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- 55/ OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

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

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 8

2.1.4 Fisiologia de corais 11

2.1.5 Diversidade genética de simbiontes de corais 11

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 12

2.1.8 Obtenção de amostras de água e organismos, disponibilizando o material para análises de concentração de metais 12

2.2 ANÁLISE 12

2.2.1 Cobertura bêntica de recifes coralíneos e recifes adjacentes ao litoral 12

2.2.2 Fisiologia de corais 13

2.2.3 Diversidade genética de simbiontes de corais 15

2.2.4 Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodolitos 16

2.2.5 Produção de $CaCO_3$ e colonização de organismos em estruturas artificiais 16

2.2.6 Variáveis físico-químicas da água na malha amostral do projeto 16

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 16

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2024: SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES 17

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 17

3.1 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES CORALÍNEOS 18

3.2 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES ADJACENTES AO LITORAL DA APA COSTA DAS ALGAS 21

3.3 FISIOLOGIA DE CORAIS 24

3.4 DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS 27

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

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

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

2 METODOLOGIA

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

2.1 COLETA

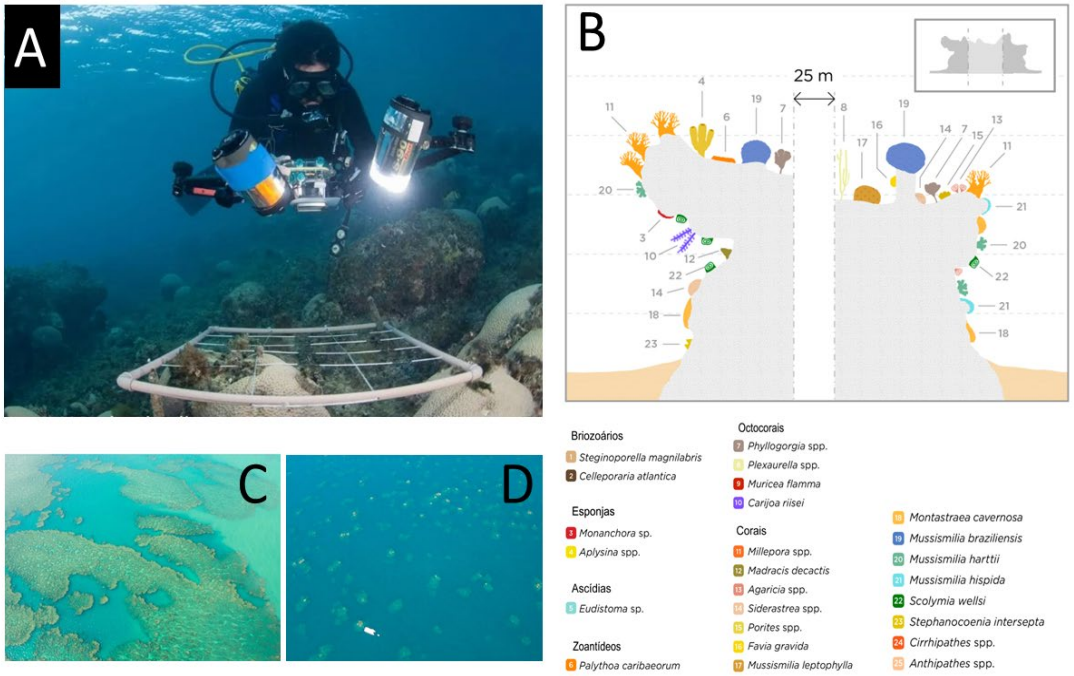
2.1.1 Cobertura bêntica de recifes coralíneos

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 45º, no sentido de minimizar sombras e *backscatter* de partículas em suspensão. As parcelas (0,5 m^2) 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).

A cobertura 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, 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. As análises por ortomosaicos foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

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 análises da cobertura bêntica de bancos de rodolitos foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

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 2), 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 m^2, por ser impraticável deslocar estruturas maiores.

Figura 2: Imageamento dos recifes adjacentes ao litoral (APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz).



Anotação

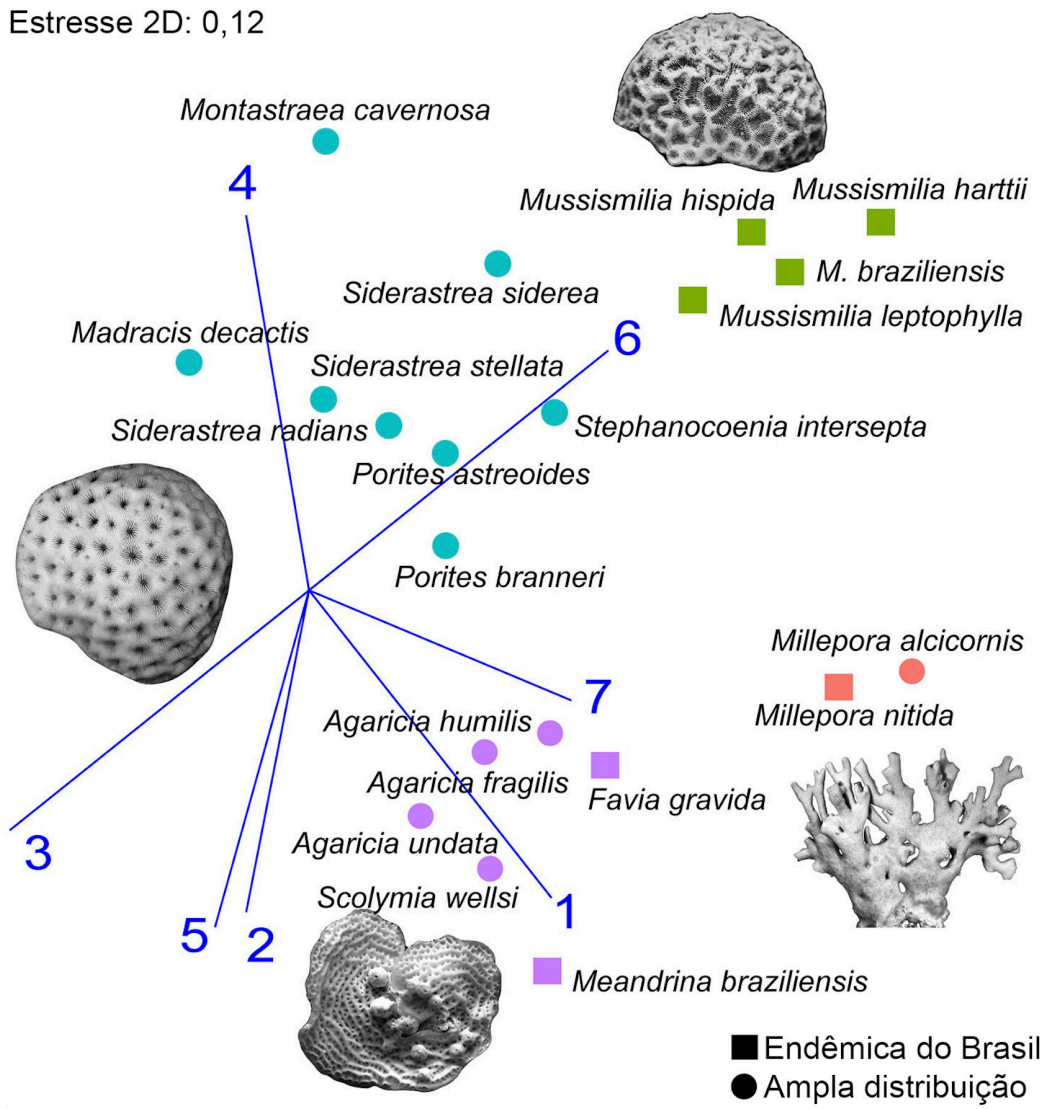
As imagens foram anotadas semiautomaticamente com uso da rede neural da plataforma CoralNet (BEIJBON *et al*. 2012), usando um limiar de confiança de 80% e todas as anotações foram conferidas manualmente pelos pesquisadores. Outros parâmetros de configuração (e.g., *label accuracy*, *fraction above threshold*) 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 m^2). Para os bancos de rodolitos foram usados 45 pontos para cada imagem de *dropcam* (0,5 m^2). Para os recifes adjacentes ao litoral foram usados 45 pontos para cada imagem de *dropcam* acrílica (0,2 m^2) 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 sete grupos de atributos e o procedimento de ordenação descrito em DARLING *et al*. (2012) e CARLOS Jr *et al.* (2026). A análise revelou quatro grupos funcionais (GF) (Figura 3). O GF MUSSISMILIAS foi composto por espécies massivas, longevas (vivem por décadas) e de crescimento relativamente rápido (~1cm.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 3: Diagrama de Ordenação (NMDS) baseado nos atributos morfofuncionais de todas as espécies de corais registradas no estudo, evidenciando os quatro grupos funcionais (discriminados por cores). Os números representam os seguintes atributos: 1) taxa de crescimento; 2) densidade esqueletal; 3) reprodução (incubador); 4) forma de crescimento (massivo); 5) forma de crescimento (encrustante);6) reprodução ("broadcast"); 7) reprodução (fragmentação). Adaptado de CARLOS Jr *et al*. (2026).



Para os recifes adjacentes ao litoral, dominados por macroalgas, a caracterização funcional foi adaptada de STENECK, DETHIER (1994) e VELEZ-RUBIO *et al*. (2021) (Quadro 1).

Quadro 1: 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**: *Centroceras*, *Chamaedoris penicilum*, Chadophora, *Gracilaria*, *Chaetomorpha*, *Polisphonia*, *Meristotheca, Turf* e cianobactérias.
2 - Macroalgas foliosas corticadas	Textura rugosa, consistência dura, corticadas. Talo flexível. **Exemplos**: *Anadyomne*, *Caulerpa prolifera*, *Cryptonemia*, Dictyotaceae, *Halymenia*, *Osmundaria*, *Stypopodium.*
3 - Macroalgas corticadas	Textura de borracha ou esponjosa, consistência dura. Frondes corticadas. Talo compacto com baixa ramificação, ereto e com eixos grossos. **Exemplos**: *Asparagopsis*, *Botryocladia*, *Caulerpa* (exceto *C. prolifera*), *Codium*, *Dictyosphaeria*, *Gelidiales*, *Hypnea*, *Laurencia*, *Neomeris*, *Ochtodes*, *Penicillus*, Udoteaceae, *Valonia.*
4 - Macroalgas coriáceas	Textura rugosa e coriácea, consistência dura. Fucales e Laminaliares. **Exemplos**: *Sargassum*, *Lobophora*, *Padina*, *Spatoglossum*, *Zonaria.*
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**: *Ulva.*
7 - Articuladas	Consistência pedregosa, textura áspera com ramificação e eixos eretos. **Exemplos**: *Amphiroa*, *Halimeda*, *Jania*, *Tricleocarpa.*

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 simbiontes 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 simbiontes da família Symbiodiniaceae) e bacteriana (auto e heterotrófica) associada aos corais. As análises da diversidade genética de simbiontes 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 rodolitos

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.

2.1.7 Produção de $CaCO_3$ e colonização de organismos em estruturas artificiais

As análises da produção de CaCO3 e colonização de organismos em estruturas artificiais foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803.

2.1.8 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 (-18ºC), tendo sido enviados para a 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 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 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, especialmente Escalonamento Multidimensional não-métrico (nMDS). Os dados foram analisados com e sem transformações dos percentuais de cobertura. Os diagramas de nMDS incluíram dados de ambos os semestres. 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. Visando controlar possíveis influências da sazonalidade, as PERMANOVA foram feitas considerando apenas dados dos primeiros semestres. 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 também 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 significativa 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 simbiontes (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 µL 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 estensions, CPCe (KOHLER & GILL, 2006). Os valores de contagem celular foram normalizados pela área raspada, assim como as concentrações pigmentares. As densidades foram expressas em células de *Symbiodineaceae* 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 90µm e fluxo de 100µL 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 (μm^3 $célula^{-1}$) através da aproximação do formato de um esferoide prolato (SUN & LIU, 2003).

Para análise pigmentar, alíquotas de 500µL a 1mL de suspensão de tecido de coral contendo os simbiontes 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 (Fv/Fm’), taxa máxima relativa de transporte de elétrons

(rETRm) e irradiância mínima saturante (Ek) (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 sequencias 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

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 análises de produção de CaCO3 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. 150 km da costa do Espírito Santo, 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. 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 sonda multiparamétrica (SeaGuard-Aanderaa). As perfilagens foram feitas 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 Rodolitos, 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 e foram compiladas com frequência semestral.

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 PMBA Fest-UFES. Na malha amostral, a partir de 2025, foram mantidos 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 rodolitos, (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.

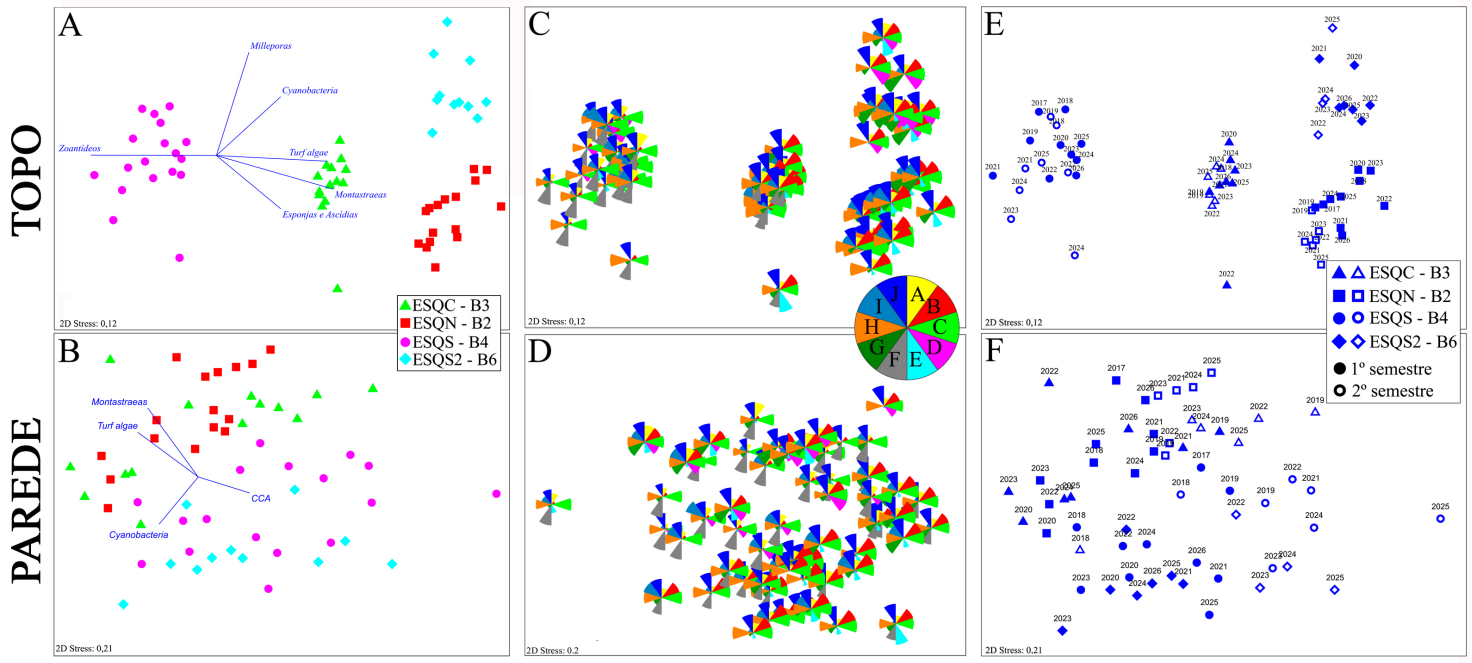
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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.

3.1 COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES CORALÍNEOS

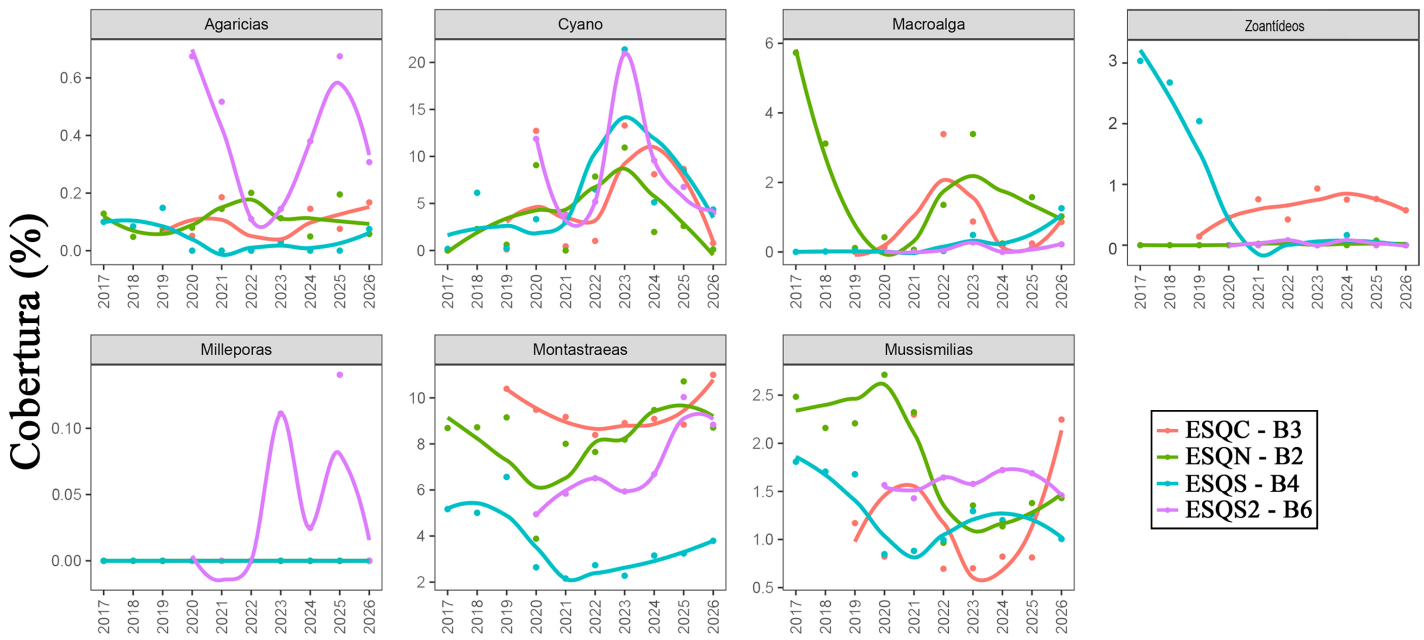
Figura 4: Dinâmica da cobertura recifal dos Recifes Esquecidos após o rompimento da barragem. SÍTIOS: ESQN - B2 = Esquecidos Norte; ESQC - B3 = Esq. Central; ESQS - B4 = Esq. Sul; ESQS2 - B6 = Esq. Sul 2. LEGENDAS: Painéis A e B: Ordenação (nMDS) com correlações de Pearson (>0,5) baseada nas coberturas (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=CIANOBACTÉRIAS, 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.



G RECIFES ESQUECIDOS - TOPO



H RECIFES ESQUECIDOS - PAREDE



A Figura 4 traz os dados coletados no âmbito do PMBA/Fest-UFES nos Recifes Esquecidos. A tendência temporal ao longo do monitoramento (Figura 4G) foi de declínio na cobertura por corais-cérebro (MUSSISSMILIAS), endêmicos do Brasil e ameaçados, e de aumento na cobertura de corais de crescimento rápido (AGARICIAS) nos topos dos recifes. Ainda nos topos, o aumento na cobertura de macroalgas, observado após 2019, foi revertido, com valores de 2025 mais próximos aos do início da série temporal. A cobertura por zoantídeos, organismos tolerantes à sedimentação, também apresentou redução nos topos a partir de 2022. Nas paredes, cuja cobertura coralínea é dominada por corais massivos (MONTASTAEAS), a tendência geral de declínio, registrada entre 2017 e 2021, foi revertida, com coberturas em 2025 e 2026 mais próximas àquelas registradas no início da série temporal.

Os nMDS com dados de topo (Figura 4A, 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 4B, D e F), a identidade de sítio é menos evidente do que nos topos, mas a PERMANOVA detectou diferenças significativas entre sítios (Tabela 1) e variabilidade temporal igualmente significativa.

As tendências temporais estimadas por meio do modelo de suavização LOESS (Figura 4G-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 de MUSSISMILIAS, corais massivos e longevos endêmicos do Brasil. Em todos os sítios, exceto B2, houve redução na cobertura por MUSSISMILIAS, ao longo do monitoramento. 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 a mais elevada variabilidade temporal.

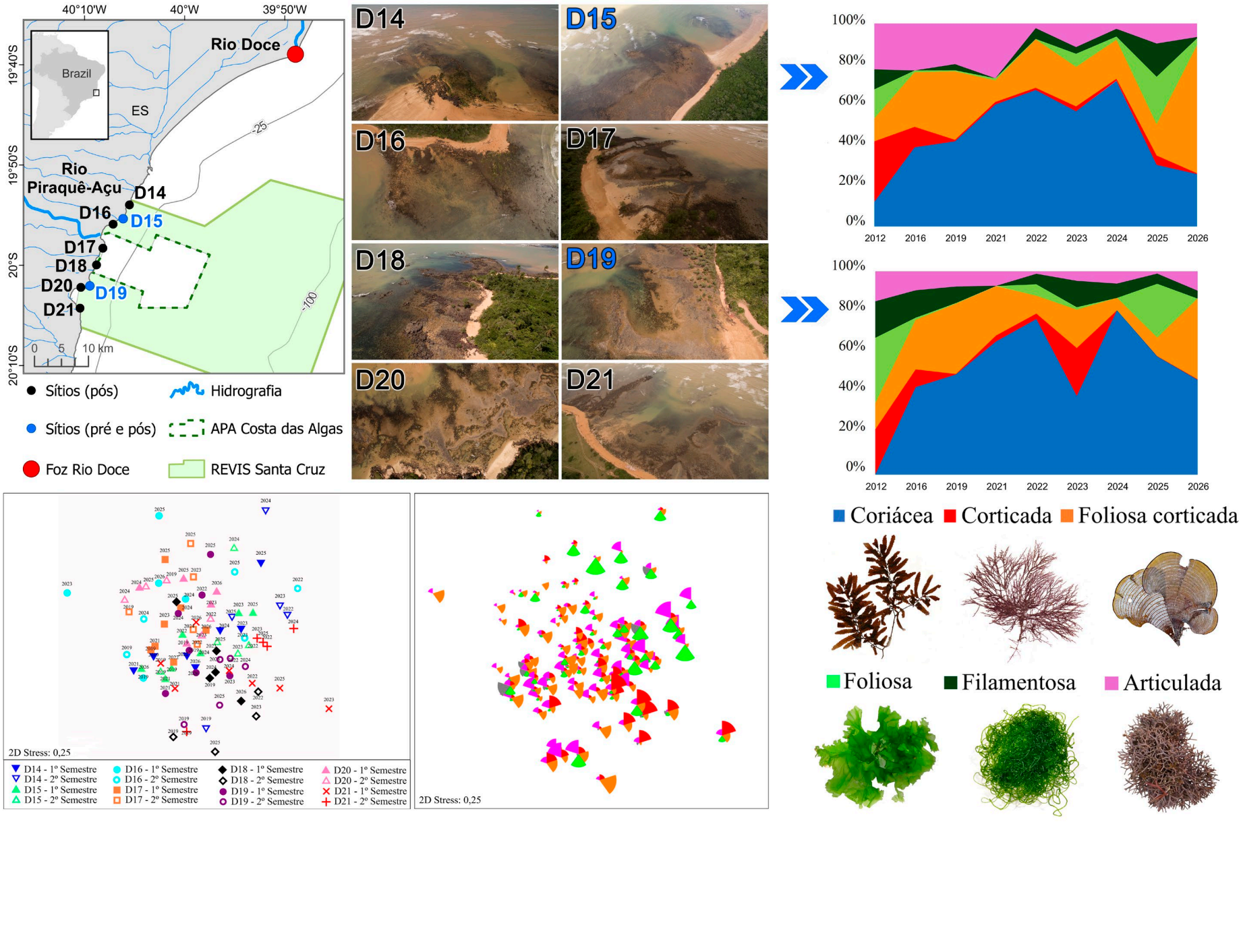
Nas paredes foi observado aumento na cobertura por MONTASTRAEAS em B6. AGARICIAS e MILLEPORAS, corais de baixa cobertura em todos os sítios analisados, tiveram a cobertura aumentada em B6, sobretudo em 2025. Assim como no topo, a cobertura por CIANOBACTÉRIAS apresentou grande variabilidade temporal.

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	1,37E+05	45666	126,33	0,001	22,628
Ano	9	21767	2418,6	66,906	0,001	72,993
Sítio x Ano	22	13010	591,36	16,359	0,003	45,853
Resíduos	361	1.31E+08	361,49			19,013
Total	395	3.17E+09				
PAREDES	df	SS	MS	Pseudo-F	P(perm)	VC
Sítio	3	18924	6307,8	24,624	0,001	83,241
Ano	9	28469	3163,2	12,348	0,001	87,429
Sítio x Ano	22	13265	602,97	23,539	0,001	5,678
Resíduos	354	90681	256,16			16,005
Total	388	1.52E+09				

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

Figura 5: 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 cobertura por macroalgas coriáceas (*Sargassum* spp.), com tendência de redução a partir de 2022. Os painéis inferiores à esquerda 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”, 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 5), confirmando uma tendência temporal relevante para avaliação dos efeitos do rompimento: o aumento na participação relativa de algas coriáceas, mais tolerantes à contaminação por metais, entre 2018 e 2022, seguido por uma tendência de recuperação a partir de 2022/2023.

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. RT39D, Fest, 2022) e em duas publicações oriundas do PMBA (CARNEIRO *et al*., 2026; MOURA *et al*., 2026). Em 2025/2026 foi observado um sinal mais pronunciado de redução na cobertura de algas coriáceas (Figura 5). Esse resultado pode refletir tanto um evento pontual quanto o desenvolvimento de uma tendência de declínio. Ressalta-se o registro de um evento local de sedimentação em D21, no primeiro semestre de 2026, causado por obras na zona costeira (MOURA *et al*., 2026).

Uma elevada variabilidade sazonal foi observada na cobertura da comunidade bentônica na APA Costa das Algas. De modo geral, os dados de verão evidenciam predominância de algas coriáceas e corticadas foliáceas, padrão associado ao regime de hidrodinamismo mais ameno, com menor altura das ondas. Já durante o inverno, período de maior hidrodinamismo, é observada uma predominância de algas calcárias articuladas (CARNEIRO *et al*., 2026).

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 5). 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 (Figura 5).

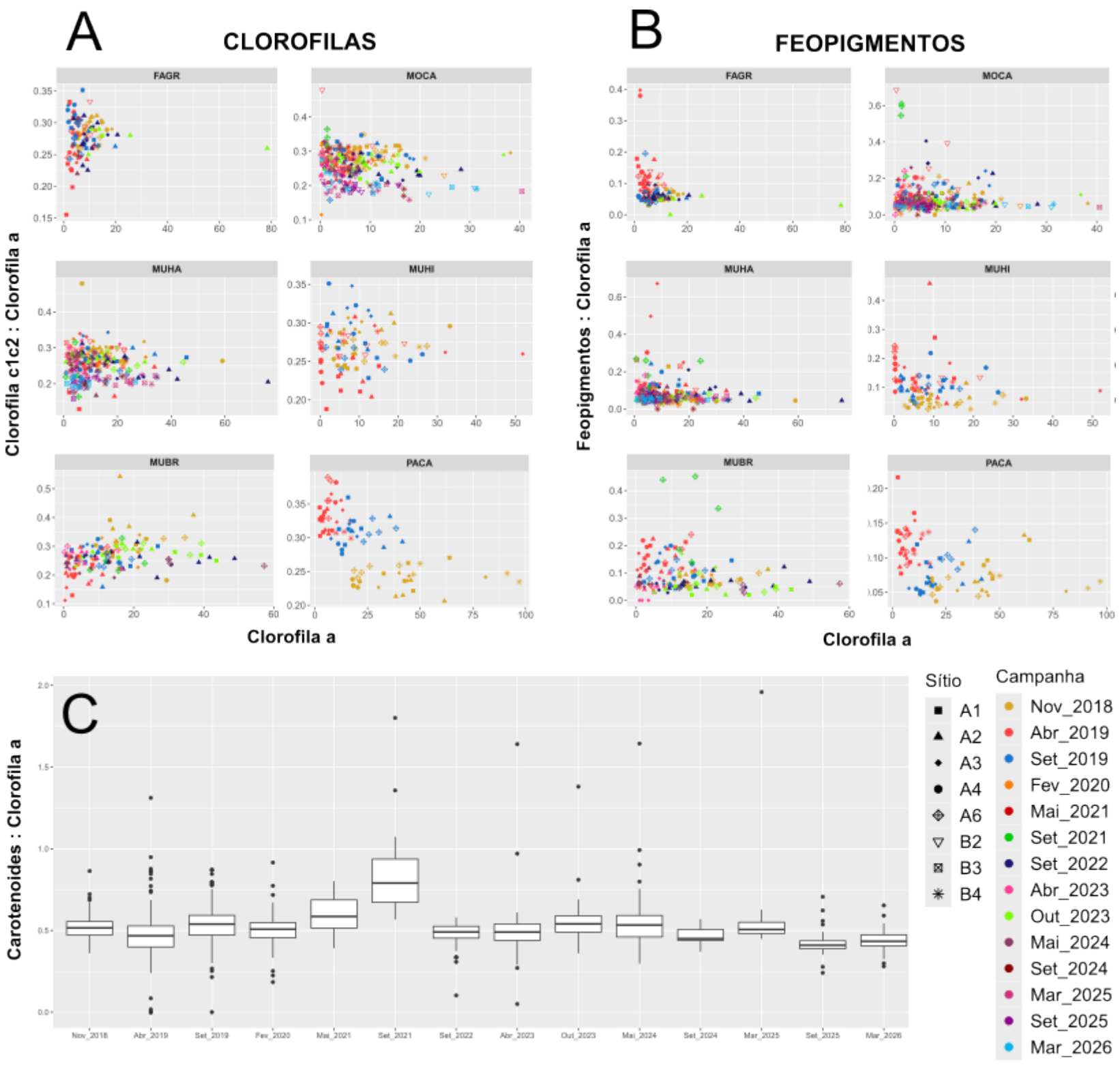
A comunidade bentônica apresentou elevada variabilidade espacial, tanto em escalas finas, entre réplicas, quanto em escalas maiores, entre sítios, indicando a atuação simultânea de processos locais e regionais na estruturação do sistema. As diferenças entre sítios parecem estar associadas com a influência dos rios Piraquê-Açu e Doce, que podem alterar condições como turbidez, aporte de

sedimentos e disponibilidade de nutrientes. Além disso, a importância da distância da foz do Rio Doce também pode ser um indicativo do impacto do rompimento da barragem. Em escalas menores, a variabilidade entre réplicas é provavelmente impulsionada por processos ecológicos locais, incluindo interações biológicas (como competição e herbivoria), padrões de dispersão e recrutamento de propágulos, além da heterogeneidade e complexidade do substrato. Esses fatores, ao atuarem de forma combinada, promovem mosaicos espaciais altamente heterogêneos, característicos de comunidades bentônicas costeiras (CARNEIRO *et al*., 2026).

Em resumo, o indicador mostrou-se valioso para avaliar os efeitos do rompimento e de outras fontes de variação espaço-temporal nos recifes costeiros. Após o evento houve aumento na cobertura de algas coriáceas, com tendência de redução a partir de 2022. É importante continuar avaliando o indicador para subsidiar o manejo das UCs e a possível recuperação da comunidade bentônica, que é influenciada pela proximidade de rios sob acelerado processo de degradação e destruição de habitats costeiros devido à expansão urbana e construção de vias.

3.3 FISIOLOGIA DE CORAIS

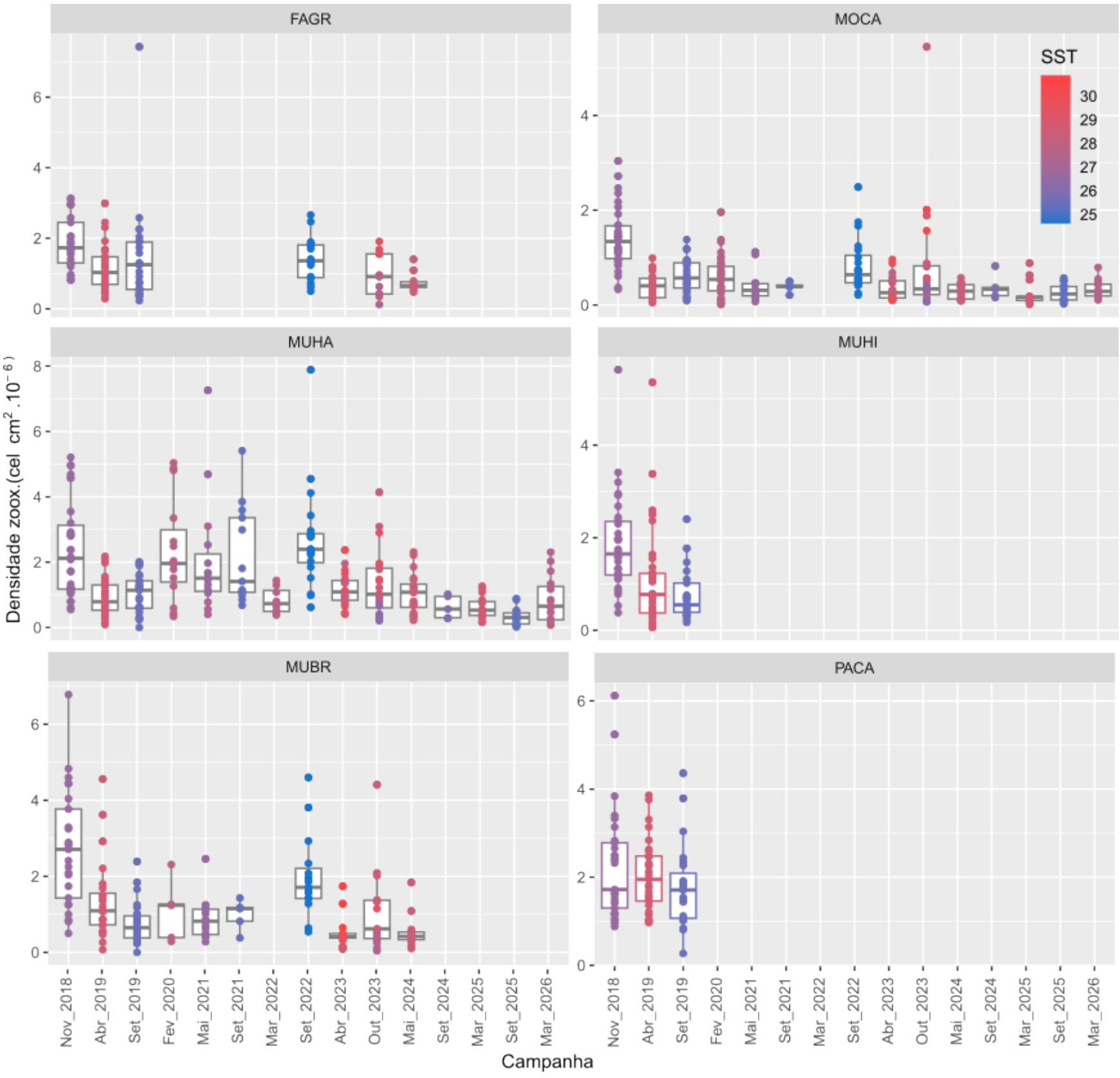
Figura 6: Razão (em massa) das clorofilas c1 e c2 (**A**), feopigmentos (**B**) e carotenoides (**C**) em função da concentração de clorofila a por unidade de área no tecido de corais (µg clorofila *a* cm^{-2}) amostradas em Abrolhos (Área A) e nos Recifes Esquecidos (Área B). FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastraea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. harttii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum.*



A relação entre a clorofila a e outras clorofilas, como as clorofilas c1 e c2, auxilia na avaliação da composição e do estado fisiológico do aparato fotossintético dos simbiontes. A razão entre feopigmentos e clorofila a, por sua vez, funciona como um indicativo complementar da integridade pigmentar do holobionte coral, uma vez que valores elevados de feopigmentos em relação à clorofila podem estar associados à degradação de pigmentos e a maior estresse fisiológico. Já os carotenoides exercem papel fotoprotetor, contribuindo para a dissipação do excesso de energia luminosa; assim, variações na razão carotenoides a podem refletir ajustes fisiológicos frente a mudanças de irradiância, temperatura e outras condições ambientais.

A concentração de clorofila a por unidade de área apresentou ampla variação ao longo da série temporal, com contrastes entre espécies, sítios e campanhas. Os menores valores associados a anomalia térmica de 2019 indicaram forte redução da biomassa pigmentar naquele período. Essa queda provavelmente resultou da combinação entre aumento da temperatura e exposição à luz, favorecendo processos de foto-oxidação dos pigmentos, além da redução na densidade e/ou na carga pigmentar dos fotoendossimbiontes (AMBARSARI *et al*., 1997; KLEPPEL *et al*., 1989; VENN *et al*., 2006). No início de 2019, *M. cavernosa* e *M. braziliensis* registraram níveis de redução de até 70% na concentração de clorofila *a*,o que evidencia a intensidade do efeito fisiológico associado à anomalia térmica. Com a inclusão das campanhas mais recentes, até março de 2026, observa-se que as razões entre clorofilas c1+c2 e clorofila a permaneceram, em geral, dentro da amplitude registrada ao longo do monitoramento, sem indicar uma tendência progressiva de alteração. As razões entre feopigmentos e clorofila a também apresentaram valores extremos pontuais, especialmente em algumas colônias e campanhas, mas sem aumento persistente nas amostragens mais recentes. A razão carotenoides a manteve medianas relativamente estáveis na maior parte da série, com elevação mais evidente em setembro de 2021 e alguns valores extremos posteriores. Nas campanhas de setembro de 2025 e março de 2026, os valores retornaram a faixas compatíveis com a maior parte da série histórica. Assim, os dados atualizados reforçam que os corais sobreviventes ao evento térmico de 2019 restabeleceram, ao menos parcialmente, seus níveis pigmentares e de simbiontes, e que as oscilações observadas posteriormente compõem uma linha de base importante para avaliar efeitos crônicos e subletais, inclusive aqueles potencialmente associados ao Material Ligado ao Desastre (MLD).

Figura 7: 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 2026 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. harttii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*



A densidade de zooxantelas (Figura 7) integra o indicador “fisiologia de corais” e deve ser interpretada como uma linha de evidência adicional, em conjunto com os pigmentos. Zooxantelas são essenciais ao metabolismo dos corais e reduções na sua densidade indicam comprometimento da saúde dos corais.

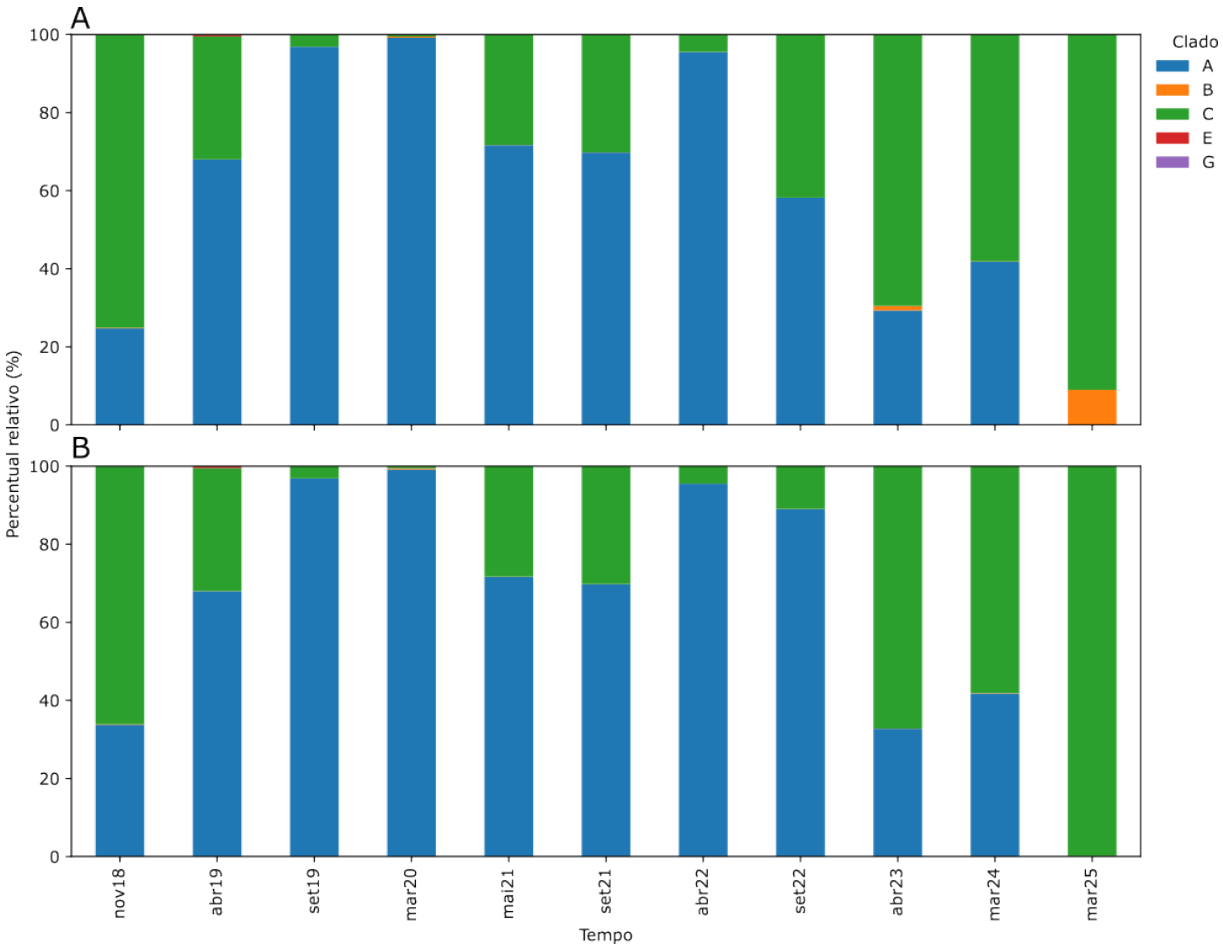
A densidade de zooxantelas foi variável entre indivíduos e espécies de corais (ca. 1 a 6 milhões de células cm^{-2}). O tamanho das zooxantelas - biovolume celular médio - foi ligeiramente maior durante a anomalia térmica, mas retornou à normalidade posteriormente (dados não apresentados). A densidade 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 2026 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, até o momento, sobreviveram ao estresse de repetidas ondas de calor. Esses resultados apontam para um grau de resiliência dos corais. Porém, o que não sabemos é quão próximo o sistema pode se encontrar de um ponto de ruptura que o desestabilize permanentemente. O monitoramento das variáveis acerca da fisiologia dos corais no contexto 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 ainda possam atingir o sistema.

Em resumo, as variáveis que compõem o indicador “fisiologia de corais” (Figura 6 e Figura 7) não apresentaram tendências que pudessem ser diretamente relacionadas ao rompimento da barragem, tendo respondido claramente a variações na temperatura da água. Esse padrão indica que, dentre as forçantes monitoradas, a temperatura foi a que mais influenciou 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 no efeito sobre a fisiologia dos corais.

3.4 DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS

Esse indicador foi removido da atual fase do monitoramento (Deliberação CIF nº 803). Porém, faz-se aqui uma atualização com resultados que foram produzidos ao longo do monitoramento, e que são importantes para o contexto dos efeitos de forçantes ambientais sobre os corais. Será dado destaque para a análise da diversidade genética de zooxantelas que revelou uma alteração na composição da comunidade desse simbiontes (Figura 8) e, em particular, de uma espécie, *Symbiochlorum necroappetens* (VILLELA *et al*. 2025), conhecidamente oportunista e que infesta tecidos de corais necrosados (Figura 9).

Figura 8: Variação temporal do percentual relativo dos clados de Symbiodiniaceae detectados em amostras de corais ao longo do monitoramento, entre novembro de 2018 e março de 2025. As barras empilhadas representam a contribuição relativa dos clados A, B, C, E e G em cada campanha. Em A, são apresentadas todas as amostras analisadas, considerando os hospedeiros *Favia gravida, Montastraea cavernosa, Mussismilia harttii* e *Mussismilia braziliensis*. Em B, são apresentadas apenas as amostras das espécies *M. harttii* e *M. braziliensis*.



A diversidade genética de zooxantelas associadas aos corais foi avaliada a partir da variação temporal dos principais clados de Symbiodiniaceae detectados ao longo do monitoramento. O conjunto de dados permite apresentar, pela primeira vez de forma integrada, a dinâmica temporal dos clados presentes nos corais. Esse resultado é particularmente relevante porque mostra uma reorganização clara da comunidade simbiótica após a anomalia térmica de 2019, seguida por recuperação progressiva da composição observada no início da série.

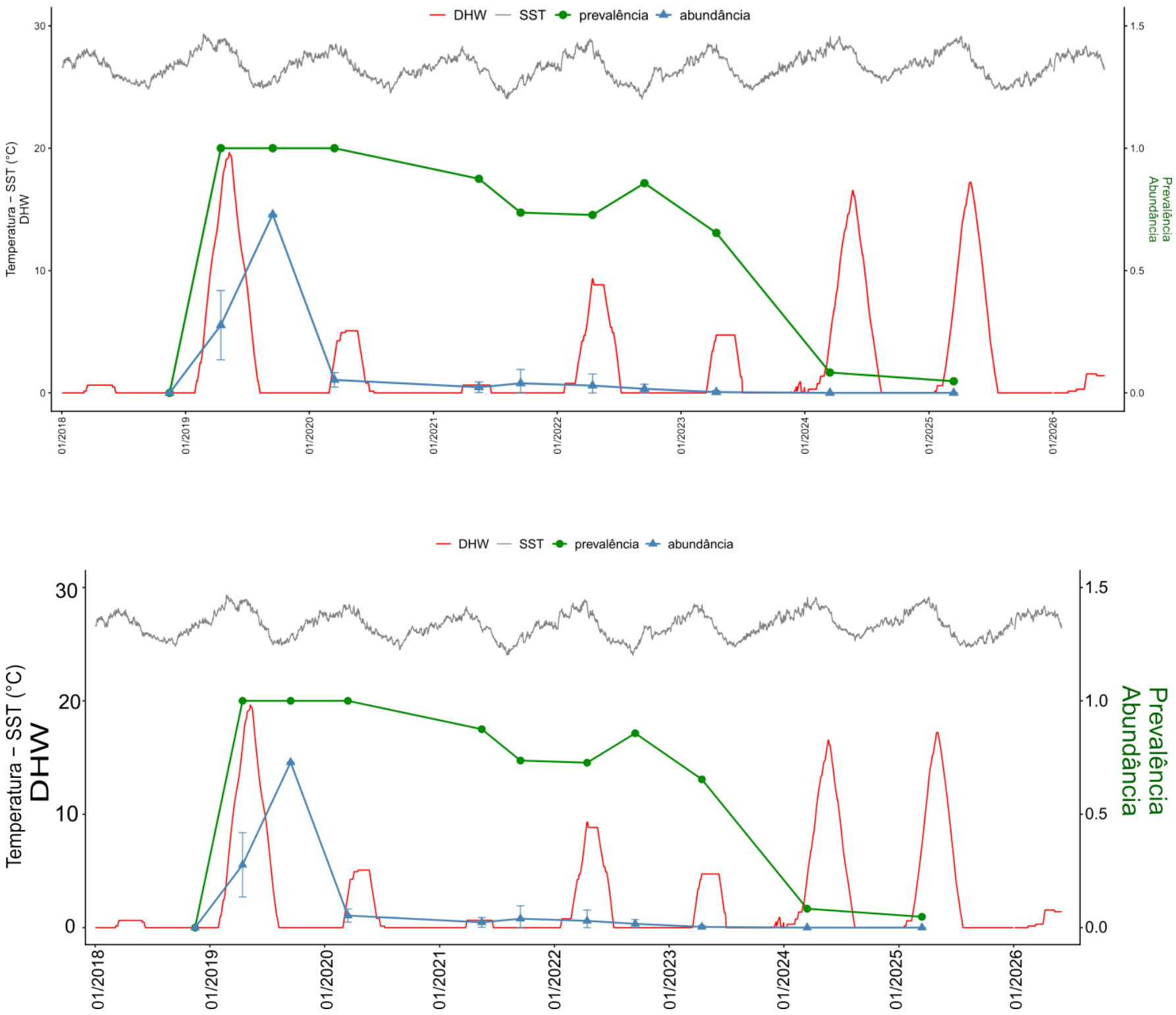
Os clados A, B e C correspondem, na nomenclatura atualmente adotada para Symbiodiniaceae, aos gêneros *Symbiodinium, Breviolum* e *Cladocopium*, respectivamente (LAJEUNESSE *et al*., 2018). O clado A é frequentemente associado a ambientes rasos, alta irradiância e condições de maior exposição ou estresse, podendo ocorrer como componente oportunista em algumas associações coral-simbionte. O clado C, por sua vez, é geralmente associado a simbioses mais estáveis e eficientes em muitos corais recifais, embora inclua linhagens com diferentes graus de sensibilidade ao aquecimento (STAT

et al., 2008; SAMPAYO *et al*., 2008). O clado B (*Breviolum*) ocorre em corais do Atlântico, incluindo o Atlântico Sul, mas sua interpretação depende da linhagem, do hospedeiro e do contexto ambiental.

O clado C era dominante em novembro de 2018, antes da anomalia térmica, representando cerca de 75% do total, enquanto o clado A correspondia a, aproximadamente, 25%. A partir de abril de 2019, ocorreu uma inversão acentuada, com aumento do clado A para cerca de 68% e redução do clado C para aproximadamente 32%. Esse padrão se intensificou em setembro de 2019 e março de 2020, quando o clado A atingiu cerca de 97–99% das sequências e o clado C foi praticamente suprimido. O predomínio do clado A persistiu em 2021 e abril de 2022, indicando que a comunidade simbiótica não retornou imediatamente à condição anterior ao evento térmico. A partir de setembro de 2022, porém, observa-se recomposição progressiva do clado C, que voltou a predominar em 2023 e 2024 e atingiu cerca de 91% em março de 2025 (Figura 8). O aumento do clado B nessa última campanha se deve ao fato de as amostras serem exclusivamente da área dos Recifes Esquecidos. Quando consideradas apenas *Mussismilia harttii* e *M. braziliensis*, o padrão temporal é semelhante. Esse resultado sugere que a anomalia térmica de 2019 esteve associada a uma alteração profunda, porém transitória, da simbiose, com aumento temporário do clado A, associado a estresse ou oportunismo, e recuperação posterior do clado C, mais relacionado a associações simbióticas estáveis.

A diversidade genética fornece uma linha de evidência independente e complementar aos indicadores fisiológicos, reforçando que o estresse térmico foi uma das principais forças de reorganização da simbiose coral-zooxantela no período monitorado. Mesmo que não haja evidência de que essa mudança possa ser atribuída diretamente e/ou exclusivamente ao rompimento da barragem, o resultado demonstra que os corais passaram por um episódio relevante de estresse, com possíveis implicações para sua resiliência frente a novos eventos térmicos e a outros impactos ambientais.

Figura 9: Prevalência e abundância relativa de *Symbiodinium necroapetens* em corais no sítio A, Abrolhos, entre novembro de 2018 e março de 2024. O gráfico mostra também valores de DHW (Degree Heating Week, NOOA, calor acumulado na água) e a temperatura da água em °C (SST).



A dinâmica do clado A é reforçada pelo comportamento do tipo A13, *Symbiodinium necroappetens* (VILLELA *et al*., 2025). Essa espécie, registrada pela primeira vez no Atlântico Sul no âmbito deste monitoramento (RA 2025), apresenta comportamento oportunista e foi associada no relatório anterior a condições de branqueamento, necrose ou estresse térmico. Sua prevalência aumentou abruptamente após a anomalia térmica de 2019, acompanhando o pulso do clado A (Figura 9).

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 Rodolitos, 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 sete 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 rodolitos 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 havia dados antecedentes. Como padrão geral, observou-se que a cobertura dos recifes, em 2025, tendeu a se aproximar da cobertura registrada no início do monitoramento. Como padrão geral, observou-se que a cobertura dos recifes, em 2025, tendeu a se aproximar da cobertura registrada no início do monitoramento. 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. Apesar da tendência à redução da cobertura de algas coriáceas a partir de 2022, 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, isolados ou combinados, do MLD no sistema recifal.

Indicador 5, Diversidade genética de simbiontes de corais. A análise integrada da diversidade genética de simbiontes revelou uma reorganização temporal marcante entre corais e zooxantelas. Após o evento térmico de 2019, ocorreu um pulso intenso do clado A (*Symbiodinium*), frequentemente associado a condições de maior exposição, estresse ou oportunismo, acompanhado pela supressão temporária do clado C. A partir de 2022–2023, observou-se recomposição progressiva do clado C. Ainda, a dinâmica do sub-clado A13, *Symbiodinium necroappetens*, um simbionte oportunista, reforça essa interpretação e o coloca como um potencial indicador de impacto. Não é possível afirmar que as mudanças observadas refletem **diretamente a** influência dos contaminantes decorrentes do rompimento, uma vez que outras forçantes ambientais, principalmente a temperatura, foram importantes no período de estudo. As análises desse indicador foram interrompidas no âmbito da Deliberação CIF nº 803. **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 nexo 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 relatórios anteriores (e.g. RT43-RA2022, 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 rodolitos 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, p. 303–307, 1997.

BEIJBOM, O.; EDMUNDS, P. J.; KLINE, D. I.; MITCHELL, B. G.; KRIEGMAN, D. Automated annotation of coral reef survey images. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR), 2012, Providence, Rhode Island. IEEE, 2012. p. 1170–1177.

BOLGER, A. M.; LOHSE, M.; USADEL, B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data. Bioinformatics, 30(15), p. 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), p. 407–420, 2016.

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.

CARLOS-JÚNIOR, L. A.; CARNEIRO, I. M.; CARDOSO, F. C.; CASTRO, G. M.; CARDOSO, G. O.; SALOMON, P. S.; MOURA, R. L. Insidious shifts in a putative climate change coral refugium. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 293, n. 2065, p. 20251957, 2026.

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.

CARNEIRO, I. M.; CASTRO, G. M.; CARDOSO, F. C.; CURVÊLLO, J. P.; CARVALHO, R. T.; SALGADO, L. T.; KAISER, J.; SALOMON, P. S.; MOURA, R. L. The dynamics of coastal macroalgal assemblages after the Fundão dam disaster: challenges and lessons from impact assessment. Environmental Monitoring and Assessment, v. 198, n. 4, art. 394, 2026.

CLARKE, K. R.; GORLEY, R. N. PRIMER v7: User Manual/Tutorial. Plymouth: PRIMER-E, 2015. 296 p.

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, J.; BOROWITZKA, M. A. Chlorophyll fluorescence terminology: an introduction. Springer, 4, p. 1–17, 2010.

DARLING, E. S. *et al*. Evaluating life-history strategies of reef corals from species traits. Ecology Letters, 15, p. 1378–1386, 2012.

EDGAR, R. C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. Bioinformatics, 26(19), p. 2460–2461, 2010.

EVANGELISTA, H. *et al*. Using Nd–Sr isotopes in suspended sediments in the Abrolhos coral-reef (SW Atlantic, Brazil) to assess potential contamination from the 2015 Fundão dam collapse. Science of the Total Environment, v. 807, art. 151231, 2022.

FEST. Relatório Anual do PMBA/FEST – RT-43: Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 193 p., 2023.

FIGUEIRA, W.; FERRARI, R.; WEATHERBY, E.; PORTER, A.; HAWES, S.; BYRNE, M. Accuracy and precision of habitat structural complexity metrics derived from underwater photogrammetry. Remote Sensing, 7, p. 16883–16900, 2015.

FUKAMI, H.; BUDD, A. F.; PAULAY, G.; SOLÉ-CAVA, A.; ALLEN, C. C.; IWAO, K.; KNOWLTON, N. Conventional taxonomy obscures deep divergence between Pacific and Atlantic corals. Nature, 427(6977), p. 832–835, 2004.

GOLDER. Rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão: avaliação do estado de conservação dos bancos de macroalgas e rodolitos adjacentes à Foz do Rio Doce. Submetido à Samarco Mineração S/A, 2016.

HUOT, Y.; BABIN, M. Overview of fluorescence protocols: theory, basic concepts, and practice. In: SUGGETT, D. J.; PRÁŠIL, O.; BOROWITZKA, M. A. (ed.). Chlorophyll a fluorescence in aquatic sciences: methods and applications. London: Springer, 2010. p. 31–74.

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. Molecular Ecology Resources, 19, p. 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), p. 1331–1335, 1989.

KLINDWORTH, A.; PRUESSE, E.; SCHWEER, T.; PEPLIES, J.; QUAST, C.; HORN, M.; GLÖCKNER, F. O. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next-generation sequencing-based diversity studies. Nucleic Acids Research, 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, p. 1259–1269, 2006.

LAJEUNESSE, Todd C.; PARKINSON, John Everett; GABRIELSON, Paul W.; JEONG, Hae Jin; REIMER, James Davis; VOOLSTRA, Christian R.; SANTOS, Scott R. Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. Current Biology, v. 28, n. 16, p. 2570–2580.e6, 2018. DOI: 10.1016/j.cub.2018.07.008.

MOURA, R. L.; CARDOSO, F. C.; CASTRO, G. M.; CARNEIRO, I. M.; CARDOSO, G. O.; FRANCO, T.; VIEIRA, F. V.; BASTOS, A. C. A novel growth form of starlet corals (Siderastreidae): centuries-old columns on shallow-mesophotic turbid-zone reefs. Bulletin of Marine Science, v. 102, n. 2, p. 209–210, 2026.

NEVEUX, J.; LANTOINE, F. Spectrofluorometric assay of chlorophylls and phaeopigments using the least squares approximation technique. Deep-Sea Research I, 40(9), p. 1747–1765, 1993.

NEVEUX, J.; PANOUSE, M. Spectrofluorometric determination of chlorophylls and pheophytins. Archiv für Hydrobiologie, v. 109, p. 567–581, 1987.

OKSANEN, J. *et al*. vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-2. 2018.

PARSONS, T. R.; MAITA, Y.; LALLI, C. M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, 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.

RALPH, P. J.; GADEMANN, R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity. Aquatic Botany, v. 82, n. 3, p. 222–237, 2005.

RIBEIRO, F. V. *et al*. Long-term effects of competition and environmental drivers on the growth of the endangered coral *Mussismilia braziliensis* (Verrill, 1867). PeerJ, v. 6, e5419, 2018.

RIBEIRO, F. V. *et al*. Benthic cyanobacterial diversity and antagonistic interactions in Abrolhos Bank: allelopathy, susceptibility to herbivory, and toxicity. Frontiers in Marine Science, v. 8, art. 790277, 2022.

RRDM. Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM – Evolução espaço-temporal do Ambiente Marinho. RT-39D, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1410 p., 2022.

SAMPAYO, Eugenia M.; RIDGWAY, Tyrone; BONGAERTS, Pim; HOEGH-GULDBERG, Ove. Bleaching susceptibility and mortality of corals are determined by fine-scale differences in symbiont

type. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 105, n. 30, p. 10444–10449, 2008. DOI: 10.1073/pnas.0708049105.

SCHERNER, F. *et al*. Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. Marine Pollution Bulletin, 76(1–2), p. 106–115, 2013.

STAT, Michael; MORRIS, Emily; GATES, Ruth D. Functional diversity in coral-dinoflagellate symbiosis. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 105, n. 27, p. 9256–9261, 2008. DOI: 10.1073/pnas.0801328105.

STENECK, R. S.; DETHIER, M. N. A functional group approach to the structure of algal-dominated communities. Oikos, 69(3), p. 476–498, 1994.

SUN, J.; LIU, D. Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton. Journal of Plankton Research, 25(11), p. 1331–1346, 2003.

TEIXEIRA, C. D.; CHIROQUE-SOLANO, P. M.; RIBEIRO, F. V.; CARLOS-JÚNIOR, L. A.; NEVES, L. M.; SALOMON, P. S.; SALGADO, L. T.; FALSARELLA, L. N.; CARDOSO, G. O.; VILLELA, L. B.; FREITAS, M. O.; MORAES, F. C.; BASTOS, A. C.; MOURA, R. L. Decadal (2006–2018) dynamics of Southwestern Atlantic's largest turbid zone reefs. PLOS ONE, v. 16, n. 2, e0247111, 2021.

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, p. 531–545, 2005.

VÉLEZ-RUBIO, G. M.; GONZÁLEZ-ETCHEBEHERE, L.; SCARABINO, F.; TRINCHIN, R.; MANTA, G.; LAPORTA, M.; ZABALETA, M.; VIDAL, V.; DE LEON-MACKEY, A.; KRUK, C. Macroalgae morpho-functional groups in Southern marine ecosystems: rocky intertidal in the Southwestern Atlantic (33°–35° S). Marine Biology, v. 168, p. 1–21, 2021.

VENN, A. A. *et al*. The impact of coral bleaching on the pigment profile of the symbiotic alga, *Symbiodinium*. Plant, Cell & Environment, 29(12), p. 2133–2142, 2006.

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, 2025.