

**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- 44/ NOV 23

RSE2023 PMBA/FEST

Vitória,

Novembro de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	RESULTADOS DOS INDICADORES	3
2.1	MORFODINÂMICA.....	4
2.1.1	Presença de lama.....	4
2.1.2	Alterações morfológicas da praia	8
2.2	GEOQUÍMICA	14
2.2.1	Concentração de elementos químicos no sedimento	14
2.2.2	Normalização de Elementos de Terras Raras (ETR) em sedimento.....	16
2.2.3	Concentração de elementos químicos na água	18
2.3	BENTOS	22
2.3.1	Indicador Macrofauna.....	22
2.3.2	Indicador Meiofauna	30
3	REFERÊNCIAS	38

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 continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

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

2 RESULTADOS DOS INDICADORES

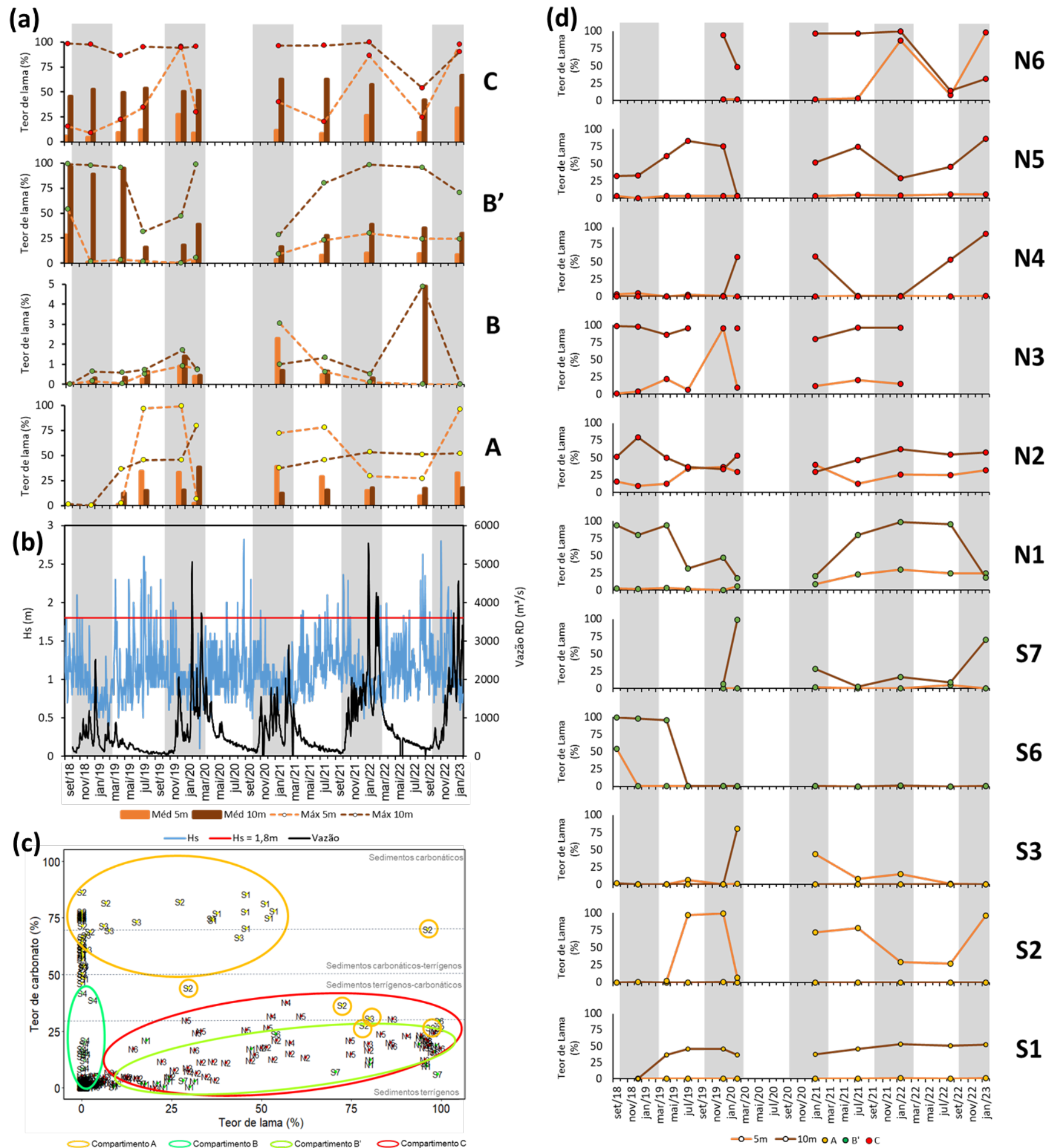
Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – março/2023) na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

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

2.1 MORFODINÂMICA

2.1.1 Presença de lama

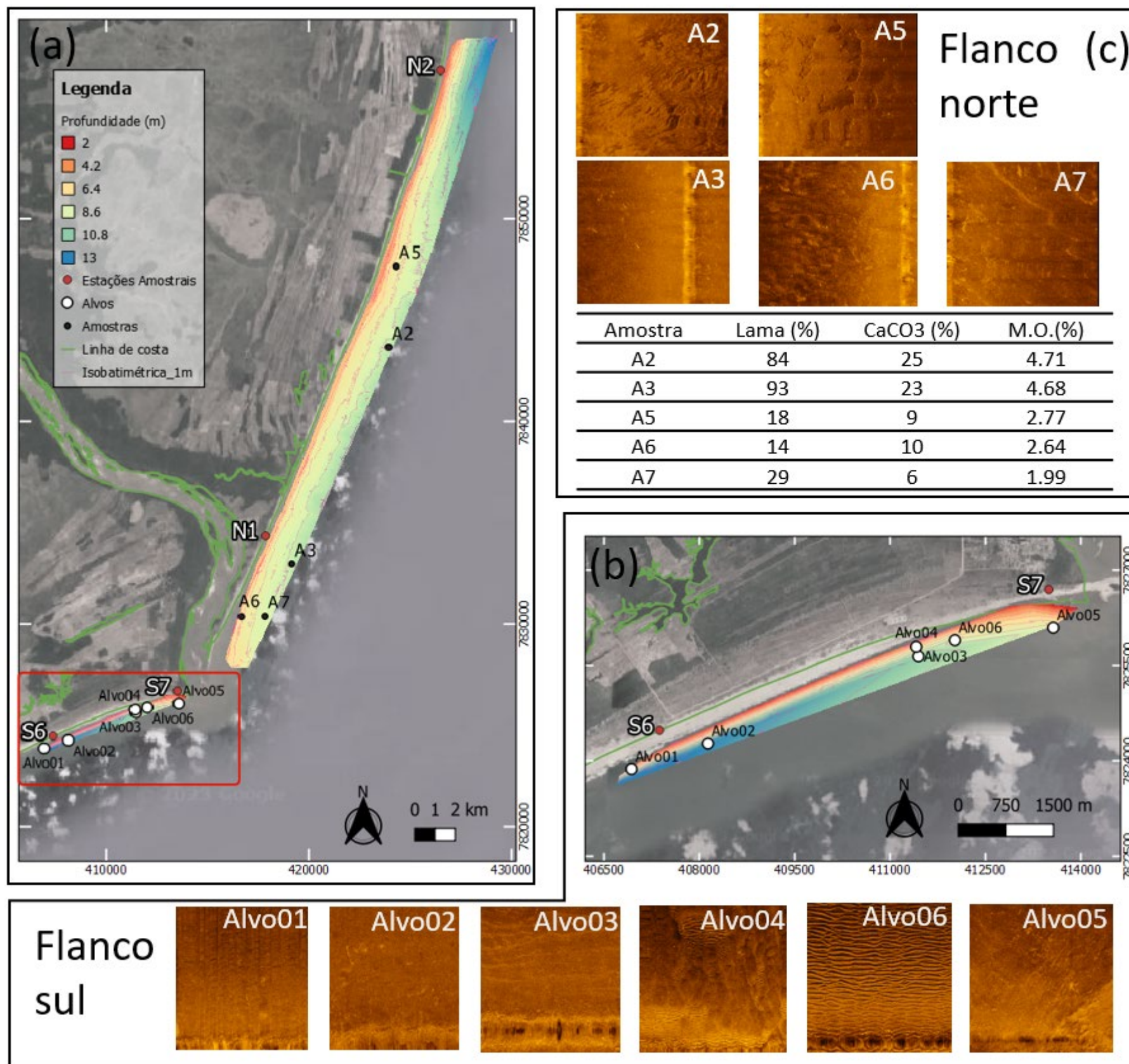
Figura 1: Teor e composição da lama. Para este indicador, utilizou-se dados somente da antepira (isóbatas de 5 e 10 m), uma vez que na praia emersa os teores de lama são nulos ou muito baixos. O gráfico (a) mostra a variação temporal dos teores de lama médios e máximos para cada Compartimento (atenção para escala do teor de lama reduzida para o Compartimento B), associados à variação temporal das condições meteoceanográficas (altura significativa de ondas – Hs e vazão do Rio Doce) apresentadas no gráfico (b). O gráfico (c) apresenta uma regressão linear entre o teor de lama e de carbonato dos sedimentos da antepira, destacando as características semelhantes dentro de cada Compartimento e delimitando as classes de composição do sedimento, baseado na sua proveniência (carbonática, terrígena e as combinações destes) (Larsonneur, 1977). O gráfico (d) apresenta um maior detalhamento espacial da variação temporal do teor de lama, apresentando as estações localizadas dentro dos Compartimentos com maior potencial de impacto: Compartimentos C, B' e A, em ordem da intensidade do impacto potencial. O Compartimento B não apresenta detalhamento espacial pois seus teores de lama na antepira não ultrapassam 5%. Destaques em cinza representam os períodos chuvosos. Os dados utilizados na construção dos gráficos foram do período de set/2018 à jan/2023. Períodos sem dados são referentes à interrupção das atividades de campo devido à pandemia de COVID-19 e adição/exclusão tardia de estações amostrais.



O **Compartimento A** apresenta teor médio de lama na antepraia ($17,5 \pm 12,5\%$) intermediário-baixo em comparação com os demais (a), com composição predominantemente carbonática (c), sendo que temporalmente, seus teores de lama são variados e parecem não responder linearmente às forçantes físicas (b). Dentro deste Compartimento, a estação S1 Praia Mole apresenta teores altos e constantes em 10 m ($40,3 \pm 6,7\%$) (d), mas com composição majoritariamente carbonática (c); enquanto S2 Formosa (d) possui os maiores e mais variados teores de lama em 5 m do Compartimento A ($51,5 \pm 39,9\%$), com eventual composição terrígena (c); por fim, S3 Putiri apresenta dois picos de lama ao longo do monitoramento, um na profundidade de 5m (jan/21: $43,7\%$) e outro em 10 m (fev/20: $79,9\%$) (d). O **Compartimento B** apresenta os menores teores médios de lama na antepraia ($0,62 \pm 0,95\%$) ao longo do litoral monitorado, sem grandes variações temporais (a), dispensando uma análise espacial mais detalhada. O **Compartimento B'** apresenta valor médio de lama na antepraia ($24,0 \pm 35,1\%$) intermediário-alto em comparação com os demais, com composição inteiramente terrígena (c) e com maiores teores ocorrendo em 10 m (a). Dentro deste Compartimento, a estação S6 Comboios (d) apresentou altos valores de lama em 10 m, somente nas três primeiras campanhas (set/18; dez/18; abril/19: $97,5 \pm 1,9\%$), com valores permanentemente nulos nas demais; a estação S7 Regência, imediatamente ao sul da desembocadura, apresentou altos valores de lama somente em 10 m durante os períodos chuvosos (fev/20, jan/21, jan/22 e jan/23: $53,5 \pm 38,0\%$), evidenciando a contribuição direta da carga de sedimentos do Rio Doce para esta estação (b); a estação N1 Povoação (d), imediatamente à norte da desembocadura, é a que mais contribui constantemente para os altos teores de lama na antepraia deste Compartimento, com maiores teores em 10 m ($61,5 \pm 34,5\%$) mas também significativos em 5 m ($11,4 \pm 11,3\%$). O **Compartimento C** é o que apresenta maiores e mais constantes teores médios de lama na antepraia ($34,2 \pm 33,4\%$), em ambas profundidades, 5 e 10 m (a), com composição majoritariamente terrígena (c). Na análise espacial mais detalhada deste Compartimento, a estação N2 Degredo (d) apresenta valores significativos e alta constância nos teores de lama chegando até 40% em 5 m de profundidade ($24,8 \pm 10,8\%$) e 80% em 10m ($50,3 \pm 14,2\%$); N3 (d) apresenta os maiores e mais constantes valores de lama, em 10 m ($93,0 \pm 6,5\%$) e menores, mas ainda significativos, em 5 m ($20,7 \pm 28,8\%$); as estações N4 Barra Nova e N5 Guriri (d) apresentam valores de teor de lama próximos a zero em 5 m, sem variações temporais, enquanto em 10 m, N4 Barra Nova apresenta variações periódicas sem sazonalidade ($22,5 \pm 33,8\%$) e N5 Guriri apresenta alto teor na maior parte do tempo ($52,1 \pm 26,3\%$). A estação N6 Itaúnas (d) apresenta valores de lama significativos em 5 m em jan/22 e jan/23 ($92,0 \pm 8,0\%$), enquanto em 10 m os valores são sempre altos ($68,5 \pm 36,6\%$).

Concluindo, a **distribuição longitudinal da lama** parece indicar uma situação crônica no Compartimento C, com altas quantidades de lama terrígena na antepraia, em 5 m e principalmente 10 m, o que não é esperado para um ambiente praial, especialmente nas porções mais rasas da antepraia. O Compartimento B' é influenciado diretamente pela vazão do rio, o que reflete nos altos teores de lama, principalmente em 10 m, em especial a estação N1 Povoação. A presença de altos valores de lama ocorre também eventualmente no Compartimentos A, em ambas profundidades, dependendo da estação amostral, com ocorrência de lama majoritariamente terrígena em S2 Formosa e S3 Putiri. O Compartimento B não apresenta valores significativos de lama.

Figura 2: Presença de lama na antepraia. Mapeamento batimétrico e sonográfico do leito marinho realizado em fevereiro e março de 2023 na antepraia adjacente à desembocadura do Rio Doce.
(a) Mapa batimétrico com destaque para a localização dos diferentes padrões de retroespalhamento acústico (pontos brancos) e as amostras de fundo coletadas na planície norte (pontos pretos).
(b) Detalhe da batimetria realizada no flanco sul da planície e os diferentes sinais acústicos de fundo. (c) Imagem dos diferentes sinais acústicos dos depósitos lamosos presentes na antepraia no flanco norte da planície, além dos teores de lama, carbonato de cálcio (CaCO_3) e matéria orgânica (M.O.) das amostras de sedimento de fundo.

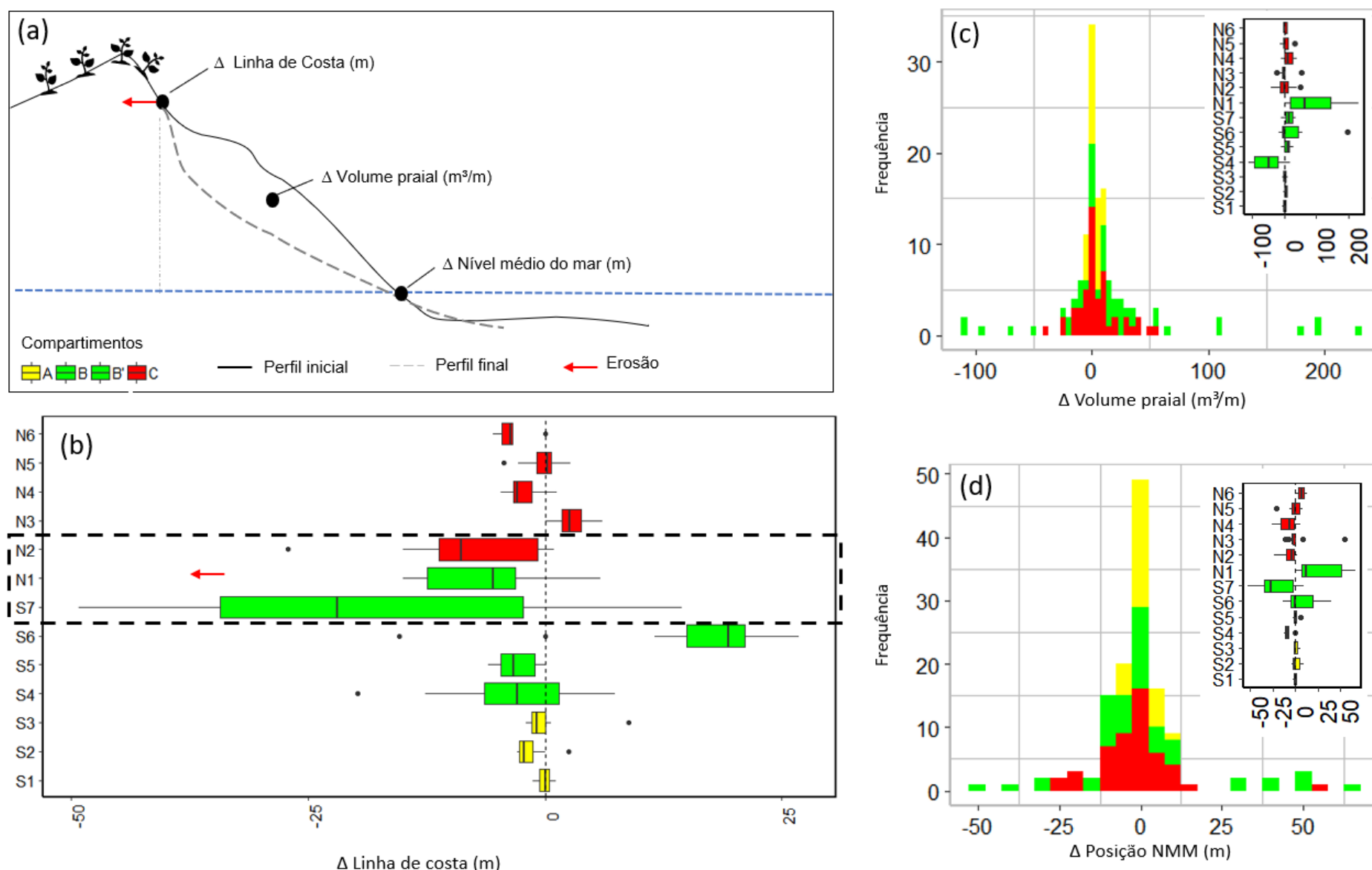


A batimetria revela diferenças significativas entre a largura e a declividade da antepraia dos flancos sul e norte da planície do rio Doce. No flanco sul, nas imediações da foz, sob influência direta da carga do rio e próximo à estação S7 Regência, a antepraia rasa, entorno de 2 m de profundidade, apresenta inclinação acentuada, próximo a 4°, que se torna mais amena em direção à antepraia profunda (em torno de 1°). Mais distante da foz, próximo à estação S6 Rebio Comboios, o relevo é marcado por uma elevação abrupta do leito entre a praia e a antepraia, (aproximadamente 6°) o que define uma antepraia estreita, com largura inferior a 200 m. No flanco norte da planície a antepraia é mais larga, em torno de 2.000 m e declividade menos acentuada, em média 1°, com as linhas isobatimétricas espaçadas próximo à foz e mais estreitas ao norte da área, próximo da estação N2 Degredo. A topografia mais suave e mais rasa no flanco norte mostra a tendência deposicional de sedimentos na antepraia, corroborando o sentido preferencial da deriva litorânea para norte.

Nos sinais de retroespalhamento acústico de fundo da antepraia do flanco sul há um predomínio de marcas de ondas arenosas assimétricas (Alvo06) (b), em sua maioria sinuosas e lunares, tanto simples (Alvo06) como compostas (Alvo04). O padrão de espalhamento acústico mais claro e rugoso, como nos Alvos 1 e 3, são correlatos com os dados de amostra de fundo coletadas ao longo do monitoramento nas estações S6 Comboios e S7 Regência e indicam uma predominância de areias fina a muito fina ao sul. Os sinais acústicos característicos de fundo lamoso, com aspecto escuro e liso, são raros na antepraia do flanco sul, mas aparecem junto à foz (Alvo05) e na base da antepraia (Alvo02) intercalados com bancos arenosos. No flanco sul, no entanto, os padrões de fundo observados ainda não passaram por validação com a amostragem de fundo. Os sinais acústicos de fundo lamoso são mais frequentes ao norte da foz e apresentam coloração mais escura e aspecto que variam de lisos/homogêneos a heterogêneos (amostras A3 e A5, respectivamente). No flanco norte os sinais com características de fundo lamoso foram identificados e a validação foi realizada a partir da dragagem de fundo com a obtenção de amostras em 5 diferentes pontos. Os resultados granulométricos mostram a presença de altos teores de lama (superior a 80%) na região mais profunda da área, próximo a 8m de profundidade, nas amostras A2 e A3 (c), enquanto que teores de lamas inferiores a 30% são comuns em águas mais rasas. Ainda para as 5 amostras coletados, os teores de M.O. são inferiores a 5% e teores de CaCO₃, que indica contribuição marinha, são inferiores a 30% havendo, portanto, a proveniência dominante de lama terrígena. O levantamento sonográfico e batimétrico da antepraia do entorno da foz confirmam, por fim, o transporte de lama aportada pelo rio para norte e junto à costa, seguindo o sentido preferencial da corrente, e a deposição intercalada desta lama junto a bancos arenosos. A antepraia ao sul da foz, exposta às ondas mais energéticas de sul e sudeste, a deposição de lama é dificultada e quando ocorre aparece intercalada a bancos arenosos e em geral restrita à região profunda da antepraia.

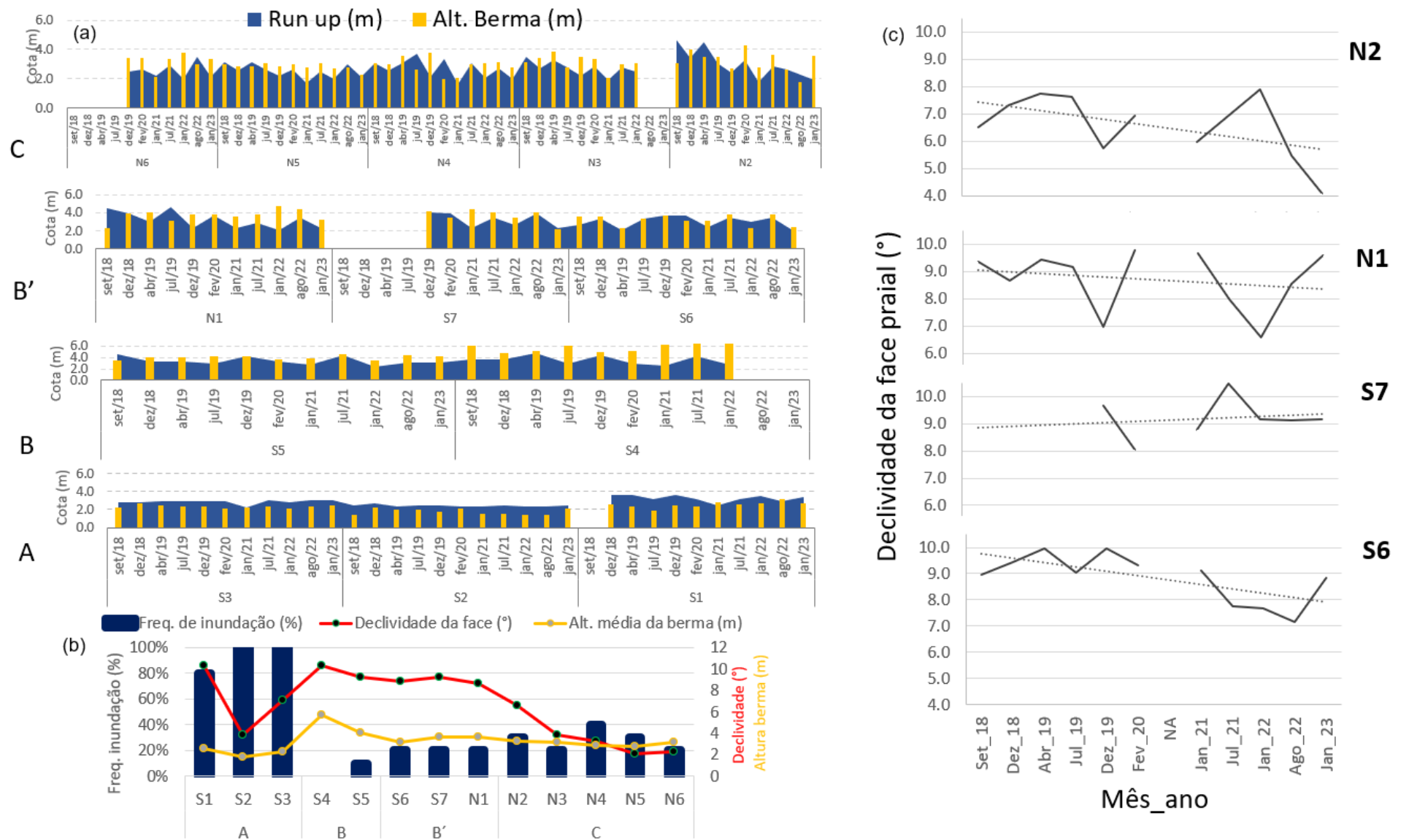
2.1.2 Alterações morfológicas da praia

Figura 3: 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 Praia (m^3/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 (ago/2018) em comparação com as campanhas subsequentes. Os valores negativos de Δ **Linha de Costa (m)** e Δ **posição NMM (m)** representam a retração do perfil rumo ao continente, e Δ **Volume praial (m^3/m)** representa a redução do volume de areia da praia emersa ativa; (b) indica a mobilidade (erosão e progradação) da Δ **Linha de Costa (m)** e o destaque (retângulo pontilhado) para as estações amostrais com tendência erosiva; (c) mostra histogramas de frequência do Δ **Volume da praia**, agrupados por Compartimentos (A, B, B' e C) e box-plot com distribuição de cada estação para o parâmetro analisado, indicando ganho ou perda de volume a partir do 0 (m^3/m); (d) mostra histogramas de frequência do Δ **Posição NMM** agrupados por Compartimentos e box-plot com distribuição de cada estação para o parâmetro analisado, indicando avanço da face da praia em direção ao mar ou recuo a partir do 0 (m).



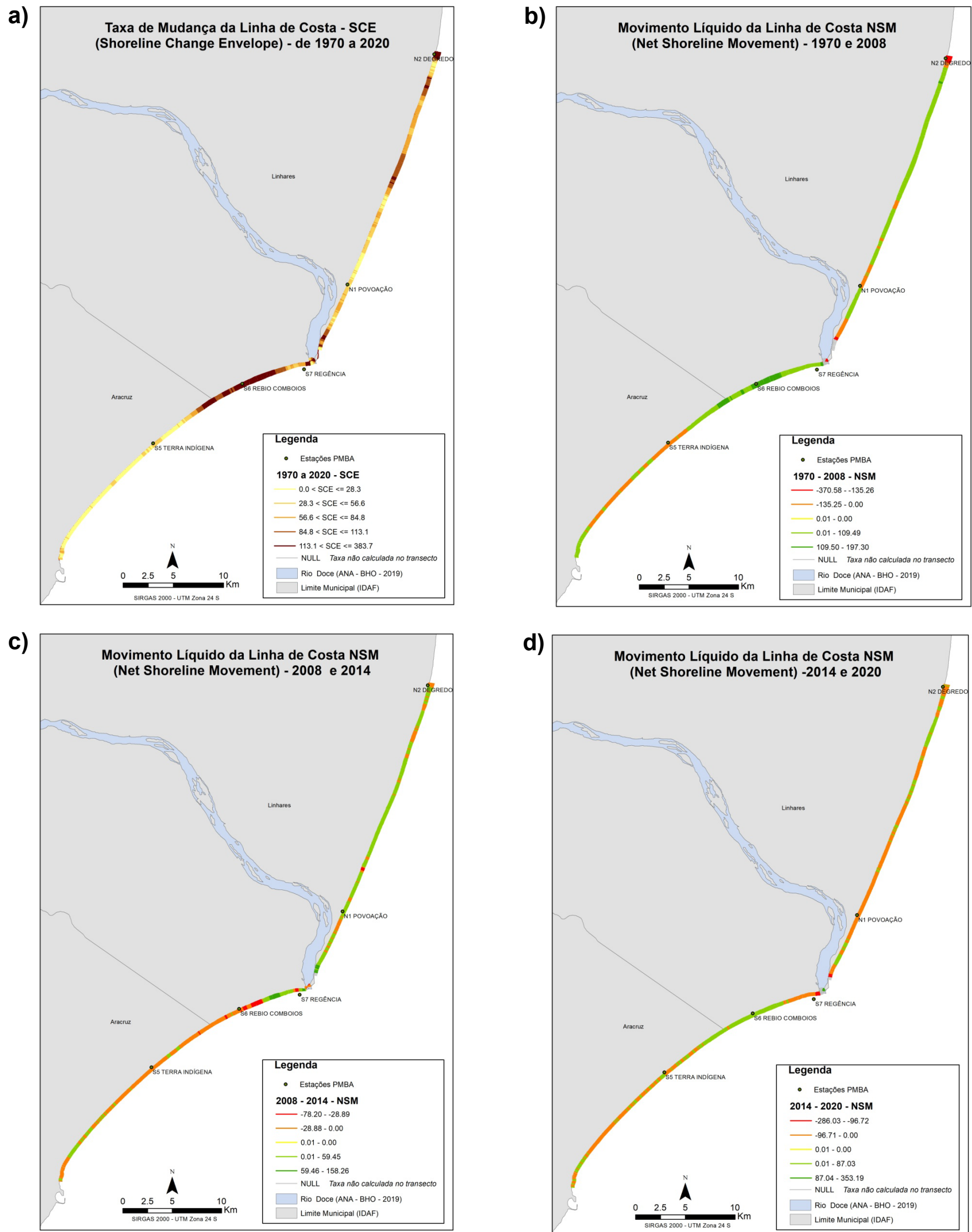
As estações S7 Regência, N1 Povoação e N2 Degredo apresentam tendências erosivas, alcançando uma retração máxima na ordem de 50 m na estação S7 (b) é possível verificar a estabilidade morfológica das praias do Compartimento A em todos os três parâmetros analisados(b), (c) e (d), e alta mobilidade nas praias dos Compartimentos B e B', com uma tendência erosiva, mas com grande capacidade de recuperação do volume de areia no Compartimento B'. A exceção a este padrão é observada na estação S6 Rebio Comboios, que apresenta um padrão progradacional. No Compartimento C, a mobilidade morfológica é mais restrita, enquanto experimenta uma retração aproximada de 15 m na estação N2 Degredo (c). Resume-se que as praias localizadas nas proximidades da foz do Rio Doce apresentam maior mobilidade morfológica, pois são diretamente influenciadas pela carga sedimentar sazonal do rio. De modo geral, o litoral estudado apresenta uma tendência retrogradante, porém com intensidades diferentes.

Figura 4: Eventos de inundação por ondas sobre a berma. (a) Evolução temporal comparativa entre a altura da berma (m) e o 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 run-up transpõe a berma praial, o que indica a chegada do espraçamento até as feições superiores da praia, e valores médio de declividade e altura da berma das estações amostrais ao longo do monitoramento. (c) Registro das declividades da face da praia ao longo do monitoramento nas estações com maior mobilidade morfológica e/ou tendências erosivas (estações S6, S7, N1 e N2). Os dados utilizados na construção dos gráficos foram do período de set/2018 à jan/2023. Períodos sem dados são referentes à interrupção das atividades de campo devido à pandemia de COVID-19 e adição/exclusão tardia de estações amostrais.



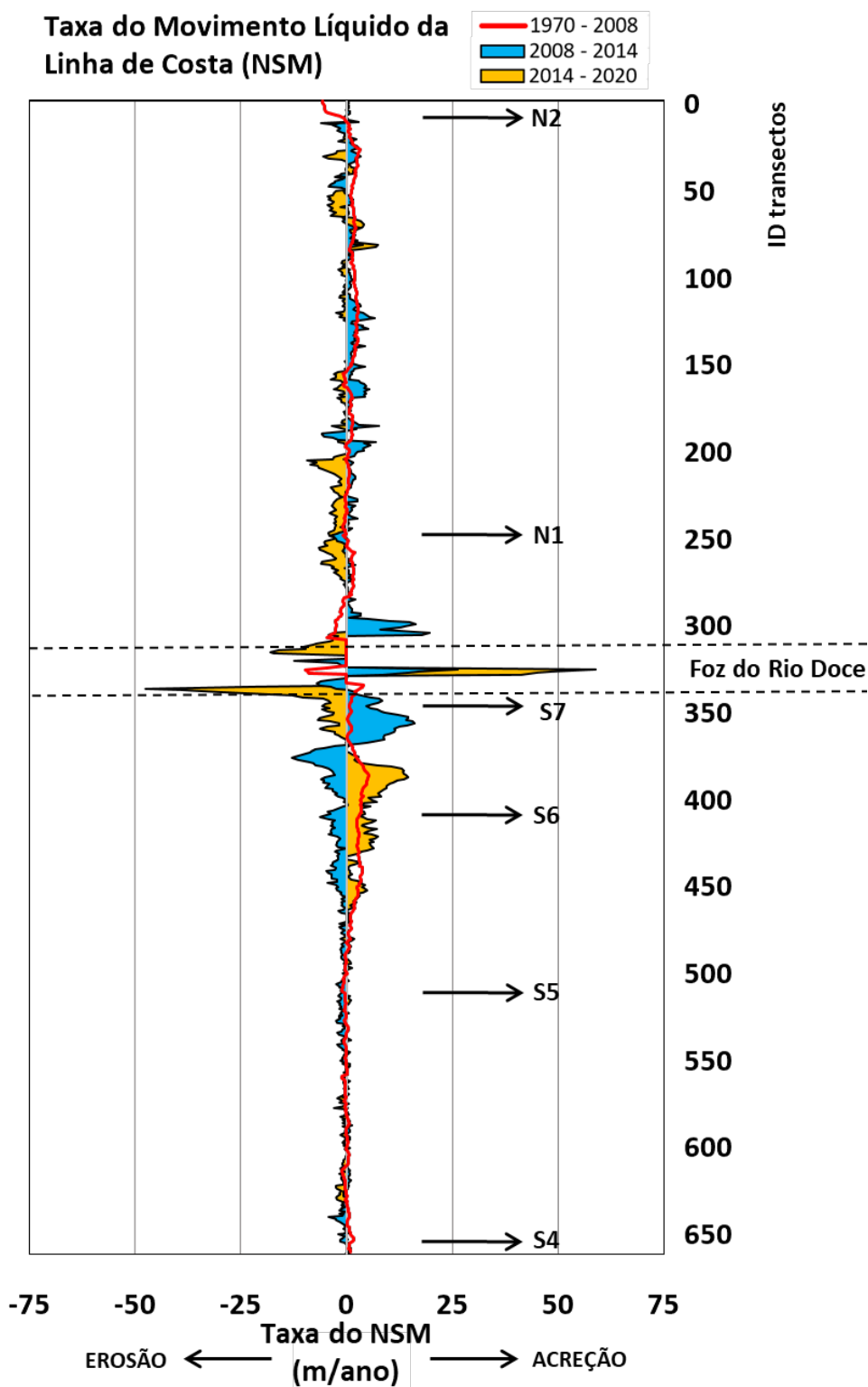
Nas praias do Compartimento A há uma maior frequência de eventos inundacionais (a), superior a 85% (b), fato que pode estar associado à baixa declividade dos perfis, com bermas ausentes ou pouco desenvolvidas, e à impermeabilização do fundo marinho devido à presença de couraças lateríticas na antepraia, 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 (b). No Compartimento C, a baixa declividade da face da praia e a presença de areias finas, potencializam o efeito do espraçamento das ondas sobre a porção seca da praia, com frequência média de 25% de ocorrência de transposição da berma (b). Observa-se pela linha de tendência da declividade da face da praia (c), uma redução da declividade em todas as estações destacadas, exceto S7 Regência, podendo sugerir uma disposição geral para o aplainamento do perfil topográfico nas estações S6 REBio Comboios, N1 Povoação e N2 Degredo, e consequentemente aumento dos eventos inundacionais e erosivos.

Figura 5. Avaliação morfológica de mesoescala da linha de costa na planície do Rio Doce. Os mapas apresentam os valores das mudanças da linha de costa (linha de vegetação na praia) para os 663 transectos espaçados em 100 m ao longo de cerca de 66 km de costa (33 km no flanco norte e 33 km no flanco sul da foz). As linhas de costa foram extraídas de ortofotomosaicos de distintos recortes temporais: 1970, 2008, 2014 e 2020. O mapa (a) ilustra a taxa de mudança da linha de costa (m) (SCE) entre 1970 e 2020, representando o deslocamento geral da linha de costa ao longo deste período, calculada pela distância máxima entre a posição mais avançada e a posição mais recuada da linha de costa. Os mapas (b), (c) e (d) ilustram o movimento líquido da linha de costa (m) (NSM), ou seja, a diferença entre a posição da linha de costa em duas datas. Os valores positivos indicam progradação e negativos indicam erosão durante o período especificado.



O deslocamento geral da linha de costa nas adjacências do Rio Doce entre os anos de 1970 e 2020 indicou mudanças substanciais nestes 50 anos, com variação média de 64m entre os extremos das mudanças (a). A localidade que apresentou maiores variações no posicionamento da linha de costa foi na foz do Rio Doce, com mobilidade máxima de 383 m. Outras áreas como o flanco sul da planície nas proximidades da estação S6 Rebio Comboios e flanco norte, entre as estações N1 Povoação e N2 Degredo, especialmente nesta última, também apresentaram valores elevados deslocamento acima de 113 m. Outras localidades tiveram mudanças menores, sendo a variação mínima de 2,6 m registrada nas proximidades da estação S5 Terra Indígena. É importante ressaltar que a SCE fornece uma medida geral da variação/mobilidade, considerando os extremos observados ao longo do tempo, mas não indica a direção desse movimento. Ou seja, grandes variações na SCE não significam progradação nem erosão, mas sim grande mobilidade. Os valores positivos do movimento líquido da linha de costa nos mapas (b), (c) e (d) indicam progradação e os valores negativos indicam erosão durante um determinado período de tempo. No período de 1970 e 2008 (b), houve uma tendência geral de avanço da linha de costa (70,36% dos transectos com progradação e 29,64% com erosão), com uma média de 30,5 m de progradação, em especial o flanco sul da planície nas proximidades da desembocadura, especialmente em S6 REBio Comboios, que progradou entre 109 e 197m. Neste período de 38 anos, o destaque de erosão mais severa foi registrado na estação N2 Degredo, que recuou entre 135 e 370m. Além disso, registrou-se um recuo generalizado, porém um pouco menos severo (<135 m) na metade meridional do flanco sul da planície e em trechos isolados no flanco norte. Entre o período de 2008 e 2014 (c), a linha de costa mostrou uma tendência de estabilidade (52% dos transectos com progradação e 48% com erosão), com um movimento líquido médio de apenas 2,3 m. Observa-se que o aspecto erosivo da linha de costa é mantido no flanco sul da planície, porém mais modesto, mas que se estende em direção à desembocadura, com destaque para a localidade da estação S6 REBio Comboios, com recuo na ordem de 29 a 78 m. Por outro lado, nota-se o aspecto geral progradacional no flanco norte da neste intervalo de 6 anos, mantendo N2 Degredo com erosão. Já no período de 2014 a 2020 (d), que corresponde ao período após o Rompimento da Barragem, houve uma tendência de recuo da linha de costa generalizada (61,63% dos transectos com erosão e 38,37% com progradação), com um movimento líquido médio de -1,56 m. Nota-se que o padrão de mobilidade da linha de costa no flanco norte, anteriormente progradante, inverteu para um padrão de erosão. Esta tendência retrogradante também é mantida no flanco sul, exceto na localidade da estação S6 REBio Comboios, que mantém sempre um balanço positivo em termos de acumulação de sedimento. Nota-se que os maiores recuos (entre 96,7 e 286 m) foram registrados na foz, especialmente em S7 Regência. Resumindo, a evolução temporal mostra claramente que após o Rompimento da Barragem, ocorrido em 2015, é clara a manutenção da tendência erosiva no extremo sul do flanco sul da planície e principalmente inversão de uma tendência historicamente progradante no flanco norte para uma retrogradante, exceto algumas localidades pontuais como Degredo (N2) que sempre apresentou padrão de recuo da linha de costa. Esta avaliação das mudanças da linha de costa em mesoescala de tempo corrobora com o monitoramento dos perfis topográficos transversais à praia e a tendência de deposição de lama na antepraia no flanco norte da planície.

Figura 6. Avaliação morfológica de mesoescala da linha de costa na planície do Rio Doce. Taxa de movimentação líquida da linha de costa (linha de vegetação na praia) para cada período sucessivo: 1970 a 2008, 2008 a 2014 e 2014 a 2020. Os valores positivos indicam progradação e negativos indicam erosão durante o período especificado. O gráfico apresenta o valor da taxa em metros por ano para cada período analisado nos 663 transectos espaçados em 100 m ao longo de cerca de 66 km de costa (33 km no flanco norte e 33 km no flanco sul da foz). O transecto 1 está no extremo norte e a foz está localizada no transecto 321.

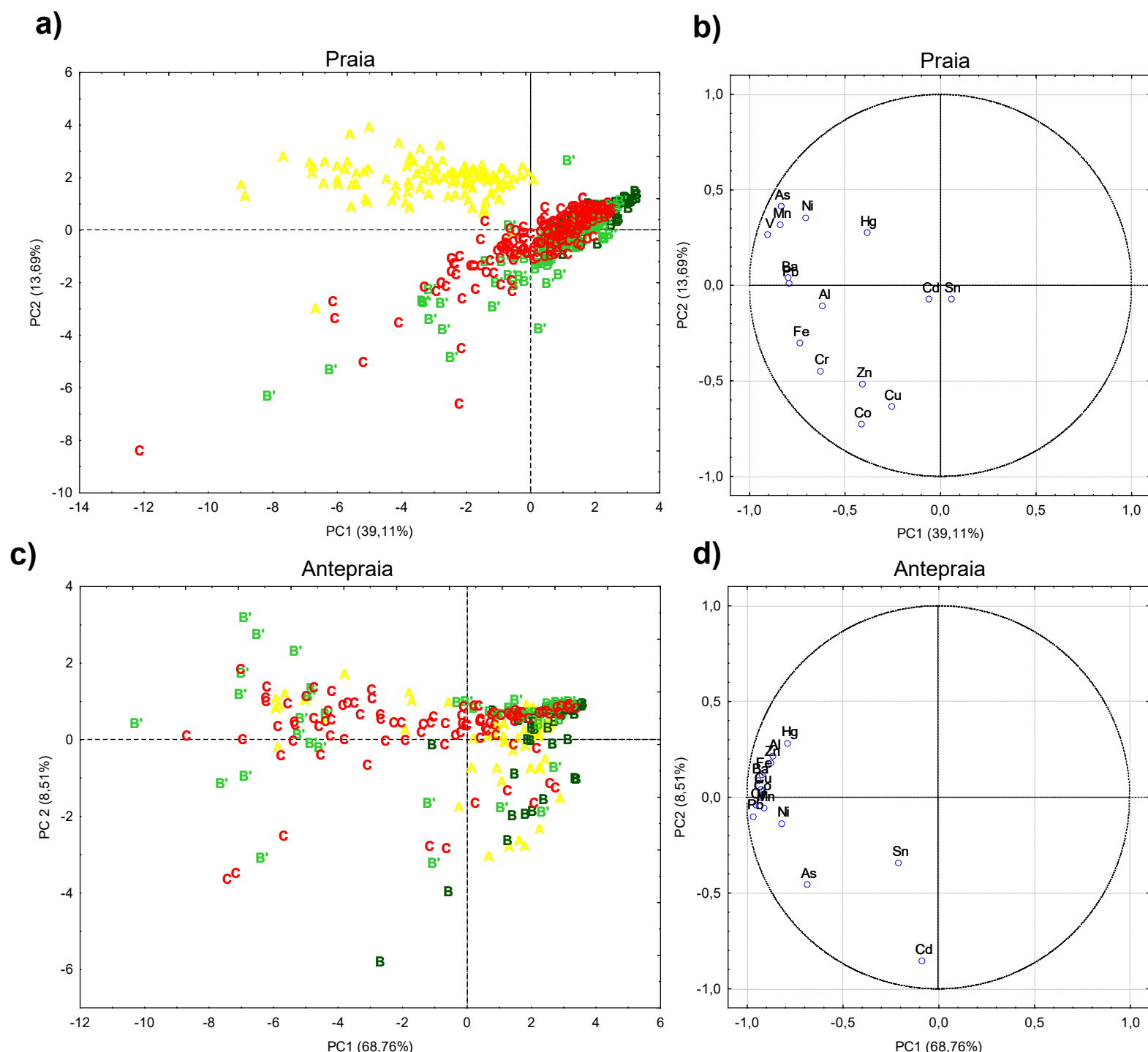


A Taxa do Movimento Líquido da Linha de Costa (NSM) possibilitou a comparação entre a magnitude dos três recortes temporais analisados em uma mesma escala, uma vez que há grande disparidade entre os intervalos de tempo analisados. O primeiro período analisado que representa a série histórica, entre 1970 e 2008, apresenta intervalo de 38 anos e sua magnitude da taxa de variação (seja progradante ou retrogradante) é de no máximo 10 m/ano. A sua baixa magnitude de variação fica explícita no gráfico, no qual a linha vermelha, que correspondente ao período, oscila levemente em torno da estabilidade (NSM = 0). O período entre 2008 e 2014, que apresenta intervalo de 6 anos analisados, apresentou variações máximas na ordem de 25 m/ano, o que já se sobrepõe em relação à série histórica. Para o último período analisado, entre 2014 e 2020, que apresenta o mesmo intervalo de anos de 2008-2014, a magnitude da taxa de variação é quase o dobro da anterior, chegando à magnitude de 50 m/ano. Neste gráfico também fica explícito a inversão do comportamento progradante/retrogradante em determinadas seções da linha de costa para os diferentes intervalos analisados. No flanco norte da Planície, há em geral, uma inversão do padrão anterior ao Rompimento da Barragem (ambos intervalos 1970-2008 e 2008-2014), onde apresentava em geral progradação e passou a apresentar, após 2014, retrogradação na maior parte da linha de costa. Há dois trechos que chamam atenção pela magnitude da retrogração: 1) o trecho correspondente à estação N1 Povoação (entre os transectos 200 e 270) com taxa de erosão de até -10 m/ano e 2) na margem imediatamente ao norte da foz (entre os transectos 300 e 315) com variação máxima acima de -15 m/ano. No flanco sul da planície, há duas situações diferentes de inversão do padrão antes e após 2014: 1) no trecho correspondente à estação S7 Regência (entre os transectos 330 a 370) ocorre uma nítida inversão do padrão após 2014, que antes era claramente progradante e passa a ser claramente retrogradante com magnitude cerca de 3 vezes maior (~ - 45m/ano) quando comparado com o período 2008-2014 (~ +15 m/ano); 2) no trecho correspondente à estação S6 REBio Comboios (entre os transectos 370 a 470) há, diferentemente das situações anteriores, uma inversão do padrão histórico (1970-2008 e 2008-2014), porém de retrogradante para progradante (2014-2020), mas de igual magnitude, entre 5 e 15m/ano. Concluindo, o padrão de mobilidade da linha de costa ao longo da planície do Rio Doce mudou para retrogradacional e de maior magnitude após o Rompimento da Barragem na margem sul da desembocadura (Regência) e em praticamente todo flanco norte da planície (referente ao trecho contemplado nesta análise). As variações observadas na região da foz do Rio Doce não foram avaliadas como variação da linha de costa, devido à alta dinâmica natural deste ambiente.

2.2 GEOQUÍMICA

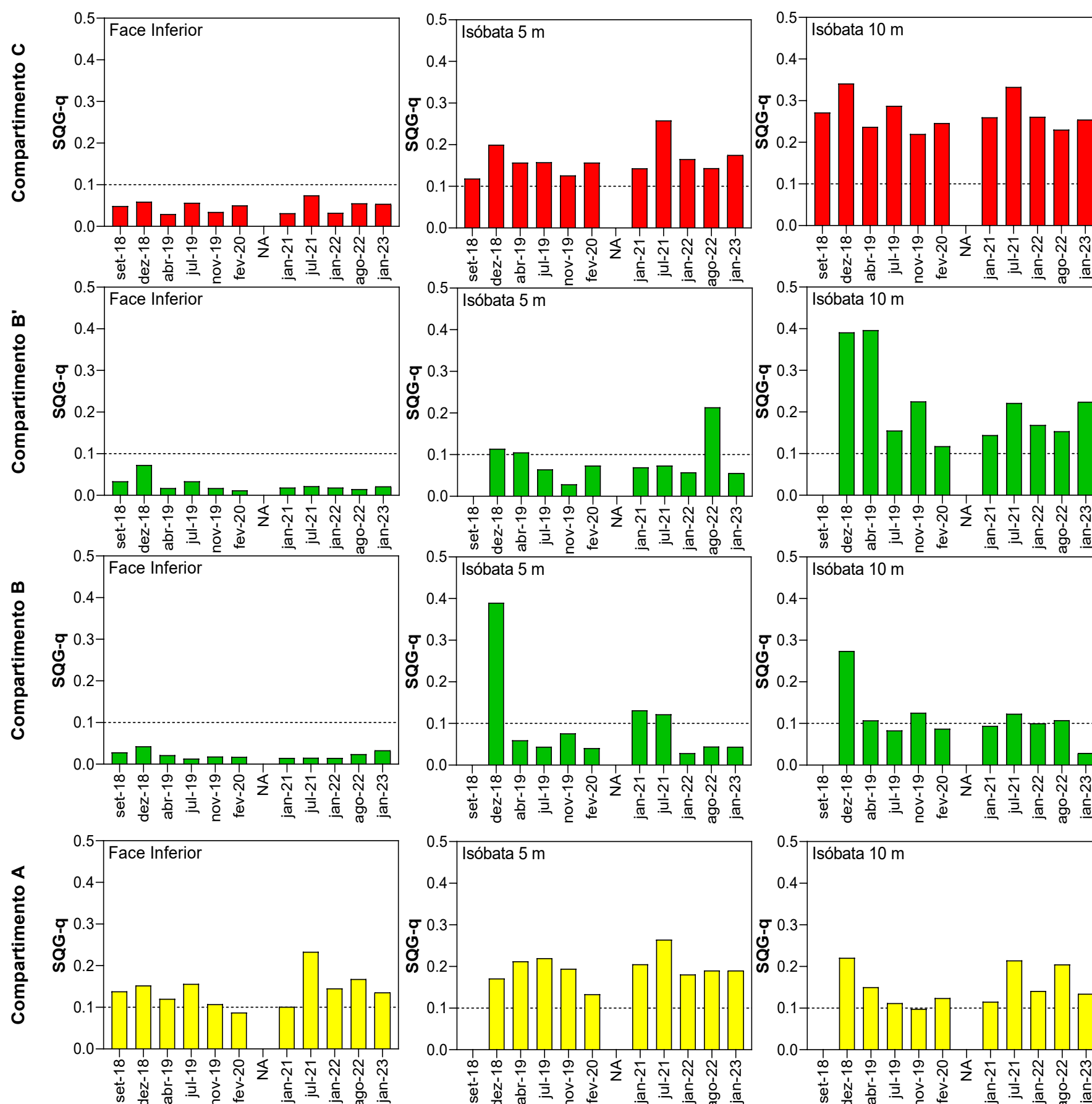
2.2.1 Concentração de elementos químicos no sedimento

Figura 7: Gráfico de escores (*aec*) e pesos (*bed*) para PC1 e PC2 em função das amostras da praia emersa e antepraia rasa (*aeb*) e praia submersa isobátas de 5 e 10 m (*ced*); Compartimento A (amarelo); o Compartimento B (verde escuro); Compartimento B' (verde claro) e Compartimento C (vermelho). Dados obtidos de setembro de 2018 a janeiro de 2023.



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 praial, 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 praial (Antepraia), 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 dos 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.

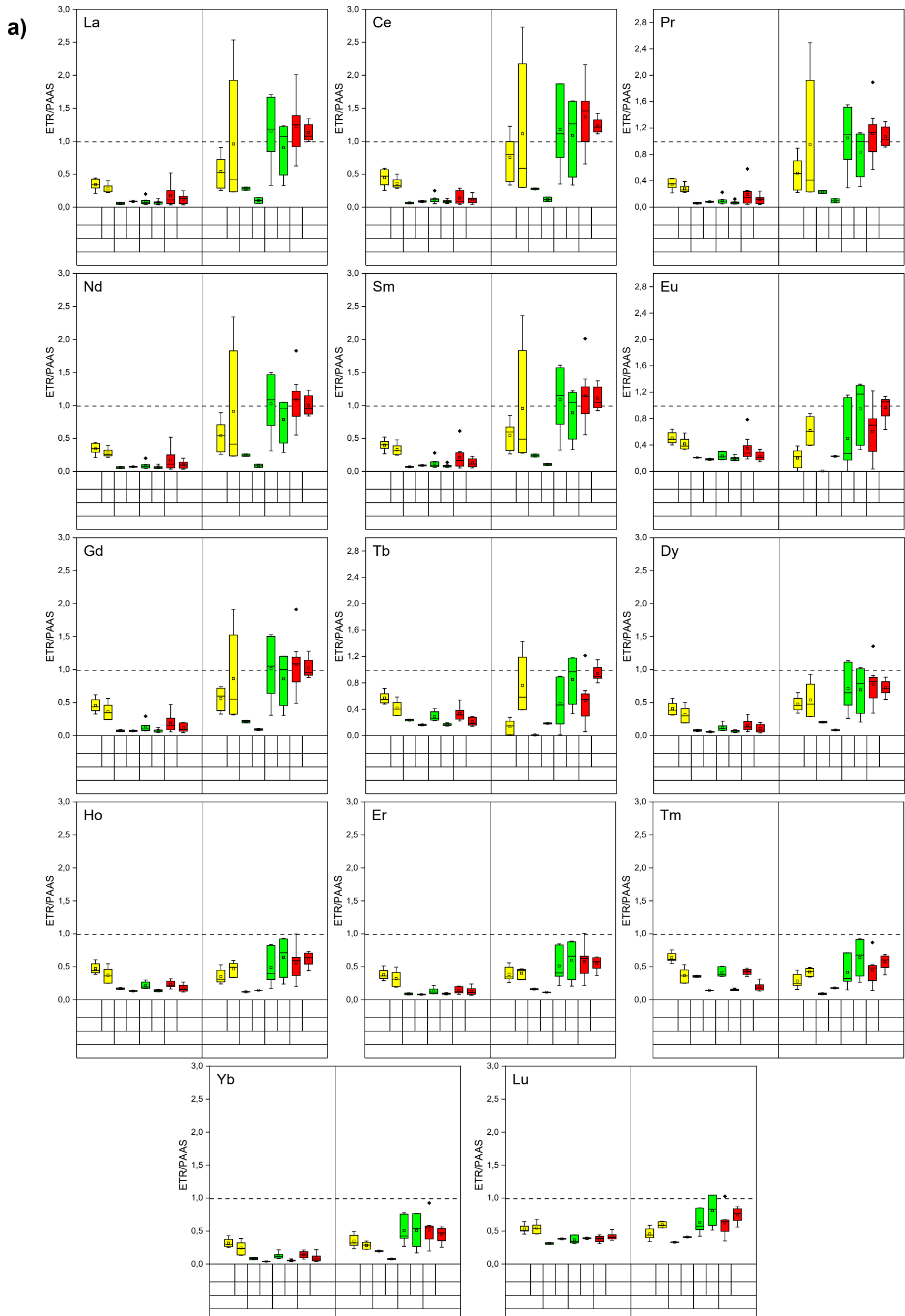
Figura 8: Índice de contaminação do sedimento das praias baseado no SQG-q (do inglês *sediment quality guideline quotient*) obtidos para os Compartimentos A (amarelo); B - B' (verde) e Compartimento C (vermelho), na face inferior, isóbata 5 m e isóbata 10 m. Dados obtidos de setembro de 2018 a janeiro de 2023. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19.



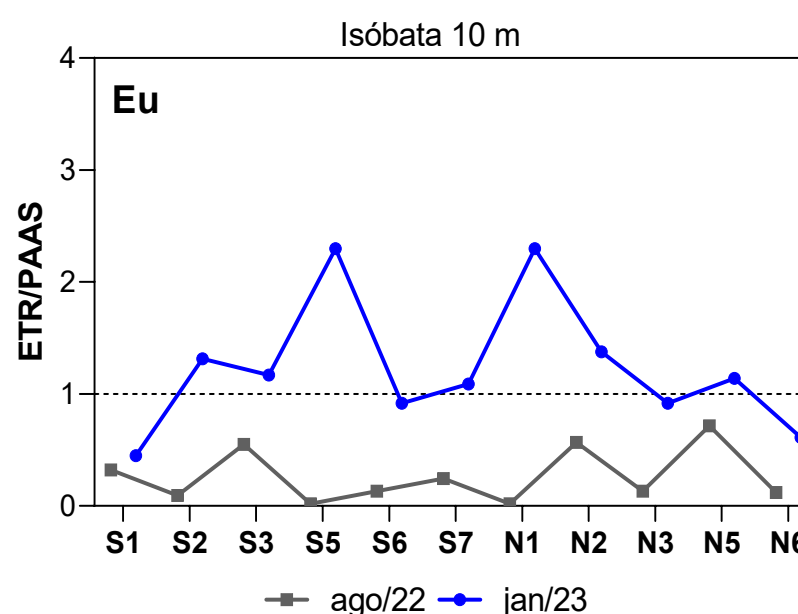
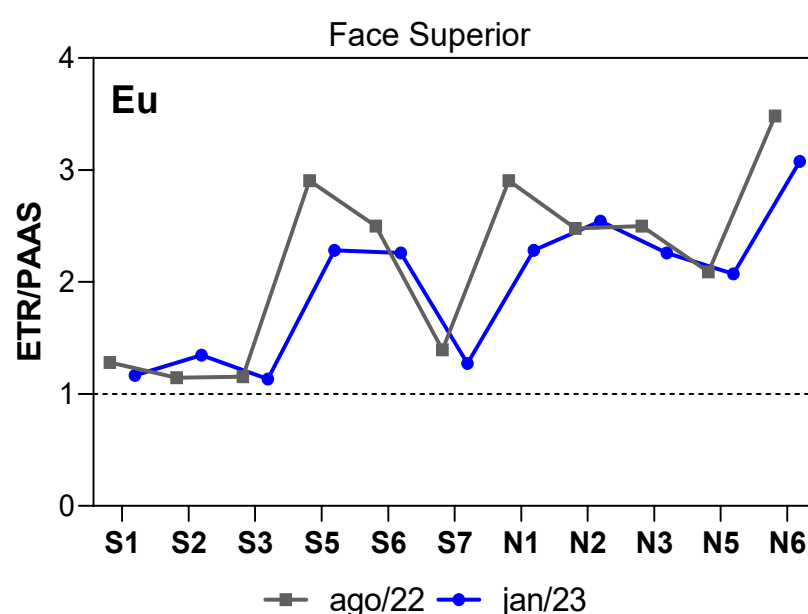
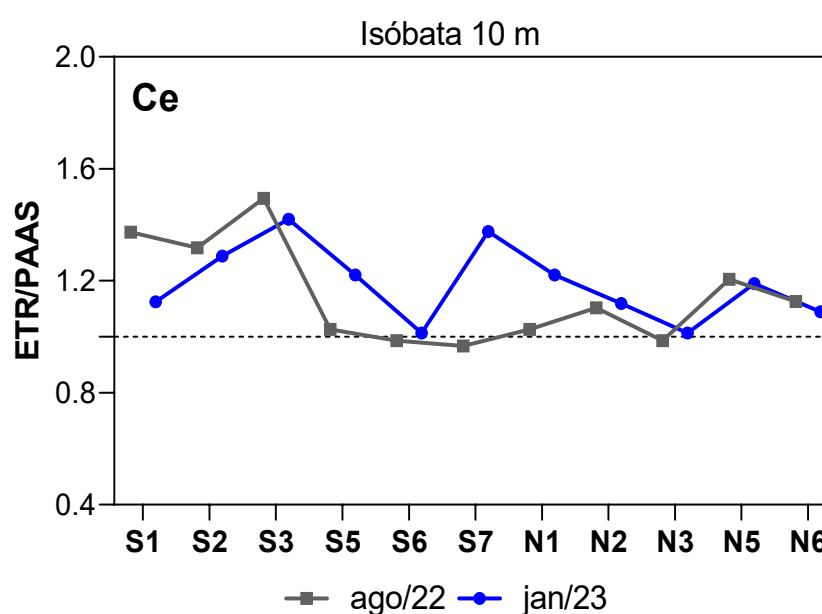
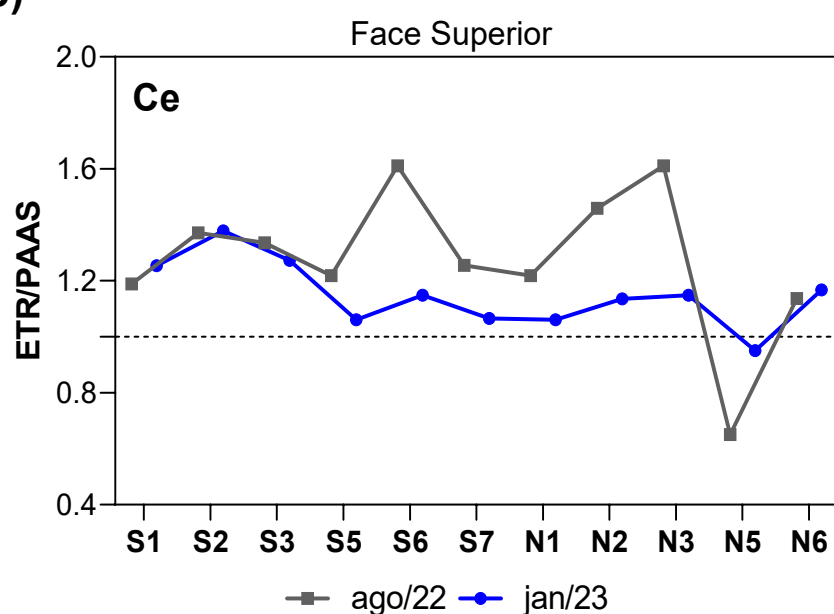
A avaliação espaço-temporal dos elementos químicos ao longo do período de monitoramento foi realizada a partir da utilização do índice *Sediment Quality Guideline Quotients* (SQG-q; Longhini et al., 2022) que permite realizar um diagnóstico qualitativo sobre a condição da contaminação ambiental. A utilização do SQG-q para o ambiente praias é importante devido, principalmente, à falta de valores de referência locais para a concentração dos elementos químicos, que inviabiliza o emprego de índices consolidados como o índice de geoacumulação (Igeo), por exemplo. SQG-q é obtido pela normalização das concentrações de cada elemento químico em relação aos seus respectivos valores de *Probable Effects Level* (PEL) estabelecidos pelos dados coletados no âmbito do programa *National Status and Trends Program* do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA; Buchman, 2008). De acordo com SQG-q, a qualidade do ambiente pode ser classificada em três categorias em relação aos prováveis efeitos adversos à fauna bentônica; não impactado para valores de SQG-q < 0,1; moderadamente impactado para valores entre 0,1 e 1 e fortemente impactado para valores superiores a 1. O Compartimento A como pode ser observado, vem apresentando-se como moderadamente impactado ao longo do monitoramento para todas as feições praias. Porém, vale destacar a isóbata de 5 m, que apresenta os maiores valores, próximos a 0,2, nas três últimas campanhas amostrais. Esse comportamento ressalta a influência das características geológicas e morfodinâmicas das praias desse compartimento sobre a influência da sazonalidade na composição química do sedimento. A zona emersa dos Compartimentos B, B' e C, representada pela face inferior, pode ser classificada como não impactada ao longo da série histórica. Por outro lado, os Compartimentos B' e C apresentaram SQG-q superior a 0,10 ao longo de todo o período de monitoramento na antepraia, principalmente na isóbata de 10 m, sendo classificados como moderadamente impactados. Na campanha de jan/23, período chuvoso, foi identificado um pequeno aumento do valor de SQG-q, indicando um maior aporte de elementos químicos nesses compartimentos. Vale ressaltar que os valores de SQG-q encontrados na isóbata de 10 m do Compartimento C são os maiores de toda a malha amostral, indicando ser a região mais impactada. Esse fato demonstra que, na isobata de 10 metros, a zona de influência do Rio Doce se estende desde a Foz, em Regência, até a estação amostral de Itaúnas. Assim, a análise espaço-temporal indica que não há uma tendência de redução da contaminação, reforçando a importância de continuidade do monitoramento ambiental.

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

Figura 9: (a) Perfil de distribuição dos elementos terras raras, normalizados pelo Folhelhos Pós Arqueano - PAAS (do inglês *Post Archean Australian Shale*), no sedimento marinho. 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 (FS) e isóbata de 10 m (I10); (b) Avaliação de ocorrência das anomalias de Cério (Ce) e Európio (Eu) ao longo das estações amostrais. Dados obtidos no período de agosto de 2022 e janeiro de 2023.



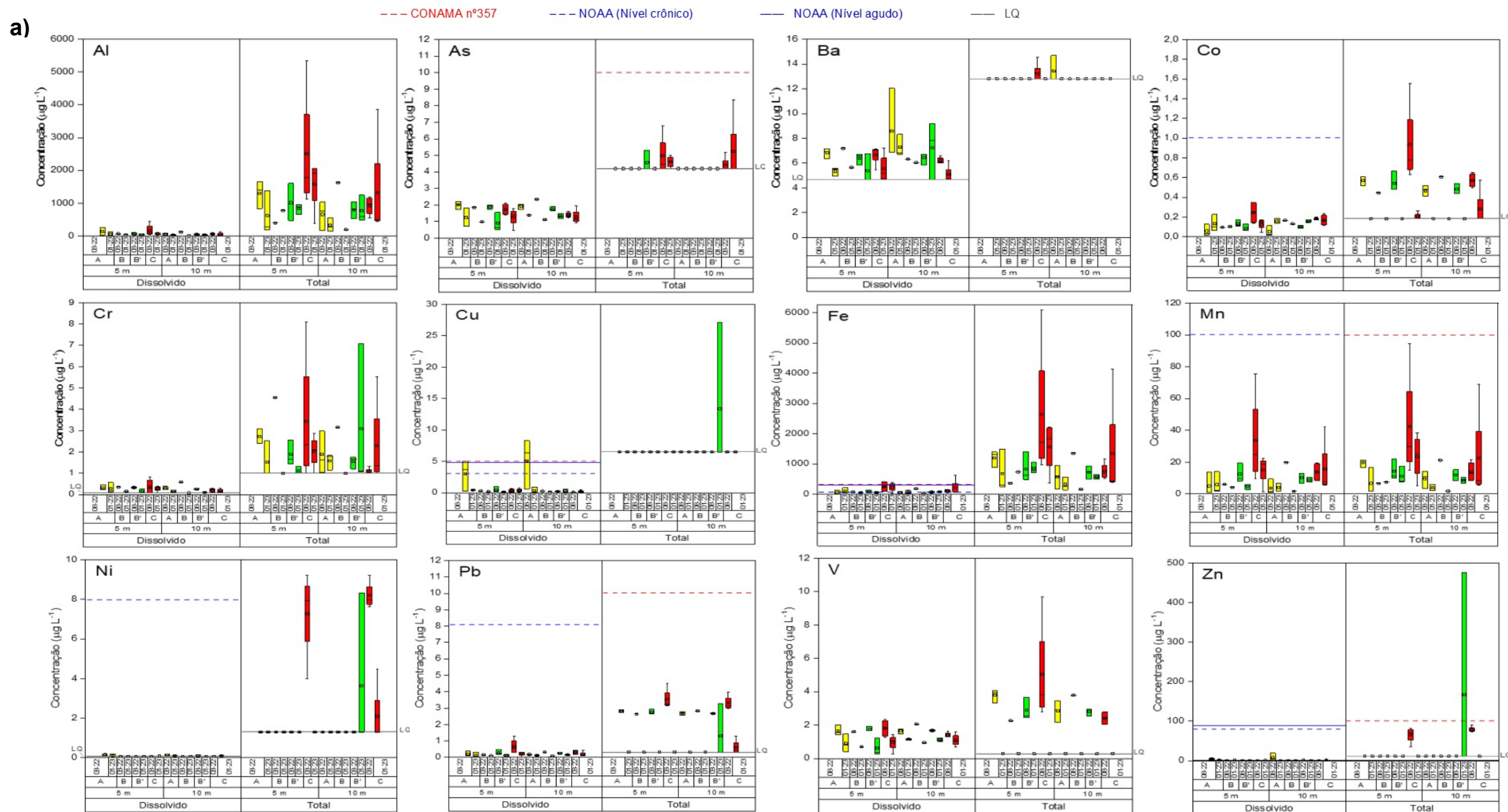
b)



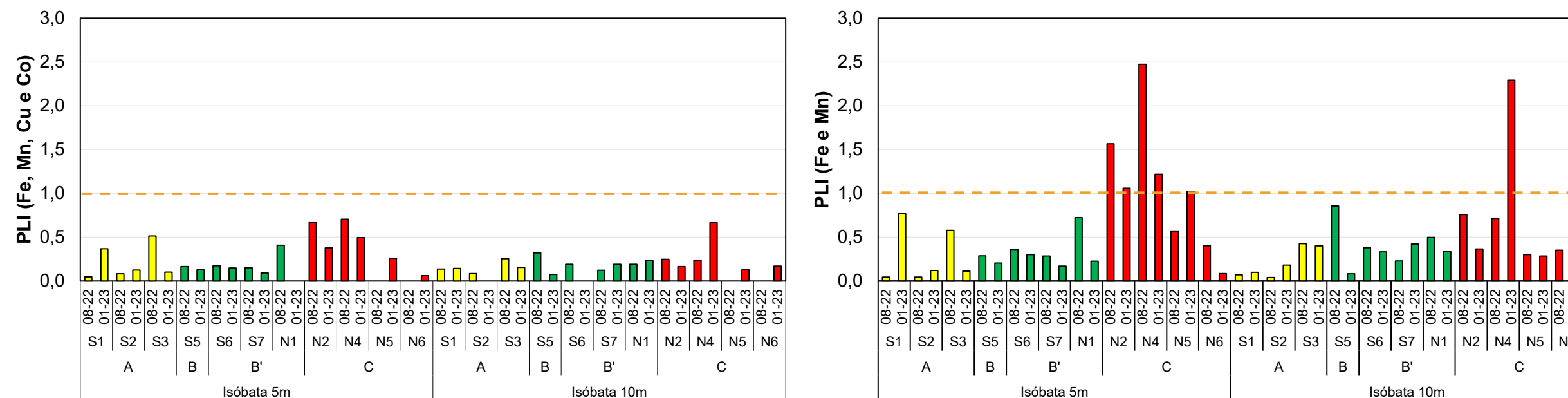
Na face superior, observou-se que as concentrações normalizadas dos elementos terras raras apresentaram um comportamento semelhante entre as campanhas de ago/22 e jan/23 para todos os compartimentos. Os valores obtidos nos diferentes compartimentos foram menores que 1, indicando um esgotamento dos ETR (a). Na isóbata de 10 m, não foi observado um padrão para as concentrações normalizadas dos elementos ETR (a). No compartimento A e B dessa feição, tem-se que as médias e medianas para todos os ETR foram menores que 1, indicando um esgotamento desses elementos, tanto na campanha de ago/22 quanto na de jan/23 (a). No Compartimento B' e C apresentam esse mesmo comportamento, com exceção para La, Ce e Pr, nos quais as razões da concentração normalizada foram maiores que 1, indicando enriquecimento destes elementos na isóbata de 10 m (a). De modo geral, na face superior foram encontradas anomalias de Eu e Ce positivas (>1) nas estações amostrais tanto na campanha de ago/22 como em jan/23 (b). Com relação as isóbatas de 10 m, anomalias de Ce positivas (>1) ou muito próximas a 1 são observadas em todas as estações amostrais nas campanhas de ago/22 e jan/23 (b). Ao avaliar as anomalias de Eu dessa feição, não foi observado um perfil similar entre as campanhas de ago/22 e jan/23 (b). Isso porque, em ago/22, todas as estações amostrais apresentaram anomalias negativas, enquanto que, em jan/23, houve uma predominância de anomalias positivas (>1) em algumas estações de amostragem (b). A presença das anomalias de Ce são sugestivas de variações nas condições redox do ambiente, sendo a anomalia positiva relacionada a deposição destes elementos no sedimento como complexo de oxi/hidróxidos de ferro, manganês ou alumínio. As anomalias negativas de Eu, especialmente em ago/22, 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 estão ocorrendo variações nas características do ambiente.

2.2.3 Concentração de elementos químicos na água

Figura 10: **(a)** Distribuição das concentrações de elementos químicos totais e dissolvidos em amostras de água do mar coletadas nas estações amostrais dos Compartimentos A (amarelo, S1 a S3), B (verde, S5), B' (verde, S6 a N1) e C (verde, N2 a N6) para isóbata de 5 metros (5 m) e isóbata de 10 metros (10 m). Linha tracejada vermelha indica valor limite CONAMA n°357, linha tracejada azul indica limite crônico – NOAA, linha contínua azul indica limite agudo – NOAA e linha contínua cinza indica o limite de quantificação. **(b)** Valores obtidos para PLI (*Pollution Load Index*). Dados obtidos no período de agosto de 2022 e janeiro de 2023.

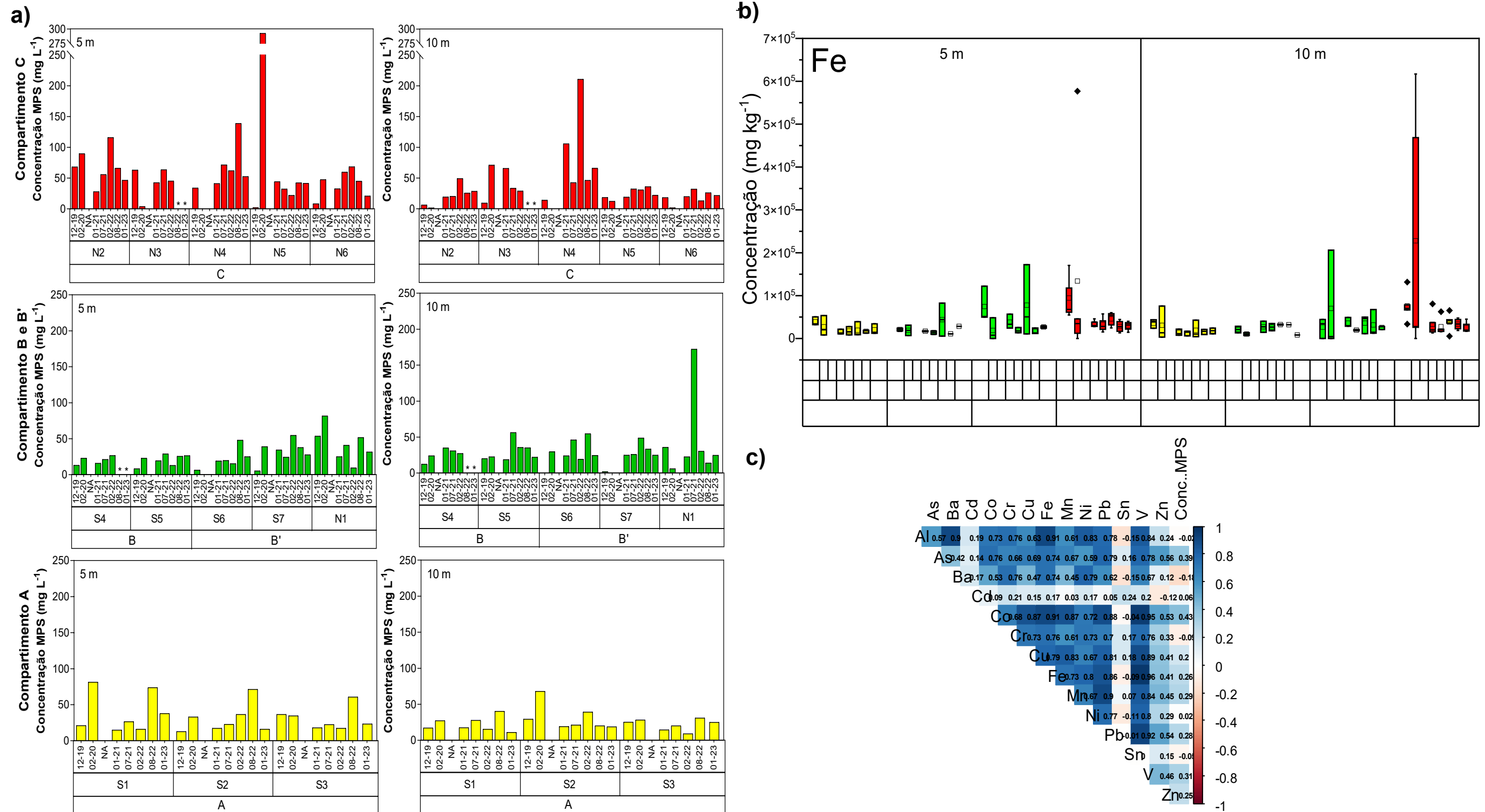


b)



A qualidade da água foi avaliada com base nos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n°357 (CONAMA, 2005) e pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (Buchman, 2008) para níveis agudos e crônicos em água salina. As concentrações dos elementos químicos foram determinadas nas amostras de água do mar em sua fração dissolvida e total (**a**). De modo geral, ao avaliar a concentração total dos elementos químicos, verificou-se que os compartimentos A (amarelo), B/B' (verde) e C (vermelho) apresentaram concentrações que se mantiveram abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução do CONAMA n°357 (---) para águas salinas classe 1 (**a**). Na fração dissolvida, a maioria das amostras analisadas apresentaram concentrações de Fe acima do nível crônico ($50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) estabelecido pelo NOAA (---). Os valores de concentração de Fe dissolvido excederam, ainda, o nível agudo ($300 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) informado pelo NOAA (—) nas estações amostrais do Compartimento C em campanhas realizadas em ago/22 e jan/23 (**a**). Esse valor limite informado como nível agudo pelo NOAA é o mesmo preconizado pela CONAMA (—). O Compartimento C apresenta ainda, concentrações mais elevadas de Mn e Zn, as quais se encontram em proximidade significativa dos limites estabelecidos, tanto na fração dissolvida quanto na total (**a**). O índice PLI (*Pollution Load Index*) também foi utilizado para avaliar o nível de poluição das águas e, devido à falta de dados pretéritos, os dados bases utilizados no seu cálculo foram os níveis crônicos apresentados pelo NOAA (**b**). Quando foram considerados os elementos Fe, Mn, Cu e Co no cálculo do índice, os valores de PLI foram menores que 1, sugerindo área não poluída; porém, utilizando somente os elementos Fe e Mn, os mais expressivos (Longhini et al., 2022), obteve-se PLI maior que 1 para as isóbatas de 5 metros das estações N2 e N4, inferindo área poluída (**b**).

Figura 11: (a) Concentração de material em suspensão (mg/L) na coluna d'água, (b) concentração de ferro no material particulado em suspensão (mg/kg) e (c) correlação de Spearman (rS), para as concentrações dos elementos químicos presentes no material particulado em suspensão. Dados obtidos para as isóbatas de 5 e 10 metros ao longo dos Compartimentos A, B, B' e C. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19. Dados obtidos no período de dezembro de 2019 a janeiro de 2023. NA: período não amostrado devido à pandemia da Covid/19.



Durante o período de monitoramento, observa-se maiores concentrações de material particulado em suspensão (MPS) nas estações situadas ao norte da desembocadura do Rio Doce (Compartimento C), especialmente na profundidade de 5 metros (**a**). Em locais mais rasos, como nas isóbatas de 5 metros, a maior energia das ondas pode remobilizar e colocar em suspensão as partículas de sedimentos mais finas. No que diz respeito à variação ao longo do tempo, não se nota uma tendência clara de distribuição do MPS associada aos períodos seco e chuvoso. Os períodos de tempo seco e chuvoso podem não apresentar padrões distintos na distribuição de MPS, uma vez que o efeito da descarga do rio, mais presente na estação chuvosa e os constantes eventos de ressuspensão dos sedimentos, devido às ondas, mais significativos na estação seca, são capazes de colocar partículas finas em suspensão. Em relação à campanha de jan/23 observa-se que de maneira geral a concentração de MPS não sofreu variações significativas em relação à campanha ago/22. Ao avaliar a concentração os elementos químicos presentes no material particulado em suspensão, também não é observado um padrão de distribuição temporal é para os diferentes elementos investigados, como exemplificado para o elemento Fe (**b**). Como exceção, durante eventos de alta vazão, como em fev/20, onde a vazão do rio Doce atingiu sua cota de inundação, foi possível observar maiores concentrações de elementos químicos nas profundidades de 10 metros nos compartimentos A, B' e C, devido à contribuição de sedimentos finos provenientes do rio (**b**). Esse padrão de distribuição em direção ao norte é resultado da influência da deriva litorânea no transporte de sedimentos, conforme relatado anteriormente por Oliveira et al. (2015). Os elementos químicos, quando quantificáveis, apresentaram altas correlações positivas entre si (**c**) e apresentam a seguinte ordem decrescente de concentrações: Fe> Al> Mn> Cr> V> Ba> Zn> As> Ni> Cu> Sn>Pb> Co> Cd.

2.3 BENTOS

2.3.1 Indicador Macrofauna

Tabela 1: Resultados das ANOVAs (Análises de variância) realizadas com os parâmetros da diversidade da macrofauna bentônica (Densidade média (**N**), riqueza taxonômica (**S**), diversidade de Shannon/Wiener (**H'**), equitabilidade de Pielou (**J**) e diversidade beta (**β**) para praia emersa e antepraia entre os compartimentos e campanhas durante todo o período de realização do PMBA/Fest. 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 ($p > 0,05$).

Variação espaço/temporal do indicador Macrofauna															
Variáveis	N			S			H'			J			β		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>															
Compartimento	8,61	0,0	B > A, C		ns			ns		8,83	0,0	C > A, B		ns	
Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
<u>Antepraia</u>															
Compartimento	5,98	0,0	B < A, C	9,85	0,0	B < A, C	4,48	0,01	B < A, C		ns			ns	
Campanha	4,59	0,0	+		ns		4,28	0,00	+	2,81	0,01	Oscila	6,9	0,01	Oscila
Compartimento x Campanha		ns			ns				ns		ns			ns	
Isóbatas		ns			ns				ns		ns			ns	

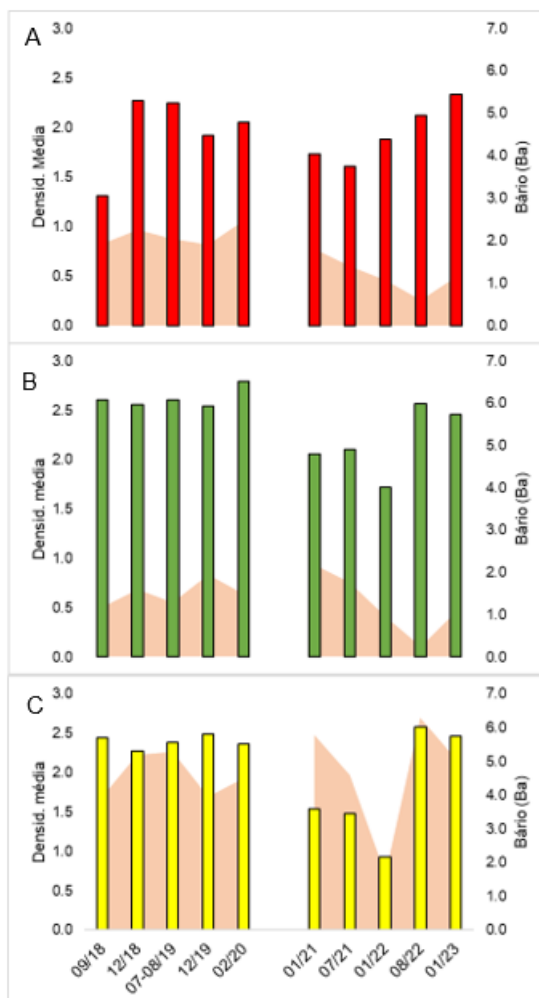
A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de dez/19. Como resultados principais, é possível observar que a densidade da macrofauna de praia emersa é maior no Compartimento B. No entanto, na antepraia, o Compartimento B apresenta os menores valores de densidade, riqueza e diversidade, sem diferença entre as isóbatas. Não há um padrão entre períodos secos e chuvosos, porém, de modo geral, ocorre uma tendência de aumento da densidade de organismos e da diversidade (H') com o tempo.

Tabela 2: 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. Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). “oscila” com o tempo. ns – não significativo ($p > 0,05$). NA – Não se aplica.

Variação espaço/temporal na densidade (ind/m ²) dos Grupos/chave												
Variáveis	Compartimento			Campanha			Compartimento x Campanha			Isóbatas		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>												
Oligochaeta	9,84	0,00	B, A > C			ns			ns	NA	NA	NA
<i>S. pussicus</i>	23,50	0,00	B > C > A			ns			ns	NA	NA	NA
<i>H. cf. variodentata</i>	26,24	0,00	B > C > A			ns			ns	NA	NA	NA
<i>E. brasiliensis</i>			ns			ns			ns	NA	NA	NA
Amphipoda	3,85	0,02	A > C			ns			ns	NA	NA	NA
<u>Antepraia</u>												
Spionidae			ns			ns			ns			ns

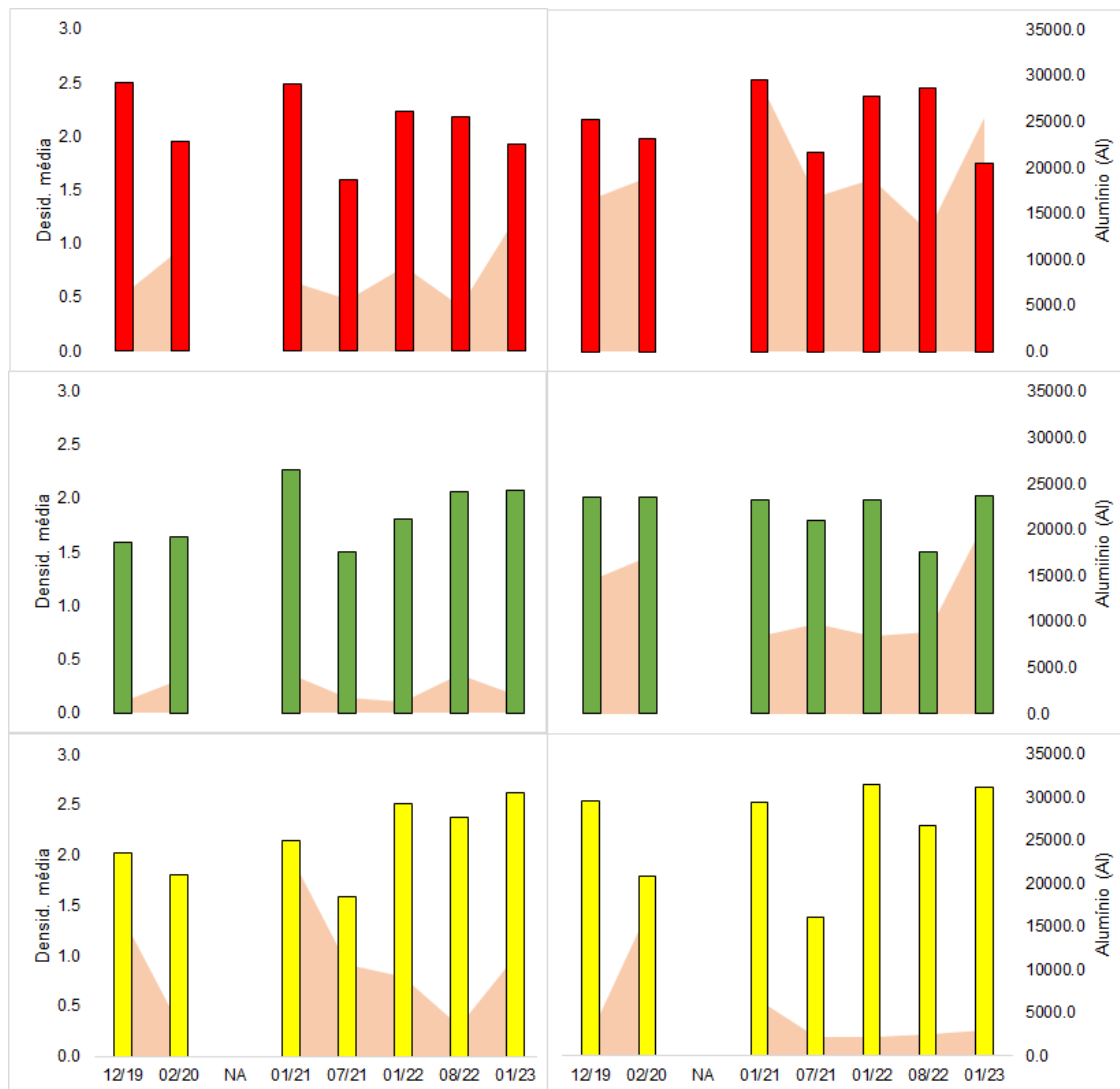
A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de dez/19. Os grupos chaves, Oligochaeta, *Saccocirrus pussicus* e *Hesionura cf. variodentata* apresentam maiores densidades no Compartimento B do que nos demais. Cabe ressaltar que as duas últimas espécies preferem regiões com sedimentos com areia grossa, característica presente nesse compartimento. Já o crustáceo Amphipoda segue apresentando maiores densidades no Compartimento A, região onde a complexidade estrutural do ambiente promove abrigo a alimento de forma proporcional. As variações sazonais nas densidades destes organismos deixaram de ser significativas.

Figura 12: Densidade média (Log X +1) da macrofauna bentônica da praia emersa em relação negativa à distribuição de Bário (Ba) 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.



As praias do Compartimento C são do tipo dissipativa e, de acordo com a literatura mundial para praias arenosas, era esperado altos valores de densidade e riqueza da macrofauna nesse local, o que não vem ocorrendo, provavelmente devido ao acúmulo de elementos químicos nesse setor. 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 Ba, os parâmetros da macrofauna da praia emersa apresentam relações com Alumínio (Al), Ferro (Fe), Níquel (Ni) e porcentagem de lama, conforme sumarizado na Tabela 3. No entanto, com a inclusão da campanha jan/2023 a relação com Manganês (Mn) deixa de ocorrer. Em relação aos Grupos/chave, listados na Tabela 4, esses continuam apresentando relações com As, Al, Fe e Ni. Com a inclusão da campanha jan/2023, deixaram de apresentar relação com Mn e passaram a apresentar com Ba. O crustáceo *Excirolan abraziensis* e o anelídeo *Oligochaeta* apresentaram relações negativas com a porcentagem de lama, assim como no FEST (2023).

Figura 13: Densidade média (Log X +1) da macrofauna bentônica na antepraia em relação à distribuição de Alumínio (Al) (mg/kg) durante todo o período de monitoramento do PMBA/Fest. Barras amarelas / Compartimento A, Barras verdes/ Compartimento B', Barras vermelhas / Compartimento C. Barras representam a densidade média da macrofauna bentônica; área sombreada distribuição de Al (mg/kg); 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 1). Além da relação com o Alumínio (Al), a macrofauna da antepraia apresenta relação com o Chumbo (Pb), Bário (Ba), %CaCO₃ e seleção, conforme apresentado na Tabela 3. Em relação aos grupos/chave, os anelídeos da família Spionidae apresentaram relação negativa apenas com Ferro (Fe). No FEST (2023) este parâmetro apresentava relação negativa com o Chumbo (Pb), deixando de ocorrer com a inclusão da campanha de jan/23 (Tabela 4).

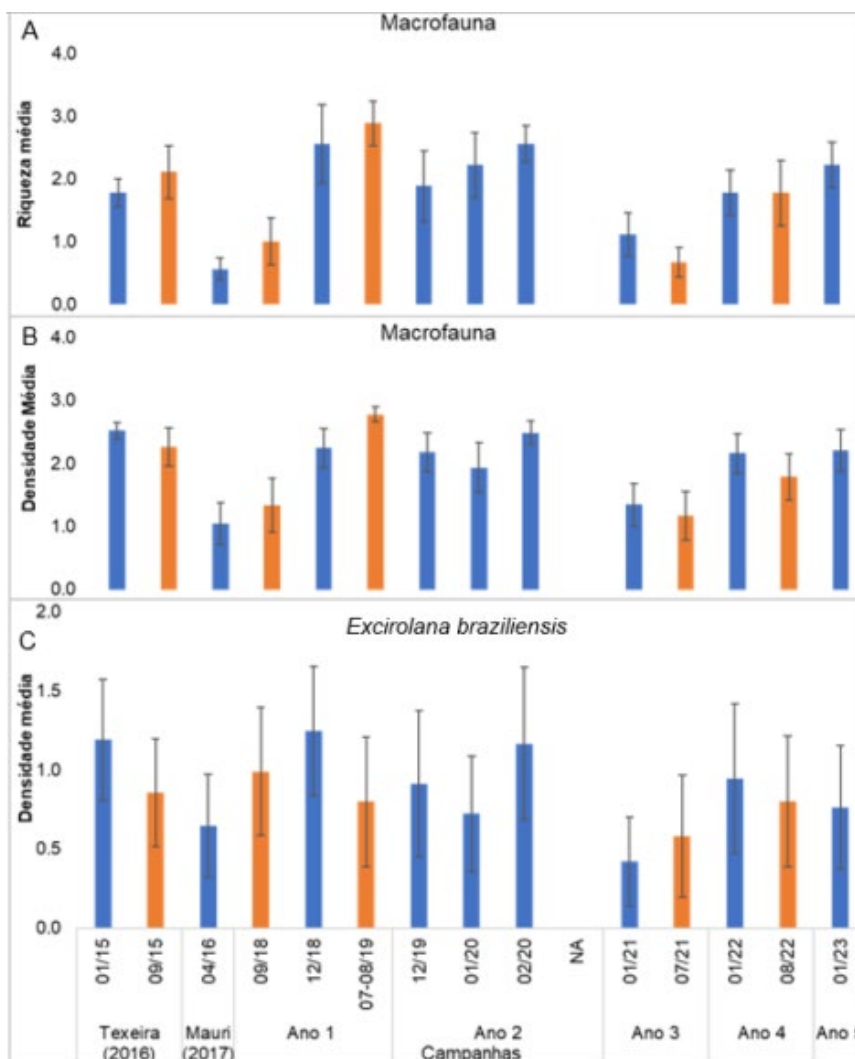
Tabela 3: Resultados das ANCOVAs (análises de covariância) realizadas com os parâmetros da macrofauna bentônica (Densidade média (**N**), Riqueza taxonômica (**S**), Diversidade de Shannon/Wiener (**H'**), Equitabilidade de Pielou (**J**) e Diversidade beta (**β**)) em relação às variáveis morfodinâmicas (%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. Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul / relação positiva; em vermelho / relação negativa.

Integração do indicador Macrofauna com os parâmetros sedimentares e concentrações elementar										
Variáveis	Praia emersa					Antepraia				
	N	S	H'	J	β	N	S	H'	J	β
%Areia										
%Carbonato										
%Lama										
Diâmetro Médio (Phi)										
Seleção (Phi)										
Arsênio (As)										
Alumínio (Al)										
Bário (Ba)										
Ferro (Fe)										
Manganês (Mn)										
Níquel (Ni)										
Chumbo (Pb)										

Tabela 4: 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. Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul / relação positiva; em vermelho / relação negativa

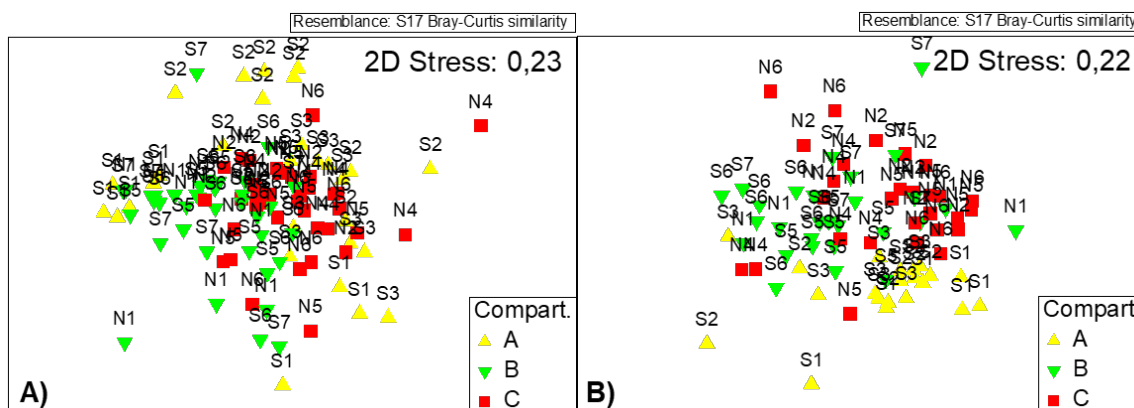
Densidade média (ind/m ²) de Grupos/chave						
Variáveis	Praia emersa					Antepraia
	Oligochaeta	<i>S. pussicus</i>	<i>H. cf. variodontata</i>	<i>E. brasiliensis</i>	Amphipoda	Spionidae
%Areia						
%Carbonato						
%Lama						
Diâmetro Médio (Phi)						
Seleção						
Arsênio (As)						
Alumínio (Al)						
Bário (Ba)						
Ferro (Fe)						
Manganês (Mn)						
Níquel (Ni)						
Chumbo (Pb)						

Figura 14: Parâmetros ecológicos da macrofauna de Degredo (N2). A) Riqueza taxonômica; B) Densidade média (Log X +1) e; C) densidade do grupo chave *Excirolan braziliensis*. Dados do pré/rompimento referem-se aos dados pretéritos (jan/2015 e set/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Dados do período Chuvoso de 2016 (abr/2016) referem-se aos dados pretéritos retirados do trabalho de conclusão de curso de Mauri (2017). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest. Campanha jan/2020 realizada durante a cheia do Rio Doce; Campanha emergencial fev/2020 realizada pós cheia do Rio Doce. Barras em azul, período chuvoso; barras em laranja, período seco. NA – não amostrado devido à pandemia de Covid/19.



Apesar das variações recorrentes nos parâmetros da macrofauna de Degredo, as últimas campanhas (Ano 4 e Ano 5) vem mostrando uma recuperação dos valores, tendendo a se igualar aos dados pretéritos ao rompimento da Barragem de Fundão, apesar de drásticas reduções nos índices ecológicos logo após a chegada da lama de rejeitos. No entanto, ao analisar os grupos chave/chaves separadamente, é possível ver variações distintas dependendo do táxon. Na Figura 14 (c) podemos observar a variação da densidade média do crustáceo *Excirolana braziliensis*. Anfípodos e o poliqueta *S. pussicus*, por exemplo ainda apresentam grande oscilação de suas densidades, inclusive estando ausentes em algumas campanhas.

Figura 15: 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) evidenciou agrupamentos da estrutura da macrofauna (composição e densidade) entre os Compartimentos, principalmente entre o B e o C. A análise ANOSIM, confirma as diferenças significativas ($R(\text{global}) = 0,108$; $p = 0,001$), onde todos compartimentos se diferem entre si. Mesmo padrão já apresentado no FEST (2023). A análise ANOSIM também evidenciou diferenças significativas da estrutura da macrofauna entre as campanhas ($R(\text{global}) = 0,033$; $p = 0,001$), onde a campanha chuvosa de 01/23 diferiu significativamente das campanhas do período seco do monitoramento (09/18, 07/08/19, 07/21), assim como das últimas campanhas dos períodos chuvosos (01/21 e 01/22). A análise SIMPER indicou que essas diferenças ocorreram devido, principalmente, às variações nas densidades de *Oligochaeta*, do isópode *Excirolana braziliensis* e *Nemertea*, mesmo padrão observado no FEST (2023).

B) Antepraia / A análise de ordenação nMDS mostrou claro padrão de agrupamento das amostras por compartimentos. A análise ANOSIM confirmou a diferença significativa da estrutura da macrofauna entre todos os compartimentos ($R(\text{global}) = 0,18$; $p = 0,001$), assim como evidenciado no FEST (2023). A análise SIMPER mostrou que, de modo geral, as variações nas densidades do crustáceo Amphipoda e dos poliquetas Spionidae e Syllidae foram as principais responsáveis pelas diferenças encontradas entre os compartimentos na antepraia. A análise ANOSIM também mostrou algumas diferenças temporais significativas ($R(\text{global}) = 0,066$; $p = 0,002$), onde a campanha 01/23 diferiu das campanhas 02/20 e 07/21. Variações nas densidades de Spionidae e Amphipoda são os responsáveis por estas diferenças. A análise ANOSIM também detectou diferenças significativas na estrutura da fauna entre as isóbatas ($R(\text{global}) = 0,034$; $p = 0,002$), onde o SIMPER detectou que as maiores densidades de Spionidae e Amphipoda na isóbata de 10 m foram as responsáveis por esta dissimilaridade. Mesmo padrão já observado no FEST (2023).

Tabela 5: 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. Os baixos valores de R Global indicam que variações nas densidades dos táxons contribuíram mais para as dissimilaridades do que diferenças na composição taxonômica. Apenas resultados significativos ($p > 0,05$) foram evidenciados na tabela abaixo.

	Praia emersa				Antepraia			
	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média	Fator	R	ANOSIM	Dissi. Média
Compart.	A x B	0,181	0,001	96,8	A x B	0,222	0,001	92,8
	A x C	0,116	0,001	97,2	A x C	0,176	0,001	92,7
	B x C	0,054	0,001	94,7	B x C	0,15	0,001	92,5
Campanha	09/18 x 01/23	0,077	0,01	95,3	02/20 x 01/23	0,063	0,026	92,1
	07/08/19 x 01/23	0,038	0,077	94,1	07/21 x 01/23	0,087	0,005	94,1
	01/21 x 01/23	0,113	0,002	97,3	/	/	/	/
	07/21 x 01/23	0,118	0,001	96,0	/	/	/	/
	01/22 x 01/23	0,086	0,001	97,0	/	/	/	/
Isóbatas	/	/	/	/	5m x 10m	0,034	0,002	91,94

2.3.2 Indicador Meiofauna

Tabela 6: Resultados das ANOVAs (Análises de variância) realizadas com os parâmetros da diversidade da meiofauna bentônica (Densidade média (**N**), riqueza taxonômica (**S**), diversidade de Shannon/Wiener (**H'**), equitabilidade de Pielou (**J**) e diversidade beta (**β**) para praia emersa e antepraia entre os compartimentos e campanhas durante todo o período de realização do PMBA/Fest. 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 ($p > 0,05$).

Variação espaço/temporal do indicador Meiofauna															
Variáveis	N			S			H'			J			β		
	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>															
Compartimento	6,56	0,00	A, C > B	8,27	0,00	A, B > C	47,6	0,00	B > A, C		ns			ns	
Campanha		ns		4,71	0,03	Oscila	8,48	0,00	Oscila		ns			ns	
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
<u>Antepraia</u>															
Compartimento		ns		7,48	0,00	A > B, C	64,12	0,00	A > B, C	8,42	0,00	A > B, C	3,73	0,02	A > C
Campanha	9,26	0,00	+		ns			ns		3,16	0,00	/	16,72	0,00	/
Compartimento x Campanha		ns			ns			ns			ns			ns	
Isóbata		ns			ns			ns			ns			ns	

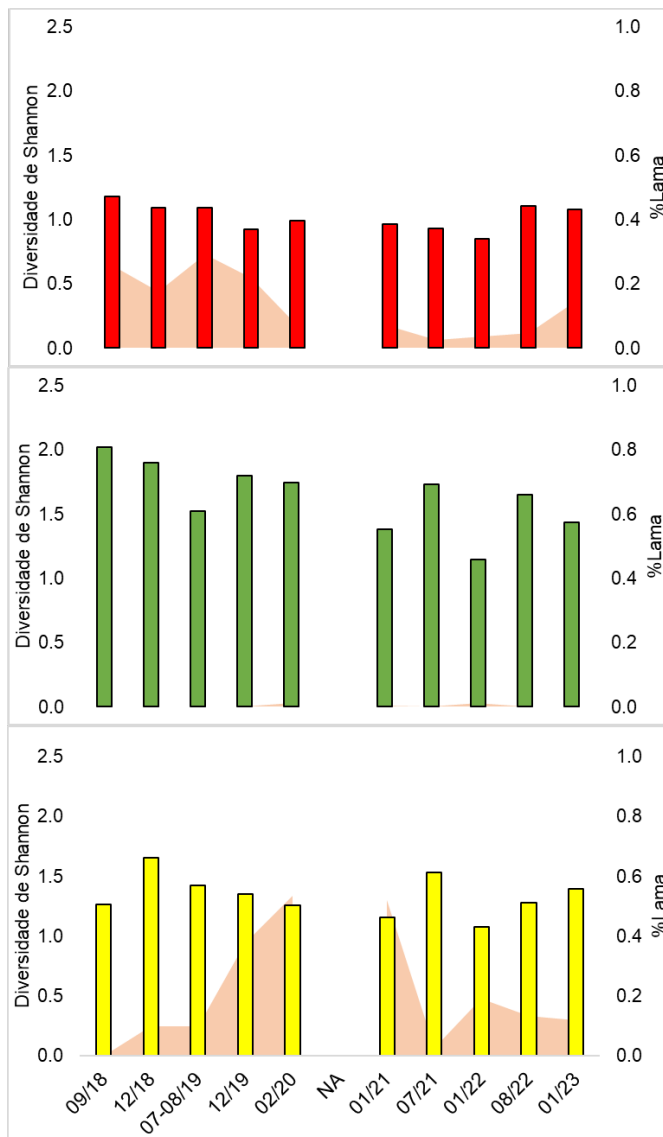
A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de dez/19. Para a praia emersa, os Compartimentos A e C apresentam as maiores densidades significativas da meiofauna, assim como no FEST (2023). No entanto, o compartimento C possui os menores valores de riqueza taxonômica e diversidade de Shannon/Wiener. Tanto a riqueza quanto a diversidade de Shannon/Wiener mostram oscilações significativas de 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 (J) está reduzindo ao longo do tempo, padrão já evidenciado no FEST (2023).

Tabela 7: Resultados das ANOVAs realizadas com os grupos chave da meiofauna bentônica da praia emersa e da antepraia entre os compartimentos e campanhas amostradas durante todo o período de realização do PMBA/Fest. “+” aumenta com o tempo. ns – não significativo. Tendência – resultado do teste post hoc para variáveis categóricas (Compartimentos) ou tendência de variância para variáveis contínuas (Campanha). “oscila” com o tempo. ns – não significativo ($p > 0,05$). NA – Não se aplica.

Densidade média (ind/10cm ²) de Grupos Chave						
Variáveis	Nematoda			Copepoda		
	F	p	tendência	F	p	tendência
<u>Praia emersa</u>						
Compartimento	19,7	0,00	A, C > B		ns	
Campanha	5,9	0,01	Oscila	5,33	0,02	+
Compartimento x Campanha		ns			ns	
<u>Antepraia</u>						
Isóbata		ns			ns	
Compartimento		ns		30,2	0,00	A > B, C
Campanha	47,7	0,00	+	7,58	0,00	Oscila
Compartimento x Campanha		ns		3,08	0,04	Oscila

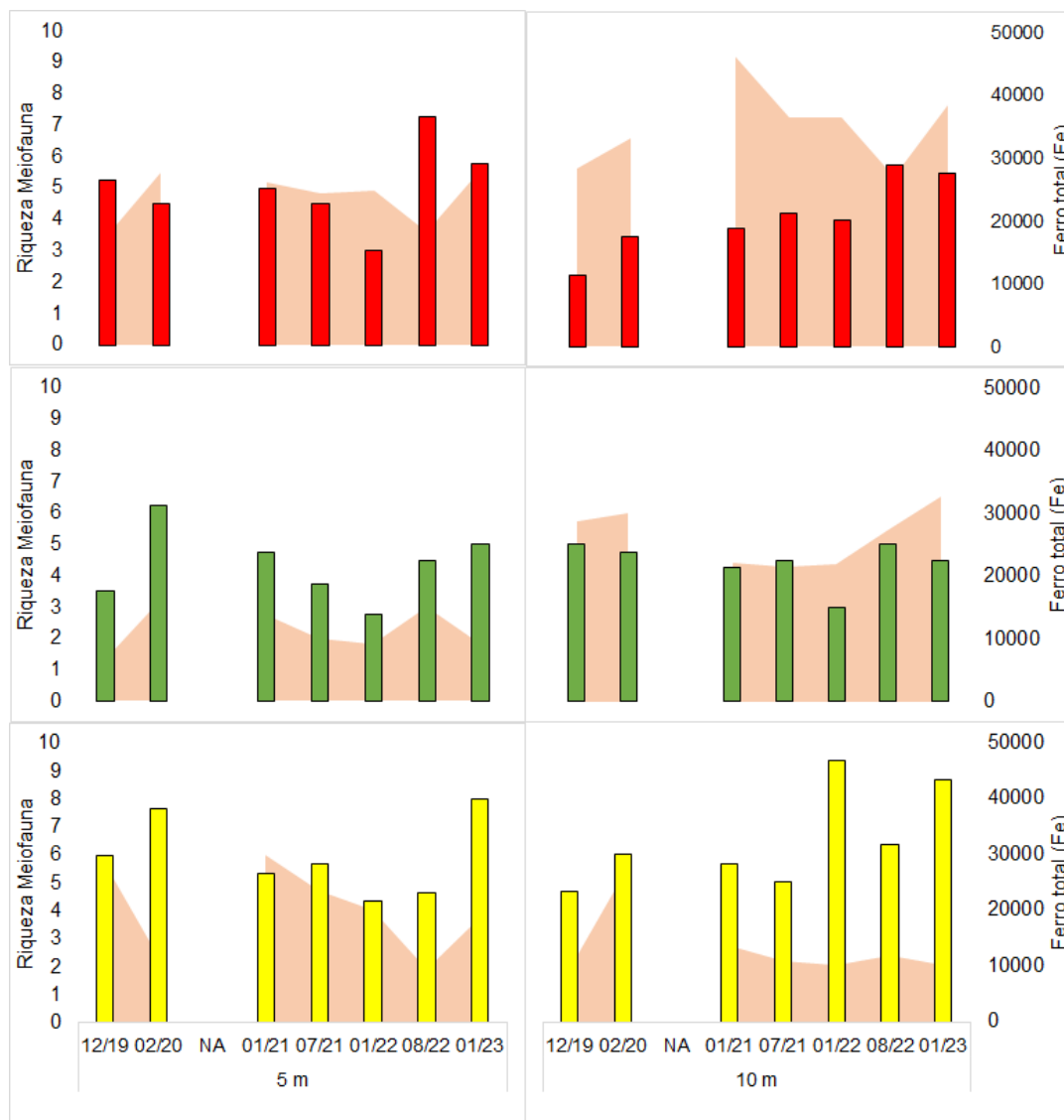
A fauna bentônica de antepraia começou a ser amostrada a partir de dez/19. Na praia emersa, Nematoda apresenta maiores densidades nos compartimentos A e C. Ao longo das campanhas, há uma oscilação na densidade de Nematoda, enquanto que Copepoda vem apresentando uma tendência de aumento. Para a antepraia, o crustáceo Copepoda teve os maiores valores de densidade no compartimento A, com oscilação da densidade ao longo das campanhas, enquanto Nematoda apresenta tendência de aumento de forma geral.

Figura 16: 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. Barras representam a diversidade de Shannon da meiofauna bentônica; área sombreada distribuição de Lama (%). NA – não amostrado devido à pandemia de COVID/19.



Menores valores da diversidade de Shannon/Wiener da meiofauna, assim como de riqueza, são registrados no Compartimento C (Tabela 6). Além da porcentagem de lama, a meiofauna também apresenta relações negativas com Arsênio (As) e Alumínio (Al). Em relação aos grupos/chaves meiofaunais, Copepoda apresentou relações negativas com Alumínio (Al), Bário (Ba) e Níquel (Ni), enquanto Nematoda se relacionou negativamente com a porcentagem de lama. A presença da lama, mesmo em baixa quantidade observada na porção emersa, e de outros elementos químicos afetam negativamente e continuamente todos os componentes da fauna bentônica. Todos os resultados das ANOVAs e ANCOVAs para a meiofauna estão sumarizados nas Tabela 6 e Tabela 8, respectivamente.

Figura 17: 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. Barras representam a riqueza da meiofauna bentônica; área sombreada distribuição de Fe total (mg/kg). NA – não amostrado devido à pandemia de COVID/19.



Assim como no FEST (2023), os menores valores de riqueza foram registrados nos Compartimentos B e C. Além da relação com o Fe, os parâmetros ecológicos da meiofauna apresentam relações negativas com Alumínio (Al), Arsênio (As), Ferro (Fe) e teor de lama (%), conforme sumarizado na Tabela 8. Os grupos chave, Nematoda e Copepoda, também apresentam relações negativas com Alumínio (Al), Bário (Ba) e Ferro (Fe), mesmo padrão relatado no relatório anterior (Tabela 9).

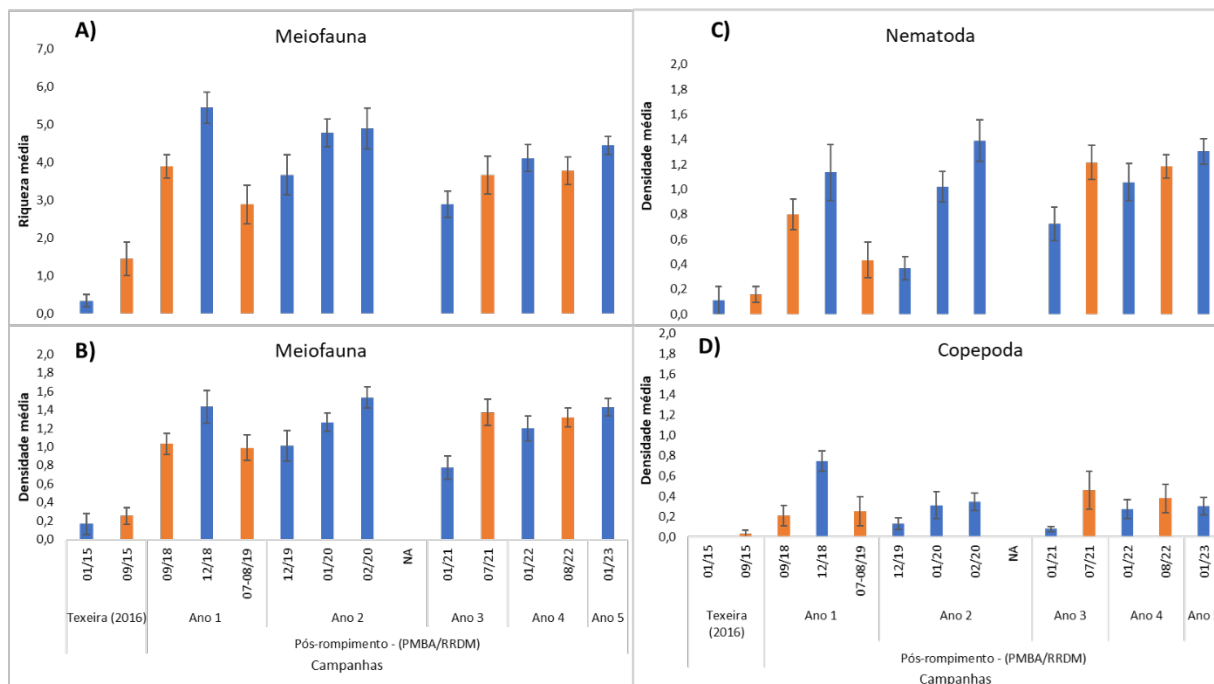
Tabela 8: Resultados das ANCOVAs realizadas com os parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica (Densidade média (**N**), Riqueza taxonômica (**S**), Diversidade de Shannon/Wiener (**H'**), Equitabilidade de Pielou(**J**) e Diversidade beta (**β**)) em relação às variáveis morfodinâmicas (%Areia, %Carbonato, %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. Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul / relação positiva; em vermelho / relação negativa.

Integração do indicador Meiofauna com os parâmetros sedimentares e concentrações elementar										
Variáveis	Praia emersa					Antepraia				
	N	S	H'	J	β	N	S	H'	J	β
%Areia										
%Carbonato										
%Lama										
Diâmetro Médio (Phi)										
Seleção										
Arsênio (As)										
Alumínio (Al)										
Bário (Ba)										
Ferro (Fe)										
Manganês (Mn)										
Níquel (Ni)										
Chumbo (Pb)										

Tabela 9: 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. Marcações coloridas indicam resultados significativos: em azul / relação positiva; em vermelho / relação negativa.

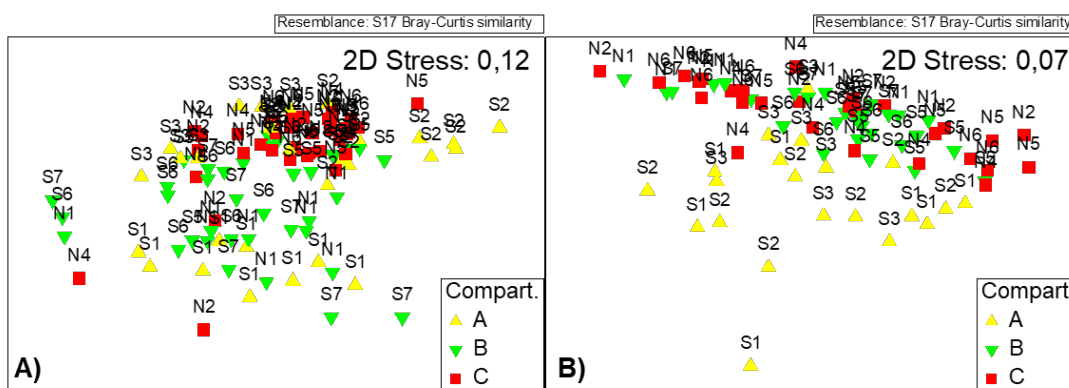
Densidade média (ind/10cm2) de Grupos Chave				
Variáveis	Praia emersa		Antepraia	
	Nematoda	Copepoda	Nematoda	Copepoda
%Areia				
%Carbonato				
%Lama				
Diâmetro Médio (Phi)				
Seleção (Phi)				
Arsênio (As)				
Alumínio (Al)				
Bário (Ba)				
Ferro (Fe)				
Manganês (Mn)				
Níquel (Ni)				
Chumbo (Pb)				

Figura 18: Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica de Degredo (N2) durante todo o período do monitoramento. A) Riqueza taxonômica. B) Densidade média (ind/10cm² – Log X + 1). C) Densidade média de Nematoda (ind/10cm² – Log X + 1). D) Densidade média de Copepoda (ind/10cm²/ Log X + 1). Dados do pré-rompimento referem-se aos dados pretéritos (jan/2015 e set/2015) retirados da dissertação de Teixeira (2016). Os demais referem-se aos dados do PMBA/Fest. Campanha jan/2020 realizada durante a cheia do Rio Doce; Campanha emergencial fev/2020 realizada pós cheia do Rio Doce. Barras em azul, período chuvoso; barras em laranja, período seco. NA – não amostrado devido à pandemia de Covid/19.



As alterações na diversidade ecológica da meiofauna bentônica, após o rompimento da Barragem de Fundão, continuam demonstrando o impacto do rejeito na praia. Os valores da densidade e riqueza da meiofauna continuam maiores que o período pré-rompimento. Além disso, o grupo chave Nematoda apresenta tendência de aumento ao longo do tempo ($p < 0,05$), padrão já revelado no FEST (2023). Contudo, esses resultados requerem cautela, visto a oscilação que os dados vêm apresentando ao longo do monitoramento.

Figura 19: 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 mantém os agrupamentos da meiofauna sinalizados no FEST (2023), com maior semelhança das amostras do compartimento C. A análise ANOSIM, da mesma forma, demonstrou que há distinção da estrutura da meiofauna entre todos os compartimentos ($R(\text{global}) = 0,073$; $p = 0,001$). O ANOSIM também registrou diferença significativa temporal ($R(\text{global}) = 0,019$; $p = 0,006$), onde a última campanha (01/23) diferiu significativamente apenas da campanha 09/18, referente a primeira campanha do monitoramento (Tabela 10). A análise de classificação SIMPER revelou que as variações nas densidades, principalmente de Nematoda e Copepoda, foram responsáveis pelas diferenças encontradas na praia emersa, padrão que vem se mantendo e já foi reportado nos RRDM (2020), RRDM (2022) assim como no FEST (2023). B) Antepraia / A análise de ordenação nMDS mostra que a estruturação da meiofauna da antepraia do compartimento A tende a ser mais dispersas do que as demais, padrão já registrado nos RRDM (2022) e FEST (2023). A análise ANOSIM, confirma a separação dos grupos ($R(\text{global}) = 0,079$; $p = 0,001$), onde apenas o compartimento A difere dos demais. Diferenças significativas entre as campanhas também foram registradas ($R(\text{global}) = 0,101$; $p = 0,001$), onde a última campanha (01/23) diferiu significativamente de todas as campanhas do monitoramento, com exceção da campanha do período seco anterior (08/22). 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, assim como entre as campanhas. No que se refere as isóbatas de 5 m e 10 m, a análise ANOSIM não registra diferenças significativas entre elas ($R(\text{global}) = 0,002$; $p = 0,553$).

Tabela 10: 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	Dissimilaridade Média	Fator	R	ANOSIM	Dissimilaridade Média
Compartimento	A x B	0,038	0,005	78,56	A x B	0,154	0,001	63,11
	A x C	0,059	0,001	73,49	A x C	0,102	0,001	67,33
	B x C	0,112	0,001	76,87	B x C	/	ns	/
Campanha	09/18 x 01/23	0,114	0,003	79,06	12/19 x 01/23	0,33	0,001	71,14
	/	/	/	/	02/20 x 01/23	0,26	0,001	72,74
	/	/	/	/	01/21 x 01/23	0,15	0,006	58,47
	/	/	/	/	07/21 x 01/23	0,15	0,005	63,15
	/	/	/	/	01/22 x 01/23	0,17	0,004	64,01
Isóbatas	/	/	/	/	5m x 10m	/	ns	/

3 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.

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

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., etal. 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.

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

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

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

THIELER ER, HIMMELSTOSS EA, ZICHICHI JL, ERGUL A. 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 / An ArcGIS Extension for Calculating Shoreline Change. Open/File Report. US Geological Survey Report No. 2008/1278: <https://cmgds.marine.usgs.gov/publications/DSAS/of2008/1278/>

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.