

**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: Fundos Recifais

RT- 52/ OUT 25

RSE2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2025

EQUIPE TÉCNICA

Rodrigo L. Moura (coordenador)

Paulo S. Salomon

Leonardo L. de Carvalho

Fernando C. Cardoso

Ivan M. Carneiro

Guilherme M. Castro

Julia P. Curvêllo

Ana P. B. Moreira

Myllena Pereira

Clara Pires

Bárbara F. Zaidan

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL.....	5
2	METODOLOGIA	5
2.1	COLETA	6
2.1.1	Cobertura bêntica de recifes coralíneos	6
2.1.2	Cobertura bêntica de bancos de rodolitos	8
2.1.3	Cobertura bêntica de recifes adjacentes ao litoral	9
2.1.4	Fisiologia de corais	12
2.1.5	Diversidade genética de simbiontes de corais	12
2.1.6	Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodolitos.....	12
2.1.7	Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais	13
2.1.8	Variáveis físico-químicas da água	14
2.1.9	Obtenção de amostras de água e organismos, disponibilizando o material para análises de concentração de metais.....	15
2.2	ANÁLISE	15
2.2.1	Cobertura bêntica de recifes coralíneos, bancos de rodolitos e recifes adjacentes ao litoral	15
2.2.2	Fisiologia de corais	16
2.2.3	Diversidade genética de simbiontes de corais	17
2.2.4	Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodolitos.....	19
2.2.5	Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais.....	20
2.2.6	Variáveis físico-químicas da água na malha amostral do projeto	20
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS	21
2.4	ALTERAÇÕES NA MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2024: SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES	21
3	RESULTADOS DOS INDICADORES.....	22

3.1	COBERTURA BÊNICA DE RECIFES CORALÍNEOS.....	23
3.2	COBERTURA BÊNICA DE RECIFES ADJACENTES AO LITORAL DA APA COSTA DAS ALGAS	26
3.3	FISIOLOGIA DE CORAIS	27
3.4	DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS.....	30
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	31
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS.....	33
6	REFERÊNCIAS.....	33

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

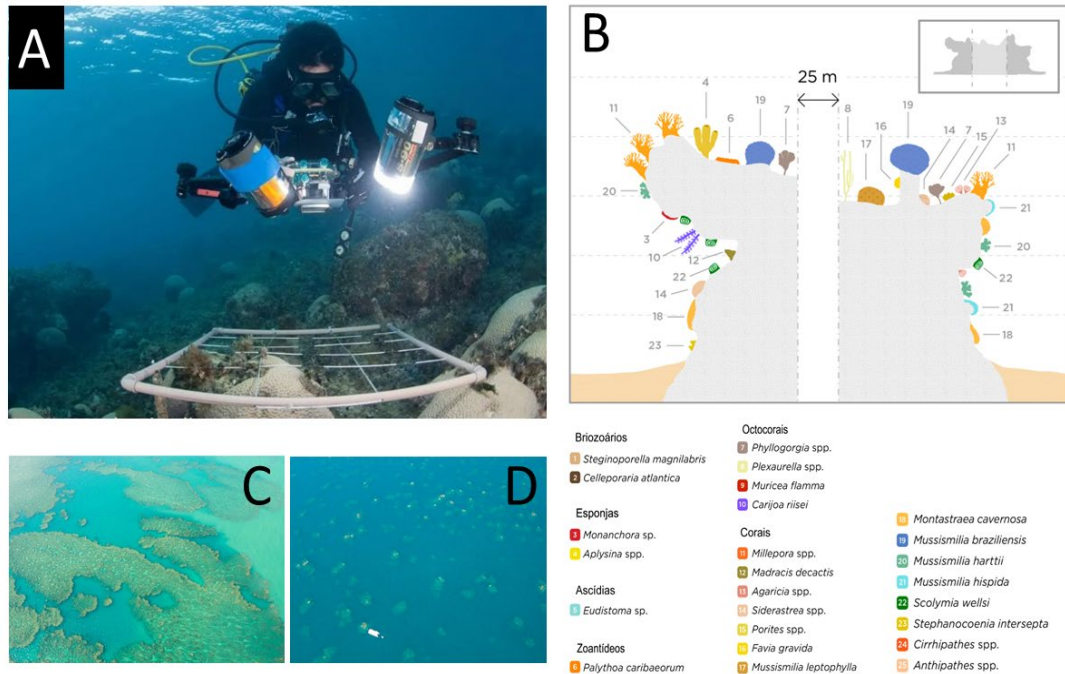
2.1.1 Cobertura bêntica de recifes coralíneos

A cobertura bêntica foi estimada a partir de imageamentos do fundo (Figura 1A) usando sistemas e protocolos específicos para as condições de cada ambiente (profundidade, turbidez, operação por mergulhador ou a partir da superfície). Nos recifes coralíneos, que se apresentam tanto como bancos (e.g., sítios A1 e A2) quanto como pináculos isolados (Figura 1B-D), o uso de amostras repetidas em fotoquadrados foi preponderante ao longo do monitoramento (dados antecedentes ao rompimento adquiridos com o mesmo protocolo). Uma avaliação detalhada da precisão e acurácia da amostragem com fotoquadrados em comparação com outros protocolos comuns (AGRRA e ReefCheck), baseados em transectos, revelou a maior capacidade dos fotoquadrados na detecção de mudanças temporais (CARNEIRO *et al.*, 2023). O imageamento dos fotoquadrados foi feito com câmeras digitais com resolução entre 12 e 20 MP, operadas por mergulhadores em caixas estanque. Esses sistemas contaram com dois flashes estanques posicionados a 45°, no sentido de minimizar sombras e *backscatter* de partículas em suspensão. As parcelas (0,5 m²) foram marcadas com pinos metálicos fixados ao fundo com uma furadeira subaquática e sofreram manutenção constante. Em cada sítio foram dispostas 10 parcelas no topo e 10 na parede do recife, no sentido de controlar a variabilidade associada ao habitat (TEIXEIRA *et al.*, 2021) (Figura 1B). A posição das parcelas foi disposta aleatoriamente no primeiro momento de amostragem e as amostras subsequentes foram obtidas nessas mesmas parcelas. Em cada estação amostral, um quadrado de PVC com 15 subunidades (que correspondem a fotografias individuais) foi colocado junto ao fundo, com vértices posicionados nos pinos (Figura 1A). Detalhes acerca do procedimento amostral podem ser encontrados em TEIXEIRA *et al.* (2021).

O delineamento temporal das amostragens em cada sítio foi variável, sendo que alguns sítios da Área A (Abrolhos e adjacências) contam com dados pretéritos ao rompimento e dados cobrindo o hiato de três anos sem o monitoramento do PMBA/Fest-UFES. Esse conjunto de dados foi obtido no âmbito do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD/CNPq/FAPES/FAPERJ e de outros projetos desenvolvidos pela equipe executora. As amostragens na área A foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

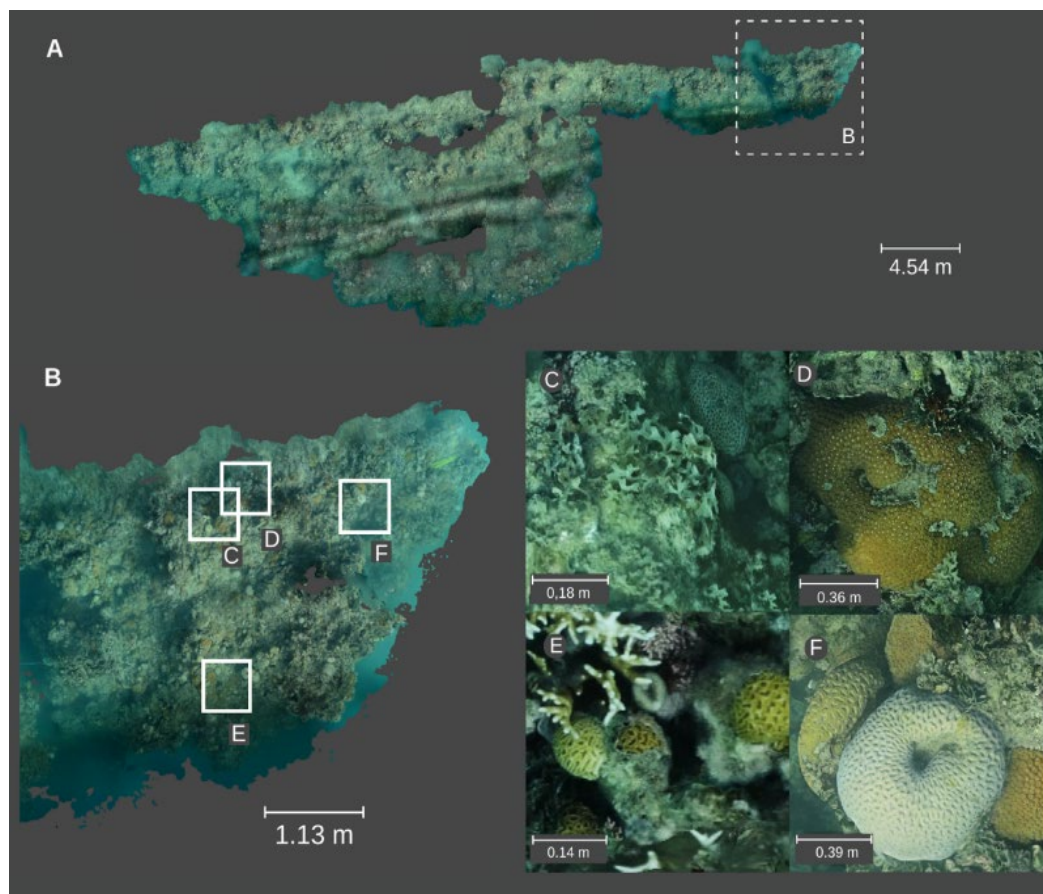
Para a Área B (Recifes Esquecidos), as primeiras amostras da cobertura dos recifes foram feitas antes da implementação do PMBA/Fest-UFES também no âmbito de outros projetos.

Figura 1: Fotoquadrado em parcela fixa marcada com pinos metálicos (A) e representação esquemática dos pináculos recifais (B), evidenciando as formas mais típicas, a heterogeneidade entre habitats e a distribuição dos principais organismos. Morfologia coalescida dos recifes costeiros (C) e pináculos isolados dos recifes *offshore* (D). Imagem: Rede Abrolhos.



Entre 2021 e 2024, as estimativas de cobertura passaram a ser complementadas com ortomosaicos baseados em fotogrametria (Figura 2), técnica que consiste na reconstrução de uma parcela do recife com imagens sobrepostas (FIGUEIRA *et al.*, 2015). Os ortomosaicos complementam a amostragem com fotoquadrados, que podem apresentar limitações em ambientes tridimensionais heterogêneos. Apesar do potencial para monitoramento em longo prazo, permitindo visualizar, *in silico*, as diferentes escalas da complexidade estrutural e biológica (Figura 2B-F), as reconstruções fotogramétricas foram realizadas em caráter piloto, em quatro sítios (RRDM 2022). A obtenção das imagens foi feita sem *zoom* (lente de 24 mm) e sem iluminação, com ISO entre 100 e 125 e ajustes de velocidade e obturador em tempo real. As fotos foram tomadas com sobreposição de 60-70%, ao longo de parcelas demarcadas com vergalhões fixados ao fundo e tralhas de chumbo paralelas dispostas na paisagem, para guiar o fotógrafo, bem como vergalhões de ferro pintados de amarelo (escalas de 50 cm) e acoplados a um ColorChecker® (i.e., paleta com alvo de calibração de cores). As tralhas e vergalhões pintados foram dispostas antes de cada imageamento e removidas logo após. O balanço de branco foi corrigido no Adobe Lightroom® e as imagens foram importadas para o programa Agisoft Metashape Pro® e processadas conforme BURNS *et al.* (2015), com ajustes menores. Os ortomosaicos foram segmentados em parcelas de 0,5 m², anotadas de forma semelhante aos fotoquadrados. As análises por ortomosaicos foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

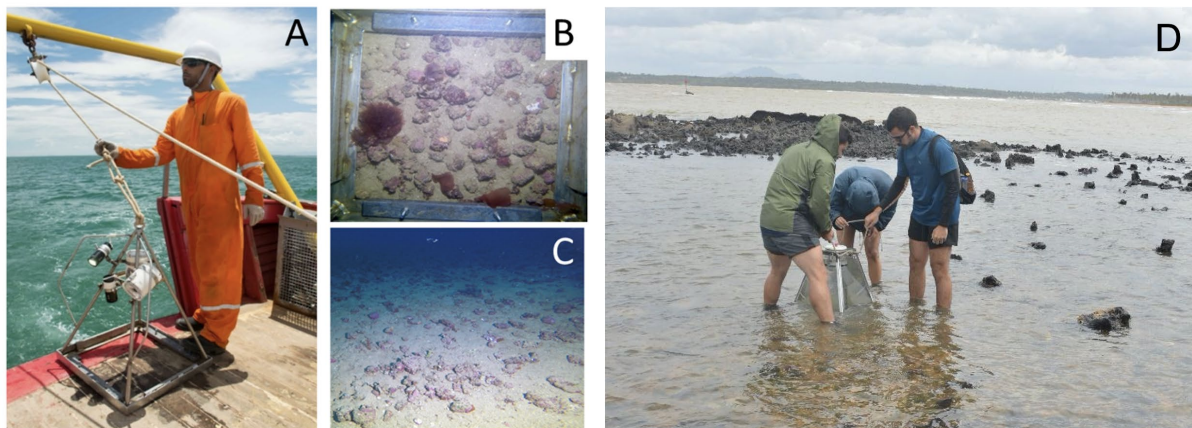
Figura 2: Ortomosaico de um recife costeiro (Pedra de Leste, A1). Painel A: imageamento da cobertura em uma área extensa (aproximadamente 50 m²), baseada em centenas de imagens com sobreposição parcial. Painel B: recorte mostrando a visualização da cobertura em diferentes escalas. Painéis C-F: ampliação dos recortes, usando o mesmo ortomosaico.



2.1.2 Cobertura bêntica de bancos de rodolitos

A cobertura bêntica foi estimada a partir de fotoquadrados e *dropcams* operadas a partir da superfície, sem estratificação por habitats. Fotoquadrados foram usados nos sítios acessíveis por mergulhadores (A5, RH18) e *dropcams* nos sítios mais profundos (>30 m) ou estações com condições que dificultaram o mergulho. As *dropcams* contam com estrutura metálica piramidal e 2 câmeras GoPro (12-27 MP), uma ortogonal e outra diagonal para imagens panorâmicas, ambas com caixas estanque e iluminação auxiliar. A *dropcam* foi lançada pelo menos cinco vezes (ou foram obtidas cinco réplicas de fotoquadrados) em um raio de 10-20 m no entorno de cada coordenada. As análises da cobertura bêntica de bancos de rodolitos foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

Figura 3: *Dropcam* com câmeras ortogonal e lateral e sistemas de iluminação (A), imagem ortogonal usada para estimativa do recobrimento (B) e imagem diagonal panorâmica (C). O painel D mostra a *dropcam* acrílica para imageamento nas águas mais turvas dos recifes adjacentes ao litoral (APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz).



2.1.3 Cobertura bêntica de recifes adjacentes ao litoral

Nos oito sítios de recifes adjacentes ao litoral, onde a influência terrígena é maior e o acesso é feito sem apoio de embarcações, foram usados tanto fotoquadrados quanto *dropcams* com estrutura acrílica preenchida com água limpa (Figura 3D), permitindo o imageamento sob condições de elevada turbidez ou marés altas. Essas *dropcams* são semelhantes às descritas, mas cobrem uma área de fundo menor, com 0,2 m², por ser impraticável deslocar estruturas maiores.

Anotação

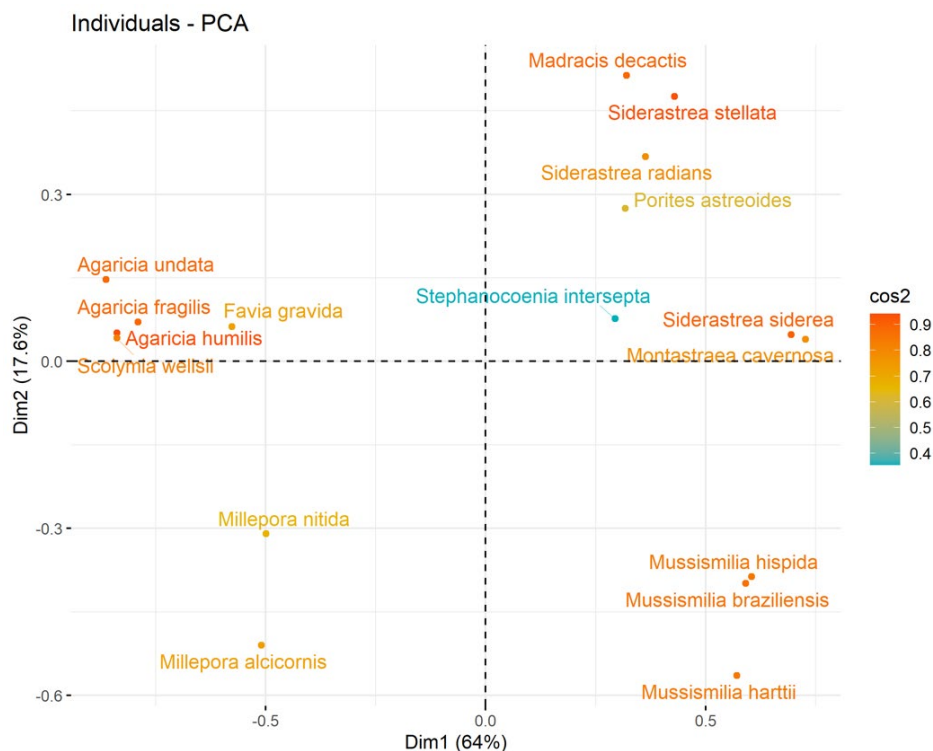
As imagens foram anotadas semiautomaticamente com uso da rede neural da plataforma CoralNet (BEIJON *et al.* 2012), usando um limiar de confiança de 80% e todas as anotações foram conferidas manualmente pelos pesquisadores. Outros parâmetros de configuração (e.g., *label accuracy*, *fraction above threshold*) estão descritos em TEIXEIRA *et al.* (2021) e CARNEIRO *et al.* (2024). Para os fotoquadrados, a cobertura foi estimada a partir de 30 pontos distribuídos aleatoriamente em cada subunidade (25 x 15 cm). Para os ortomosaicos, foram usados 30 pontos por parcela (0,5 m²). Para os bancos de rodolitos foram usados 45 pontos para cada imagem de *dropcam* (0,5 m²). Para os recifes adjacentes ao litoral foram usados 45 pontos para cada imagem de *dropcam* acrílica (0,2 m²) ou 3 pontos por subunidade. Em todos os ambientes, os organismos abaixo dos pontos foram identificados na melhor resolução possível e posteriormente agregados em categorias taxonômicas mais abrangentes e/ou grupos funcionais.

Grupos funcionais

Antes das análises, os organismos foram agregados em categorias mais abrangentes e grupos funcionais (GF), representados em caixa alta. Para corais, usamos uma matriz com oito grupos de atributos (Quadro 1) e o procedimento de ordenação descrito em DARLING *et al.* (2012). Foram excluídas três espécies (*Meandrina braziliensis*, *Mussismilia leptophylla* e *Porites branneri*) com cobertura baixa na área de estudo (<0,1 %), uma vez que não foi possível compilar pelo menos 60% dos atributos. A análise revelou quatro grupos funcionais (GF) (Figura 6). O GF MUSSISMILIAS foi

composto por espécies massivas, longevas (vivem por décadas) e de crescimento relativamente rápido ($\sim 1\text{cm.ano}^{-1}$ de extensão linear em bandas de crescimento), com esqueletos de densidade relativamente baixa. Inclui espécies endêmicas do Brasil com modo reprodutivo *broadcaster* e desovas concentradas no tempo. O GF AGARICIAS foi composto por espécies incrustantes ou submassivas de vida relativamente curta (<10 anos), crescimento relativamente rápido e esqueletos de densidade relativamente baixa. As espécies tendem a ser amplamente distribuídas no Atlântico, a maioria incubadora (*brooder*) e com reprodução contínua. O GF MILLEPORAS foi composto pelos hidrocorais ramificados de crescimento rápido e esqueletos de alta densidade, muito sensíveis a anomalias na temperatura, abrangendo tanto espécies endêmicas do Brasil quanto espécies mais amplamente distribuídas. O GF MONTASTRAEAS foi composto por espécies massivas ou submassivas, longevas (vivem por décadas) e de crescimento relativamente lento (mm.ano^{-1}), com esqueletos de densidade relativamente alta. Inclui espécies endêmicas e amplamente distribuídas, com diferentes modos e estratégias reprodutivas.

Figura 4: Diagrama de Ordenação (PCA) baseado nos atributos morfofuncionais de todas as espécies de corais registradas no estudo (Quadro 1), evidenciando os quatro grupos funcionais (em caixa alta).



Quadro 1: Espécies de corais registradas na área de estudo e sua respectiva atribuição a grupos funcionais. A última linha mostra os atributos utilizados nas ordenações.

Espécie	Grupo Funcional
<i>Agaricia humilis</i> , <i>A. fragilis</i> , <i>A. undata</i>	AGARICIAS
<i>Favia gravida</i>	
<i>Scolymia wellsi</i>	
<i>Millepora alcicornis</i> , <i>M. nitida</i> ,	MILLEPORAS
<i>Madracis decactis</i>	MONTASTRAEAS
<i>Montastraea cavernosa</i>	
<i>Porites astreoides</i>	
<i>Siderastrea radians</i> , <i>S. stellata</i> , <i>S. siderea</i>	
<i>Stephanocoenia intersepta</i>	
<i>Mussismilia braziliensis</i> , <i>M. hispida</i> , <i>M. harttii</i>	MUSSISMILIAS
Atributos usados na PCA (Figura 4): forma de crescimento, ramificação, modo reprodutivo, tamanho, mortalidade pós-branqueamento, densidade (esqueleto), diversidade de simbiontes, taxa de crescimento.	

Para os recifes adjacentes ao litoral e bancos de rodolitos, dominados por macroalgas, a caracterização funcional foi adaptada de STENECK, DETHIER (1994) e VELEZ-RUBIO *et al.* (2021) (Quadro 2).

Quadro 2: Grupos funcionais (GF) de macroalgas, com exemplos de táxons registrados na área de estudo.

GF	Características e exemplos
1 - Fotossintetizantes filamentosos	Textura macia, consistência delicada, alta ramificação; algumas espécies com corticação. Exemplos: <i>Centroceras</i> , <i>Chamaedoris penicilum</i> , <i>Chadophora</i> , <i>Gracilaria</i> , <i>Chaetomorpha</i> , <i>Polisphonia</i> , <i>Meristotheca</i> , <i>Turf</i> e cianobactérias.
2 - Macroalgas foliosas corticadas	Textura rugosa, consistência dura, corticadas. Talo flexível. Exemplos: <i>Anadyomne</i> , <i>Caulerpa prolifera</i> , <i>Cryptonemia</i> , <i>Dictyotaceae</i> , <i>Halymenia</i> , <i>Osmundaria</i> , <i>Stypopodium</i> .
3 - Macroalgas corticadas	Textura de borracha ou esponjosa, consistência dura. Frondes corticadas. Talo compacto com baixa ramificação, ereto e com eixos grossos. Exemplos: <i>Asparagopsis</i> , <i>Botryocladia</i> , <i>Caulerpa</i> (exceto <i>C. prolifera</i>), <i>Codium</i> , <i>Dictyosphaeria</i> , <i>Gelidiales</i> , <i>Hypnea</i> , <i>Laurencia</i> , <i>Neomeris</i> , <i>Ochtodes</i> , <i>Penicillus</i> , <i>Udoteaceae</i> , <i>Valonia</i> .
4 - Macroalgas coriáceas	Textura rugosa e coriácea, consistência dura. Fucales e Laminaliares. Exemplos: <i>Sargassum</i> , <i>Lobophora</i> , <i>Padina</i> , <i>Spatoglossum</i> , <i>Zonaria</i> .
5 - Algas crostosas	Consistência pedregosa, dura, com textura áspera sem ramificação. Formam crostas firmes e duras, aderidas ao substrato. Exemplos: algas coralináceas crostosas (CCA), incluindo as formadoras de rodolitos e concreções calcárias.
6 - Macroalgas foliáceas	Textura macia, consistência delicada, com pouca ou nenhuma ramificação. Talos variáveis formando lâminas ou tubos ocos. Exemplo: <i>Ulva</i> .
7 - Articuladas	Consistência pedregosa, textura áspera com ramificação e eixos eretos. Exemplos: <i>Amphiroa</i> , <i>Halimeda</i> , <i>Jania</i> , <i>Tricleocarpa</i> .

2.1.4 Fisiologia de corais

Durante as campanhas de campo realizadas entre 2018 e 2024 para a área A e 2018 e até 2025 para a área B, cinco réplicas de colônias de três espécies de corais do topo dos chapeirões foram submetidas à metodologia de curva rápida de luz (RLC) *in situ* com equipamento de amplitude de pulso modulada (DIVING-PAM), seguida por coleta de uma fração da colônia com marreta e talhadeira. O tecido retirado de fragmentos padronizados, através de jateamento de ar, foi diluído em água do mar filtrada em 0,2µm. Essas amostras foram aliquotadas para quantificação da densidade e morfologia (fixação em paraformaldeído 1% conc. final) e concentração pigmentar (congeladas em Nitrogênio Líquido).

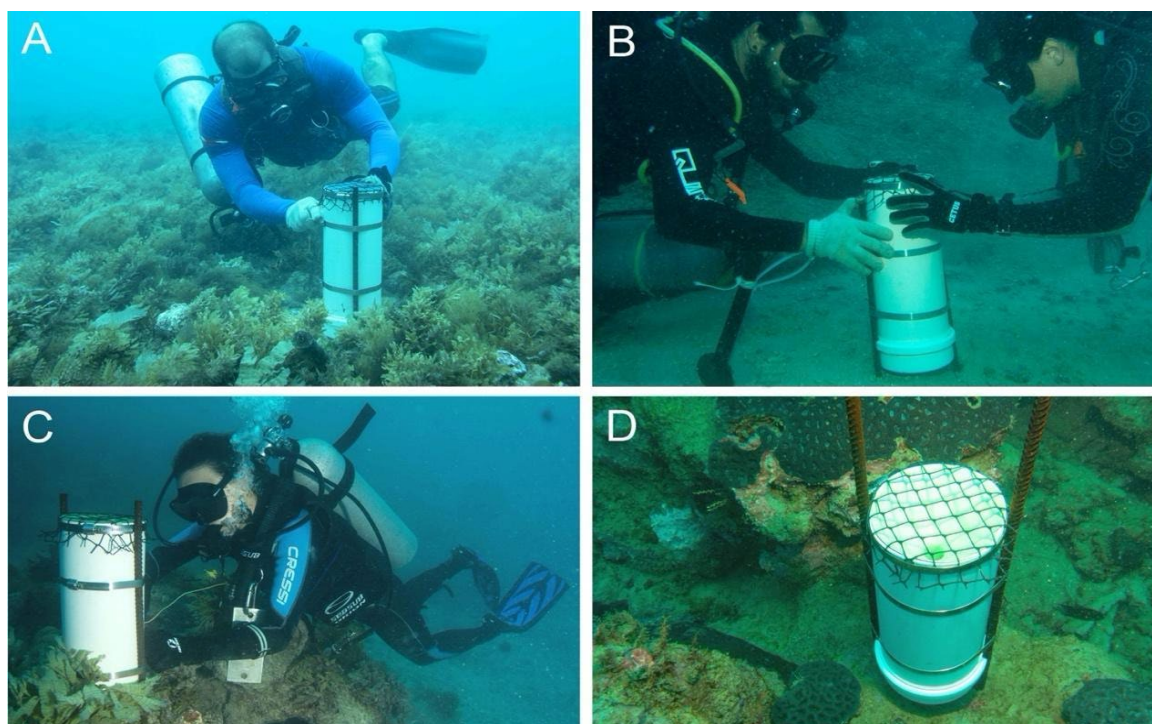
2.1.5 Diversidade genética de simbioses de corais

Durante as campanhas de campo realizadas entre 2018 e 2024, alíquotas do tecido foram armazenadas a bordo em nitrogênio líquido e preservadas para as análises visando a avaliação da diversidade genética de zooxantelas (dinoflagelados simbioses da família Symbiodiniaceae) e bacteriana (auto e heterotrófica) associada aos corais. As análises da diversidade genética de simbioses de corais foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

2.1.6 Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodólitos

Durante as campanhas de campo realizadas entre 2018 e 2024, sedimentos superficiais foram obtidos através de coletas manuais (áreas A e B e recifes adjacentes ao litoral da área D) ou dragagens (áreas C e D). Dados de armadilhas de sedimento (Figura 5) (n=3 réplicas por sítio) foram obtidos em sete campanhas, contemplando períodos com entre 3 e 12 meses de submersão nas Áreas A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos) (sítios A1, A2, A3, A4, A5, A6, B1, B2, B4 e B6). As armadilhas foram transportadas para a embarcação fechadas com tampas plásticas e os sedimentos foram transportados para o laboratório em recipientes plásticos refrigerados, no escuro, após decantação e remoção do excesso de água. As análises da natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodólitos foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

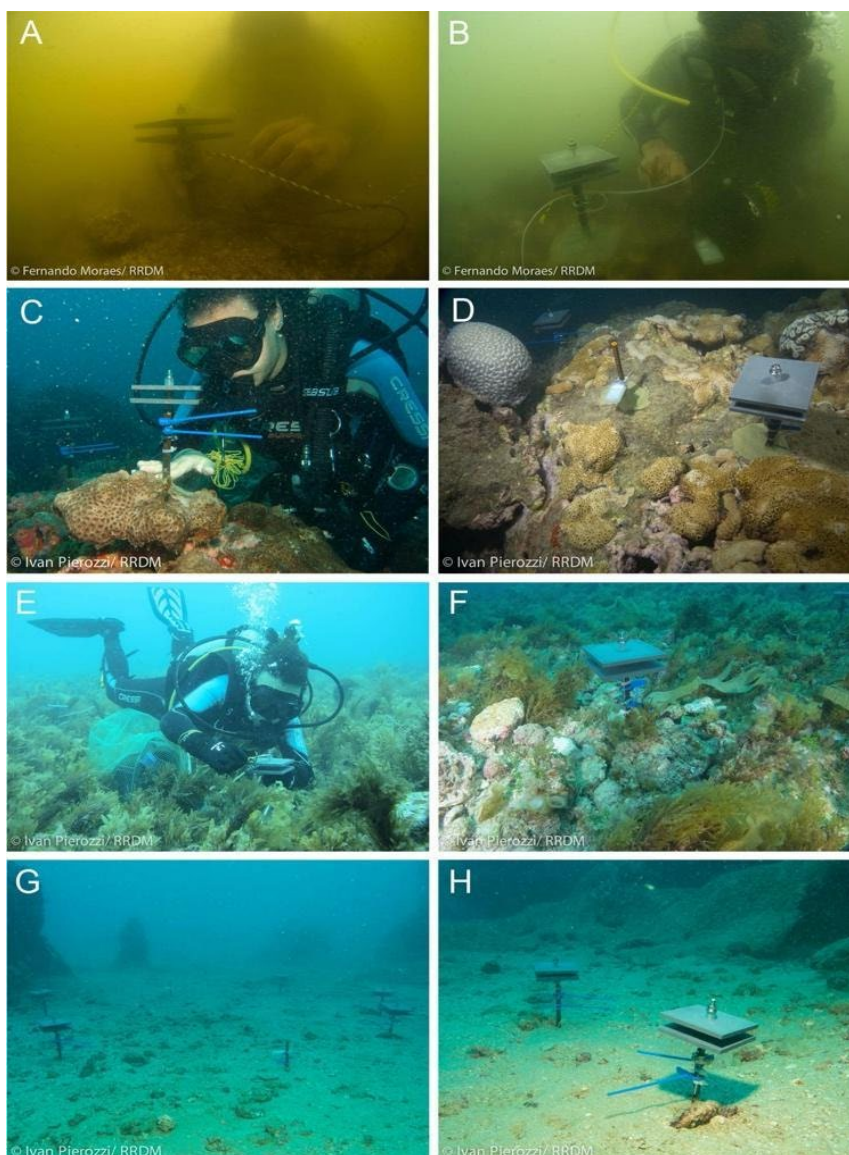
Figura 5: Coleta de sedimentos recifais com armadilhas. Legenda: **A e B)** Armadilhas em bancos de rodólitos; **C)** Armadilhas em recifes; **D)** Detalhe das armadilhas (tela de proteção, funil e fixação ao fundo).



2.1.7 Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais

A avaliação de taxas de colonização de organismos sésseis, realizada entre 2018 e 2024, foi estimada utilizando-se placas artificiais denominadas CAUs (*Calcification Accretion Units*) (Figura 6), mantidas submersas em blocos temporais subsequentes, cada um com cerca de um ano, em áreas de recifes e bancos de rodólitos. Em dois sítios recifais, um costeiro e outro *offshore* (A1 e A3) foram usados dados antecedentes (2 ciclos) e posteriores ao rompimento da barragem, oriundos do PELD/Abrolhos. Na remoção, as CAUs foram acondicionadas em sacos plásticos, ainda embaixo d'água, e transportadas para a embarcação onde foram desmontadas sobre bandejas e lavadas com água do mar. Cada face de cada placa foi fotografada antes de ser preservada em formol à 10%, no escuro. A metodologia de processamento e análise seguiu REIS *et al.* (2016), envolvendo a estimativa da produção de CaCO_3 e a quantificação dos organismos e da contribuição relativa de organismos construtores e não-construtores. As análises da produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

Figura 6: Estruturas artificiais para estudos de calcificação e colonização (CAUs) instaladas em recifes adjacentes ao litoral (A, B), recifes coralíneos (C, D) e bancos de rodólitos (E-H).



2.1.8 Variáveis físico-químicas da água

A área de estudo abrange ca. 300 km da costa do Espírito Santo e Sul da Bahia, com grande variabilidade em relação à influência de aportes continentais de sedimentos e fortes gradientes *cross-shelf* de profundidade e extensão da plataforma. Pelo norte, a região recebe influência das águas oligotróficas da Corrente do Brasil. O aporte continental resulta em mistura sobre a plataforma, formando a água costeira. Regiões mais fundas na plataforma externa estão sujeitas a incursões de águas intermediárias frias e ricas em nutrientes (ACAS), resultando em um cenário regional complexo e dinâmico. As variáveis físico-químicas foram obtidas através de: (i) compilação de dados de sensoriamento remoto; (ii) perfilagens verticais com CTD ou fundeios próximos ao leito marinho com duração de ca. 1 dia com sonda multiparamétrica (SeaGuard-Aanderaa). Perfilagens e fundeios foram feitos concomitantemente às demais amostragens. Este conjunto de variáveis não compõe os

indicadores do tema Fundos Recifais, mas subsidiam interpretações acerca da estrutura e funcionamento dos ecossistemas e dos efeitos do rompimento da barragem.

2.1.9 Obtenção de amostras de água e organismos, disponibilizando o material para análises de concentração de metais

Entre 2018 e 2024, nas estações nas Áreas A (Abrolhos e adjacências), B (Recifes Esquecidos) e D (Recifes adjacentes ao litoral, APA Costa das Algas) foram obtidos espécimes de algas pardas, corais e outros invertebrados através de coletas feitas por mergulhadores. Os espécimes foram acondicionados em sacos ou frascos plásticos e congelados, rotulados e imediatamente congelados em freezer (-18°C), tendo sido enviados para a equipe de Hidrogeoquímica. As amostras de água foram coletadas na Área A (Abrolhos) pela equipe de Ecotoxicologia, e nas áreas B (Recifes Esquecidos) e D (Recifes adjacentes ao litoral das APA Costa das Algas) pela equipe de Hidrogeoquímica. Com a redução do escopo no âmbito da Deliberação CIF nº 803, foram mantidas apenas análises de metais em espécimes de algas pardas das Áreas D costeiras.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Cobertura bêntica de recifes coralíneos, bancos de rodólitos e recifes adjacentes ao litoral

Os conjuntos de dados brutos extraídos das imagens, inseridos inicialmente em planilhas do MS Excel®, foram codificados e formatados com uso dos softwares R (R CORE TEAM, 2024) e PRIMER v7 (CLARKE; GORLEY, 2015) após procedimentos de controle de qualidade. Os pacotes utilizados no R incluíram dplyr, Psych e tidyverse, ggplot2 e GGally para compor as visualizações, e PCA, FactoMineR, factoextra para as análises multivariadas, que também foram feitas em programas comerciais (CLARKE; WARWICK, 2001). As análises envolveram técnicas multivariadas de ordenação, visando descobrir padrões em dimensões reduzidas, incluindo Análise de Componentes Principais (PCA) e Escalonamento Multidimensional não-métrico (nMDS). Os dados foram analisados com e sem transformações dos percentuais de cobertura. Diferenças estatísticas foram exploradas com análise de variância permutacional (PERMANOVA), uma análise não paramétrica que testa a hipótese nula de que a dispersão das observações é equivalente em todos os grupos. Mais detalhes sobre as análises podem ser encontrados nos relatórios anteriores e em CLARKE; WARWICK (2001). Para melhor representação da variabilidade dos principais grupos funcionais, foram feitos gráficos de dispersão com suavização dos dados e identificação de tendências locais através do LOESS (*Locally Estimated Scatterplot Smoothing*), implementada na linguagem R (R CORE TEAM, 2024). Estes gráficos consideraram apenas os dados de primeiro semestre de cada ano a partir de 2017, para visualização das tendências temporais sem a interferência da sazonalidade, já que há variação sazonal expressiva em alguns sítios, sobretudo na cobertura por macroalgas e cianobactérias.

Os resultados do indicador “cobertura bêntica de recifes coralíneos”, desde o início da série amostral, não contemplaram o sítio A4 (Portinho Norte, PNOR), na Ilha Santa Bárbara. Esse sítio possui uma estrutura de habitat não-comparável à dos demais.

Recifes adjacentes ao litoral, ao contrário dos recifes coralíneos, têm cobertura dominada por organismos de crescimento mais rápido (macroalgas) e/ou que apresentam episódios de crescimento explosivo (cianobactérias filamentosas) (BRASILEIRO *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2018, 2022; TEIXEIRA *et al.*, 2021). Para recifes adjacentes ao litoral, que apresentaram menor identidade de sítio, buscamos isolar efeitos sazonais nos contrastes “Before-After” (BA), considerando apenas dados do primeiro semestre, o que permite incorporar os “baselines” pré-rompimento.

2.2.2 Fisiologia de corais

Para a quantificação de simbioses (Symbiodiniaceae), suspensões de tecido de corais foram homogeneizadas utilizando vórtex (1 minuto) e sonicador (30 segundos, com pulsos intervalados de 1 segundo, a 20% de amplitude do aparelho Cole Palmer CPX 130) com o objetivo de romper grumos celulares. Posteriormente, as suspensões foram filtradas em malha de nylon de 25 μm para remoção de partículas maiores (sedimento, fragmentos de esqueleto de coral). Alíquotas da suspensão foram analisadas em um citômetro de fluxo utilizando um laser azul de excitação, a um fluxo de 66 $\mu\text{L min}^{-1}$ durante 2 min. Células de Symbiodiniaceae foram discriminadas nos citogramas pelo seu tamanho (FSC-H) e fluorescência de clorofila (FL3-H), com um filtro 670 nm *long pass* (90% de atenuação). Microesferas fluorescentes de 3 μm com concentração conhecida foram adicionadas em todas as amostras durante a leitura para o estabelecimento de um controle interno. A partir de fotografias dos espécimes adquiridos em campo, a área dos corais foi estimada utilizando o software Coral Point Count with Excel extensions, CPCe (KÖHLER & GILL, 2006). Os valores de contagem celular foram normalizados pela área raspada, assim como as concentrações pigmentares. As densidades foram expressas em células de *Symbiodiniaceae* por cm^2 de superfície do coral.

Para as análises morfométricas de estimativas de biovolume de zooxantelas, uma alíquota da suspensão de tecido de cada coral foi analisada em um sistema de imageamento em fluxo (FlowCam® VS, Fluid Imaging Technologies, USA) com célula de fluxo FOV de 90 μm e fluxo de 100 $\mu\text{L min}^{-1}$. As células foram imageadas em uma objetiva de 20X de aumento a uma taxa de aquisição de 20 imagens por segundo. Células de Symbiodiniaceae em foco foram selecionadas semiautomaticamente para medições celulares (largura e comprimento) usando o software VisualSpreadsheet (Fluid Imaging Technologies, USA). Comprimento e largura foram usados para estimativas de biovolume ($\mu\text{m}^3 \text{ célula}^{-1}$) através da aproximação do formato de um esferoide prolato (SUN & LIU, 2003).

Para análise pigmentar, alíquotas de 500 μL a 1mL de suspensão de tecido de coral contendo os simbioses foram filtradas, sob um vácuo inferior a 200 mbar sobre filtros GF/F de 25mm ou 47mm de diâmetro montados sobre um sistema de filtração. Este procedimento objetivou concentrar o tecido sobre o filtro e eliminar o máximo de água possível contida na suspensão. Após as filtrações, os filtros foram alocados em tubos de vidro de 10 mL e conservados a -80°C até a análise pigmentar.

Os pigmentos clorofilianos e carotenoides presentes nas amostras de tecido de coral foram extraídos em 6ml de acetona 90% (volume final) adicionados aos tubos de vidro. Em seguida, os filtros foram macerados com auxílio de um bastão de vidro com ponta recém-quebrada e os tubos lacrados com película flexível, semitransparente e impermeável (Parafilm®). Em seguida, as amostras foram

sonicadas por 2 minutos a 0°C e mantidas a 4 °C durante um período de 12 a 16h. Após este período, os tubos foram centrifugados por 10 minutos a 3500 rpm e a fluorescência dos extratos medida em um espectrofluorímetro VARIAN CARY ECLIPSE® para se obter as concentrações de pigmentos clorofilianos e as absorbâncias obtidas por um espectrofotômetro Femto Cirrus 80ST para estimativa das concentrações de carotenoides totais. As concentrações de carotenoides totais foram calculadas segundo a metodologia de PARSONS *et al.* (1984), a partir do registro das absorbâncias em 480 e 510 nm, corrigidas pela absorbância a 750 nm. Os coeficientes específicos de fluorescência de cada pigmento foram estimados por diluição serial da solução estoque, e os respectivos pigmentos de degradação tipo feopigmentos obtidos por acidificação, conforme as recomendações de NEVEUX & PANOUSE (1987).

As concentrações dos pigmentos clorofilianos foram avaliadas segundo o método de NEVEUX & LANTOINE (1993) modificado por TENÓRIO *et al.* (2005). A aquisição de dados foi realizada por registro do espectro de emissão de fluorescência, composto por 31 comprimentos de onda de excitação de 390 a 480 nm, com intervalo de 3 nm. Para cada comprimento de onda de excitação obteve-se um espectro de emissão de 615 a 715 nm com intervalos de 2 nm, resultando em 51 dados de fluorescência. As concentrações pigmentares foram estimadas a partir dos 1581 dados de fluorescência (31 comprimentos de onda de excitação * 51 comprimentos de onda de emissão) utilizadas em 1581 equações lineares com 10 incógnitas mais uma constante e eliminação dos resultados negativos a partir da técnica dos mínimos quadrados. A significância dos resultados obtidos por espectrofluorimetria está relacionada com as concentrações relativas dos pigmentos no extrato e do seu rendimento quântico no solvente. São consideradas significativas apenas as concentrações dos pigmentos acessórios que representem pelo menos 5% da Cla. Valores inferiores não significam necessariamente a ausência de um pigmento, mas sua determinação é considerada imprecisa. A resolução de equações para obter a concentração dos pigmentos clorofilianos em microgramas por litro no extrato acetônico foi realizada por meio de uma rotina desenvolvida no programa MATLAB e os valores normalizados pela área de tecido de coral raspado.

Através da fluorimetria buscamos mensurar o funcionamento do aparato fotossintético por meio da quantificação da fluorescência emitida e cálculo do que foi absorvido e dissipado (HUOT; BABIN, 2010). O método de fluorimetria foi aplicado para construção de curvas rápidas de luz (RLC, *Rapid Light Curves*), utilizando da modulação da amplitude de pulsos, como descrito acima. Mais detalhes são fornecidos em COSGROVE; BOROWITZKA (2010). Através das curvas foram calculados os parâmetros de rendimento fotossintético efetivo (F_v/F_m'), taxa máxima relativa de transporte de elétrons ($rETR_m$) e irradiância mínima saturante (E_k) (RALPH & GADEMANN, 2005). As análises de fluorimetria foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

2.2.3 Diversidade genética de simbiontes de corais

O DNA do tecido de coral foi extraído com protocolo adaptado de FUKAMI *et al.* (2004) que, resumidamente, consiste na adição do tampão Chaos-forming (4 M guanidine thiocyanate, 0.1% N-lauroyl sarcosine sodium, 10 mM Tris-HCl pH8, 0,1 M 2-mercaptoethanol) por aproximadamente sete

dias. Foi realizada uma etapa de adição de CETAB, com a amostra mantida em 50 graus por 60 minutos. A separação dos compostos orgânicos foi feita por adição de clorofórmio e, posteriormente, etanol 70% para precipitação e retirada de excesso de sais. O material genômico final foi eluído em água ultrapura e armazenado a -18°C. O DNA genômico total foi quantificado e purificado com kit ProNex® Size-Selective Purification System. A região transcrita do espaçador interno ribossomal (ITS2) foi amplificada por PCR com iniciadores (Sym_VAR_5.8SF e SYM_VAR_REV) em uma primeira reação de 25 ciclos. O amplicon gerado foi purificado do gel de agarose com kit GeneJET Gel Extraction Kit, e reamplificado com estes primers ligados a cauda Illumina (HUME *et al.*, 2018) por mais 10 ciclos de PCR. Os amplicons foram sequenciados na plataforma Illumina em fragmentos de 250 pares de base pelo modo *pair-end*, em cerca de 50.000 leituras por amostra. As sequências foram processadas pelo conjunto de passos no programa Symportal (HUME *et al.*, 2019). Todas as sequências foram reamostradas pelo menor número de sequências obtidas nas amostras, utilizando o pacote vegan (OKSANEN *et al.*, 2018) no software R (R CORE TEAM, 2024). Buscando minimizar o efeito da superestimativa de diversidade devido às múltiplas cópias interagenômicas, as ITS2 types correlacionadas foram agrupadas, também no software R. Dentro dos conjuntos com valores positivos de correlação foram reconsideradas como OTUs ("Operational Taxonomy Units") aquelas mais abundantes dentro do agrupamento, e as demais como cópias intragenômicas. Abundâncias relativas foram calculadas utilizando essa abordagem.

As comunidades bacterianas foram estudadas através do marcador 16S (região V3 e V4). A região foi amplificada com iniciadores descritos em KLINDWORTH *et al.* (2013) já com a cauda adaptadora da plataforma Illumina em 35 ciclos, e os amplicons foram quantificados e sequenciados pelo modo *pair-end* com leituras de 300 pares de base. As sequências foram filtradas por qualidade e os adaptadores foram retirados pelo programa Trimmomatic (BOLGER *et al.*, 2014). Os pares de leituras foram assimilados em consenso aceitando ao menos uma ambiguidade, e posteriormente filtradas dentro do tamanho esperado (250-550bp). Sequências iguais foram agrupadas em sequências únicas (unidades taxonômicas operacionais de distância zero; zOTUs) utilizando a ferramenta unoise implementada no programa Usearch (EDGAR, 2010). Sequências quiméricas foram removidas e as zOTUs foram classificadas com o algoritmo Bayesian Last Common Ancestor contra o banco de dados GTDB (<https://ftdb.ecogenomic.org>). Todas as zOTUs não bacterianas foram removidas junto com zOTUs de cópia única na base de dados. As sequências foram distribuídas para contagens em cada amostra. As análises de diversidade genética de simbiontes de corais foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

2.2.4 Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodolitos

Os processos de erosão de rochas resultam na produção de partículas que são transportadas através de processos hidroclimatológicos e geológicos altamente dinâmicos no espaço e no tempo, adicionando complexidade às investigações sobre a origem e deposição de sedimentos no meio marinho. O tipo e a quantidade de sedimentos em transporte e em deposição impactam a penetração de luz no oceano e modulam diversos processos biogeoquímicos (e.g. SZCZUCINSKI, 2007). A dinâmica sedimentar é um dos processos mais críticos em sistemas recifais e, portanto, é um tema central para ações de manejo (SHEPPARD *et al.*, 2009; GOLDBERG, 2013). Além disso, o transporte de sedimentos está intimamente ligado à introdução e à persistência de contaminantes nos recifes.

Os sedimentos coletados em armadilhas e na superfície do fundo foram lavados duas vezes com água deionizada e centrifugados. Em seguida, o material foi seco por liofilização durante 48h e sua massa foi obtida para o cálculo da taxa de sedimentação mensal, considerando o período de permanência das armadilhas no ambiente. As armadilhas também forneceram uma aproximação inicial sobre a variação espaço-temporal nas taxas de sedimentação (BUESSELER *et al.*, 2007).

Posteriormente, para análise granulométrica, o sedimento foi passado por peneiras (4, 2 e 1 mm; 500, 250, 125 e 63 μ m) empilhadas sobre agitador eletromagnético, durante 1 h. Cada peneira foi pesada em balança digital de precisão, antes e depois da separação, para cálculo da porcentagem de sedimentos em cada fração. Os sedimentos foram classificados com base na escala granulométrica de fragmentos clásticos de Wentworth, como segue: Argila (<0,004 mm); Silte (0,004–0,064 mm); Areia (0,064–2 mm); Grânulo (2–4 mm); Seixo (4–64 mm) (WENTWORTH, 1922).

A mineralogia é importante para acessar a origem e processos de transformação sofridos pelos sedimentos. Para análise mineralógica, os sedimentos finos (n=3 réplicas por estação) foram analisados por difração de raios-X. As amostras (50 mg por réplica) foram previamente moídas 2 vezes (em moinho de bolas), por 10 minutos, e peneiradas em malha de 25 μ m. Foi utilizado um difratômetro de raios-X PANalytical Empyrean, com as seguintes características/configurações: geometria Bragg-Brentano, radiação CuK α , gerador: 40 mA and 40 kV, amplitude angular 5-90° 2 θ , tomada a cada 0.02°, 180 s por medida. A identificação das fases cristalinas, na forma de picos no difratograma, foi realizada utilizando o software Panalytical X' Pert Pro V3, baseada na comparação com dados de minerais de origem orgânica e inorgânica (e.g., Crystallographic Open Database - COD). A quantificação de fases cristalinas e parâmetros de rede foram baseadas na técnica de refinamento Rietveld, com uso do software MAUD, também usado para determinar a porcentagem de substituição de Mg por cristais de calcita (TITSCHACK *et al.* 2011). Os dados sedimentológicos foram explorados e analisados com gráficos, regressões e PERMANOVAs.

As análises da natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodolitos foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

2.2.5 Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais

As medições do balanço carbonático revelam se o recife está acumulando ou perdendo CaCO_3 . A produção líquida se refere ao balanço entre a produção orgânica e a respiração, e a calcificação líquida se refere ao balanço entre a calcificação e a dissolução do CaCO_3 . As CAUs representam unidades experimentais usadas para medir a variação na massa carbonática e orgânica, e são valiosas para acessar a composição da comunidade bentônica em estágios sucessionais iniciais (VARGAS-ANGEL *et al.*, 2015; REIS *et al.*, 2016).

A metodologia de processamento e análise das CAUs seguiu REIS *et al.* (2016), envolvendo a quantificação da produção de CaCO_3 , quantificação dos organismos colonizadores e da contribuição relativa de construtores e não-construtores. Para a análise de diversidade e cobertura, as imagens das placas foram analisadas com o software ImageJ 1.48. Especialistas auxiliaram na identificação de grupos específicos de organismos (e.g. ascídias e briozoários). A área de cada organismo foi obtida através do contorno de seu perímetro na imagem, com uso de mesa digitalizadora. O percentual de cobertura foi relativo à área total da superfície da CAU (400 cm^2 , representando duas superfícies superiores e duas inferiores das duas placas que compõem cada unidade de 100 cm^2).

Em laboratório, as placas foram lavadas separadamente (3x) em solução de hidróxido de cálcio em água deionizada (pH 10) para evitar a desmineralização de organismos, e posteriormente secas a 60°C por 5-6 dias. O material seco foi raspado, triturado em moinho de bolas, homogeneizado e pesado para obtenção da massa total (calcária + não calcária). Alíquotas (1 g, peso seco) das amostras pulverizadas foram analisadas para a determinação do percentual de massa calcária e não calcária. Estas alíquotas foram submetidas a desmineralização por imersão em ácido nítrico 5% até a completa dissolução do CaCO_3 . O material remanescente (massa não calcária ou orgânica) foi seco e sua massa determinada em balança analítica. O valor da massa calcária foi obtido pela subtração do valor da massa total pelo da massa não calcária. Para determinação da produção anual líquida de CaCO_3 ($\text{g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$), os valores de massa calcária foram normalizados considerando a área total das CAUs e o tempo de submersão. As séries temporais pré-monitoramento (2012-17) foram obtidas no âmbito do programa PELD/CNPq e de outros projetos. Os dados foram explorados graficamente e com nMDS e PERMANOVAs, considerando que os sítios A5 e B1 correspondem a bancos de rodolitos, ao passo que os demais correspondem a recifes coralíneos (A1, A3, A6, B2 e B4) e recifes lateríticos adjacentes ao litoral (D15 e D21). Os nMDS e PERMANOVAs foram baseados em dados transformados (raiz quarta) e matrizes de distância de Bray-Curtis, com exceção do contraste (univariado) entre massas calcárias antes e após o rompimento, baseado em distâncias Euclidianas.

As análises de produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

2.2.6 Variáveis físico-químicas da água na malha amostral do projeto

A área de estudo abrange 300 km da costa do Espírito Santo e Sul da Bahia, com grande variabilidade em relação à influência de aportes continentais de sedimentos, fortes gradientes *cross-shelf* com

variações marcantes na profundidade e na extensão da plataforma continental. Pela porção norte, a região recebe influência das águas oligotróficas da Corrente do Brasil. O aporte continental resulta em mistura sobre a plataforma, formando a água costeira. Regiões de maior profundidade na plataforma externa estão sujeitas a incursões de águas intermediárias frias e ricas em nutrientes (ACAS). Isto resulta em um cenário complexo e dinâmico nas características da coluna d'água e nos padrões de sedimentação em escala regional.

As variáveis físico-químicas da água foram obtidas através de duas abordagens complementares: (i) compilação de dados de sensoriamento remoto; (ii) perfilagens verticais na coluna d'água com CTD ou fundeios próximos ao leito marinho com duração de ca. 1 dia com sonda multiparamétrica (SeaGuard-Aanderaa). Perfilagens e fundeios foram feitos concomitantemente à coleta de amostras e dados da biota planctônica e bentônica. Este conjunto de variáveis não compõe os indicadores do tema Fundos Recifais e Bancos de Rodólitos, mas é importante para subsidiar interpretações acerca da estrutura e funcionamento dos sistemas recifais e possíveis efeitos do rompimento.

O estudo com o uso de imagens de sensoriamento remoto inclui as variáveis iPAR (Photosynthetic Active Radiation), Kd490 (Diffuse Attenuation Coefficient Kd490) e concentração de clorofila. Essas variáveis foram adquiridas na base ERDDAP (Easier Access to Scientific Data), repositório de dados administrado pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Estes dados foram processados, calibrados e validados pela NASA's Ocean Biology Processing Group (OBPG) (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Os valores de "Sea Surface Temperature" (SST), foram adquiridos na PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), repositório responsável por disponibilizar dados oceanográficos para a comunidade científica e a NASA. Este repositório é administrado pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL). Os parâmetros SST, iPAR, Kd490 e clorofila são produtos do sensor MODIS. A resolução espacial de todas as imagens representadas nos mapas é de 16 km². O cálculo dos valores destas variáveis para cada ponto amostral foi calculado como a média de 4 pixels, utilizando uma máscara poligonal quadrada de 64 km². A resolução temporal das imagens produzidas é de 2 dias. Todas as variáveis foram compiladas com frequência mensal e representadas nos mapas como médias semestrais, sendo o período de dezembro a maio rotulado como verão e o período de junho a novembro rotulado como inverno.

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Não houve alterações significativas na metodologia das análises mantidas no âmbito da Deliberação 803. As alterações na malha amostral e análises que deixaram de ser realizadas a partir de 2025 estão descritas no item 2.4.

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2024: SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES

A partir da Deliberação CIF 803/2024, foram realizadas alterações no plano de trabalho do PMBAFest-UFES. Na malha amostral, a partir de 2025, foram mantidos apenas os sítios amostrais nos Recifes

Esquecidos e na APA Costa das Algas. Além disso, houve a exclusão das análises de: (1) ortomosaicos (fotogrametria), (2) natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodólitos, (3) avaliação de taxas de colonização de organismos sésseis em placas artificiais (CAUs), (4) fluorometria e diversidade genética de simbiontes de corais, e (5) da concentração de metais dissolvidos em água, em corais e outros organismos (sendo mantido apenas análises de metais em macroalgas). A redução de escopo espacial e a exclusão de alguns indicadores descontinuou avaliações comparativas entre setores/áreas impactadas x não impactadas.

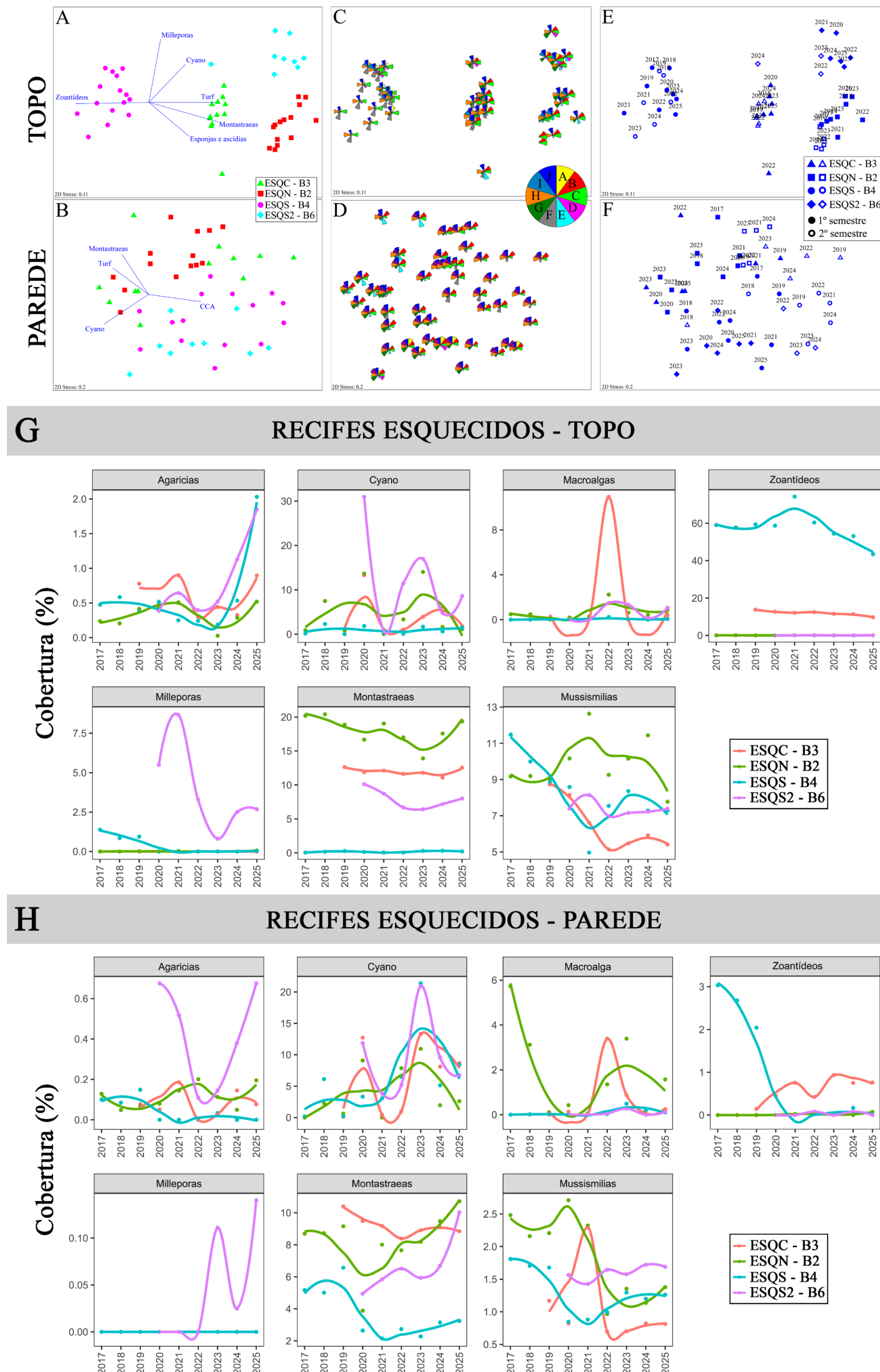
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES CORALÍNEOS

Figura 7: Efeito do rompimento sobre comunidades recifais. SÍTIOS: ESQN - B2 = Esquecidos Norte; ESQC - B3 = Esq. Central; ESQS - B4 = Esq. Sul; ESQS2 - B6 = Esq. Sul 2.
LEGENDAS: **Painéis A e B:** Ordenação (nMDS) com correlações de Pearson ($>0,5$) baseada nas coberturas (com transformação). **Painéis C e D:** “pizzas” com a cobertura (%) por grupos com recobrimento $>20\%$ (Painel C: A=AGARICIAS, B=MONTASTRAEAS, C= MUSSISMILIAS, D= MILLEPORAS, E= MACROALGAS, F= ZOANTÍDEOS, G=CIANO BACTÉRIAS, H= ESPONJAS E ASCÍDIAS, I= sedimentos, J= *Turf*. Painel D: A a H como painel C; I= CCA e J= *Turf*). **Painéis E e F:** Ordenação (nMDS) com correlações de Pearson ($>0,5$) baseada nas coberturas (com transformação) para análise do efeito da sazonalidade. Painéis **G e H:** Cobertura (%) dos diferentes grupos com suavização de LOESS. Cyano = cianobactérias.



A Figura 7 traz dados posteriores ao PMBA/FEST-UFES, obtidos nos Recifes Esquecidos. Os nMDS com dados de topo (Figura 7A, C e E), assim como as PERMANOVA (Tabela 1), revelam identidades de sítio, ou seja, uma preponderância da variabilidade espacial sobre a variabilidade temporal. Nos sítios B2 e B3 há predominância de *turf* e MONTASTRAEAS; B4 é dominado por ZOANTÍDEOS, e B6 tem predominância de CIANOBACTÉRIAS e MILLEPORAS. Não há um efeito marcante da sazonalidade. Nos nMDS com dados de parede (Figura 7B, D e F), assim como nas PERMANOVA correspondentes (Tabela 1), a identidade de sítio não é evidente, observando-se variabilidade espacial e temporal elevada.

As tendências temporais estimadas por meio do modelo de suavização LOESS (Figura 7G-H) indicam que a dinâmica dos grupos funcionais bentônicos varia substancialmente entre os sítios analisados.

Nos topos dos sítios B4 e B6, em 2025, houve aumento na cobertura por AGARICIAS, corais relativamente pequenos, com crescimento mais rápido e vida mais curta, concomitante a uma redução nas coberturas de MILLEPORAS, hidrocorais ramificados de crescimento rápido e MUSSISMILIAS, corais massivos e longevos endêmicos do Brasil. No sítio B3 houve redução na cobertura por MUSSISMILIAS. Nos sítios B2, B3 e B6, a alta cobertura por MONTASTRAEAS, corais longevos de crescimento lento e esqueletos mais densos manteve-se relativamente estável. No sítio B4, houve elevada dominância de ZOANTÍDEOS em toda a série temporal. Em contraste, CIANOBACTÉRIAS e MACROALGAS apresentaram elevada variabilidade temporal.

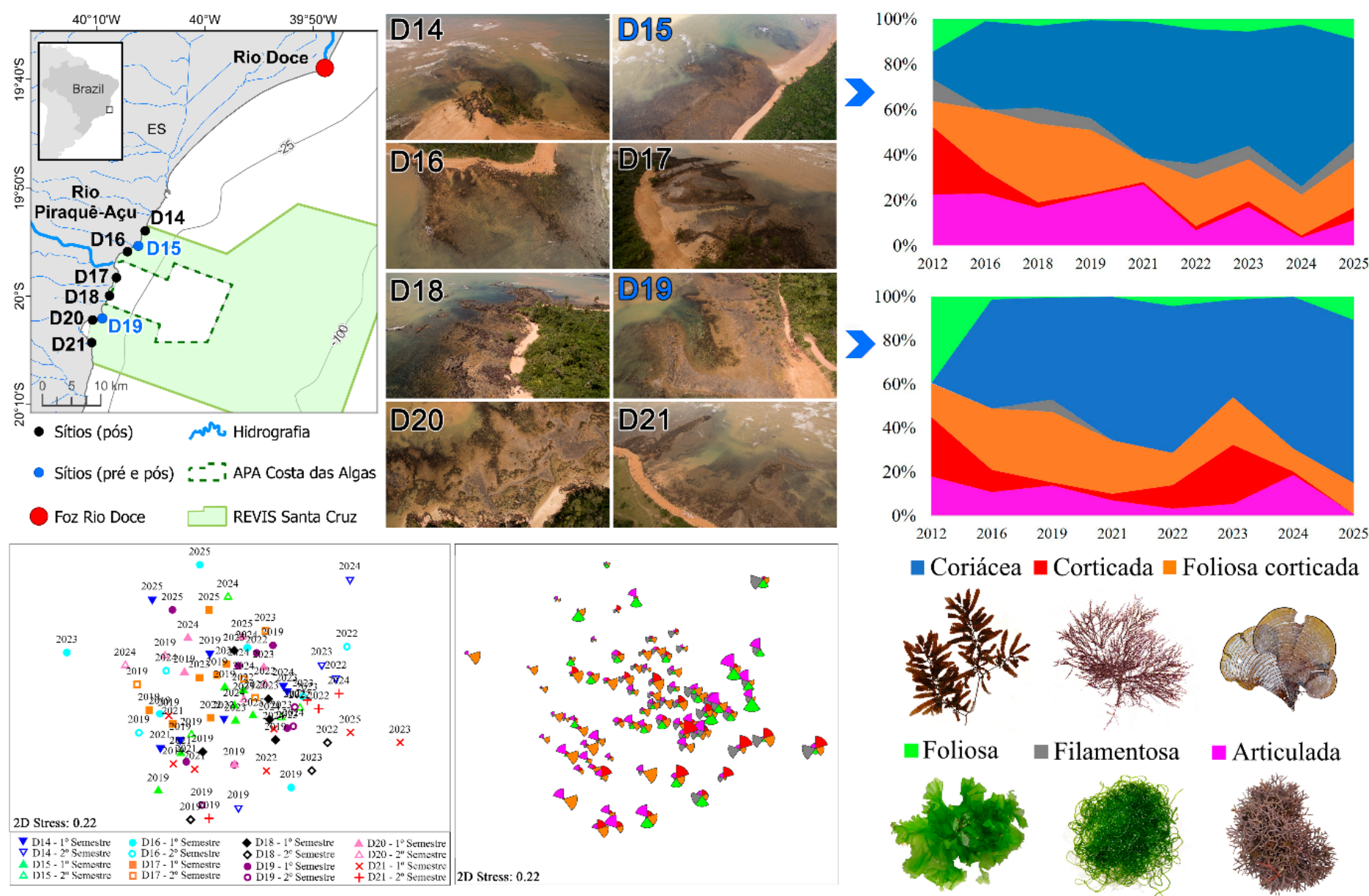
Nas paredes foi observado aumento na cobertura por MONTASTRAEAS em B6 e B2. AGARICIAS e MILLEPORAS, corais de baixa cobertura em todos os sítios analisados, tiveram a cobertura aumentada em B6, sobretudo em 2025. Assim como no topo, a cobertura por CIANOBACTÉRIAS apresentou grande variabilidade temporal. Ainda assim, em relação a toda a série temporal, há uma leve tendência de aumento nas CIANOBACTÉRIAS, especialmente nos sítios B3 e B4.

Tabela 1: Efeito da sazonalidade sobre a estrutura das comunidades recifais. Sumário das PERMANOVAs baseadas nos dados de cobertura dos sítios recifais B2, B3, B4 e B6 monitorados no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Análise feita com dados transformados por $\log(x+1)$. Legenda: df = graus de liberdade; SS = Soma de Quadrados; MS = Quadrado Médio; P(perm) = p-valor por permutação; VC = componentes de variância.

TOPOS	df	SS	MS	Pseudo-F	P(perm)	VC
Sítio	3	1,71E+09	57062,0	104,6	0,001	511,7
Ano	8	19392	2424,0	0,71802	0,814	-17584
Semestre (Ano)	6	18880	3146,6	91.334,00	0,001	89223
Sítio x Ano	20	11102	555,1	10.644,00	0,439	22306
Sítio x Semestre (Ano)	12	6041,5	503,46	14.613,00	0,051	15892
Resíduos	498	1,72E+09	344,52			344,52
Total	547	4,31E+09				
PAREDES	df	SS	MS	Pseudo-F	P(perm)	VC
Sítio	3	22909	7636,3	14.228,00	0,001	64772
Ano	8	30124	3765,5	0,86951	0,615	-10384
Semestre (Ano)	6	24386	4064,3	15.762,00	0,001	120,08
Sítio x Ano	20	15342	767,11	14.504,00	0,057	15421
Sítio x Semestre (Ano)	12	5984,6	498,72	19.342,00	0,001	24068
Resíduos	497	1,28E+09	257,85			257,85
Total	546	2,31E+09				

3.2 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES ADJACENTES AO LITORAL DA APA COSTA DAS ALGAS

Figura 8: Malha amostral nos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz, com destaque para os dois sítios (D15 e D19) com dados de cobertura antecedentes ao rompimento da barragem. Esses dois sítios revelam a reestruturação da comunidade recifal após o rompimento, com perda de diversidade e aumento na dominância por macroalgas coriáceas (*Sargassum* spp.), seguida por pequena recuperação entre 2022 e 2023, descontinuada a partir de 2024. Os painéis inferiores mostram dois diagramas de ordenação (NMDS), um com a evolução temporal e sazonalidade na cobertura (esquerda) e outro com os grupos funcionais de macroalgas (exceto coriáceas – omitidas para melhor visualização dos demais) (direita). As fotos trazem espécies representativas de cada grupo funcional.



As macroalgas são os elementos dominantes nos recifes rasos com crostas lateríticas na chamada “Costa das Algas” (Figura 8), região com a maior diversidade florística do Atlântico Sul. A cobertura dos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas e do REVIS Santa Cruz, pelos diferentes grupos funcionais de macroalgas, foi avaliada em oito sítios. Dois desses sítios (D15 e D19) se destacam por possuírem dados comparáveis com os do PMBA/Fest-UFES, obtidos em 2012 (pré-rompimento) (SCHERNER *et al.*, 2013) e 2016 (logo após o rompimento) (GOLDER, 2016).

O contraste pré- *versus* pós-rompimento, com dados de primeiro semestre e utilizando a cobertura relativa por macroalgas nos sítios D15 e D19, é marcante (Figura 8), confirmando tendências temporais relevantes para avaliação dos efeitos do rompimento: 1) aumento na participação relativa de formas coriáceas, especialmente *Sargassum* spp., após o rompimento, com consequente redução na diversidade da comunidade; 2) variação, entre 2022 e 2023, sugerindo recuperação, especialmente em D19, o sítio mais distante da foz do Rio Doce, mas com regressão em 2024 e 2025, quando a cobertura por *Sargassum* spp. volta à tendência de aumento.

O aumento na participação de *Sargassum* spp. (efeitos diretos), bem como a redução competitiva na cobertura por outras algas (efeitos indiretos), são os principais aspectos da alteração constatada, já que *Sargassum* spp. tem elevada tolerância à exposição a metais pesados (CORAÇÃO *et al.* 2020). Estes mecanismos potenciais foram discutidos em relatórios anteriores (e.g. RRDM 2022).

Assim como nas comunidades dos bancos de rodolitos, também dominadas por macroalgas, os oito sítios adjacentes ao litoral apresentaram menor “identidade” quando comparados a recifes coralíneos (Figura 8). Em geral, as amostras se sobrepuseram no diagrama de ordenação, com exceção do sítio D18, no qual a presença marcante de formas corticadas se manteve ao longo de quase todo o período amostral. Além de possuir a maior fração de sedimentos (cerca de 30%), D16, o mais variável dos sítios, apresentou presença marcante de fotossintetizantes filamentosos e algas foliosas. No geral, maiores contribuições de algas foliosas (e.g. *Ulva* spp.) estiveram relacionadas com maiores variabilidades temporais. A variação na contribuição de macroalgas coriáceas, que diferiu entre sítios, também ficou evidente nos diagramas de ordenação com todos os dados.

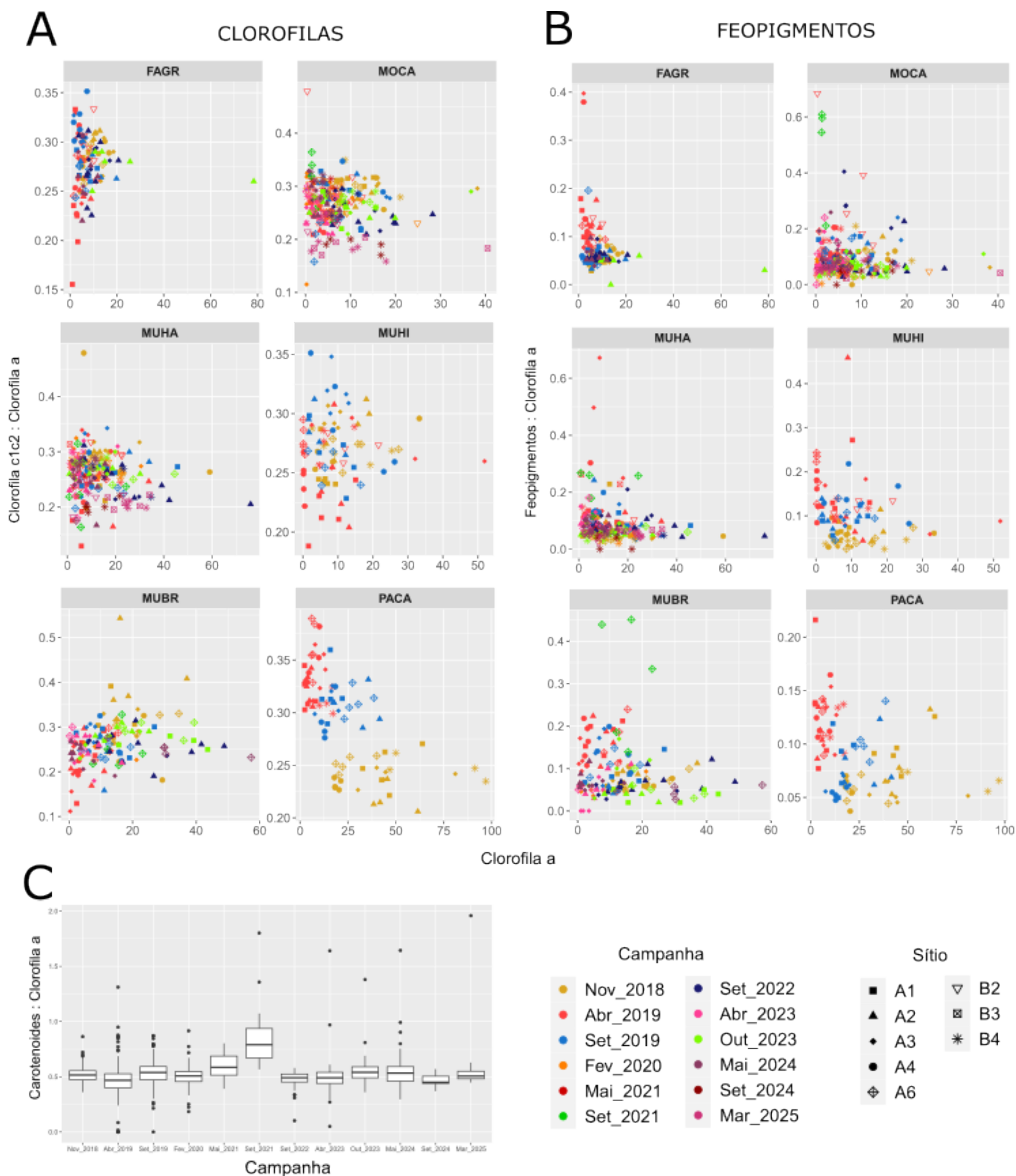
Em resumo, a cobertura por macroalgas apresentou-se como excelente indicador do impacto do rompimento, e o monitoramento realizado pelo PMBA/Fest-UFES revelou uma profunda reorganização na estrutura da comunidade recifal após o rompimento da barragem, a qual passou a ser dominada por algas coriáceas tolerantes a metais pesados. É importante que esse indicador seja monitorado até que a comunidade se recupere e que sejam implementados estudos aplicados com foco em macroalgas, inclusive dado o potencial biorremediador desses organismos (CORAÇÃO *et al.* 2020).

3.3 FISILOGIA DE CORAIS

Esse indicador, *proxy* da saúde de corais, é composto por razões entre pigmentos associados à fotossíntese (clorofilas, feopigmentos) e fotoproteção (carotenoides) (Figura 9) e pela densidade de fotoendossimbiontes i.e. zooxantelas (Figura 10).

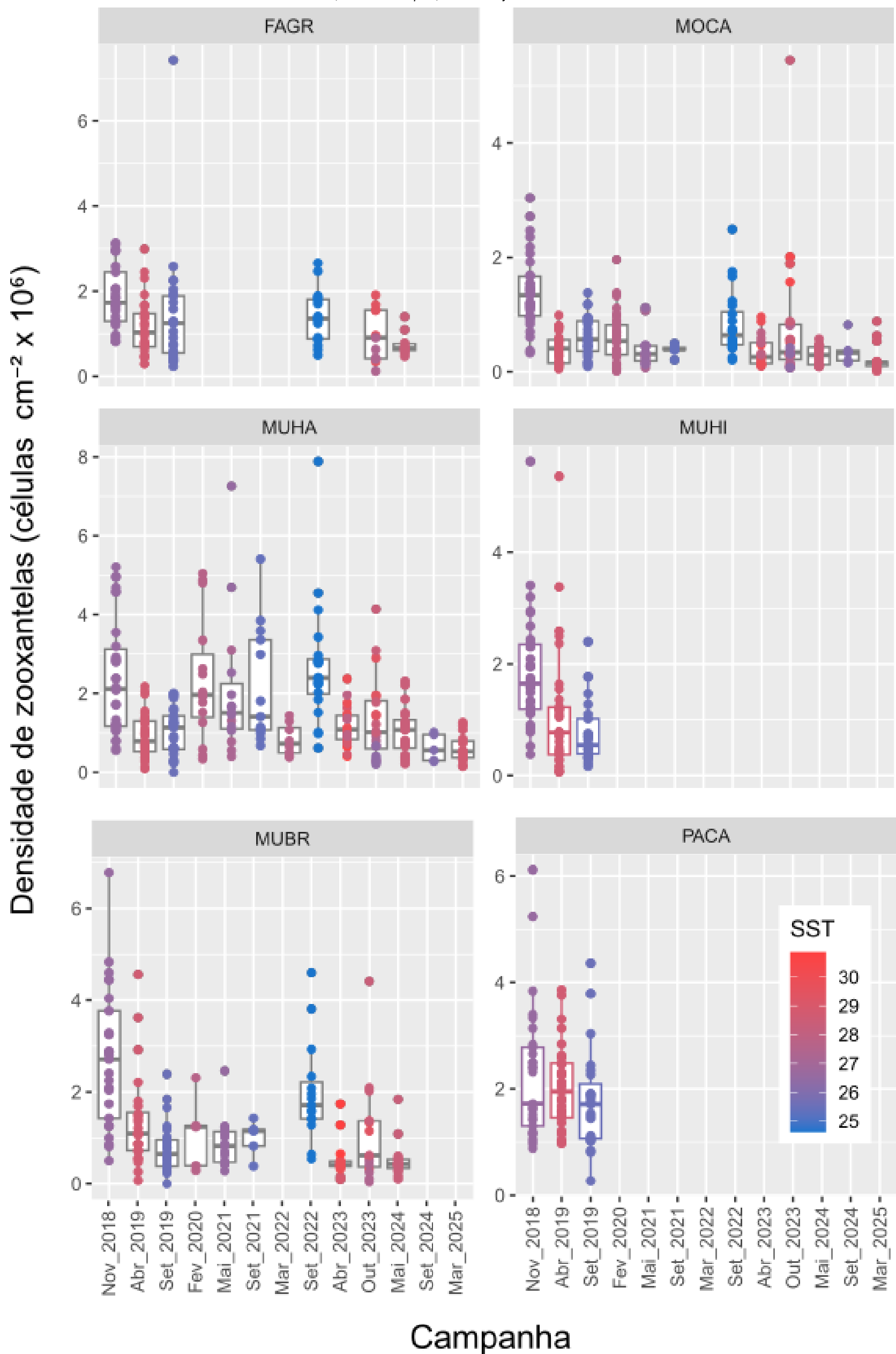
A proporção entre a clorofila a e outras clorofilas indica a composição de grupos taxonômicos nos corais. A razão entre a concentração de feopigmentos e a da clorofila é um indicativo de saúde do holobionte coral. Altos níveis de feofitina em relação a clorofila indicam um organismo menos saudável. Carotenoides são pigmentos fotoprotetores que em baixas concentrações indicam maior suscetibilidade dos corais a irradiância solar.

Figura 9: Razão (em massa) das clorofilas c1 e c2 (A), feopigmentos (B) e carotenoides (C) em função da concentração de clorofila a por unidade de área no tecido de corais (μg clorofila a cm^{-2}) amostradas em Abrolhos (Área A) e nos Recifes Esquecidos (Área B). FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastraea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. harttii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*.



A concentração de clorofila *a* por unidade de área dos corais apresentou ampla variação temporal, com os menores valores associados a anomalia térmica de 2019. A redução nas concentrações de pigmentos clorofilianos nesse período provavelmente reflete um processo de foto-oxidação dos pigmentos pela interação entre luz e o aumento da temperatura, bem como à redução nas densidades e carga pigmentar de fotoendosimbiontes (zooxantelas da família Symbiodiniaceae) (AMBARSARI *et al.*, 1997; KLEPPEL *et al.*, 1989; VENN *et al.*, 2006). No início de 2019 os corais *M. cavernosa* e *M. braziliensis* registraram níveis de redução de até 70% na concentração de clorofila *a*, mostrando a severidade das consequências da anomalia térmica. Após esse evento, as oscilações foram menos pronunciadas e os valores oscilaram durante o restante do monitoramento, no que pode-se considerar a normalidade ou uma linha de base para a situação atual do sistema recifal. Podemos concluir que os corais sobreviventes à anomalia térmica restabeleceram seus níveis de fotoendosimbiontes. As razões entre feofitina e carotenoides e a clorofila *a* foram relativamente mais baixas na primeira campanha (novembro 2018) e aumentaram sensivelmente durante a anomalia térmica, acompanhadas pela redução da biomassa clorofiliana. Esse resultado indica perda de saúde e resistência dos corais. A razão carotenoides:clorofila apresenta valores médios bastante consistentes em torno de 0,5, exceto por uma elevação a aproximadamente 0,7 em setembro de 2021, cuja força é desconhecida. Ressalta-se maior variabilidade entre colônias durante o branqueamento de 2019. Essas linhas de base para pigmentos clorofilianos, suas feofitinas e os carotenoides, que agora, com o compilado dos dados do monitoramento devem ser consideradas de forças diversas na avaliação de efeitos a longo prazo (decadal) sobre o sistema recifal, inclusive para a avaliação de efeitos crônicos, subletais dos contaminantes associados ao Material Ligado ao Desastre (MLD).

Figura 10 . Densidade de zooxantelas por área de tecido (células cm^{-2}) em seis espécies de coral (diferentes janelas temporais entre novembro 2018 – setembro de 2024 para a área A e até março de 2025 para a área B). A cor dos pontos representa a temperatura in situ, conforme escala. FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastraea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. hartii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*.



A densidade de zooxantelas (Figura 10) integra o indicador “fisiologia de corais” e deve ser interpretada em conjunto com os pigmentos. Zooxantelas são essenciais a sobrevivência dos corais e reduções na sua densidade indicam comprometimento da saúde dos corais.

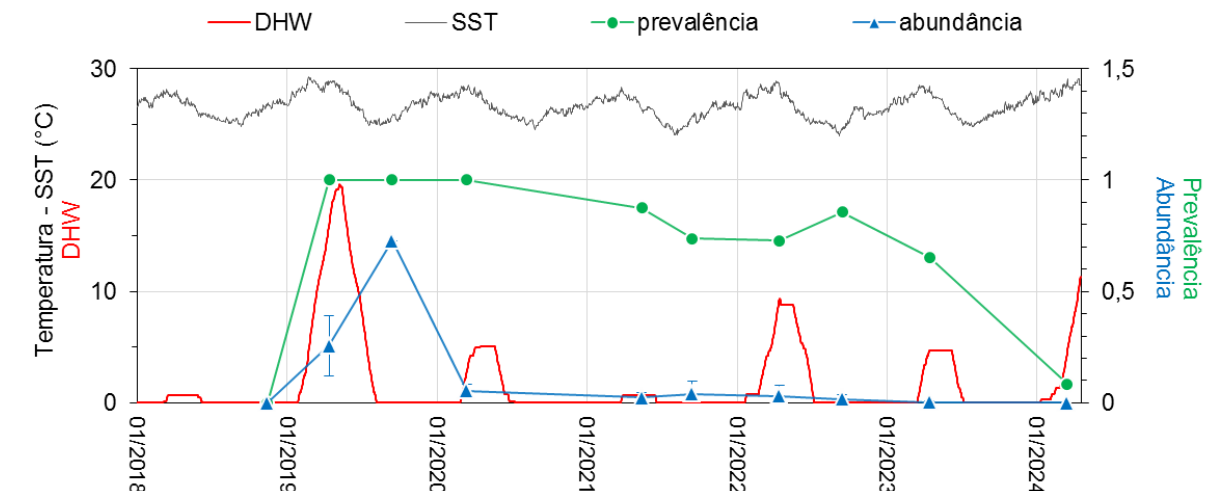
A densidade de zooxantelas foi variável entre indivíduos e espécies de corais (ca. 1 a 6 milhões de células cm^{-2}). O tamanho das zooxantelas - biovolume celular médio - foi ligeiramente maior durante a anomalia térmica, mas retornou à normalidade posteriormente (dados não apresentados). A densidade de zooxantelas convergiu temporalmente com as concentrações e razões pigmentares, incluindo redução acentuada durante a anomalia térmica de 2019. A consistente relação inversa da densidade de zooxantelas com a temperatura, observada até a última campanha realizada no início de 2025 nos recifes Esquecidos, expressa claramente oscilações em resposta a esta forçante, que compõe uma linha de base para avaliação de efeitos a longo prazo do MLD. De forma similar ao que concluímos para os pigmentos clorofilianos e fotoprotetores, a densidade de zooxantelas permanece dentro dos limites que podem ser considerados normais em corais que sobrevivera ao estresse de ondas de calor. Esses resultados apontam para um certo grau de resiliência dos corais. Porém, não podemos inferir quão próximo o sistema se encontra de um ponto de ruptura. O monitoramento das variáveis acerca da fisiologia dos corais mantidos no PMBA/Fest-UFES deve servir como fundamento para uma análise mais robusta em futuros distúrbios que venham a ser causados por fatores globais, regionais ou mesmo reflexo de eventos de remobilização de MLD que podem atingir o sistema.

Em resumo, **as variáveis que compõem o indicador “fisiologia de corais” (Figura 9) não apresentaram tendências que pudessem ser diretamente relacionadas ao rompimento da barragem**, tendo, por outro lado, respondido claramente a variações na temperatura da água, indicando que, dentre as forçantes monitoradas, esta é a que mais influencia o indicador. No entanto, é importante considerar que **anomalias térmicas promovem estresse fisiológico, com potencial interação cumulativa com a contaminação por MLD, já constatada no ambiente recifal** (e.g. CARDOSO *et al.*, 2022; EVANGELISTA *et al.*, 2022). Os efeitos de anomalias térmicas compreendem a principal fonte do declínio global em recifes coralíneos e é fundamental monitorá-los e compreendê-los no contexto da região afetada por MLD, considerando potenciais interações entre esses fatores.

3.4 DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS

Esse indicador foi removido da atual fase do monitoramento. Porém, faz-se aqui uma atualização com dados que estavam sendo produzidos quando do fechamento do relatório anterior. Será dado destaque para a análise da diversidade genética de zooxantelas que revelou a presença de *Symbiochlorum necroappetens* (VILLELA *et al.* 2025), uma espécie oportunista que infesta tecidos de corais necrosados, tipicamente em situações de branqueamento causado por estresse térmico. *S. necroappetens* esteve abaixo da detecção nas amostras da primeira campanha, no final de 2018, aumentando abruptamente tanto em prevalência (número de corais com presença da espécie) quando em abundância relativa (proporção da espécie em relação ao total da comunidade de zooxantelas) a partir da anomalia térmica de 2019 (Figura 11).

Figura 11. Prevalência e abundância relativa de *Symbiodinium necroappetens* em corais no sítio A, Abrolhos, entre novembro de 2018 e o março de 2024. O gráfico mostra também valores de DHW (Degree Heating Week, NOAA, calor acumulado na água) e a temperatura da água em °C (SST).



A prevalência de *S. necroappetens* permaneceu acima de 70% até o final de 2022 e vem declinando, tendo atingido ca. 7% em março de 2024. Esse é o primeiro registro dessa espécie fora do seu habitat original, o Caribe. Sua ocorrência está claramente associada ao estresse térmico e ao declínio na composição e cobertura recifal em Abrolhos (CARDOSO et al. 2025). A presença e abundância de *S. necroappetens* na comunidade de simbiontes pode ser um importante indicador de danos precoces aos corais e ao funcionamento do sistema recifal. Sugere-se a reincorporação do indicador ao monitoramento.

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

Ao longo da execução do PMBA/Fest-UFES foram selecionados sete indicadores para o tema Fundos Recifais e Bancos de Rodólitos, discriminados abaixo. Indicadores são medidas que sinalizam o estado e a saúde de um ecossistema, sendo amplamente utilizados para identificar mudanças temporais ou contrastes espaciais. Embora desempenhem um papel relevante na compreensão de consequências de impactos ambientais, sendo particularmente úteis na gestão ambiental, vale lembrar que indicadores não fornecem um panorama abrangente e compreensivo acerca das perdas e danos à biodiversidade em uma área impactada. Os dados dos seis anos de monitoramento do PMBA/FEST-UFES, iniciado dois anos após o rompimento da barragem de Fundão, juntamente com dados antecedentes ao evento, oriundos do PELD Abrolhos, revelam **alterações significativas em indicadores que incidem sobre diferentes níveis de organização dos recifes e bancos de rodólitos da área estudada**. Trata-se de um contexto no qual é possível afirmar que esses ecossistemas receberam materiais associados ao rompimento e sofreram alterações estruturais e funcionais, incluindo perda de diversidade, na vasta

região marinha que vai da costa central do Espírito Santo até o sul da Bahia, incluindo os Recifes Esquecidos e Abrolhos, o complexo coralíneo mais biodiverso do Atlântico Sul. A partir de 2025 houve redução no escopo do Projeto e foram descontinuadas as análises comparativas entre as áreas mais distantes e mais próximas da Foz e entre os contextos pré- e pós-rompimento.

Indicador 1, Cobertura bêntica de recifes coralíneos. Nos recifes coralíneos, houve alteração na estrutura e na dinâmica das comunidades após o rompimento da barragem, confirmada pelos contrastes realizados na Área A, Abrolhos e adjacências, para onde haviam dados antecedentes. O indicador não mostrou retorno para a condição observada antes do rompimento. Outros resultados da pesquisa realizada pelo Tema, tratados adiante (“Considerações sobre os ambientes monitorados”, abaixo), indicam chegada e incorporação de materiais associados ao rompimento nos corais de Abrolhos. No âmbito da Deliberação CIF nº 803, as análises desse indicador não incluem os sítios de Abrolhos e adjacências.

Indicador 2, Cobertura bêntica de bancos de rodolitos. Não houve alteração nesse indicador, muito embora tenham sido constatados outros impactos associados ao rompimento da barragem em rodolitos (veja “Considerações sobre os ambientes monitorados”, abaixo). As análises desse indicador foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

Indicador 3, Cobertura bêntica dos recifes adjacentes ao litoral da APA Costa das Algas. Nesses recifes, o rompimento afetou drasticamente a cobertura por macroalgas, a qual passou a ser dominada por algas coriáceas tolerantes a metais pesados. O indicador não mostrou retorno à condição observada antes do rompimento.

Indicador 4, Fisiologia de corais. Variáveis relacionadas a concentração e razões de pigmentos clorofilianos e fotoprotetores e da densidade de zooxantelas mostraram variações temporais relacionadas a temperatura, marcadamente pelo evento de anomalia térmica no início de 2019, que levaram ao branqueamento de corais. Os dados do monitoramento revelaram as amplitudes de oscilação dos componentes do indicador constituindo informação básica para a análise de tendências a médio e longo prazo dos efeitos do MLD no sistema recifal.

Indicador 5, Diversidade genética de simbioses de corais. A riqueza e diversidade genética de zooxantelas e bactérias simbioses de corais mostram fortes contrastes espaço-temporais e entre espécies de hospedeiro. Não é possível afirmar se as mudanças observadas refletem a dinâmica populacional natural dos simbioses ou se houve influência dos contaminantes decorrentes do rompimento. Em contrapartida, a detecção de uma espécie de simbiote em particular (a zooxantela *Symbiodinium necroappetens*) se mostra como um potencial organismo indicador da saúde dos corais. As análises desse indicador foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803. Sugerimos sua reincorporação em vista da descoberta do papel indicador de *S. necroappetens*.

Indicador 6, Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em estruturas recifais e bancos de rodolitos. Nos recifes costeiros da APA Costa das Algas, a concentração de hematita se destacou como possível assinatura da descarga sedimentar do Rio Doce, com atenuação linear persistente em

função da distância da sua foz. Nas demais áreas, a detecção desse polimorfo mineral, ainda que em baixas concentrações, também pode estar relacionada à descarga sedimentar do Rio Doce. Embora a detecção de sedimentos ferrosos não represente nexos causal inequívoco com o rompimento, a associação entre sedimentos ferrosos e o rompimento foi demonstrada através de outras pesquisas realizadas no entorno da "Lista de Impactos Marinhos". Neste sentido, conforme apresentado em RRDM (2020, 2021, 2022) e FEST (2023), detectamos: 1) similaridades entre assinaturas microestruturais e químicas de partículas minerais ferrosas nos sedimentos marinhos e aquelas oriundas da barragem, 2) partículas de óxidos de ferro sobre talos de macroalgas, com assinatura microestrutural e química similar aos sedimentos da barragem, e 3) alterações celulares em macroalgas na APA Costa das Algas, com incorporação subcelular de íons de ferro. Outras evidências, também relacionadas à "Lista de Impactos Marinhos", são tratadas ("Considerações sobre os ambientes monitorados"). As análises desse indicador foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

Indicador 7, Taxas de colonização de organismos sésseis em estruturas recifais. Nos recifes da Área A (Abrolhos) o rompimento afetou processos de colonização por organismos sésseis, com associação entre o evento e alterações nos padrões de cobertura por organismos construtores e não-construtores e nas taxas anuais de acreção carbonática (massa calcária). Menores taxas de recrutamento de corais foram detectadas nos Recifes Esquecidos, sob influência da pluma do Rio Doce.

Em resumo, conclui-se que os recifes coralíneos e bancos de rodólitos da região estudada receberam material ligado ao desastre, com alterações detectadas nos níveis subcelular, celular, metabólico, de indivíduos, comunidades e processos ecossistêmicos, muitas delas sem retorno às condições registradas antes do rompimento. As análises desse indicador foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos para o Tema.

6 REFERÊNCIAS

- AMBARSARI, I., BROWN, B.E., BARLOW, R.G., BRITTON, G., CUMMINGS, D. Fluctuations in algal chlorophyll and carotenoid pigments during solar bleaching in the coral *Goniastrea aspera* at Phuket, Thailand. Marine Ecology Progress Series, 159:303–307.1997.
- BABIN, A., BIARD, C., MORET, Y. Dietary supplementation with carotenoids 19 improves immunity without increasing its cost in a crustacean. The American Naturalist, 20 (176): 234–241. 2010.
- BOLGER, A.M.; LOHSE, M.; USADEL, B. Trimmomatic: A flexible trimmer for Illumina sequence data. Bioinformatics, 30 (15): 2114–2120. 2014.

- BRASILEIRO, P.S., PEREIRA-FILHO, G.H., BAHIA, R.G. et al. Macroalgal composition and community structure of the largest rhodolith beds in the world. *Marine Biodiversity*, 46 (2): 407–420. 2016.
- BUESSELER, K. O., LAMBORG, C. H., BOYD, P. W., LAM, P. J., TRULL, T. W., BIDIGARE, R. R., BISHOP, J. K., CASCIOTTI, K. L., DEHAIRS, F., ELSKENS, M., HONDA, M., KARL, D. M., SIEGEL, D. A., SILVER, M. W., STEINBERG, D. K., VALDES, J., VAN MOOY, B., & WILSON, S. Revisiting carbon flux through the ocean's twilight zone. *Science*, 316 (5824): 567–570. 2007.
- BURNS J, DELPARTE D, GATES RD, TAKABAYASHI M. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. *PeerJ*, 3 (1077). 2015.
- VILLELA L.B., AIUBE Y.R., SILVA-LIMA A.W., MOURA R.L., SALOMON P.S. Symbiodinium necroappetens outbreak and persistence in Southwestern Atlantic corals following a bleaching event. *Coral Reefs*. Jun 23. 2025.
- CARDOSO F.C., CARNEIRO I.M., CASTRO G.M., CARDOSO G.O., SHIMADA A., PEREIRA M.S., VILLELA L.B., SALOMON P.S., MOURA R.L. Nowhere to hide: massive corals' mortality after cumulative heat stress in a putative climate change refugium. *Coral Reefs* 44:321–337. 2025.
- CARDOSO, G.O.; FALSARELLA, L.N.; CHIROQUE-SOLANO, P.M. PORCHER, C.C., LEITZKE, F.P., WEGNER, A.C., CARELLI, T., SALOMON, P.S., BASTOS, A.C., SÁ, F., FALLON, S., SALGADO, L. T., MOURA, R.L. Coral growth bands recorded trace elements associated with the Fundão dam collapse. *Science of the Total Environment*, 807 (2):150880. 2022.
- CARNEIRO, I.M., SÁ, J.A., CHIROQUE-SOLANO, P.M., CARDOSO, F.C., CASTRO, G.M., SALOMON, P.S., BASTOS, A.C., MOURA, R.L. Precision and accuracy of common coral reef sampling protocols revisited with photogrammetry. *Marine Environmental Research*, 194, 106304. 2024.
- CLARKE, K.R., WARWICK, R.M. Change in marine communities: an approach to statistical analyses and interpretation. PRIMER-E Ltd. 2001.
- CORAÇÃO, A.C.S. et al. What do we know about the utilization of the Sargassum species as biosorbents of trace metals in Brazil? *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (4):103941. 2020.
- COSGROVE, JEFF; BOROWITZKA, MICHAEL A. Chlorophyll fluorescence terminology: an introduction. *Springer*, 4: 1–17. 2010.
- DARLING, E.S. et al. Evaluating life-history strategies of reef corals from species traits. *Ecol. Lett*, 15:1378–1386. 2012.
- EDGAR, R. C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*, 26(19):2460–2461. 2010.

- FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/FEST – RT-43, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 193 pag. 2023.FIGUEIRA, W., FERRARI, R., WEATHERBY, E., PORTER, A., HAWES, S., AND BYRNE, M. Accuracy and precision of habitat structural complexity metrics derived from underwater photogrammetry. *Remote Sens*, 7:16883–16900. 2015.
- FUKAMI, H., BUDD, A.F., PAULAY, G., SOLÉ-CAVA, A., ALLEN, C.C., IWAIO, K., KNOWLTON, N. Conventional taxonomy obscures deep divergence between Pacific and Atlantic corals. *Nature*, 427(6977):832-5. 2004.
- GOLDBERG, W.M. The biology of reefs and reef organisms. University of Chicago Press, 401pp. 2013.
- GOLDER. Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão, Avaliação do estado de conservação dos bancos de macroalgas e rodólitos adjacentes à Foz do Rio Doce. Submetido à Samarco Mineração S/A. 2016.
- HUME, B. C. et al. An improved primer set and amplification protocol with increased specificity and sensitivity targeting the Symbiodinium ITS2 region. *PeerJ*, 6, e4816. 2018.
- HUME, B. C. et al. SymPortal: A novel analytical framework and platform for coral algal symbiont next-generation sequencing ITS2 profiling. *Mol. Ecol. Resour.*, 19:1063–1080. 2019.
- KLEPPEL, G.S.; DODGE, R.E.; REESE, C.J. Changes in pigmentation associated with the bleaching of stony corals. *Limnology and Oceanography*, 34(7), 1331–1335. 1989.
- KLINDWORTH, A. PRUESSE, SCHWEER, T. PEPLIES, T., QUAST, C., HORN, M., GLÖCKNER, O.F. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic Acids Res.* 41(1). 2013.
- KOHLER K.E.; GILL, S.M. Coral Point Count with Excel extensions (CPCe): A Visual Basic program for the determination of coral and substrate coverage using random point count methodology. *Computers & Geosciences*, 32:1259–1269. 2006.
- NEVEUX, J.; LANTOINE, F. Spectrofluorometric assay of chlorophylls and phaeopigments using the least squares approximation technique. *Deep-Sea Res. I*, 40(9):1747–1765. 1993.
- OKSANEN, J. et al. The vegan package. *Community ecology package*, 10:719. 2007.
- PARSONS, T.R., MAITA, Y., LALLI, C.M. (eds). *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, New York. 173 p. 1984.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- REIS, V.M., KAREZ, C.S., MARIATH, R., DE MORAES, F.C., CARVALHO, R.T., BRASILEIRO, P.S., BAHIA, R.G., LOTUFO, T.M.C., RAMALHO, L. V., MOURA, R.L. et al. Carbonate production

- by benthic communities on shallow coralgall reefs of Abrolhos Bank, Brazil. *Plos One*, 11(4), p.21. 2016.
- RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2020.
- RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2021.
- RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 2022.
- SCHERNER, F., HORTA, P.A., DE OLIVEIRA, E. C., SIMONASSI, J.C. et al. Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 76(1-2):106-115. 2013.
- SHEPPARD C. Large temperature plunges recorded by data loggers at different depths on an Indian Ocean atoll: comparison with satellite data and relevance to coral refuges. *Coral Reefs*, 28: 399–403. 2009.
- SZCZUCIŃSKI, W., NIEDZIELSKI, P., KOZAK, L., FRANKOWSKI, M., ZIOŁA, A., LORENC, S. Effects of rainy season on mobilization of contaminants from tsunami deposits left in a coastal zone of Thailand by the 26 December 2004 tsunami. *Environmental Geology*, 53: 253–264. 2007.
- STENECK, ROBERT S., DETHIER, M.N. A Functional Group Approach to the Structure of Algal-Dominated Communities. *Oikos* 69(3):476–98. 1994.
- SUN, J., LIU, D. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton, *Journal of Plankton Research*, 25(11): 1331–1346. 2003.
- TENÓRIO, M.B., BORGNE, R. L., RODIER, M., NEVEUX, J. The impact of terrigenous inputs on the Bay of Ouinné (New Caledonia) phytoplankton communities: A spectrofluorometric and microscopic approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64:531–545. 2005.
- TITSCHACK, J., GOETZ-NEUNHOEFFER, F., NEUBAUER, J. Magnesium quantification in calcites [(Ca,Mg)CO₃] by Rietveld-based XRD analysis: Revisiting a well-established method. *American Mineralogist*, 96(7): 1028–1038. 2011.
- VENN, A.A., VENN A., WILSON M.A., TRAPIDO-ROSENTHAL, G.H., KEELY, B.J., DOUGLAS A.E. The impact of coral bleaching on the pigment profile of the symbiotic alga, *Symbiodinium*. *Plant, Cell & Environment*, 29(12):2133–2142. 2006.
- WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30:377–392. 1922.