revela que as variações nas densidades principalmente de Nematoda e Copepoda foram responsáveis pelas diferenças encontradas, tanto para compartimento, quanto para as campanhas. Este mesmo padrão foi observado nos RS2020, RA2020 e RA2021. Na antepraia, também ocorre diferenças na estrutura da meiofauna entre os compartimentos e entre a última campanha com todas as demais. O resultado da análise de classificação SIMPER também mostra que estas diferenças são resultantes das variações das densidades de Nematoda e Copepoda registrados nos Compartimentos.

4 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Não houve itens previstos e não realizados em nenhuma das equipes que compõe o tema Praias.

5 REFERÊNCIAS

BASELGA, A. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. **Global Ecology and Biogeography**, 19: 134-143. 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x>

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.

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

CONAMA. Resolução No. 357 de 18 de março de 2005 do Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Diário Oficial da União, Brasília, Brasil**, no. 053, p. 58–63, 2005.

COSTA, E. S., SÁ, F., SILVA, C. A., LERHBACK, B. D., NETO, R. R., 2017. Monitoramento hidrogeoquímico da foz do rio doce: metais: total, dissolvido, material particulado em suspensão e sedimentos superficiais. In: BASTOS, A. C. (Co). Monitoramento da Influência da Pluma do rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG – novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, p.121-163.

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

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.

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.

LONGHINI, C. M., RODRIGUES, S.K., COSTA, E.S., et al. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical

approach. **Science of The Total Environment**, v. 803, p. 149883, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149883.

OLIVEIRA, Kyssyanne Samihra Santos; DA SILVA QUARESMA, Valéria. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 78, p. 101-115, 2017.

R. CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Austria: Vienna, 2018.

TAYLOR, S. R., & MCLENNAN, S. M. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*. Vol. 33 (2). p. 241-265. 1995.

VAN GOSEN, B.S. et al. **Deposit model for heavy-mineral sands in coastal environments**. US Geological Survey, 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.

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

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