

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

Material Suplementar Ambiente Marinho

Tema: Zooplâncton

RT-52/OUT 25

RSE2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2025

EQUIPE TÉCNICA

Luiz Fernando Loureiro Fernandes (Coordenador)

Bianca Salvador

Gabriel Harley Costa Santos

Gustavo Martins Rocha

Laura Rodrigues da Conceição

Priscila Teixeira-Amaral

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	4
2	METODOLOGIA	4
2.1	COLETA	5
2.1.1	Preparo pré-campo.....	5
2.1.2	Amostragem – Abundância, composição e biomassa	5
2.2	ANÁLISE	7
2.2.1	Procedimentos de preparo e manuseio de amostras em laboratório	7
2.2.2	Procedimentos de análise de contagem – Abundância e Composição	8
2.2.3	Procedimento para cálculo da densidade	9
2.2.4	Análise de dados e Estatística.....	9
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	11
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	11
3.1	ÍNDICES DE BIODIVERSIDADE	13
3.2	ÍNDICE DE PREVALÊNCIA DE INDICADORAS (IPI)	21
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	25
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	25
6	REFERÊNCIAS	26

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

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

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

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

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA/Fest-UFES submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia) e na Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024. Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest-UFES a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

2.1.1 Preparo pré-campo

Previamente à etapa de campo, foi feito o preparo de solução preservante a partir de formaldeído (CH_2O) 37% (considerado absoluto) e bórax (tetraborato de sódio decahidratado - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) para fixação e preservação das amostras de zooplâncton (USEPA, 2016). O procedimento foi realizado em laboratório equipado com capela, pois o formaldeído é volátil e nocivo à saúde. Foram utilizados luvas, óculos e máscara com filtro, seguindo as orientações contidas na Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) para formaldeído 37% P.A. e Tetraborato de Sódio P.A.

- Em um béquer foi adicionado aproximadamente 20 g de bórax em 1000 mL de formaldeído 37% P.A para formar a solução estoque;
- Utilizou-se um agitador magnético para acelerar a dissolução do bórax;
- Após dissolvido, a solução foi retornada para o frasco de formaldeído, tampada e registrada que a mesma estava tamponada, utilizando uma etiqueta adesiva.

Preparo dos frascos com o preservante:

- Foi separado um número de frascos suficiente para toda a campanha com um excedente de 20% (capacidade individual de 500 mL);
- Na capela de exaustão, o frasco foi preenchido com a solução estoque;
- O volume da solução estoque foi obtido a partir da diluição de 9 partes de água para 1 parte de formaldeído ($V=9:1$).

2.1.2 Amostragem – Abundância, composição e biomassa

A coleta do zooplâncton foi realizada no período noturno (entre 18 horas e 6 horas), por meio de arrastos verticais estratificados, com rede do tipo WP-2 com abertura de malha de 200 μm (HARRIS *et al.*, 2000).

Um fluxômetro mecânico foi acoplado na abertura da boca da rede na região central, para medir o fluxo de água que passa pela rede. Esses dados são secundários e para fins de registro apenas, não sendo utilizados no cálculo de volume de água filtrada. O fechamento da rede WP-2 na profundidade desejada foi feito através do mecanismo de fechamento fixado no cabo que sustenta a rede, o qual foi liberado no cabo pela equipe de coleta. A profundidade do ponto amostral foi informada pela equipe de bordo antes de iniciar a coleta utilizando o equipamento (sonda) disponível na embarcação para determinação da profundidade dos estratos (h).

Em profundidades superiores a 5 m e inferiores a 30 m foram feitos 2 arrastos:

- 1 arrasto do fundo até metade da coluna d'água;
- 1 arrasto da metade da coluna d'água até a superfície.

Em profundidades superiores a 30 m foram feitos 3 arrastos:

- 1 arrasto do fundo até 30 m;
- 1 arrasto de 30 a 15 m da coluna d'água até a superfície;
- 1 arrasto de 15 m até a superfície.

Durante a coleta, entre cada procedimento amostral, foi feita a verificação e limpeza da rede de arrasto a fim de conferir a integridade dos equipamentos e do sistema de fechamento para que pudesse ser realizado o próximo lançamento.

Para o preparo da rede WP-2, foi utilizado o procedimento a seguir: colocou-se o copo coletor, certificando de que todas as manilhas estavam fechadas e o sistema de fechamento da rede acoplado e travado. O fluxômetro foi preso no aro da rede (diâmetro = 60 cm; raio(r) = 30 cm) com abraçadeiras de forma a ficar localizado no centro da boca da rede.

Os dados da estação e o número inicial do fluxômetro foram preenchidos a lápis, assim como as demais informações relevantes (pontos de coleta, hora, data, profundidade, etc.), na planilha de custódia impressa em papel vegetal, para garantir que nenhuma informação anotada fosse perdida.

A rede, presa no cabo, foi colocada na água com auxílio de um guincho, sendo o primeiro estrato amostrado sempre o mais profundo. Os arrastos sempre foram iniciados 5 metros acima da profundidade local, de acordo com a medição da sonda e a metragem lançada de cabo, para evitar que a rede tocasse no fundo. Um metro antes da rede WP-2 atingir a profundidade desejada para finalizar o arrasto, o mensageiro foi lançado para fechamento da rede. Logo após recolher a rede ao deck, com o cuidado de posicionar o copo coletor em pé, anotou-se o número final do fluxômetro na planilha de custódia.

A rede foi, então, posicionada na vertical para lavagem, sempre jogando o jato de água do lado de fora da rede, para evitar contaminação da amostra. O copo coletor da rede foi desacoplado e amostra transferida para um frasco de polietileno de 500 mL contendo solução de formaldeído 4% tamponado, já com etiqueta padronizada contendo informações da amostra (código, ponto amostral, data, estrato, tipo de dado de bruto). Quando necessário, foi completado o volume do recipiente com água filtrada do local.

Após a operação de coleta, as amostras foram acondicionadas em caixas plásticas de transporte, em local protegido do sol, evitando a perda do formol por evaporação. Ao final de toda a etapa de amostragem, as amostras depositadas nas caixas plásticas de transporte foram enviadas pela equipe de logística por transporte terrestre para o LabZoo, para ser dado início à etapa de análises laboratoriais.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Procedimentos de preparo e manuseio de amostras em laboratório

As amostras recebidas no laboratório foram registradas na matriz de rastreabilidade de amostras, onde foram conferidas as quantidades e estado dos potes, que por sua vez foram higienizados na parte externa e posteriormente acondicionados em prateleiras dentro de armário fechado com sistema de exaustão interno, até sua análise.

Devido à toxicidade do formaldeído usado para preservação das amostras, este foi substituído temporariamente por água destilada durante a identificação e contagem dos organismos. A amostra pode permanecer nesta condição por poucos dias (2 dias em temperatura ambiente ou 4 dias sob refrigeração) (USEPA, 2016).

O método de substituição do formaldeído por água consiste em filtrar diretamente a amostra em uma peneira circular com base contendo malha de náilon, com abertura menor que 200 μm , de modo a impedir a passagem dos organismos. Para garantir a qualidade do preparo da amostra, procedeu-se da seguinte maneira:

- Dentro da capela de exaustão ligada, utilizando luva nitrílica, óculos de proteção, máscara com respirador, sapato fechado e jaleco, despejou-se a amostra na peneira com malha de náilon sobre um béquer, de forma que os organismos ficassem retidos na malha e a solução com formaldeído a 4% passasse para o béquer. Lavou-se a borda interna do frasco que continha a amostra com uma pisseta contendo solução de formaldeído a 4% para que todos os organismos fossem transferidos para a peneira, evitando o risco de sub quantificação e ressecamento dos organismos que possivelmente teriam ficado ali retidos;
- O formaldeído retirado da amostra foi descartado em bombona devidamente identificada para posterior recolhimento pela empresa coletora de resíduos.
- A peneira foi virada do lado avesso sobre um béquer de vidro graduado para transferência dos organismos. O procedimento foi realizado com cuidado para os organismos não caírem para fora do recipiente. Com auxílio de uma pisseta contendo água destilada, lavou-se a malha da peneira, de forma a transferir a totalidade dos organismos retidos na malha para o béquer para que pudessem ser analisados em microscópio estereoscópico;
- Após o fim da análise da amostra, reverteu-se o processo inicial onde a água foi retirada com a mesma peneira utilizada. A água ficou depositada em um béquer, a qual foi posteriormente descartada. Os organismos foram então transferidos da peneira para um vidro de boca larga devidamente etiquetado utilizando uma pisseta contendo solução de formaldeído 4% tamponado com tetraborato de sódio.

2.2.2 Procedimentos de análise de contagem – Abundância e Composição

Amostras com pequeno número de organismos (< 500 organismos) foram analisadas integralmente, enquanto as amostras que continham um número elevado de organismos foram subamostradas (BAIRD *et al.*, 2017).

Para garantir a qualidade do procedimento de contagem, este seguiu sempre a sequência abaixo descrita:

- O formaldeído foi retirado da amostra, transferindo-o para um béquer graduado com água (Item 2.2.1);
- A amostra contida no béquer graduado foi homogeneizada, com auxílio da Pipeta de Pasteur, em movimentos aleatórios, com cuidado para não danificar os organismos;
- Os organismos foram transferidos para o subamostrador de Folsom para homogeneizar e dividir a amostra. No subamostrador de Folsom foram feitos 40 movimentos semicirculares para completa homogeneização da amostra e posterior transferência do homogeneizado aos recipientes do equipamento. Cada recipiente conteve metade da amostra inserida no subamostrador. Este procedimento de fracionamento foi repetido até que se alcançasse uma quantidade satisfatória de organismos (aproximadamente 500 indivíduos) (BAIRD *et al.*, 2017). A fração final (1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, ...) foi anotada para o cálculo de densidade;
- Os organismos da subamostra obtida no subamostrador de Folsom foram transferidos para a peneira com malha de náilon;
- Com auxílio de uma pisseta, lavou-se com jatos de água destilada a malha da peneira, de forma a transferir os organismos retidos na malha para um béquer graduado;
- Os organismos do béquer foram transferidos para uma câmara de Bogorov, com auxílio de pipeta de Pasteur, para análise em microscópio estereoscópico. Este procedimento se repetiu até finalização da subamostra;
- Todos os organismos do zooplâncton contidos na subamostra (alíquota) foram identificados e contados com o auxílio de bibliografia especializada (BOLTOVSKOY, 1999; BOLTOVSKOY, 1981), e os resultados anotados na ficha de análise, incluindo a fração da amostra que foi analisada.

Alguns organismos do mesozooplâncton tiveram necessidade de dissecação em microscópio estereoscópico, possibilitando que partes do corpo fossem observadas em microscópio óptico sob maiores aumentos ($\geq 100\times$). Para isto, os organismos foram retirados da subamostra contida na câmara de Bogorov, com auxílio de uma pinça de ponta fina, e posicionados em uma gota de glicerina diluída com formalina 4% tamponada (proporção de 9 para 1 de formalina) em lâmina lisa ou escavada. A dissecação foi realizada utilizando agulha (Insect pins) de 0,15mm, sob observação em microscópio estereoscópico.

2.2.3 Procedimento para cálculo da densidade

Os dados obtidos foram expressos de forma quantitativa (estimativa de densidade), por meio do número de organismos por unidade de volume (ind.m^{-3}) (HARRIS *et al.*, 2000), e serviram para compor os dados brutos. Esta extrapolação foi feita com base no volume de água filtrada em campo para obtenção de cada amostra, o qual foi calculado pela seguinte fórmula:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Sendo que:

V = volume de água filtrado pela rede (m^3)

$$\pi = 3,14$$

r = raio da boca da rede utilizada para coleta

h = distância percorrida pela rede em arrasto vertical (m)

Com base no volume de água filtrada calculado, a densidade de organismos (ind.m^{-3}) foi então expressa segundo a fórmula a seguir:

$$N = (n_i/a)/V$$

Onde:

N = densidade da espécie no ambiente

n_i = número de indivíduos da espécie i na subamostra (ou na amostra, quando analisada na integralidade)

a = alíquota da amostra (fração correspondente)

V = volume de água filtrada pela rede (m^3)

2.2.4 Análise de dados e Estatística

A densidade de organismos obtida foi utilizada para o cálculo dos índices de biodiversidade pertinentes: Diversidade de Shannon (H') e Equabilidade de Pielou (J), selecionados a partir de embasamento bibliográfico, considerando a sua aplicação e eficácia em estudos de diagnóstico ambiental (BENEDETTI *et al.*, 2016; CAMPOS *et al.*, 2017; UTTAH *et al.*, 2013). Esses índices buscam avaliar o impacto direto na composição da comunidade zooplancônica, bem como mudanças na dominância de espécies. Apenas os taxa identificados a nível de espécie foram considerados no cálculo dos índices de biodiversidade.

Com base na abundância relativa das espécies, calculada a partir da abundância total de organismos identificados, foi também calculado o Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI), que expressa a dominância dos taxa resistentes frente às condições de maior ou menor concentração do Material Ligado ao Desastre (MLD). No presente relatório foram considerados os taxa *Paracalanus* spp. (juvenil),

Paracalanus cf. *parvus* e *Oikopleura* spp., que mostraram grande relevância ecológica nos diferentes setores e importância na estruturação da comunidade ao longo de todo monitoramento. O índice foi calculado com base nos dados de abundância, onde: $IPI = (AR \text{ *Paracalanus* spp. [juvenil]} - AR \text{ *Paracalanus* cf. *parvus*}) + AR \text{ *Oikopleura* spp.}$ Onde AR = Abundância Relativa Percentual. Desta forma, quanto maior o valor de IPI, maior o indicativo de impacto na comunidade, pois denota maior dominância de espécies resistentes ao impactante.

Com o objetivo de identificar variações temporais para os índices ecológicos durante o monitoramento, foram realizadas análises estatísticas em todos os setores entre os períodos seco e chuvoso, considerando todas as campanhas, bem como entre os anos dentro de cada um dos períodos sazonais. No setor Foz do rio Doce foi feita uma subsectorização de acordo com a localização dos pontos amostrais situados ao norte, sul e transecto central, objetivando identificar a variação espacial das respostas da comunidade em relação à vazão do rio e ao deslocamento do MLD.

O teste de variância ANOVA foi aplicado aos índices ecológicos a fim de detectar variabilidades espaciais (entre os setores) e temporais (entre os períodos e entre os anos dentro de cada setor) de acordo com a comparação entre as médias calculadas para cada variável (TURNER & THAYER, 2001). Onde foram encontradas diferenças significativas, foi aplicado também o teste Tukey a fim de localizar os momentos em que essas diferenças estavam concentradas (TUKEY, 1977). Para essas análises, a matriz de dados foi transformada através da raiz quarta com o objetivo de atender os pressupostos de normalidade e homogeneidade.

Os dados de composição e abundância zooplancônica do setor Foz do rio Doce também foram examinados através de análises multivariadas. As espécies e grupos taxonômicos que representaram ao menos 1% de abundância relativa neste setor foram selecionados para análise, transformados em raiz quadrada, e todos os procedimentos realizados com índice de dissimilaridade de Bray-Curtis. A dinâmica espaço-temporal da comunidade foi avaliada através da Análise de Coordenadas Principais (PCO), cujo procedimento de ordenação fornece uma projeção direta dos pontos no espaço definido pelas dissimilaridades entre amostras (ANDERSON *et al.*, 2008).

As relações entre a comunidade zooplancônica e as variáveis ambientais obtidas foram investigadas através da Análise Canônica de Coordenadas Principais (CAP). Este procedimento combina duas técnicas multivariadas (PCO e análise canônica) e identifica os eixos da análise que apresentam correlações com o outro conjunto de variáveis (ANDERSON *et al.*, 2008). A CAP foi utilizada para avaliar as relações da comunidade zooplancônica no setor Foz com as variáveis ambientais (MPS: material particulado em suspensão, MO%: percentual de matéria orgânica particulada, Clorofila-a, fluxo médio de vazão do rio Doce para os 15 dias anteriores à coleta e altura média de ondas para 3 e 15 dias anteriores à coleta) e os valores de concentração de metais totais na água ($\mu\text{g/L}$). Para melhor visualização dessas relações, os resultados da CAP foram representados em imagens separadas para concentração de metais e o restante das variáveis ambientais. Os taxa e os índices ecológicos (diversidade de espécies e IPI) que mais contribuíram para caracterização das assembleias foram identificados através de correlação (Spearman) entre os vetores e os eixos da análise.

Os dados de vazão do rio Doce foram obtidos do tema Bacia Integração do PMBA/Fest-UFES. Para as análises, foram utilizados os valores médios referentes aos períodos de 3 e 15 dias anteriores à coleta, levando em consideração o tempo de resposta dos organismos zooplancônicos às alterações ocorridas no ambiente (HOOVER *et al.*, 2006; ROCHA *et al.*, 2022).

As análises estatísticas foram realizadas através dos softwares PRIMERv6 com o pacote complementar PERMANOVA+ adicionado (CLARKE & GORLEY, 2006; ANDERSON *et al.*, 2008) e STATISTICA 12 (HILL & LEWICKI, 2007).

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Com o objetivo de realizar uma análise temporal mais robusta, a partir do RA2022 o fator Ano foi incluído nos testes estatísticos e nas análises descritivas dos índices ecológicos aplicados à comunidade zooplancônica. Além das análises comparativas entre os períodos seco e chuvoso, que já eram realizadas, a inclusão desse fator permite observar tendências de aumento ou diminuição dos índices frente aos impactos do MLD no decorrer do tempo do monitoramento. Desta forma, foi possível otimizar as análises referentes à comunidade zooplancônica sem impacto financeiro.

Buscando atender às demandas do novo formato dos Relatórios Anuais e consolidar os resultados expressos pelas espécies indicadoras ao longo do monitoramento, foi realizada uma adaptação na apresentação de dois indicadores anteriormente utilizados: a dinâmica populacional entre juvenis e adultos de *Paracalanus cf. parvus* e a abundância relativa de *Oikopleura*. Ambos agora integram o Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI), detalhado nas seções anteriores, visando aprimorar e categorizar os impactos através das respostas das espécies consideradas tolerantes ou sensíveis ao aporte de material do rio Doce.

Tendo como base a observação dos efeitos dos impactos na comunidade zooplancônica através da heterogeneidade espacial da malha amostral, a análise canônica (CAP) passou a diferenciar e incluir como fator a distância dos pontos amostrais em relação à costa, sendo estes agora agrupados em pontos internos (até a isóbata de 20 metros) e pontos externos (além da isóbata de 20 metros).

Por fim, outra adaptação importante realizada na metodologia de análise diz respeito aos taxa inclusos no cálculo dos índices de biodiversidade (J e H', anteriormente citados). A partir do Novo Ciclo, apenas indivíduos identificados a nível de espécie estão sendo considerados no cálculo da diversidade e da equabilidade. Essa alteração se fez necessária para atender os pressupostos da aplicação desses índices.

3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest-UFES e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental. Vale ressaltar que os indicadores aqui apresentados

têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

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

3.1 ÍNDICES DE BIODIVERSIDADE

Figura 1: Valores do Índice de diversidade de Shannon da comunidade zooplancônica amostrada nos setores (a) APA, (b) Foz e (c) Norte para os períodos chuvoso e seco entre as campanhas de outubro/2018 e janeiro/2025. Ano 1: entre outubro de 2018 e setembro de 2019, Ano 2: entre outubro de 2019 e setembro de 2020, Ano 3: entre outubro de 2020 e setembro de 2021, Ano 4: entre outubro de 2021 e setembro de 2022, Ano 5: entre outubro de 2022 e setembro de 2023, Ano 6: entre outubro de 2023 e setembro de 2024, Ano 7: entre outubro de 2024 e janeiro de 2025. (d) Variação temporal (por campanha) das médias do Índice de Shannon (\pm EP) nos setores APA, Foz e Norte ao longo do período de estudo. (e) Variação temporal (por campanha) das médias do Índice de Shannon (\pm EP) nos subsetores norte, central e sul do setor Foz, ao longo do período de estudo. (f) Valores médios do fluxo de vazão do rio Doce durante os 15 dias anteriores às campanhas amostrais ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$).
NA: período não amostrado devido às restrições durante a pandemia de COVID-19

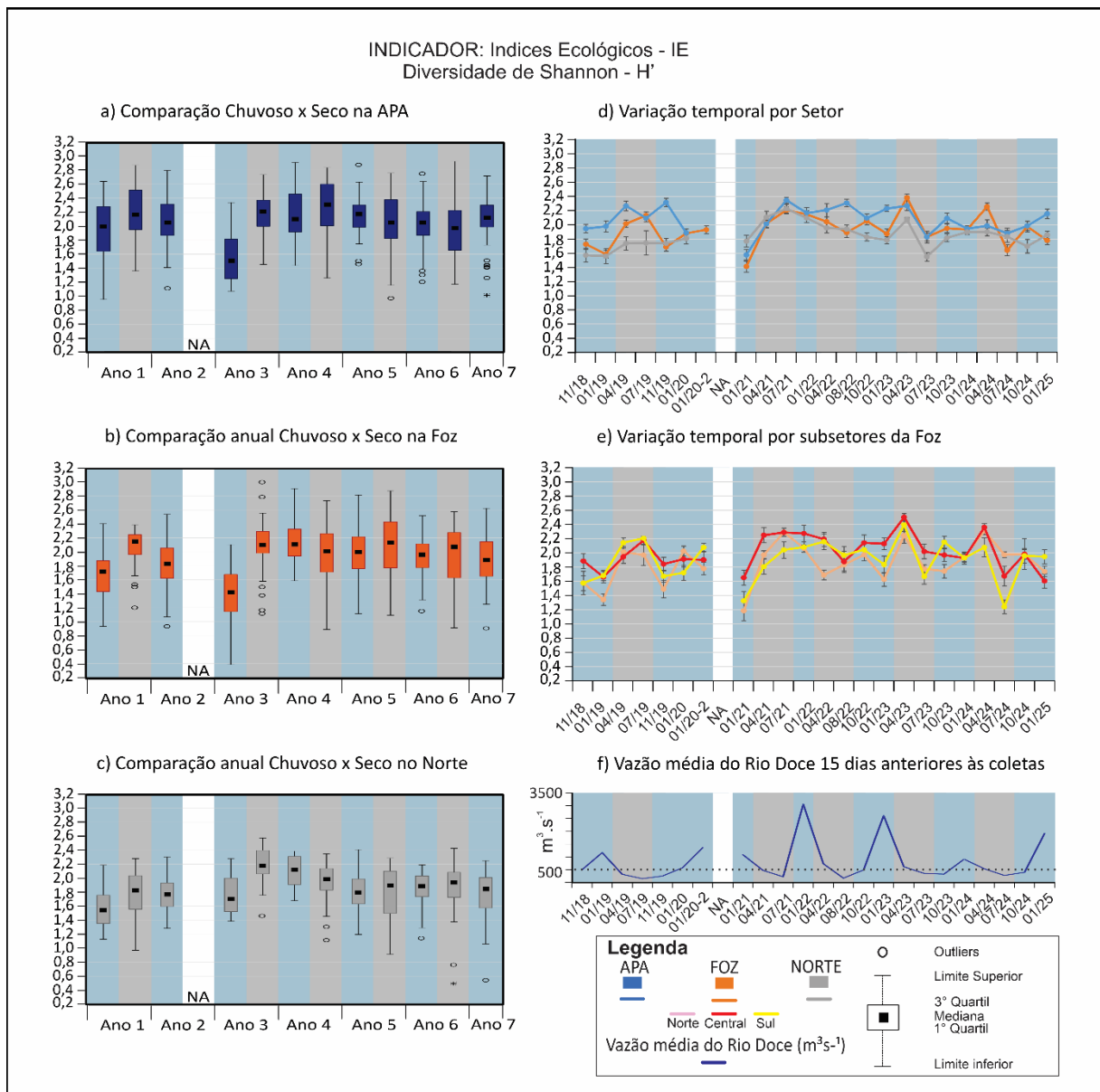


Figura 2: Valores do Índice de equabilidade de Pielou da comunidade zooplancônica amostrada nos setores (a) APA, (b) Foz e (c) Norte para os períodos chuvoso e seco entre as campanhas de outubro/2018 e janeiro/2025. Ano 1: entre outubro de 2018 e setembro de 2019, Ano 2: entre outubro de 2019 e setembro de 2020, Ano 3: entre outubro de 2020 e setembro de 2021, Ano 4: entre outubro de 2021 e setembro de 2022, Ano 5: entre outubro de 2022 e setembro de 2023, Ano 6: entre outubro de 2023 e setembro de 2024, Ano 7: entre outubro de 2024 e janeiro de 2025. (d) Variação temporal (por campanha) das médias do Índice de equabilidade de Pielou (\pm EP) nos setores APA, Foz e Norte ao longo do período de estudo. (e) Variação temporal (por campanha) das médias do Índice equabilidade de Pielou (\pm EP) nos subsetores norte, central e sul do setor Foz, ao longo do período de estudo. (f) Valores médios do fluxo de vazão do rio Doce durante os 15 dias anteriores às campanhas amostrais ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

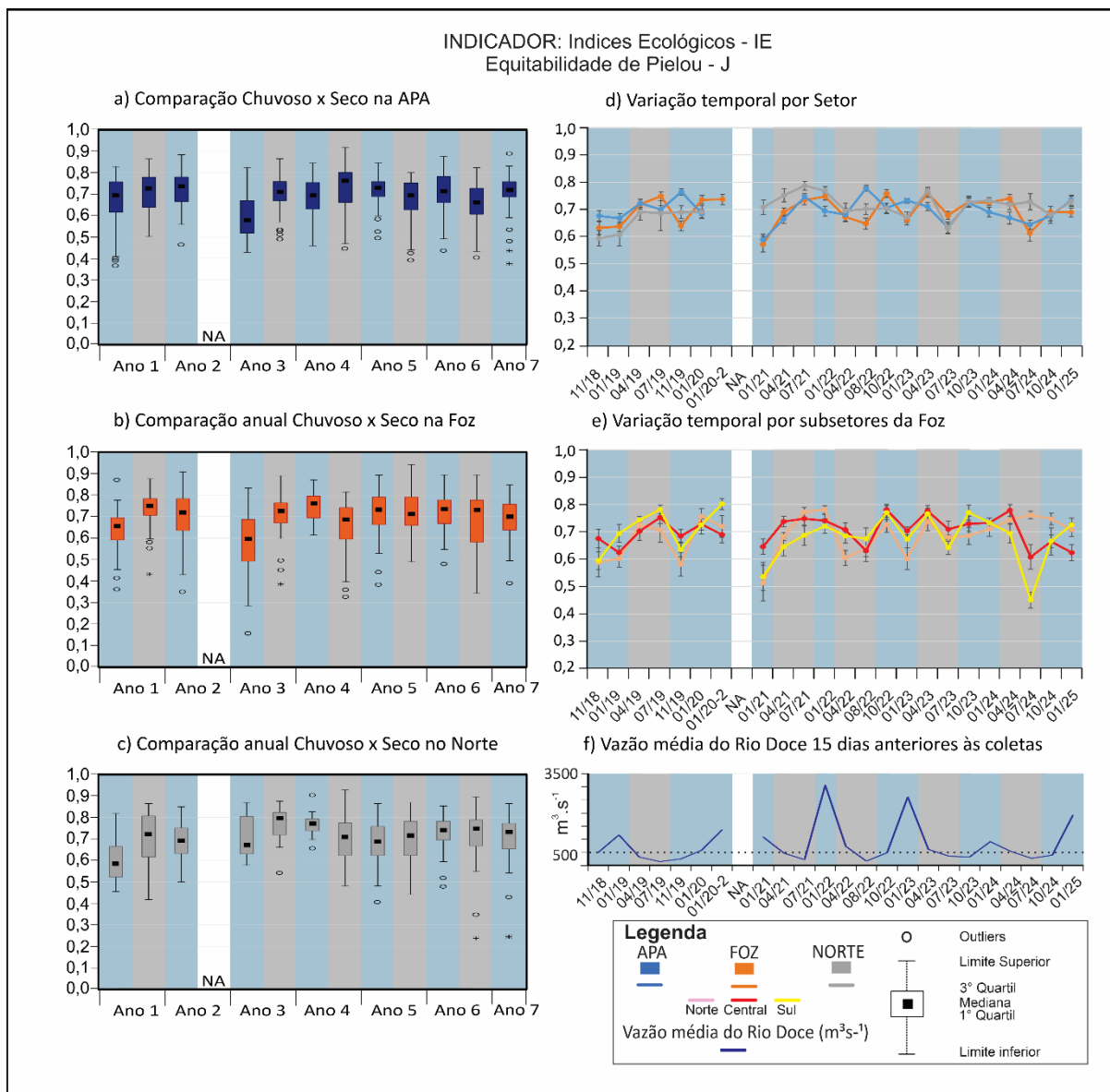


Tabela 1: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade dentro do setor APA considerando o fator Período (Seco/Chuvoso), entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2025 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA							
			Degr. of	SS	MS	F	p
APA	J	Intercept	1	508,09	508,09	419472,54	0,000000
		Período	1	0,00	0,00	0,17	0,680052
		Error	615	0,74	0,00		
	H'	Intercept	1	875,62	875,62	242910,50	0,000000
		Período	1	0,03	0,03	8,96	0,002870
		Error	615	2,22	0,00		
	Densidade	Intercept	1	25158,51	25158,51	12557,34	0,000000
		Período	1	11,10	11,10	5,54	0,018879
		Error	615	1232,15	2,00		

Tabela 2: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade dentro do setor Norte considerando o fator Período (Seco/Chuvoso), entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2025 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA							
			Degr. of	SS	MS	F	
NORTE	J	Intercept		325,08	325,08	228685,10	0,000000
		Período	1,00	0,00	0,00	1,14	0,286001
		Error	388,00	0,55	0,00		
	H'	Intercept	1,00	524,92	524,92	163016,15	0,000000
		Período	1,00	0,02	0,02	5,29	0,021957
		Error	388,00	1,25	0,00		
	Densidade	Intercept	1,00	15614,90	15614,90	8444,56	0,000000
		Período	1,00	21,66	21,66	11,71	0,000687
		Error	388,00	717,45	1,85		

Tabela 3: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade dentro do setor Foz e seus respectivos subsetores (Norte, Central e Sul) considerando o fator Período (Seco/Chuvoso), entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2025 no âmbito do PMBA//Fest-UFES. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA							
			Degr. of	SS	MS	F	p
FOZ	J	Intercept	1,00	543,40	543,40	338790,94	0,000000
		Período	1,00	0,00	0,00	0,58	0,444701
		Error	663,00	1,06	0,00		
	H'	Intercept	1,00	906,21	906,21	223875,14	0,000000
		Período	1,00	0,14	0,14	34,25	0,000000
		Error	663,00	2,68	0,00		
	Densidade	Intercept	1,00	28342,40	28342,40	13264,94	0,000000
		Período	1,00	17,29	17,29	8,09	0,004578
		Error	663,00	1416,59	2,14		
FOZ NORTE	J	Intercept	1,00	167,65	167,65	97876,90	0,000000
		Período	1,00	0,01	0,01	3,94	0,048357
		Error	203,00	0,35	0,00		
	H'	Intercept	1,00	276,11	276,11	77386,16	0,000000
		Período	1,00	0,09	0,09	26,49	0,000001
		Error	203,00	0,72	0,00		
	Densidade	Intercept	1,00	9122,45	9122,45	4270,04	0,000000
		Período	1,00	23,60	23,60	11,05	0,001053
		Error	203,00	433,69	2,14		
FOZ CENTRAL	J	Intercept	1,00	203,16	203,16	168553,51	0,000000
		Período	1,00	0,00	0,00	1,79	0,181896
		Error	244,00	0,29	0,00		
	H'	Intercept	1,00	342,89	342,89	92429,37	0,000000
		período	1,00	0,06	0,06	16,63	0,000062
		Error	244,00	0,91	0,00		
	Densidade	Intercept	1,00	10007,49	10007,49	4487,02	0,000000
		período	1,00	24,00	24,00	10,76	0,001189
		Error	244,00	544,20	2,23		
FOZ SUL	J	Intercept	1,00	172,39	172,39	91168,46	0,000000
		Período	1,00	0,01	0,01	3,18	0,075777
		Error	212,00	0,40	0,00		
	H'	Intercept	1,00	286,91	286,91	63001,62	0,000000
		Período	1,00	0,01	0,01	1,70	0,193189
		Error	212,00	0,97	0,00		
	Densidade	Intercept	1,00	9183,99	9183,99	4996,96	0,000000
		Período	1,00	7,18	7,18	3,91	0,049325
		Error	212,00	389,64	1,84		

Tabela 4: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade Total dentro do setor APA considerando o fator Período-Ano (Seco/Chuvoso), entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2025 no âmbito do PMBA/Fest-UFES.

Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA							
			Degr. of	SS	MS	F	p
APA	J	Intercept	1	439,86	439,86	396284,33	0,000000
		Ano-Período	11	0,07	0,01	6,03	0,000000
		Error	605	0,67	0,00		
	H'	Intercept	1	755,17	755,17	240342,01	0,000000
		Ano-Período	11	0,35	0,03	10,08	0,000000
		Error	605	1,90	0,00		
	Densidade	Intercept	1	21510,50	21510,50	11004,13	0,000000
		Ano-Período	11	60,62	5,51	2,82	0,001339
		Error	605	1182,63	1,95		

Tabela 5: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade dentro do setor Norte, considerando o fator Período-Ano (Seco/Chuvoso), entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2025 no âmbito do PMBA/Fest-UFES.

Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA							
			Degr. of	SS	MS	F	p
NORTE	J	Intercept	1	256,12	256,12	192568,38	0,000000
		Ano-Período	11	0,05	0,00	3,45	0,000137
		Error	378	0,50	0,00		
	H'	Intercept	1	413,58	413,58	141073,71	0,000000
		Ano-Período	11	0,16	0,01	4,91	0,000000
		Error	378	1,11	0,00		
	Densidade	Intercept	1	12112,97	12112,97	7186,77	0,000000
		Ano-Período	11	102,01	9,27	5,50	0,000000
		Error	378	637,10	1,69		

Tabela 6: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade dentro do setor Foz e seus respectivos subsetores (Norte, Central e Sul), considerando o fator Período-Ano (Seco/Chuvoso), entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2025 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA							
			Degr. of	SS	MS	F	p
FOZ	J	Intercept	1	499,34	499,34	352066,83	0,000000
		Ano-Período	11	0,14	0,01	8,86	0,000000
		Error	653	0,93	0,00		
	H'	Intercept	1	829,68	829,68	236359,82	0,000000
		Ano-Período	11	0,53	0,05	13,73	0,000000
		Error	653	2,29	0,00		
	Densidade	Intercept	1	26255,79	26255,79	14176,46	0,000000
		Ano-Período	11	224,49	20,41	11,02	0,000000
		Error	653	1209,40	1,85		
FOZ NORTE	J	Intercept	1	147,71	147,71	110647,11	0,000000
		Ano-Período	11	0,10	0,01	6,59	0,000000
		Error	193	0,26	0,00		
	H'	Intercept	1	241,48	241,48	92556,41	0,000000
		Ano-Período	11	0,32	0,03	10,99	0,000000
		Error	193	0,50	0,00		
	Densidade	Intercept	1	8084,19	8084,19	4334,14	0,000000
		Ano-Período	11	97,30	8,85	4,74	0,000002
		Error	193	359,99	1,87		
FOZ CENTRAL	J	Intercept	1	187,68	187,68	170840,29	0,000000
		Ano-Período	11	0,04	0,00	3,24	0,000386
		Error	234	0,26	0,00		
	H'	Intercept	1	316,09	316,09	95266,02	0,000000
		Ano-Período	11	0,19	0,02	5,22	0,000000
		Error	234	0,78	0,00		
	Densidade	Intercept	1	9153,90	9153,90	5027,82	0,000000
		Ano-Período	11	142,16	12,92	7,10	0,000000
		Error	234	426,03	1,82		
FOZ SUL	J	Intercept	1	157,35	157,35	105671,56	0,000000
		Ano-Período	11	0,11	0,01	6,48	0,000000
		Error	202	0,30	0,00		
	H'	Intercept	1	261,08	261,08	72551,67	0,000000
		Ano-Período	11	0,25	0,02	6,22	0,000000
		Error	202	0,73	0,00		
	Densidade	Intercept	1	8666,94	8666,94	5513,89	0,000000
		Ano-Período	11	79,31	7,21	4,59	0,000003
		Error	202	317,51	1,57		

Os índices de biodiversidade são excelentes indicadores da alta variabilidade da comunidade zooplactônica na malha amostral compreendida pelo PMBA/Fest-UFES, com respostas distintas dos setores frente às variações ambientais encontradas na Foz do rio Doce e suas adjacências. A diversidade de Shannon-Wiener (H'), conforme reportado nos relatórios anteriores, apresentou variações significativas entre os períodos analisados (seco e chuvoso) ao longo do monitoramento, exceto no subsetor Foz Sul, onde não houve diferença significativa ($p > 0,05$). A Equitabilidade de Pielou (J), por sua vez, permanece não apresentando diferenças estatisticamente significativas entre os períodos secos e chuvosos, de acordo com as análises de variância (Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3), com exceção do subsetor Foz Norte.

Os valores de diversidade de Shannon (H') foram significativamente menores nas campanhas do período chuvoso (Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3, Figura 1) em todos os três setores. É possível observar, entre os Anos 1 e 3, a alta variabilidade apresentada pelos valores de H' , que sofreram influência direta das variações no fluxo do rio Doce.

Em geral, o setor APA apresenta índices mais elevados quando comparados visualmente com os demais setores. Os valores apresentaram bastante variação entre os períodos secos e chuvosos até o Ano 3, seguido por um padrão de aparente estabilização da diversidade até a campanha de julho/2023, quando, assim como nos demais setores, foi registrada queda dos valores médios sem aparente relação com o fluxo do rio Doce e possivelmente relacionada ao grupo de variáveis que tem sua influência aumentada quando a vazão diminui, como ondas e ventos. Com a inclusão das campanhas do período chuvoso do Ano 7, observa-se novamente pouca distinção na diversidade entre os períodos secos e chuvosos, sendo, porém, possível observar na variação temporal que os valores de H' têm sido ligeiramente superiores nas campanhas de período chuvoso (Figura 1 D).

O setor Foz, contudo, respondeu de forma distinta apresentando bastante variabilidade ao longo da série temporal (Figura 1 B e D). Merece destaque a variação interna de períodos secos subsequentes (abril x julho) onde, em geral, os meses de abril apresentam índices de diversidade mais elevados seguidos por queda expressiva na diversidade de Shannon durante os meses de julho (vide períodos secos de 2023 e 2024; Figura 1 D). Essa variação sugere que outras variáveis além do fluxo de vazão do rio Doce tiveram influência aumentada na resposta do zooplâncton. Esse fenômeno pode ser explicado por fatores como maior energia de ondas e variação da intensidade da ressurgência, ressuspendendo o MLD sedimentado. De acordo com Conceição *et al.* (2021), mesmo em condições de baixa vazão do rio, eventos de ressurgência completa podem contribuir diretamente para o aumento dos índices ecológicos na região da Foz. Já em casos de ressurgência incompleta, com menor intensidade, os índices diminuem. Todavia, estudos futuros devem ter como foco investigar esta questão

Os menores valores de H' registrados foram encontrados no período chuvoso do Ano 3, na Foz do rio Doce, e também na campanha de Julho/24 (seco Ano 6) nos subsetores central e sul (Figura 1 B e E). Valores de H' baixos em períodos secos demonstram a influência de outros fatores, além da vazão, influenciando a composição da comunidade, como energia de ondas e ressurgência (FEST, 2024;

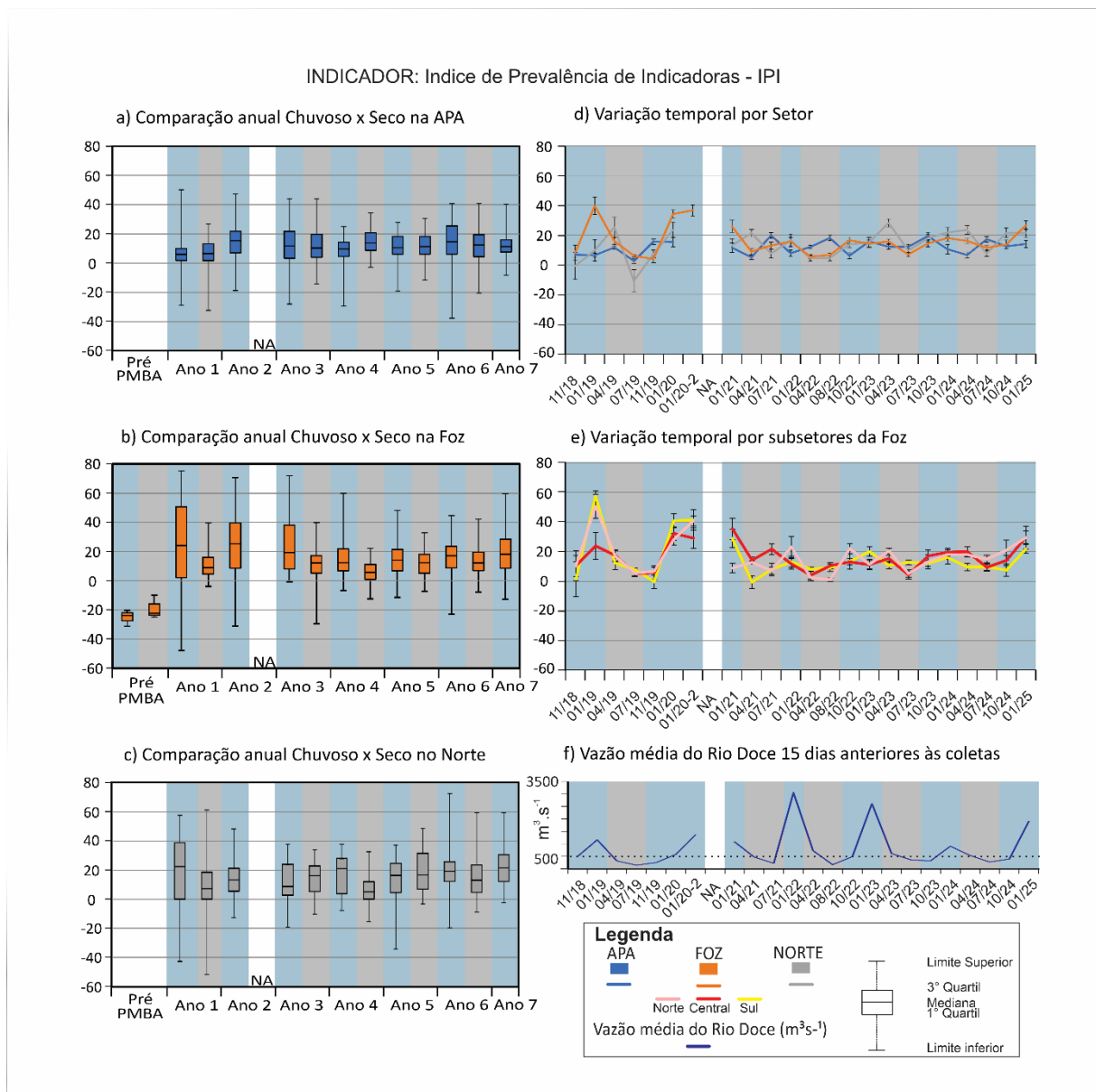
CONCEIÇÃO *et al.*, 2021), bem como biodisponibilização de metais (RODGHER & SPÍNDOLA, 2008). Com a adição das campanhas do período chuvoso do Ano 7 os valores de H' apresentaram aumento gradual.

Em relação ao setor Norte, observa-se uma queda gradativa nos índices entre o período seco do Ano 3 (Julho/21) e chuvoso do Ano 5 (Janeiro/23) com aparente estabilização até o momento, padrão este que vem sendo mantido no setor APA (Figura 1 A, C e D).

Para a equitabilidade de Pielou (J), o subsetor Foz Norte segue como o único a apresentar diferenças estatísticas entre os períodos secos e chuvosos quando levamos em conta todos os anos de monitoramento (Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3, Figura 2). Todavia, assim como a diversidade de Shannon, é observada maior variabilidade entre os períodos nos três primeiros anos de monitoramento, principalmente no setor Foz, que registrou o valor mínimo para a equitabilidade no período chuvoso do Ano 3 (Figura 2 B e E). A partir do Ano 4, principalmente no setor Norte, é também observada diminuição da variabilidade sazonal (Figura 2 C), padrão que se mantém até a inclusão das campanhas do Ano 7. No setor APA, observa-se a partir do Ano 5 que os valores médios da equitabilidade mostram-se ligeiramente maiores nas campanhas do período chuvoso em relação ao período seco, o que pode sugerir neste setor uma maior influência das variáveis relacionadas à ressuspensão do MLD em comparação às diretamente afetadas pela vazão do rio Doce, como vinha sendo o padrão. No setor Foz, a tendência de diminuição da variabilidade sazonal também é evidente (Figura 2 D e E), porém, deve ser observada com cautela já que nas análises de seus subsetores ainda é observada alta variabilidade, inclusive com valores mínimos demonstrados em campanhas mais recentes (Julho/2024). Esse cenário está relacionado a eventos que carecem de investigação mais profunda, mas que são também reflexos da variação da concentração de metais na coluna d'água e suas condicionantes (ROCHA *et al.*, 2022). De forma geral, os valores de J encontrados continuam sendo considerados baixos, refletindo uma comunidade com níveis de desequilíbrio e dominada por um baixo número de espécies zooplanctônicas.

3.2 ÍNDICE DE PREVALÊNCIA DE INDICADORAS (IPI)

Figura 3: Valores do Índice de IPI nos setores (a) APA, (b) Foz e (c) Norte para os períodos chuvoso e seco entre as campanhas de outubro/2018 e janeiro/2025. Ano 1: entre outubro de 2018 e setembro de 2019, Ano 2: entre outubro de 2019 e setembro de 2020, Ano 3: entre outubro de 2020 e setembro de 2021, Ano 4: entre outubro de 2021 e setembro de 2022, Ano 5: entre outubro de 2022 e setembro de 2023, Ano 6: entre outubro de 2023 e setembro de 2024, Ano 7: entre outubro de 2024 e janeiro de 2025. (d) Variação temporal (por campanha) das médias do IPI (\pm EP) nos setores APA, Foz e Norte ao longo do período de estudo. (e) Variação temporal (por campanha) das médias do IPI (\pm EP) nos subsetores norte, central e sul do setor Foz, ao longo do período de estudo. (f) Valores médios do fluxo de vazão do rio Doce durante os 15 dias anteriores às campanhas amostrais ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

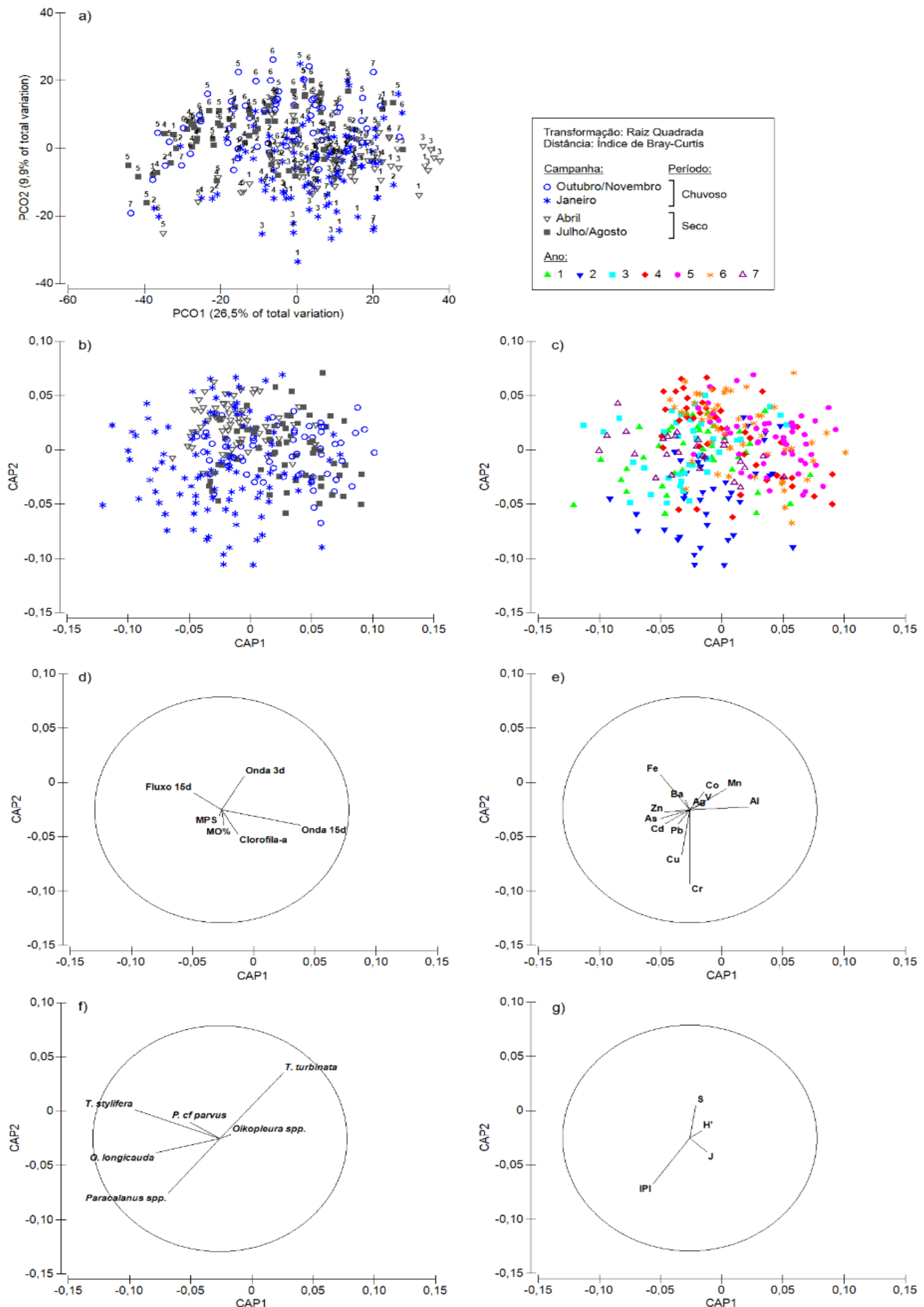


O Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI) foi desenvolvido ao longo do PMBA/Fest-UFES e vem se consolidando como indicador de impacto ambiental associado ao efeito de poluição por metais na coluna d'água (FERNANDES *et al.*, 2020; ROCHA *et al.*, 2022; ROCHA *et al.*, 2025). Quanto maior o seu valor, maior é a dominância de espécies consideradas indicadoras de tal impacto ambiental na comunidade zooplanctônica, como juvenis de *Paracalanus* spp. e *Oikopleura* spp. *et al.*

Ao longo dos sete anos de monitoramento, os valores do IPI indicam um padrão espaço-temporal claramente identificável na Figura 3. A partir dela, nota-se que os maiores valores do indicador estão concentrados nos setores Norte e Foz, durante o primeiro ano e nos períodos de alta vazão do rio Doce nos três primeiros anos de monitoramento, respectivamente. Durante este período é possível observar como a diferença entre os valores de alta e baixa vazão se tornam progressivamente menos discrepantes nestes setores a partir do Ano 2 no setor Norte (Figura 3 C) e a partir do Ano 4 no setor Foz (Figura 3 B), assim como são desde o início do monitoramento no setor APA (Figura 3 A).

Ainda em análise temporal, o projeto de Caracterização Ambiental da Bacia do Espírito Santo e porção norte da Bacia de Campos (AMBES) (PETROBRAS, 2015), que nos fornece um padrão pré-rompimento para o setor Foz, indica que, mesmo após o Ano 4, os valores do IPI ainda estão distantes do observado antes do rompimento da barragem, indicando que o ambiente ainda não se recuperou do impacto ambiental causado pelo MLD depositado na calha do rio Doce.

Figura 4: Análises multivariadas dos dados zooplancônicos obtidos pelo PMBA/Fest-UFES entre outubro/2018 e janeiro/2025 no setor Foz. **(a)** Análise de Coordenadas Principais (PCO) dos pontos internos (isóbatas < 20 m) agrupados de acordo com o mês de amostragem (o número ao lado de cada símbolo indica o ano de monitoramento.; Análise Canônica de Coordenadas Principais (CAP) da comunidade zooplancônica (pontos internos): **(b)** campanhas agrupadas de acordo com o mês de amostragem; **(c)** campanhas agrupadas de acordo com o ano de monitoramento; **(d)** vetores de correlação das variáveis ambientais (MO%: percentual de matéria orgânica particulada; MPS: material particulado em suspensão; clorofila-a, valores médios de vazão e altura de ondas para 3 e 15 dias anteriores às coletas); **(e)** vetores de correlação da concentração de metais totais na água ($\mu\text{g/L}$); **(f)** vetores de correlação de espécies representativas da comunidade; **(g)** vetores de correlação dos índices ecológicos (H': Índice de Shannon; J: Índice de Pielou; S: número de espécies; IPI: Índice de Prevalência de Indicadoras). Os dados de abundância foram transformados em raiz quadrada e a distância calculada através do Índice de Bray-Curtis.



A comunidade zooplancônica amostrada no setor Foz durante o período de execução do PMBA/Fest-UFES vem apresentando distribuição espaço-temporal associada principalmente à localização dos pontos amostrais (internos e externos) e aos meses de realização das coletas (outubro/novembro, janeiro, abril e julho/agosto). Nos pontos internos (isóbatas inferiores à 20 m), a comunidade é diretamente afetada pelo MLD devido à influência do fluxo de vazão do rio Doce, ao passo que em maiores profundidades os organismos estão frequentemente sujeitos a ação de diferentes forçantes oceânicas. No sentido de reduzir o efeito da variabilidade espacial, as análises multivariadas foram realizadas separadamente entre essas regiões e a abordagem foi concentrada nos dados coletados nos pontos internos.

Mesmo com a inclusão dos dados referentes ao período chuvoso do Ano 7, a distribuição temporal das campanhas amostrais não apresentou distinção entre períodos de acordo com o regime de precipitação (seco/chuvoso; Figura 4 A). Como foi abordado no relatório anterior (FEST, 2024), os agrupamentos identificados refletem as diferentes condições meteoceanográficas de cada campanha e o tempo de resposta dos organismos às alterações ambientais. Desta forma, a comunidade amostrada nos meses de janeiro (período chuvoso) apresenta maior similaridade com as amostras de abril (início do período seco), ao passo que as campanhas realizadas em outubro/novembro (início do período chuvoso) são agrupadas próximas às de julho/agosto (período seco).

Como vem sendo observado ao longo monitoramento, a distribuição temporal dos organismos responde principalmente a variação sazonal das duas maiores forçantes ambientais atuando na região: o fluxo vazão do rio Doce e a altura significativa de ondas. Apesar da dispersão entre pontos, é interessante observar que as amostras referentes ao Ano 7 foram distribuídas próximo às campanhas dos Anos 1-3. De acordo com a análise canônica (CAP), as comunidades amostradas em julho/agosto e outubro/novembro foram associadas à maior ação de ondas (especialmente entre os Anos 4-6), ao passo que as amostras de janeiro e abril são caracterizadas pelo elevado aporte fluvial (Figura 4 B, C e D). Com relação à concentração de metais totais na água, as maiores correlações foram observadas para os elementos Cr, Al, Cu, Fe, Mn e As (Figura 4 E). Os resultados da análise mostraram que os valores de Cr, Cu, Fe, As e Cd ($r > 0,2$) foram positivamente associados às comunidades de janeiro, especialmente entre os Anos 1-3 e 7 (Figura 4 B, C e E). Em termos de composição taxonômica, essas amostras foram caracterizadas pelas maiores abundâncias relativas de *Paracalanus* spp. (juvenis), *Oikopleura longicauda*, *Temora stylifera* e *Paracalanus cf parvus* (adultos), acarretando também em maiores valores de IPI (Figura 4 F e G). O agrupamento referente às campanhas de abril apresentou maiores concentrações de Fe, Mn e Co, ao passo que as amostras de outubro/novembro e julho/agosto foram principalmente associadas aos maiores valores de Mn e Al. Essas campanhas também foram caracterizadas por maiores valores de diversidade zooplancônica (S, H' e J) em relação às comunidades amostradas em janeiro (Figura 4 B e G).

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

Com o início do sétimo ano de monitoramento do zooplâncton na região marinha adjacente à foz do rio Doce, alguns padrões parecem cada vez mais consolidados. Os três índices sinalizados como representativos dos padrões da comunidade apontam para o mesmo padrão geral, tanto temporal como espacial. Os três primeiros anos de monitoramento tiveram os sinais mais claros de impacto na região, com a comunidade zooplanctônica muito fragilizada nos períodos de alta vazão do rio Doce, seguido de melhora intermitente e relativa nos períodos de baixa vazão.

A partir do terceiro ano, a diferença entre os valores dos indicadores registrados entre os períodos de alta e baixa vazão se reduz, indicando que a vazão do rio Doce passa a se tornar relativamente menos impactante para a comunidade zooplanctônica, que passa a mostrar sinais de influência de outras forçantes ambientais de forma mais intensa. A região marinha monitorada é oceanograficamente muito dinâmica, sendo influenciada, além do MLD do rio Doce, por inversão de ventos, fenômenos intermitentes de ressurgência, influência de três massas d'água distintas (Água Tropical, Água Costeira e Água Central do Atlântico Sul), ação de ondas com variável grau de intensidade, que podem ressuspender o material depositado no fundo (DANG *et al.*, 2020; BALEANI *et al.*, 2021; BOURRIN *et al.*, 2021), entre outros, o que torna o monitoramento ambiental desafiador. Porém um padrão que segue sendo evidenciado pela análise multivariada é a importância do efeito da concentração de metais na água, que tem como principal fonte na região o material aportado pelo rio Doce. Isso se torna mais evidente quando focamos as análises nos pontos amostrais mais próximos da calha do rio Doce, como são aqueles localizados até a isóbata de 20 metros.

Desta forma, a análise multivariada aponta para uma correlação direta entre os metais e a comunidade, principalmente quando representada pelos seus principais bioindicadores como os juvenis de *Paracalanus* spp. e *Oikopleura longicauda*, como foi o caso das campanhas de Janeiro dos primeiros três anos de monitoramento, quando os metais Cr, Cu, Cd e As, em geral mais concentrados, se tornam mais tóxicos e deletérios para a comunidade.

Por fim, os dados de IPI, que nos permitem comparação temporal com o período anterior ao rompimento da barragem de Fundão, evidencia que a aparente estabilização da comunidade zooplanctônica, que ainda carece de ser confirmada nos anos subsequentes, ainda está muito distante do padrão de base pré-rompimento, indicando a necessidade de medidas mais diretas para a sua completa recuperação.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos pelo Tema.

6 REFERÊNCIAS

- Anderson, M. J.; Gorley, R. N.; Clarke, K. R., 2008. PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods. Plymouth: Primer-E Ltd.
- Baird, R.B.; Eaton, A.D.; Rice, E.W. (Eds.) 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington DC: APHA Press.
- Baleani, C. A., Manstretta, G. M., Menendez, M. C., Vitale, A. J., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E., 2021. Influence of storm events on surf zone zooplankton in a Southwestern Atlantic sandy beach: A preliminary methodology using high-frequency physical data. *Journal of Marine Systems*, 220, 103560.
- Benedetti, F.; Gasparini, S.; Ayata, D., 2016. Identifying copepod functional groups from species functional traits. *Journal of Plankton Research* 38: 159-166.
- Boltovskoy, D. 1981. Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino.
- Boltovskoy, D. 1999 (Ed.). South Atlantic Zooplankton. Backhuys Publishers, Leiden.
- Bourrin, F., Uusöue, M., Artigas, M. C., Sánchez-Vidal, A., Aubert, D., Menniti, C., ... & Portmán MIDAS cruise shipboard party., 2021. Release of particles and metals into seawater following sediment resuspension of a coastal mine tailings disposal off Portmán Bay, Southern Spain. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 47973-47990.
- Campos, C.C.; Garcia, T.M.; Neumann-Leitão, S.; Soares, M.O., 2017. Ecological indicators and functional groups of copepod assemblages. *Ecological Indicators*, 83, 416-426.
- Clarke, K.R.; Gorley, R.N., 2006. PRIMER v6: User Manual/Tutorial. Plymouth: PRIMER-E.
- Conceição, L.R., Demoner, L.E., Pereira, J.B., Perassoli, F., Ghisolfi, R.D., Bastos, A.C., *et al.*, 2021. Copepod community structure after a mining dam disaster in the Southwestern Atlantic Ocean. *Estuar. Coast. Shelf Scie*, 254, 107325.
- Dang, D. H., Layglon, N., Ferretto, N., Omanović, D., Mullot, J. U., Lenoble, V., ... & Garnier, C., 2020. Kinetic processes of copper and lead remobilization during sediment resuspension of marine polluted sediments. *Science of the total environment*, 698, 134120.
- Fernandes, L. F. L., Paiva, T. R. M., Longhini, C. M., Pereira, J. B., Ghisolfi, R. D., Lázaro, G. C. S., ... & Rocha, G. M. (2020). Marine zooplankton dynamics after a major mining dam rupture in the Doce River, southeastern Brazil: Rapid response to a changing environment. *Science of the Total Environment*, 736, 139621.

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

Harris, R.; Wiebe, P.; Lenz, J.; Skjoldal, H.-R.; Huntley, M. 2000 ICES Zooplankton Methodology Manual; Academic Press.

Hill, T. & Lewicki, P., 2007. STATISTICS: Methods and Applications. StatSoft, Tulsa.

Hoover, R. S., Hoover, D., Miller, M., Landry, M. R., DeCarlo, E. H., Mackenzie, F. T. 2006. Zooplankton response to storm runoff in a tropical estuary: bottom-up and top-down controls. Marine Ecology Progress Series, 318, 187-201.

Petrobras. 2015. Relatório Final do Projeto de Caracterização Ambiental Regional da Bacia do Espírito Santo e Parte Norte da Bacia de Campos (PCR-ES/AMBES). Anexo II.2.2-6 – Estrutura da Comunidade Zooplanctônica: Descritores espaciais e temporais.

Rocha, G. M., Salvador, B., de Souza Laino, P., Santos, G. H. C., Demoner, L. E., da Conceição, L. R., ... & Fernandes, L. F. L. 2022. Responses of marine zooplankton indicators after five years of a dam rupture in the Doce River, Southeastern Brazil. Science of The Total Environment, 806, 151249.

Rocha, G. M., Salvador, B., Santos, G. H. C., da Conceição, L. R., Teixeira-Amaral, P., Di Domenico, M., ... & Fernandes, L. F. L. 2025. A novel zooplankton-based environmental monitoring tool for coastal impacted areas: The case of the Doce River dam rupture. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 320, 109301.

Rodgher, S., & Espíndola, E. L. G. 2008. The influence of algal densities on the toxicity of chromium for *Ceriodaphnia dubia* Richard (Cladocera, Crustacea). Brazilian Journal of Biology, 68, 341-348.

Tukey, J. W., 1977. Exploratory data analysis. Reading, MA: Addison -Wesley.

Turner, J. R.; Thayer, J. F., 2001. Introduction to analysis of variance: Design, analysis, & interpretation. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2016. Standard Operating Procedure for Zooplankton Analysis. LG403. Revision.

Uttah, E.; Ogbeche, J.; Ukpog, G.I.; Ajang, R.; Iboh, C.; Ayanda, O.I., 2013. The Taxa Structure and Composition of Zooplankton Communities of Bonny Estuary: A Bio-indication of Anthropogenic Activities. The Pacific Journal of Science.