

**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- 46/JUN 24

RA2023 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2024

EQUIPE TÉCNICA

Rodrigo L. Moura (UFRJ)

Paulo S. Salomon (UFRJ)

Leonardo T. Salgado (JBRJ)

Fernando C. Cardoso (UFRJ)

Lélis A. Carlos Jr (PUC-Rio)

Ivan M. Carneiro (UFRJ)

Rodrigo T. Carvalho (JBRJ)

Guilherme M. Castro (UFRJ)

Julia P. Curvêllo (UFRJ)

Tayana S. Louzada (UFRJ)

Ana P. B. Moreira (UFRJ)

Myllena Pereira (UFRJ)

Clara Pires (UFRJ)

Aline Shimada (UFRJ)

Bárbara F. Zaidan (UFRJ)

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL.....	5
2	METODOLOGIA	5
2.1	COLETA	5
2.1.1	Cobertura bêntica	5
2.1.2	Fisiologia de corais	12
2.1.3	Diversidade genética de simbiontes de corais	12
2.1.4	Natureza do sedimento e taxas de sedimentação em recifes e bancos de rodolitos	12
2.1.5	Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais	13
2.1.6	Variáveis físico-químicas da água	14
2.1.7	Obtenção de amostras de água e organismos, disponibilizando o material para análises de concentração de metais	14
2.2	ANÁLISE	14
2.2.1	Cobertura bêntica	14
2.2.2	Fisiologia de corais	15
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	18
2.2.5	Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais	18
2.2.6	Variáveis físico-químicas da água na malha amostral do projeto	19
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS	20
3	RESULTADOS DOS INDICADORES.....	20
3.1	COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES CORALÍNEOS	22
3.2	COBERTURA BÊNTICA DE BANCOS DE RODOLITOS	27
3.3	COBERTURA BÊNTICA DE RECIFES ADJACENTES AO LITORAL DA APA COSTA DAS ALGAS	29
3.4	FISIOLOGIA DE CORAIS	31
3.5	DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS	37
3.6	NATUREZA DO SEDIMENTO E TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO EM ESTRUTURAS RECIFAIS E BANCOS DE RODOLITOS	39

3.7	TAXAS DE COLONIZAÇÃO DE ORGANISMOS SÉSSEIS EM ESTRUTURAS RECIFAIS	43
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	46
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	47
6	REFERÊNCIAS	47

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostral do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) MS – Malha e Frequência amostral, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) MS – Mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais monitoradas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais monitoradas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

2 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 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). Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

2.1.1 Cobertura bêntica

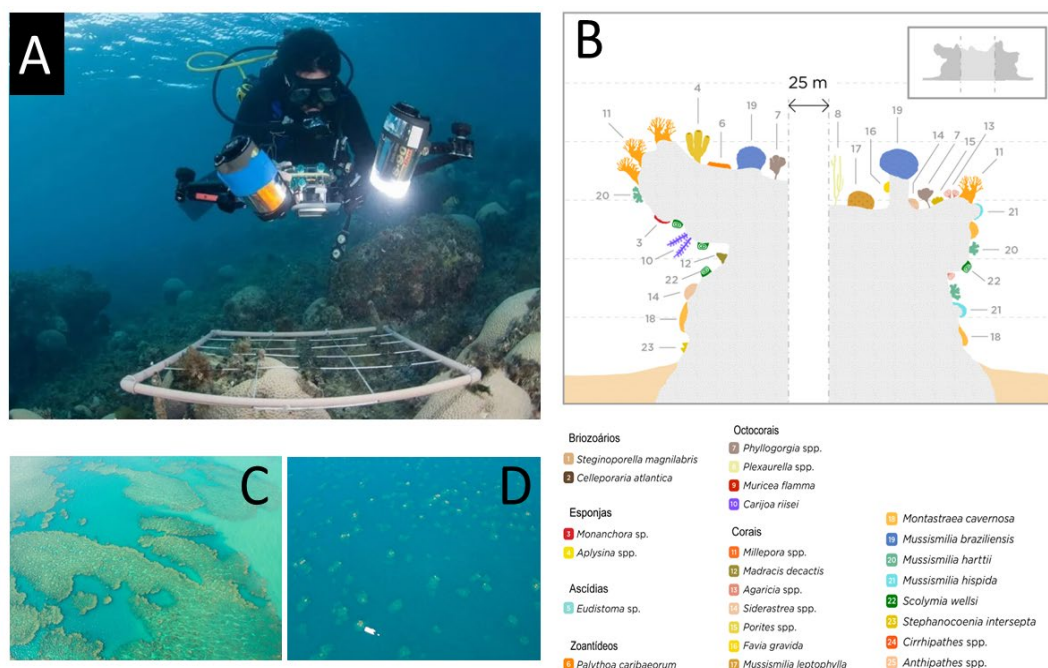
A cobertura bêntica foi estimada a partir de imageamentos do fundo (Figura 1A), usando sistemas e protocolos específicos para as condições de cada ambiente (profundidade, turbidez, operação por mergulhador ou a partir da superfície). Os procedimentos estão descritos para cada ambiente, seguidos pelo procedimento de anotação de imagens, semelhante para os três ambientes.

Recifes coralíneos

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 (0,7 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 (“*repeated measures*”). 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 1). Detalhes acerca do procedimento amostral podem ser encontrados em TEIXEIRA et al. (2021).

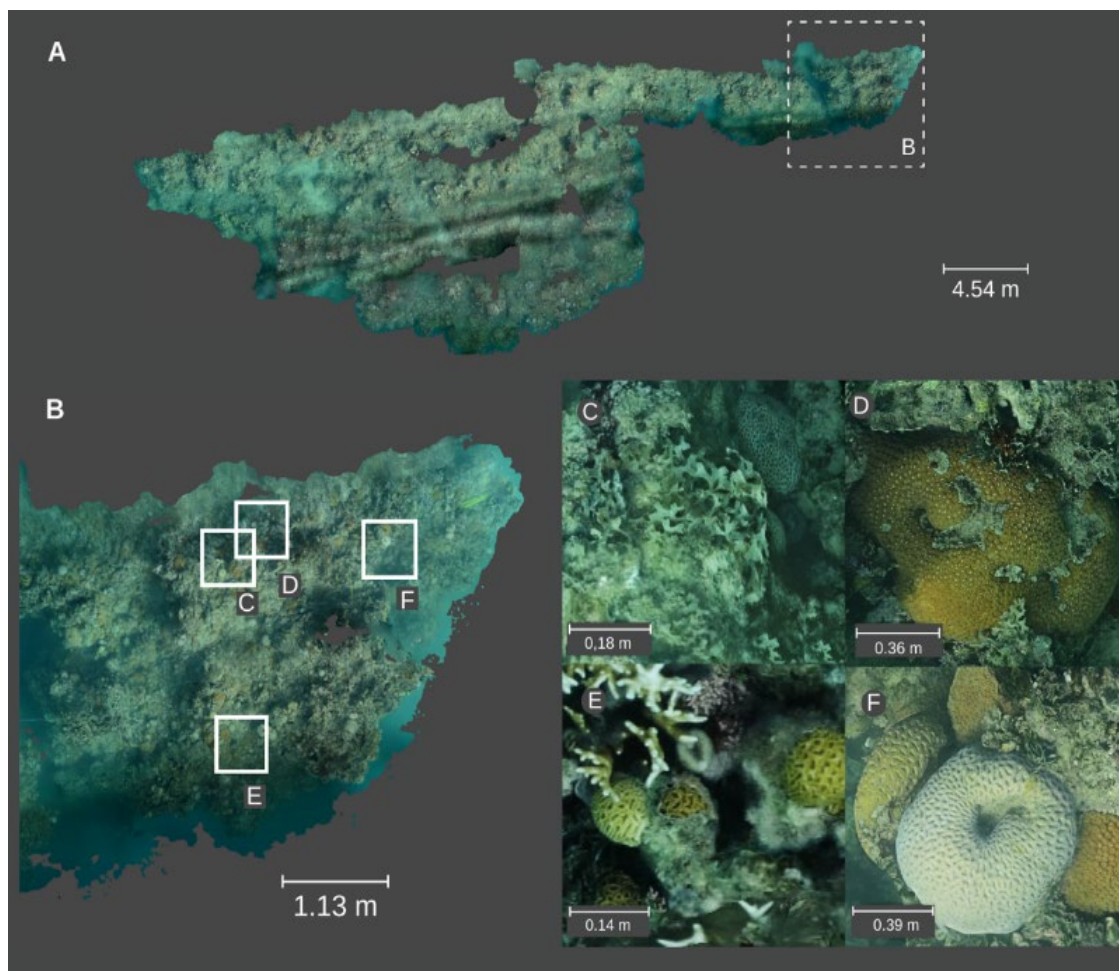
A cobertura temporal das amostragens em cada sítio foi variável, sendo que alguns sítios da Área A (Abrolhos e adjacências) contam com dados pretéritos ao rompimento e dados cobrindo o hiato de três anos sem o monitoramento do PMBA/Fest. Esse conjunto de dados foi obtido no âmbito do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD/CNPq/FAPES/FAPERJ), do *International Ocean Discovery Program* (CAPES/IODP), e de outros projetos desenvolvidos pela equipe executora. Para a Área B (Recifes Esquecidos), as primeiras amostras da cobertura dos recifes foram feitas antes da implementação do PMBA/Fest, 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. Imagem: Rede Abrolhos.



A partir de 2020 as estimativas de cobertura passaram a ser complementadas com ortomosaicos baseados em fotogrametria (Figura 2), técnica que consiste na reconstrução de um cenário 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 “color-checker”® (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.

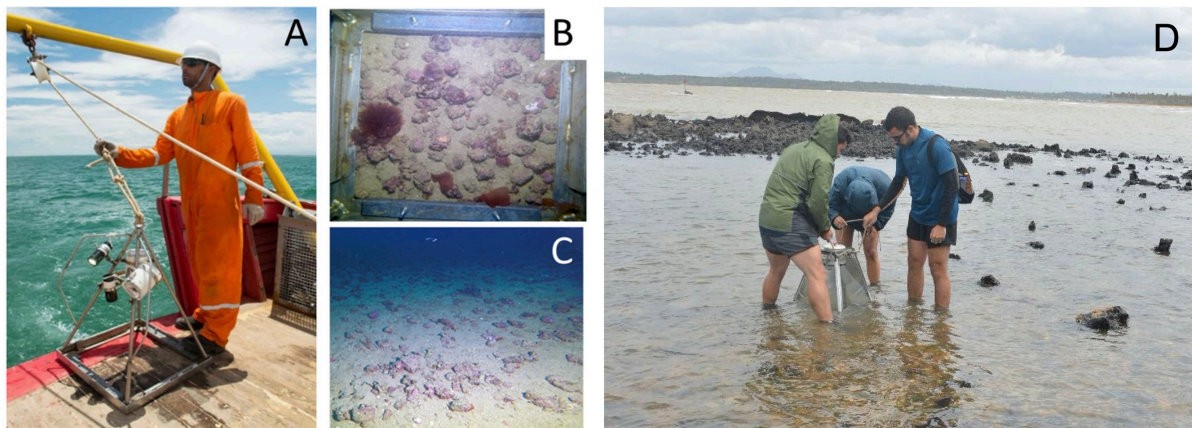
Figura 2: Ortomosaico de um recife costeiro (Pedra de Leste, A1). Painei A: imageamento da cobertura em uma área extensa (aproximadamente 50 m²), baseada em centenas de imagens com sobreposição parcial. Painei B: recorte mostrando a visualização da cobertura em diferentes escalas. Paineis C-F: ampliação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



Bancos de rodolitos

Nesse ambiente de topografia plana foram usados fotoquadrados e “dropcams” operadas a partir da superfície (Figura 3), 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 câmeras GoPRO (12-27 MP), uma ortogonal e outra diagonal, ambas com caixas estanque e iluminação auxiliar (Figura 3A). A câmera ortogonal cobre 0,25 m² (Figura 3B) e a lateral obtém imagens panorâmicas (Figura 3C). Em cada estação, 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.

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).



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, visto ser impraticável deslocar estruturas maiores.

Anotação

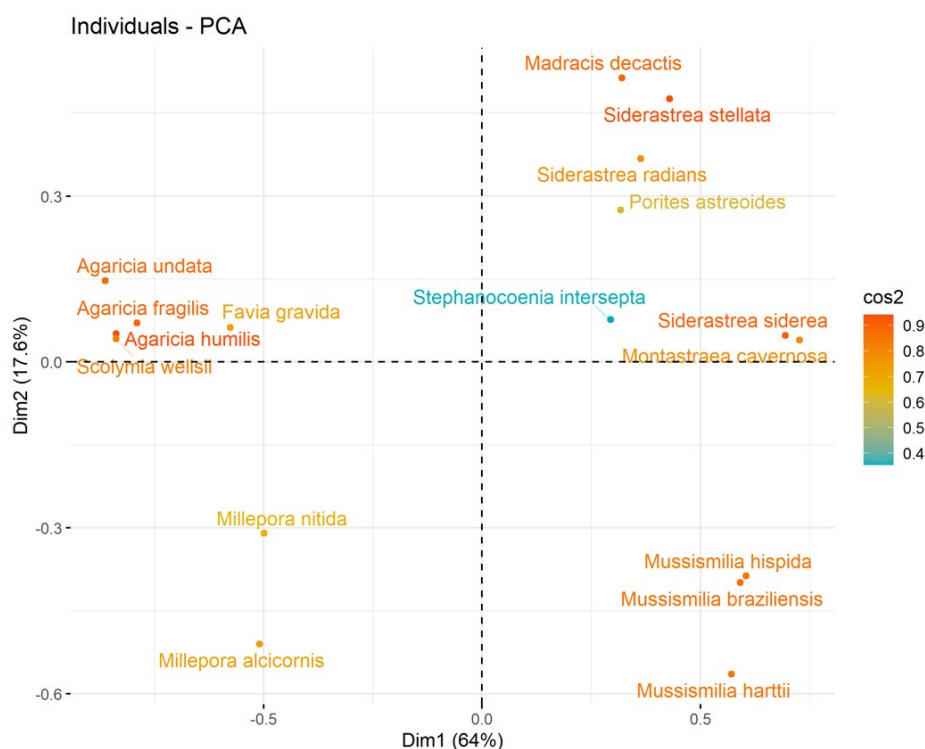
As imagens foram anotadas semi-automaticamente com uso da rede neural da plataforma CoralNet (BEIJON et al. 2012), usando um limiar de confiança de 80%. Outros parâmetros de configuração (e.g., “label accuracy”, “fraction above threshold”) estão descritos em TEIXEIRA et al. (2021) e CARNEIRO et al. (2024). Para os fotoquadrados, a cobertura foi estimada a partir de 40 pontos distribuídos aleatoriamente em cada subunidade (25 x 15 cm). Para os ortomosaicos foram usados 100 pontos por parcela (0,5 m²). Para os bancos de rodolitos foram usados 40 pontos para cada imagem de “dropcam” (0,5 m²). Para os recifes adjacentes ao litoral foram usados 52 pontos para cada imagem de “dropcam” acrílica (0,2 m²) ou 15 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. 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 (~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 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 wellsii</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. hartii</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> . Turf 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. Fucas 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> .

2.1.2 Fisiologia de corais

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).

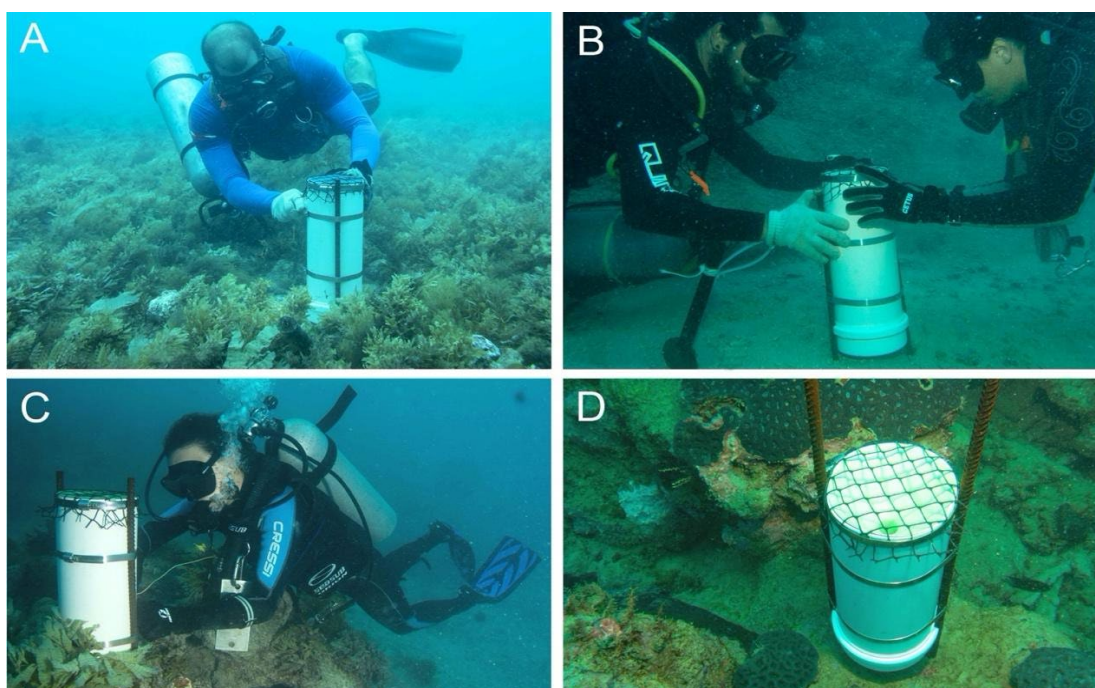
2.1.3 Diversidade genética de simbiossomas de corais

Alíquotas do tecido (item 2.1.2) foram armazenadas a bordo em nitrogênio líquido e preservadas para as análises visando a avaliação da diversidade genética de zooxantelas (dinoflagelados simbiossomas da família Symbiodiniaceae) e bacteriana (auto e heterotrófica) associada aos corais.

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

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.

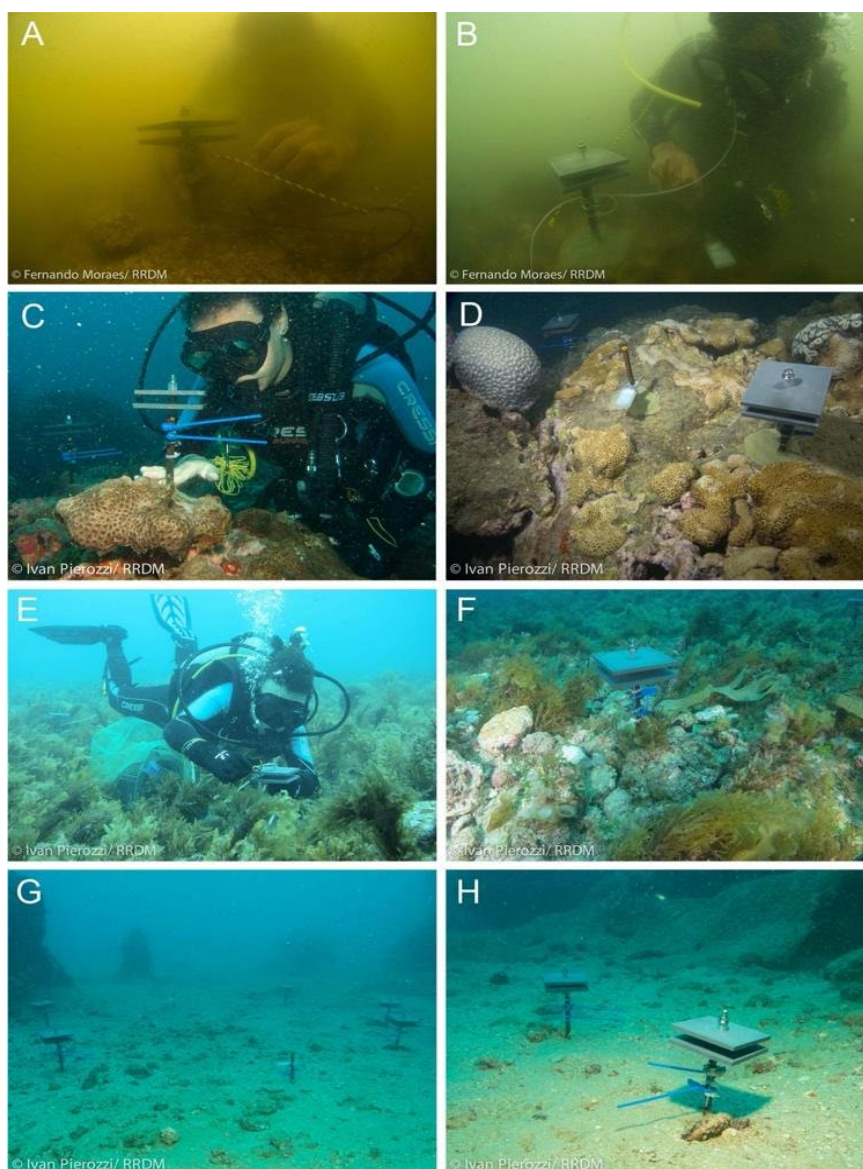
Figura 5: Coleta de sedimentos recifais com armadilhas. Legenda: **A e B)** Armadilhas em bancos de rodólitos; **C)** Armadilhas em recifes; **D)** Detalhe das armadilhas (tela de proteção, funil e fixação ao fundo).



2.1.5 Produção de CaCO_3 e colonização de organismos em estruturas artificiais

A avaliação de taxas de colonização de organismos sésseis 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.

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).



2.1.6 Variáveis físico-químicas da água

A área de estudo abrange ca. 300 km da costa do Espírito Santo e Sul da Baía, 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.

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

Em 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.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Cobertura bêntica

Os conjuntos de dados brutos extraídos das imagens, inseridos inicialmente em planilhas do MS Excel®, foram codificados e formatados com uso do “*software*” livre R (R CORE DEVELOPMENT TEAM, 2018) e em programas comerciais (e.g., Primer-e®), após procedimentos de controle de qualidade. Os pacotes utilizados 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).

Os resultados do indicador “cobertura bêntica de recifes coralíneos” não contemplaram o sítio A4 (Portinho Norte, PNOR), na Ilha Santa Bárbara, uma vez que o mesmo possui uma estrutura de hábitat não comparável com a dos demais sítios. Além disso, para os demais sítios recifais consideramos apenas dados obtidos no primeiro semestre, sem interferência de sazonalidade, uma vez que a variabilidade sazonal expressiva na cobertura por macroalgas e cianobactérias só ocorre em alguns sítios. Incorporar o sítio A4 e a sazonalidade na análise desse indicador iria agregar fontes adicionais de variação sem contribuir para elucidar a associação entre mudanças na estrutura da comunidade e o rompimento da barragem - tema norteador da pesquisa.

Contrastando com recifes, bancos de rodolitos e recifes adjacentes ao litoral 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 os bancos de rodolitos, agrupamos as amostras por semestres na maior parte das análises, ao passo que para os recifes adjacentes ao litoral buscamos isolar efeitos sazonais nos contrastes “*Before-After*” (BA), considerando apenas dados do primeiro semestre, o que permite incorporar os “baselines” pré-rompimento. De forma complementar, apresentamos dados temporalmente desagregados em algumas análises.

2.2.2 Fisiologia de corais

Para a quantificação de simbiontes (*Symbiodiniaceae*), suspensões de tecido de corais foram homogeneizadas utilizando vortex (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 semi-automaticamente 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 de aproximação do formato de um esferoide prolado (SUN & LIU, 2003).

Para análise pigmentar, alíquotas de 500 μL a 1 mL 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 carotenóides 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 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 Fento Cirrus 80ST para estimativa das concentrações de carotenóides totais. As concentrações de carotenóides totais foram calculadas segundo a metodologia de PARSONS et al. (1984), a partir do registro das absorbâncias em 480 e 510nm, corrigidas pela absorbância a 750nm. 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 efetiva (F_v/F_m), taxa máxima relativa de transporte de elétrons ($rETR_m$) e irradiância mínima saturante (E_k) (RALPH & GADEMANN, 2005).

2.2.3 Diversidade genética de simbioses 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 os mesmos 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) na plataforma R (R Core Development Team, 2018). Buscando minimizar o efeito da superestimativa de diversidade devido as múltiplas cópias intergenômicas, as ITS2 types correlacionadas foram agrupadas, também na plataforma 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 assimiladas 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.

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.

2.2.5 Produção de CaCO₃ e colonização de organismos em estruturas artificiais

As medições do balanço carbonático revelam se o recife está acumulando ou perdendo CaCO₃. 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 CaCO₃. As CAUs ("Calcification Accretion

Units") representam unidades experimentais usadas para medir a variação na massa carbonática e orgânica, e também 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, com 100 cm^2 cada).

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.

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

A área de estudo abrange ca. 300 km da costa do Espírito Santo e Sul da Baía, 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 SST (4 microns – nighttime) (Sea Surface Temperature), foram adquiridos na PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center), repositório responsável por disponibilizar dados oceanográficos para 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.

3 RESULTADOS DOS INDICADORES

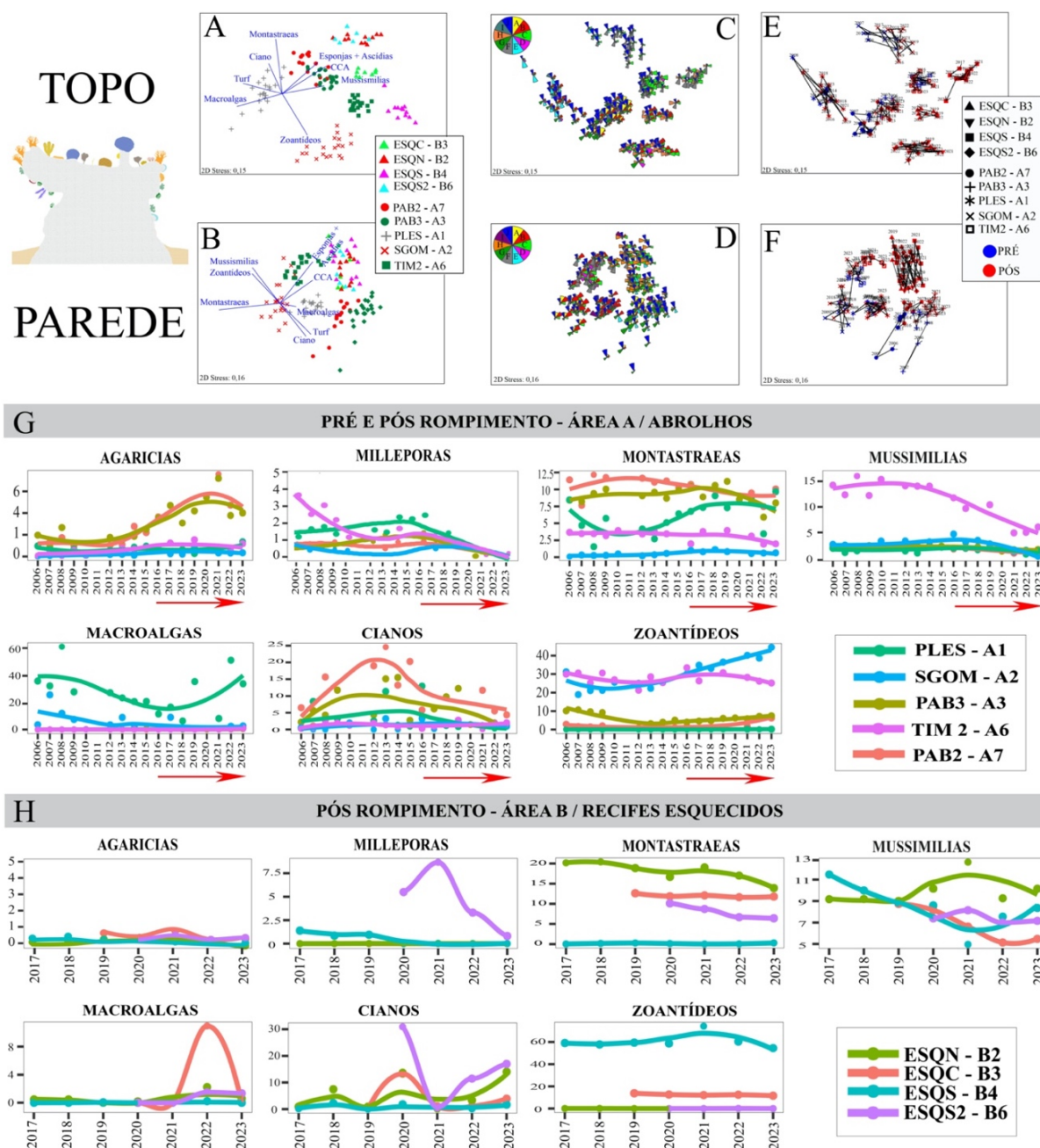
Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar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

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será

exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

3.1 COBERTURA BÊNITICA DE RECIFES CORALÍNEOS

Figura 7: Efeito do rompimento sobre comunidades recifais. Baseados nos dados dos primeiros semestres obtidos nos sítios recifais abrangidos pelo PMBA/Fest (considerando dados antecedentes obtidos pelo PELD Abrolhos). SÍTIOS: PAB2 - A7 = Parcel dos Abrolhos 2, PAB3 - A3 = P. dos Abrolhos 3, SGOM - A2 = Sebastião Gomes; TIM2 - A6 = Timbebas 2; 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 (sem 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: como acima, exceto I=CCA e J=Turf). **Painéis E e F:** Azul=pré-rompimento (PRÉ); vermelho=pós-rompimento (PÓS). **Painéis G e H:** Cobertura (%) dos diferentes grupos com suavização de LOESS (anos pós-rompimento destacados com seta vermelha).



A Figura 7 traz dados antecedentes e posteriores ao PMBA/Fest, obtidos em sítios recifais mais próximos e mais afastados da foz do rio Doce. Além de diversas singularidades na estrutura das comunidades, as tendências temporais evidenciam uma discriminação significativa entre os anos prévios e posteriores ao rompimento. Os gráficos de dispersão com suavização LOESS (*"cally Estimated Scatterplot Smoothing"*) detalham a variabilidade dos principais grupos (Figura 7G-H). De maneira geral, a variabilidade temporal foi maior nas paredes dos chapeirões, dominadas por organismos de crescimento rápido e vida curta (e.g., macroalgas, turf).

Na maioria dos sítios, a cobertura por corais do grupo funcional (GF) AGARICIAS, relativamente pequenos, de crescimento mais rápido e vida mais curta, tendeu a aumentar após o rompimento. A cobertura do GF MONTASTRAEAS, que abrange corais longevos de crescimento lento e esqueletos mais densos, tendeu a diminuir em todos os sítios após o rompimento, especialmente a partir de 2019 (i.e., antes do evento de branqueamento; TEIXEIRA et al. 2020). Um declínio semelhante foi registrado para o GF MUSSISMILIAS, composto por corais massivos e longevos endêmicos do Brasil, com inflexão a partir de 2018 ou 2019. Após o rompimento houve declínio do GF MILLEPORAS, hidrocorais ramificados de crescimento rápido, o qual foi mais acelerado a partir de 2021. A cobertura por zoantídeos foi espacialmente heterogênea e temporalmente pontuada. A exceção foi o recife Sebastião Gomes (A2), onde houve aumento contínuo na cobertura desses organismos associados a sítios rasos com intensa sedimentação (TEIXEIRA et al. 2021). Não foi detectada associação entre as variações nas abundâncias de zoantídeos e o rompimento, possivelmente porque boa parte dos impactos sobre os recifes decorrem da dispersão de partículas pequenas e materiais dissolvidos, e não apenas em função de aumentos na deposição sedimentar e/ou turbidez. A participação de cianobactérias filamentosas também foi pontuada e possivelmente relacionada a variações meteoceanográficas (RIBEIRO et al. 2018, 2022). A cobertura por macroalgas foi espacialmente heterogênea e relacionada com a proximidade à costa, com baixa cobertura nos sítios offshore e em Timbebas (A6). Nos recifes costeiros da Área A (A1 e A2) e em Esquecidos Norte e Central (B3 e B4), a variação na abundância relativa de macroalgas, embora pontuada, tendeu a aumentar depois de 2016 (pós-rompimento).

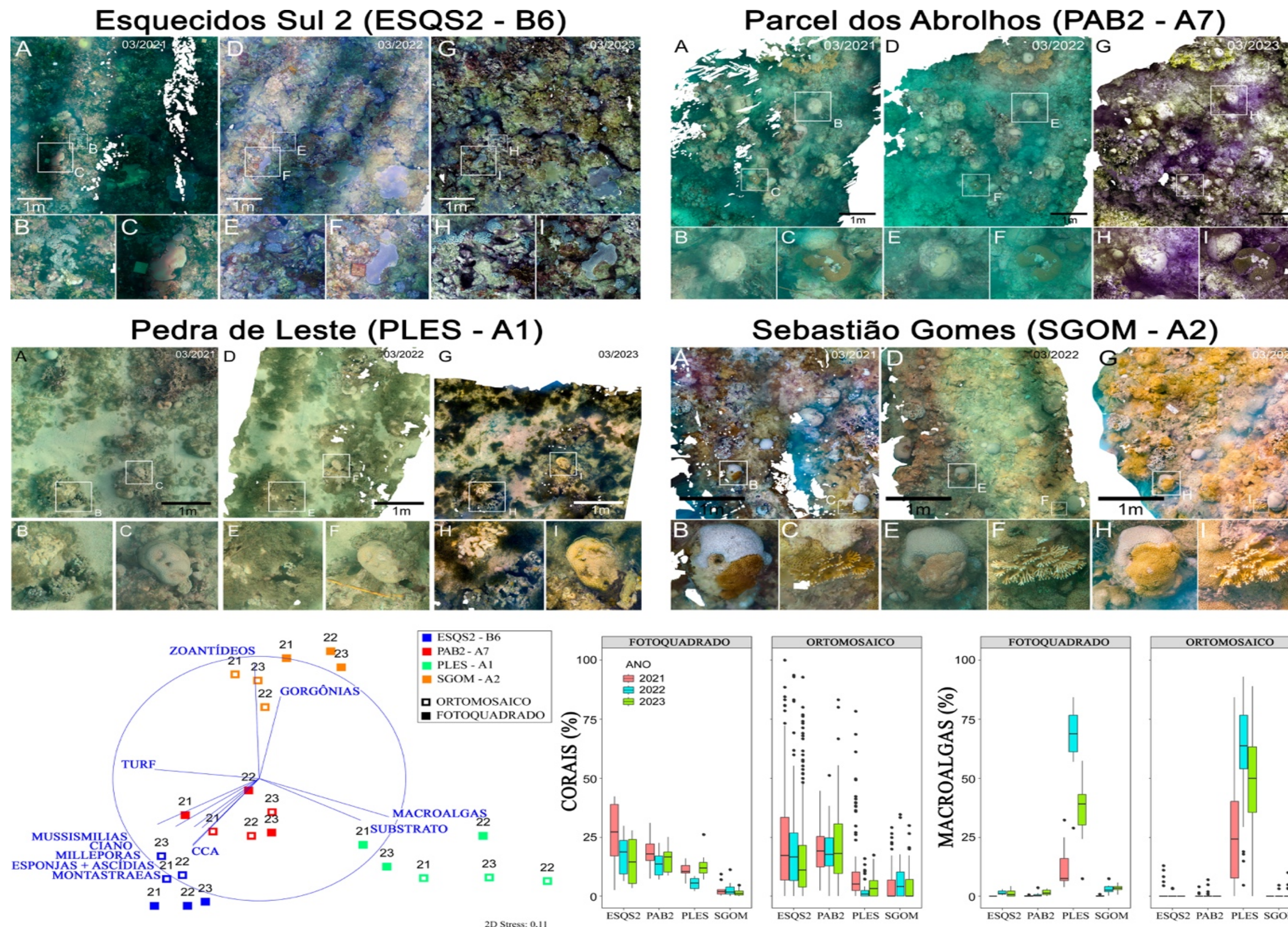
PERMANOVAs (Tabela 1) explorando o efeito dos sítios (fator aleatório, 9 níveis) e do rompimento da barragem (fixo, 2 níveis: pré- e pós-rompimento) demonstram interações significativas ubíquas. Em síntese, apesar da estrutura de comunidades própria de cada sítio, observa-se discriminação consistente após o rompimento da barragem, **corroborando a hipótese de que o evento afetou a dinâmica das comunidades recifais mais biodiversas do Atlântico Sul Ocidental**. Ressalta-se, por fim, a pertinência de monitorar sítios a diferentes distâncias da foz do rio Doce até que os indicadores se estabilizem, inclusive no sentido de se documentar efeitos positivos das medidas de manejo ou da resiliência natural do sistema, o que não se observou até o presente, oito anos após o rompimento e cinco anos após o início do monitoramento no âmbito do PMBA/Fest.

Tabela 1: Efeito do rompimento sobre a estrutura das comunidades recifais. Sumário das PERMANOVAs baseadas nos dados de cobertura dos nove sítios recifais monitorados no âmbito do PMBA/Fest (primeiro semestre, incluindo dados anteriores ao rompimento oriundos do PELD Abrolhos). Análise feita com dados transformados por $\log(x+1)$. O fator "Barragem", fixo, se refere à codificação das amostras como anteriores ou posteriores (2016 em diante) ao rompimento. ** = nem todos os níveis do segundo fator estão presentes em todos os sítios. Valores significativos ($p < 0.05$) em negrito. Uma PERMANOVA sem os dados dos Recifes Esquecidos (apenas dados posteriores ao evento) apresentou resultados semelhantes.

TOPOS	gl	SQ	QM	Pseudo-F	P (perm)
Barragem	1	48832	48832	2,238	0,014
Sítio	8	5,13E+05	64100	67,215	0,001
Ano (Barragem)	15	37865	2524,3	2,8865	0,001
Barragem x Sítio **	4	16040	4010,1	4,8939	0,001
Ano (Barragem) x Sítio **	66	55281	837,59	2,5784	0,001
Resíduos	889	2,89E+05	324,84		
Total	983	9,596E+05			

PAREDES	gl	SQ	QM	Pseudo-F	P (perm)
Barragem	1	50959	50959	3,5101	0,001
Sítio	8	2,746E+05	34328	29,305	0,001
Ano (Barragem)	15	49884	3325,6	3,1474	0,001
Barragem x Sítio **	4	12880	3219,9	3,2126	0,001
Ano (Barragem) x Sítio **	66	67593	1024,1	3,6121	0,001
Resíduos	900	2,5518E+05	283,53		
Total	994	7,1111E+05			

Figura 8: Ortomosaicos de quatro sítios recifais (dados de verão, 2021-2023), evidenciando alterações na cobertura nos destaques (quadrados brancos). O diagrama de ordenação (nMDS) contrasta estimativas de cobertura obtidas com ortomosaicos e fotoquadrados e os boxplots destacam estimativas de cobertura de corais e macroalgas com essas duas abordagens.



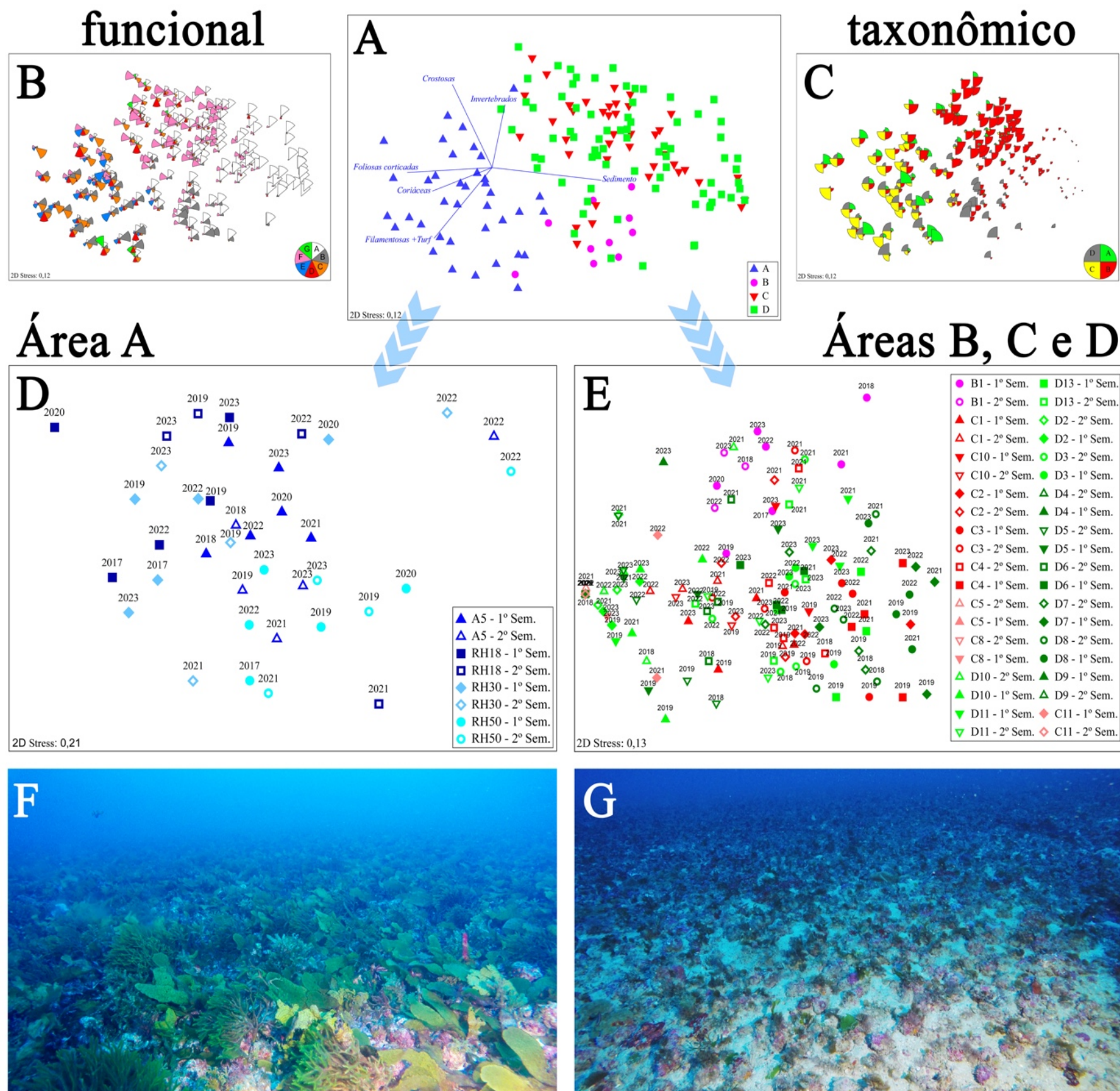
A amostragem com ortomosaicos representa um componente complementar do estudo sobre a dinâmica recifal. Trata-se de abordagem promissora que possibilita visualização rápida e holística da cobertura de forma custo-efetiva, mas cuja acurácia não havia sido anteriormente avaliada.

Na Figura 8 estão apresentados ortomosaicos de quatro sítios (PAB2 - A7, PLES - A1, SGOM - A2 e ESQSUL2 - B6) construídos com dados de três campanhas de verão (2021, 2022 e 2023), cada um contando com inserções com maior detalhamento espacial. Em PAB2 destaca-se a retração tecidual de uma colônia massiva de *M. braziliensis* e uma colônia de *M. cavernosa* que permaneceu estável ao longo do tempo. Em PLES fica evidente a maior cobertura de macroalgas e uma dinâmica temporal mais intensa associada a esses organismos, dominantes e de crescimento rápido. As inserções mostram mudanças na coloração e perda tecidual em uma colônia de *M. braziliensis*. Em SGOM, destaca-se o recobrimento gradual de uma colônia de *M. braziliensis* por zoantídeos, bem como uma colônia de *Millepora* sp. com crescimento mínimo e pouca variação na coloração. Em ESQSUL2 são evidenciadas colônias de *M. hartii* com perda tecidual e uma colônia de *M. cavernosa* com alterações na coloração e retração tecidual. O diagrama de ordenação evidencia a semelhança nas estimativas baseadas em fotoquadrados e ortomosaicos, e os boxplots corroboram a equivalência entre as abordagens. Em PLES, por exemplo, o aumento na cobertura por macroalgas entre 2021 e 2022, seguido por redução entre 2022 e 2023, foi bem detectado por ambas. Tendências temporais de cobertura por corais também foram semelhantes, tal como evidenciado pela redução da cobertura coralínea em ESQSUL2 entre 2021 e 2023.

A alta compatibilidade entre as duas abordagens amostrais foi apresentada em publicação recente (CARNEIRO et al., 2024). Ressalta-se, por fim, que a avaliação temporal de dados obtidos com ortomosaicos corrobora o declínio na cobertura coralínea (veja Figura 8), indicando que **ortomosaicos podem ser utilizados como estratégia de otimização de monitoramentos em longo prazo, com a vantagem de permitirem visualizar mudanças na paisagem do recife.**

3.2 COBERTURA BÊNTICA DE BANCOS DE RODOLITOS

Figura 9: Variação espaço-temporal na cobertura de bancos de rodolitos. Os diagramas de ordenação (nMDS) nos painéis A a C abrangem os dados de cobertura das áreas A (adjacências de Abrolhos), B (Recifes Esquecidos), C (Foz do Rio Doce) e D (APA Costa das Algas), incluindo: **(A)** correlações de Pearson (>0,5) entre a abundância dos principais grupos e os scores das amostras; **(B)** abundância dos diferentes grupos funcionais; **(C)** abundância dos diferentes grupos. Legenda da pizza do Painel B: A=sedimentos, B=Fotossintetizantes filamentosos, C=Macroalgas foliosas corticadas, D=Macroalgas corticadas, E=Macroalgas coriáceas, F=Algas crostosas, G=Macroalgas foliáceas. Legenda da pizza do Painel C: A=Chlorophyta, B=Ochrophyta, C=Rhodophyta, D=turf. Os painéis **D** e **E** representam ordenações (nMDS), uma com os dados da Área A (Painel D) e outra com os dados das áreas B, C e D (Painel E), ambas com amostras discriminadas por sítios e semestres (Sem.). As imagens subaquáticas são representativas das fisionomias da Área A (Painel F) e das áreas B, C e D (Painel G).

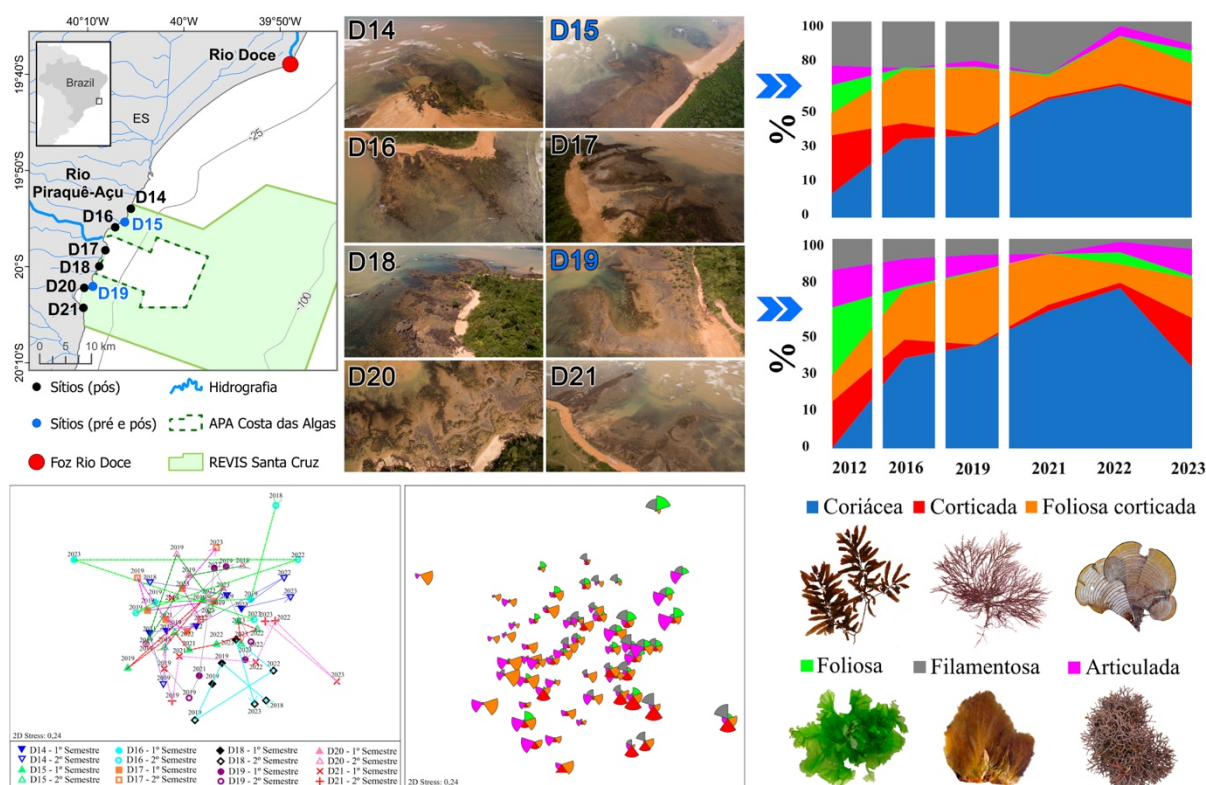


Bancos de rodolitos são o ambiente recifal mais extenso da região estudada. Destacam-se por prover serviços ecossistêmicos essenciais e abrigar grande biomassa e diversidade de organismos de diferentes grupos, tais como macroalgas e peixes (e.g. AMADO-FILHO et al., 2017; MOURA et al. 2021). Sua extensão e distribuição na área de estudo ainda não é adequadamente conhecida, e os bancos de rodolitos representam o ambiente recifal menos protegido por Unidades de Conservação e outros mecanismos de manejo (MOURA et al., 2016, 2021). Macroalgas são os principais organismos sésseis nos bancos de rodolitos (BRASILEIRO et al., 2016) e representaram o foco principal do estudo sobre a dinâmica espaço-temporal da sua cobertura (Figura 9). Os bancos de rodolitos apresentaram menor identidade de sítio do que os recifes. Entretanto, na escala regional, as comunidades da Área A se destacaram por dosséis expressivos de macroalgas, especialmente formas coriáceas e foliosas corticadas, em oposição à expressiva cobertura sedimentar (i.e., menor densidade de nódulos) e contribuição de invertebrados (e.g., esponjas e briozoários) nas áreas B, C e D (Figura 9). Dosséis algais menos expressivos e uma maior exposição das formas crostosas formadoras dos nódulos caracteriza os sítios mais afastados da costa nas áreas A, C e D. A Área A apresentou assembleias mais diversificadas com participação expressiva de algas pardas (Ochrophyta), contrastando com as áreas B, C e D, que apresentaram menor diversidade e participação expressiva de macroalgas vermelhas (Rhodophyta).

O monitoramento foi iniciado mais de dois anos após o rompimento da barragem e abrangeu as seguintes áreas: 1) Área A (adjacências de Abrolhos), com estações amostrais em malha “cross-shelf” entre 8 e 50 m de profundidade; 2) Área C (Foz do Rio Doce), apenas na plataforma externa; 3) Área D (APA Costa das Algas), na plataforma média e externa. A despeito da ausência de uma linha de base sobre a cobertura dos bancos de rodolitos antes do rompimento, **não há evidências que permitam associar o contraste espacial [impacto (Áreas B, C e D) versus “controle” (Área A)] ao evento. Assim, possíveis alterações nessas comunidades, em decorrência da contaminação observada nos rodolitos (veja Item 4), devem ser endereçadas a partir de séries temporais longas.** Além disso, embora não tenha sido evidenciado impacto na cobertura dos bancos de rodolitos, fica evidente a necessidade de uma caracterização em escala regional para subsidiar medidas de conservação, inclusive “offsets” (JACOB et al., 2020).

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

Figura 10: 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. 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 10), 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, 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 10), confirmando duas 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) tendência recente, entre 2022 e 2023, de recuperação, especialmente em D19, o sítio mais distante da foz do rio Doce. O aumento na participação de *Sargassum* spp. (efeitos diretos), bem como a redução competitiva na cobertura por outras algas (efeitos indiretos), são os dois

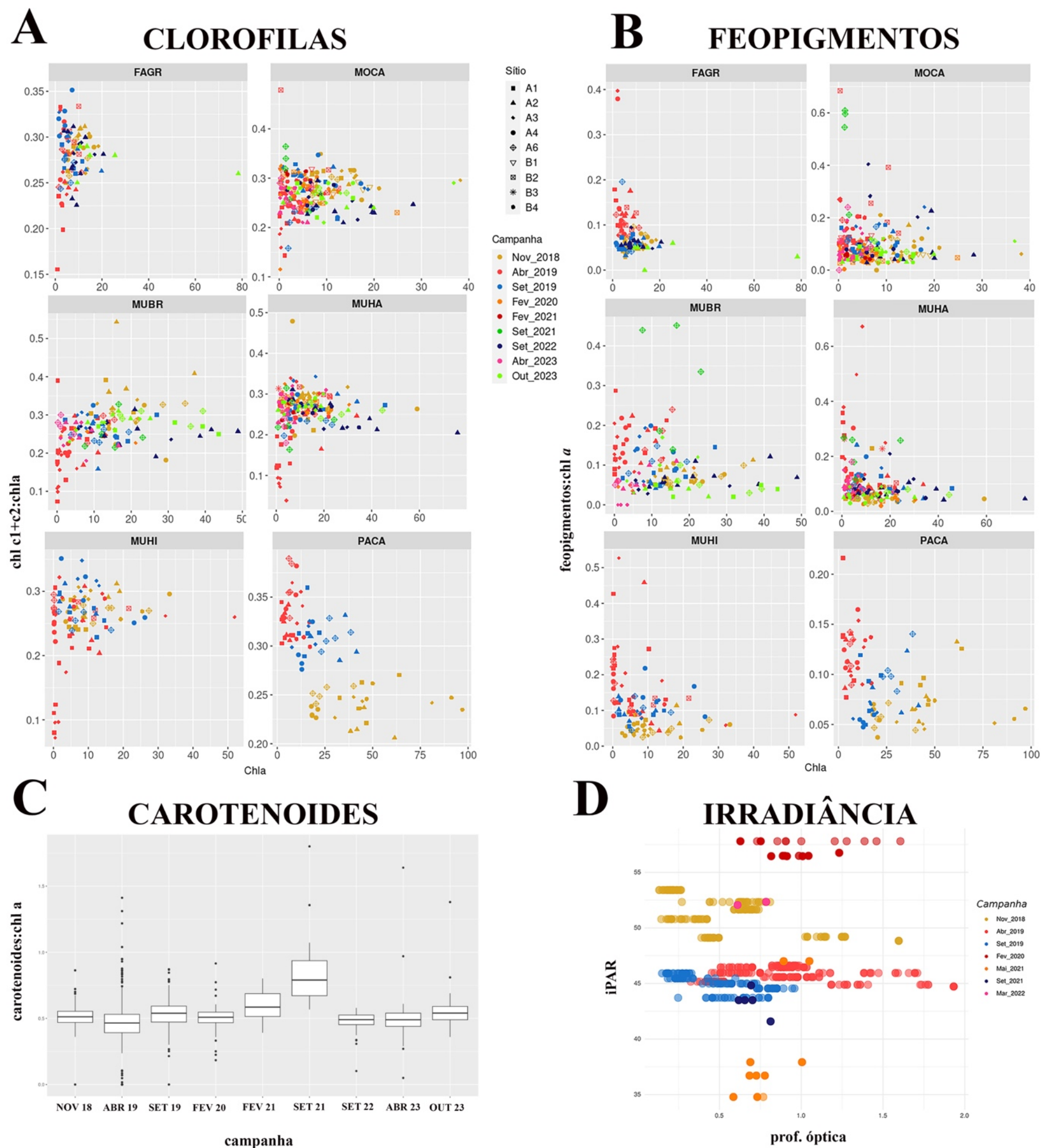
principais aspectos da alteração constatada, cujos mecanismos potenciais foram expostos em relatórios anteriores, especialmente como decorrência da resistência de *Sargassum* spp. à exposição a metais pesados (CORAÇÃO et al. 2020).

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 10). 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 do PMBA/Fest 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).

3.4 FISILOGIA DE CORAIS

Figura 11: 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 seis espécies de corais amostradas em sítios de Abrolhos (Área A) e Recifes Esquecidos (Área B) entre 2018 e 2023. FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastrea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. hartii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*. O painel D mostra o regime de irradiância solar média (iPAR, E m-2 d-1) vs. profundidade ótica (novembro de 2018 a março de 2022).



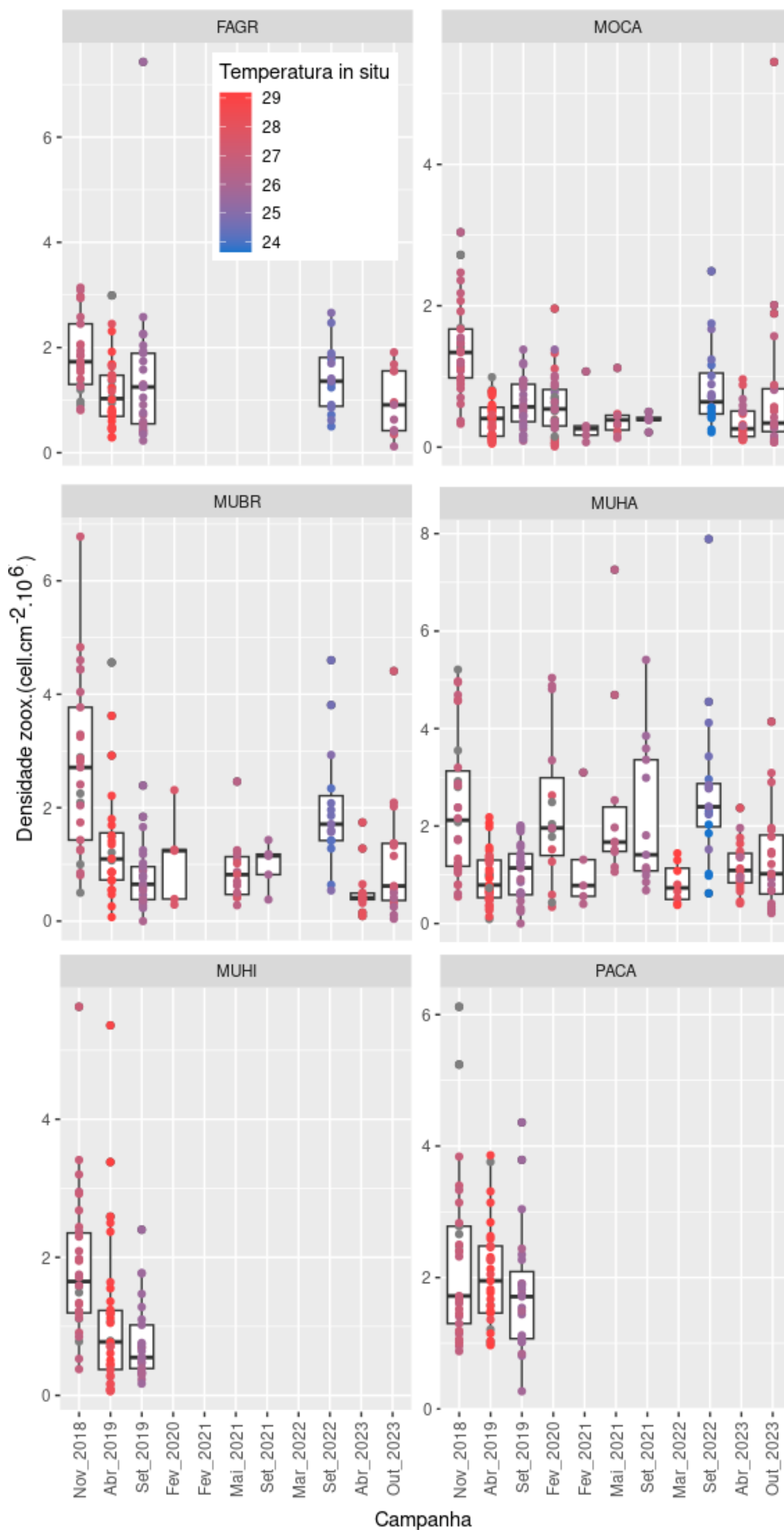
Esse indicador, *proxy* da saúde de corais, é composto por razões entre pigmentos associados à fotossíntese (clorofilas, feopigmentos e carotenoides) (Figura 11) e pela densidade e fotobiologia de zooxantelas (veja Figura 12).

A proporção entre a clorofilas *a* e outros tipos de clorofila indica grupos taxonômicos (e.g. clorofila *c* em zooxantelas) e estado fisiológico. A razão entre a biomassa de feopigmentos e a da respectiva clorofila intacta (e.g. feofitina *a*:clorofila *a*) indica degradação da clorofila e menor saúde do coral. Carotenoides são pigmentos fotoprotetores cujas baixas proporções indicam maior suscetibilidade a alta irradiância. Para completar o quadro, apresentamos também a disponibilidade de luz, ligada à turbidez que, por sua vez, responde a forçantes naturais e antropogênicas.

A concentração de clorofila *a* mostrou grande variação, com mínimos durante a anomalia térmica de 2019 (Figura 11). A redução nas concentrações de pigmentos clorofilianos nesse período pode ter sido associada à foto-oxidação dos pigmentos pela interação entre luz e o aumento da temperatura, bem como à redução nas densidades e carga pigmentar das zooxantelas (AMBARSARI et al., 1997; KLEPPEL et al., 1989; VENN et al., 2006). Os corais *M. cavernosa* e *M. braziliensis* apresentaram decréscimos de mais de 70% na concentração de clorofila *a*, mostrando a severidade das consequências da anomalia térmica. Após esse evento, as oscilações foram menos pronunciadas e, na última campanha (outubro de 2023), os valores foram dentro da normalidade.

As razões entre feofitina e carotenoides e a clorofila *a* foram relativamente mais baixas na primeira campanha (novembro 2018) (Figura 11) e aumentaram sensivelmente durante a anomalia térmica, acompanhadas pela redução da biomassa clorofiliana. Em setembro de 2019 e fevereiro de 2020 as razões ficaram similares às de 2018, com nova alta em setembro de 2021 e 2022, cujas forçantes são desconhecidas. Nas campanhas de 2023 (abril e outubro) os níveis permaneceram baixos. Ressalta-se maior variabilidade da razão carotenoides:clorofila *a* entre colônias durante o branqueamento.

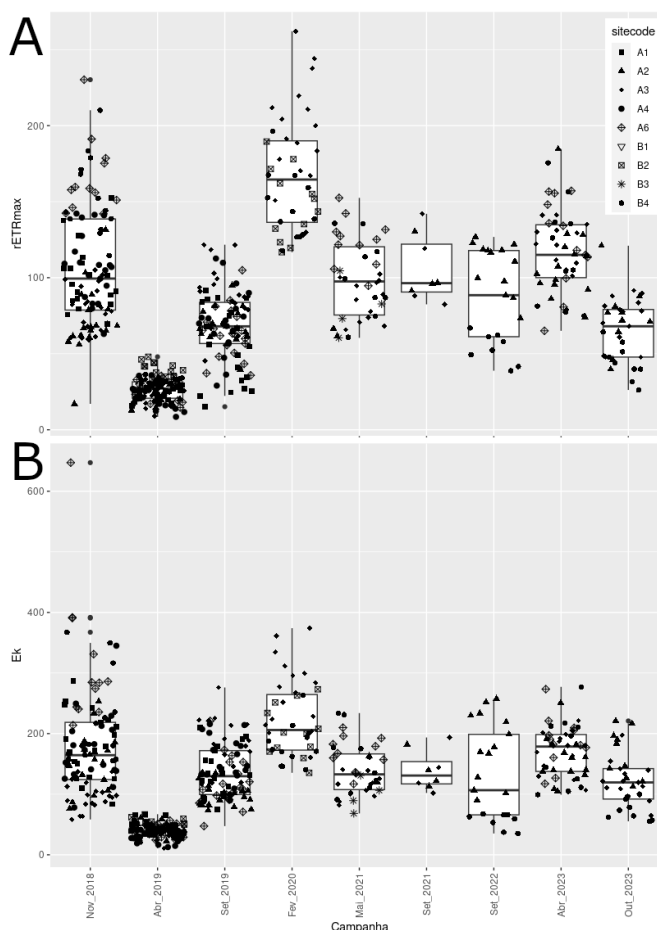
Figura 12: Densidade de zooxantelas por área de tecido (células cm^{-2}) em seis espécies de coral (diferentes janelas temporais entre novembro 2018 - outubro 2023). A cor dos pontos representa a temperatura in situ, conforme escala. FAGR = *Favia gravida*, MOCA = *Montastrea cavernosa*, MUBR = *Mussismilia braziliensis*, MUHA = *M. harttii*, MUHI = *M. hispida*, PACA = *Palythoa caribaeorum*.



Como ressaltado acima, a densidade de zooxantelas no tecido dos corais (Figura 12) integra o indicador “fisiologia de corais” e deve ser interpretada em conjunto com os pigmentos (veja Figura 11) e a fotobiologia (Figura 12). Zooxantelas são os principais componentes da microbiota de eucariontes fotossintetizantes associados a corais, sendo essenciais para sua sobrevivência. Reduções na sua densidade indicam comprometimento nas relações simbióticas e 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). Não surpreendentemente, a densidade de zooxantelas convergiu temporalmente com as concentrações de clorofila *a*, *c1* e *c2*, incluindo redução acentuada durante a anomalia térmica e posterior aumento (Figura 12). A relação inversa da densidade de zooxantelas com a temperatura expressa claramente o episódio de branqueamento em massa dos corais e oscilações sazonais (Figura 12). Não foi detectada associação direta entre a densidade de zooxantelas e o rompimento da barragem.

Figura 13: Fotobiologia de corais. Evolução temporal da capacidade fotossintética (fluxo máximo de transporte de elétrons, $rETR_m$, indicador da capacidade fotossintética) (A) e Irradiância mínima saturante (E_k , fluxo máximo de energia suportado pelo fotossistema das zooxantelas, indicador da capacidade de fotoaclimação do organismo) (B), nos sítios de Abrolhos (Área A) e Recifes Esquecidos (Área B).



Os indicadores relacionados à fotobiologia dos corais também apresentaram ampla variação e contundente queda em decorrência da anomalia térmica (Figura 13). Isso indica a sensibilidade das variáveis indicadoras da fotobiologia em relação a processos metabólicos de resposta rápida, em contraste com o teor de pigmentos e a densidade de zooxantelas, que representam respostas que integram efeitos acumulados por mais tempo.

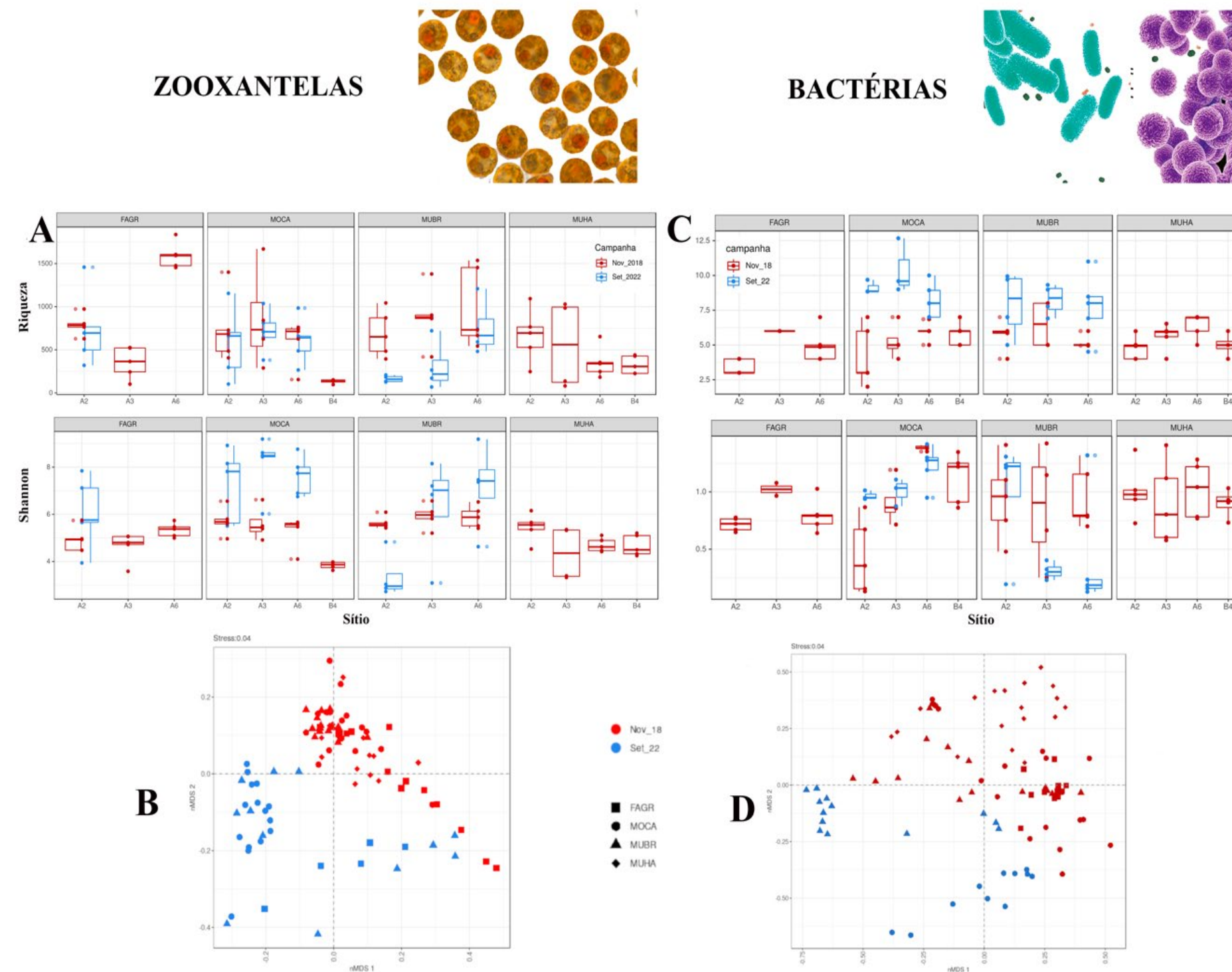
Valores mais elevados de $rETR_m$, indicador da capacidade fotossintética, são esperados durante o verão, dada sua relação direta com a irradiância e inversa com a profundidade ótica (ILUZ & DUBINSKY, 2015; SCHEUFEN et al., 2017). Na campanha de fevereiro de 2020 foram observados os maiores valores de $rETR_m$, (Figura 13A), que seguiram a forte redução durante a anomalia térmica de 2019. Esse pico após a anomalia pode representar uma supercompensação na resposta ao estresse térmico (ANTHONY & HOEGH-GULDBERG, 2003). Após o evento anômalo, os valores se mantiveram estáveis, próximos aos do início do monitoramento do PMBA/Fest (Figura 13A). Com fotossistemas sob menor estresse oxidativo, a partir de fevereiro de 2020, ficou evidente a menor capacidade fotossintética em maiores profundidades óticas (e.g. Recifes Esquecidos, B2 e B4) (Figura 13A).

O E_k , fluxo máximo de energia suportado pelo fotossistema das zooxantelas e indicador da capacidade de fotoaclimatação, foi menor nos Recifes Esquecidos (Área B) (Figura 13B). Temporalmente, valores mais altos de E_k foram observados em novembro de 2018, fevereiro de 2020 e abril de 2023 (Figura 13B). Durante o branqueamento em massa (abril 2019) houve decréscimo de E_k para todos os corais, seguindo o observado para rETRm. Os fotossistemas já haviam se recuperado em setembro de 2019 e mantiveram valores no nível pré-anomalia até a última campanha em outubro de 2023.

Em resumo, **as variáveis que compõe o indicador “fisiologia de corais” (Figura 11, Figura 12 e Figura 13) não apresentaram tendências diretamente relacionadas ao rompimento da barragem**, tendo respondido fortemente à anomalia térmica de 2019, associada a um evento de branqueamento em massa. No entanto, é importante considerar que **anomalias térmicas promovem estresse fisiológico, com potencial interação cumulativa com a contaminação por materiais associados ao rompimento da barragem, 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 materiais associados ao rompimento da Barragem de Fundão, considerando potenciais interações.

3.5 DIVERSIDADE GENÉTICA DE SIMBIONTES DE CORAIS

Figura 14: Diversidade genética de zooxantelas e bactérias simbiotes de corais em diferentes espécies de corais (FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastraea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *Mussismilia hartii*) e sítios (novembro de 2018 e setembro de 2022). **Chave:** Riqueza e diversidade de Shannon baseada na diversidade de sequências dos marcadores ITS-2 de zooxantelas (A) e 16SrDNA de bactérias (C). Ordenação não métrica multidimensional (nMDS) da diversidade genética das comunidades de Symbiodiniaceae (B) e bacteriana (D). Microfotografias meramente ilustrativas.



A riqueza da comunidade de zooxantelas variou entre sítios e espécies de corais hospedeiros. Notavelmente, a riqueza de tipos de ITS-2 em setembro de 2022, amostrada nos recifes de Abrolhos, foi maior do que aquela registrada em novembro de 2018 (Figura 14). Como não houve alteração no processamento e sequenciamento, pode-se inferir aumento na diversidade destes simbiossomas entre 2018 e 2022. Apesar de não haver um conjunto de dados análogo anterior ao rompimento da barragem, **é plausível supor que a menor diversidade em novembro de 2018 tenha sido efeito da contaminação, e que os valores da riqueza em 2022 indiquem recuperação.** Alternativamente, a variação pode ser resultado de oscilações naturais relacionadas a outras variáveis ambientais. A diversidade de Shannon, calculada com base nos tipos de ITS-2, indica, em 2022, valores mais próximos daqueles de 2018, exceto para *M. braziliensis* em dois sítios com menor diversidade. Esse padrão corrobora a variabilidade temporal na dominância por táxons de zooxantelas após o rompimento da barragem. O diagrama de ordenação (Figura 14B) complementa o quadro indicativo de uma composição de zooxantelas variável, temporalmente e entre espécies de corais. A falta de dados antecedentes ao rompimento impede uma análise robusta denexo causal, mas as informações aqui apresentadas formam uma base sólida para futuras comparações.

As métricas da comunidade bacteriana para os mesmos corais (Figura 14C e D) também indicam grande variação na riqueza, entre ca. 250 a >1500 OTUs, com extremos entre sítios e para a mesma espécie de coral amostrada no mesmo período (e.g. *F. graxida* em A2 e A6, novembro de 2022). A diversidade de Shannon foi, em geral, menos variável entre sítios e espécies. No contraste temporal, observa-se mudanças entre novembro de 2018 e setembro de 2022. Essas mudanças são mais evidentes para a riqueza associada a *M. braziliensis*, com menores valores em 2022, e para a diversidade bacteriana associada a *M. cavernosa*, maior em 2022.

Ressalta-se que o trabalho não pretendeu ser taxonomicamente exaustivo, mas sim fornecer um panorama que indicasse tendências em longo prazo. **Os dados de riqueza e diversidade alfa e beta aqui apresentados fornecem indícios de mudanças após o rompimento, sem comprovar nexode causa, e constituem a base para contrastes futuros.**

3.6 NATUREZA DO SEDIMENTO E TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO EM ESTRUTURAS RECIFAIS E BANCOS DE RODOLITOS

Figura 15: Variações espaço-temporais (2018-23) em características dos sedimentos superficiais de recifes, bancos de rodolitos e recifes costeiros (médias semestrais). **Painel A (recifes)**: Parcel dos Abrolhos (A7), Timbebas (A6), Pedra de Leste (A1) e Sebastião Gomes (A2), Esquecidos Sul e Norte (B2 e B4); **Painel B (bancos de rodolitos)**: áreas A (A5), B (B1), C (C2, C4, C8 e C10) e D (D2-3, D5-8, D10-11 e D13); **Painel C (recifes costeiros, APA Costa das Algas)**: do ponto mais próximo ao mais afastado da foz do rio Doce (D14-D21). **Painel D**: Teor de hematita em relação à distância da foz (D14-D21).

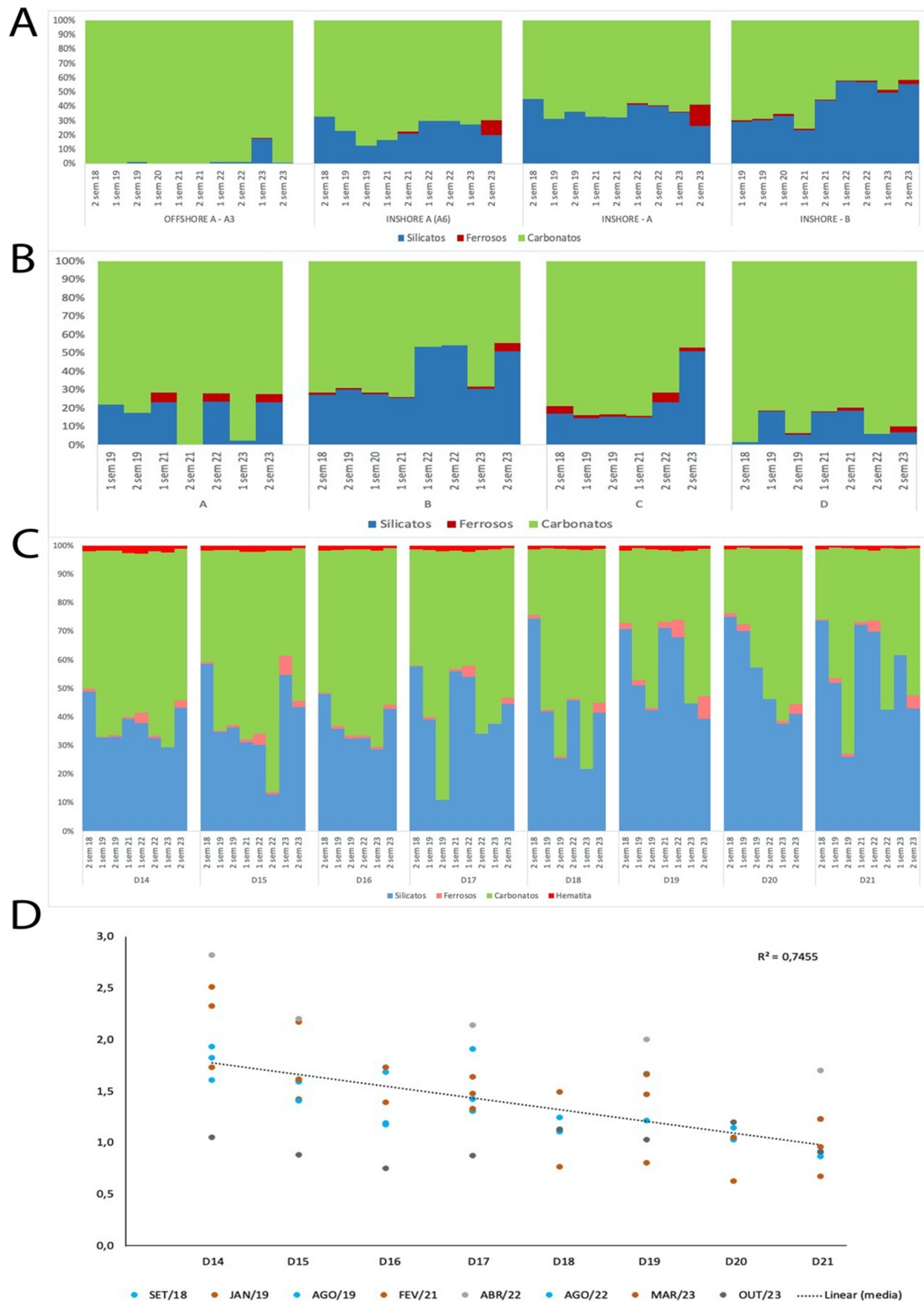


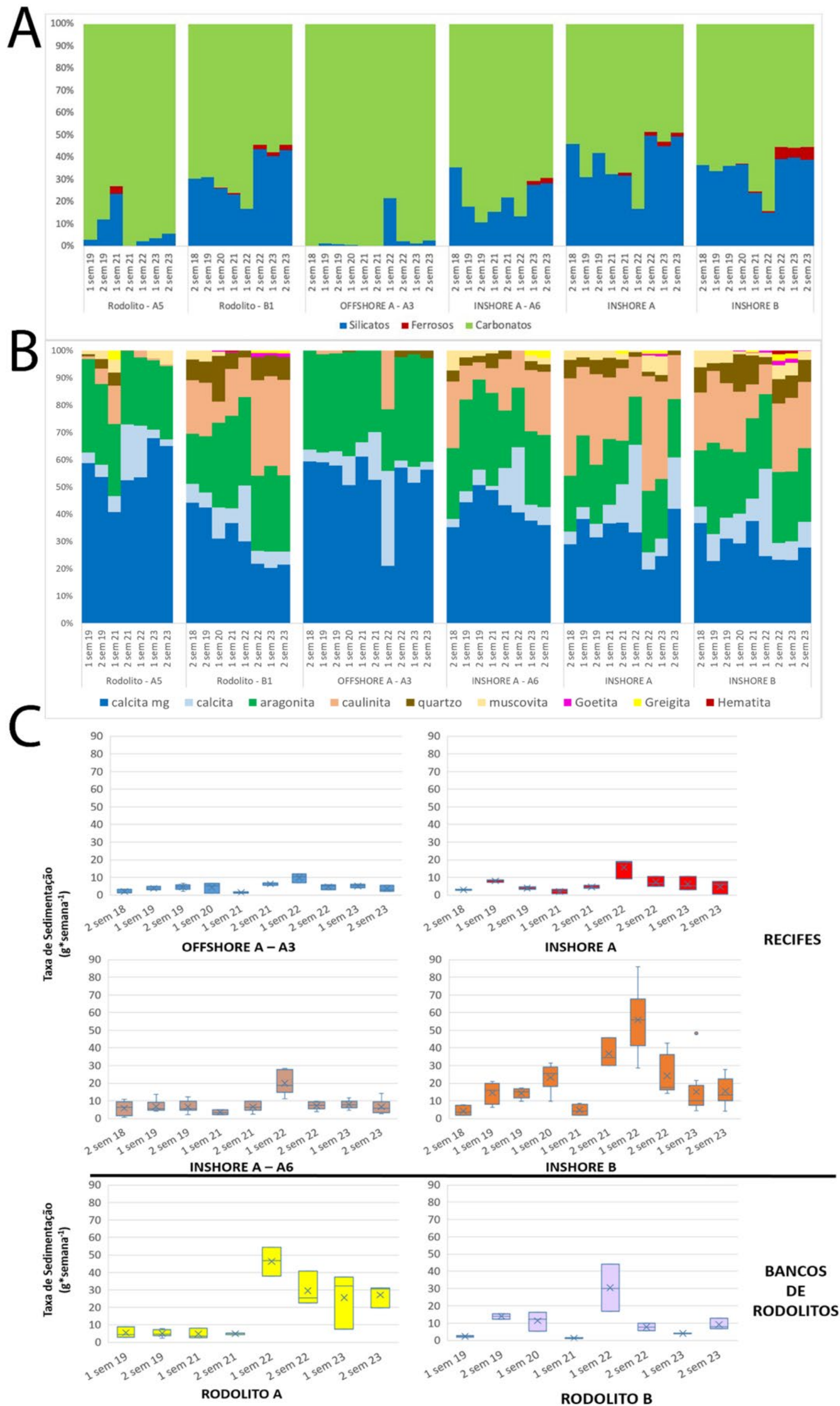
Tabela 2: Composição cristalográfica dos sedimentos superficiais coletados entre setembro de 2018 e outubro de 2013, mostrando as concentrações (%) dos polimorfos em sítios de recifes (RE), bancos de rodolitos (RO) e recifes adjacentes ao litoral (RC). Os sítios A4 (Ilha Santa Bárbara) e os sítios D2 e D5, sem rodolitos ou com rodolitos mortos e esparsos, destacados na tabela, não foram considerados nas séries temporais, devido às suas singularidades.

Sítio		N de Amostras	Gormanita	Greigita	Muscovita	Calcita	Aragonita	Calcita Mg	Caulinita	Quartzo	Hematita
A1	RE	10	0	1,2	4,7	8,6	23,4	35,9	19,3	6,8	0
A2	RE	10	0	2,2	6,4	7,5	20,1	29,1	29,5	5,2	0
A3	RE	11	0	0,1	0,1	8,3	33,2	56,3	1,5	0,5	0
A6	RE	10	0	1,1	3,3	7,6	26,3	42,3	14,4	5	0
B4	RE	9	0	1,1	2,8	6,4	18,9	30,2	24,4	16,1	0,1
B6	RE	4	0	1,2	5	4,9	13	23,2	30,2	22,3	0,2
A5	RO	8	0	1,7	2,5	7,9	27,5	46,6	10,1	3,7	0
B1	RO	8	0	0,9	1,9	6,8	20,9	33,6	23,6	12	0,2
C2	RO	3	0	0,4	3,2	7	28,3	38,9	5,8	15,9	0,4
C4	RO	6	0,3	0,6	2	4,6	30,9	44,8	7,6	7,8	1,4
C8	RO	3	0	1,8	8	4,6	17,6	28,5	38,3	1,1	0,3
D3	RO	8	0	0,7	2,1	5,6	35,7	44,7	8,8	2,2	0,2
D6	RO	5	0	0,8	1,7	1,9	33,7	58,7	2,2	1,1	0
D7	RO	6	0,5	0,5	1,7	9	16,5	47,8	21,6	2	0,6
D8	RO	5	0	2,1	1,6	6,5	23,2	64,1	1,9	0,6	0
D10	RO	7	0,5	0,3	3,5	7,2	38,5	36	12,9	0,8	0,3
D11	RO	7	0	0,2	0,6	6	41,1	48,6	3,1	0,4	0
D13	RO	6	0	0,4	0,6	2,2	45,4	50	1,4	0	0
A4	AR	10	0	0	1	8,2	33,5	51,3	3,7	2,4	0
D2	RO	5	0	1	1,9	3	30	36,2	16,3	10,5	1,1
D5	RO	8	0	1,1	1	5,2	32	45,9	13,1	1,6	0
D14	RC	9	0	0,64	0,96	5,03	24,56	30,87	1,66	34,31	1,97
D15	RC	9	0	1,45	1,74	3,5	22,01	33,8	6,86	29,03	1,61
D16	RC	7	0	0,83	0,24	3,39	24,9	32,77	4,69	31,86	1,32
D17	RC	9	0	0,61	1,04	2,99	16,64	36,49	3,76	36,96	1,51
D18	RC	7	0	0,91	1,55	2,97	21,24	31,81	6,1	34,28	1,14
D19	RC	8	0	2,26	1,3	2,89	15,35	22,91	5,88	48,00	1,41
D20	RC	7	0	1,37	1,46	2,58	22,05	16,14	26,57	28,81	1,02
D21	RC	9	0	1,24	2,64	2,14	18,69	21,83	1,66	50,74	1,06

De maneira geral, os minerais mais representativos foram os carbonáticos (67,9%), seguidos dos siliciclásticos (30,5%) e dos ferrosos (1,6%). A evolução temporal está apresentada separadamente para recifes e bancos de rodolitos (Figura 15A e B) e as concentrações médias dos polimorfos estão listadas na Tabela 2. A predominância de minerais de CaCO_3 nas amostras das adjacências de Abrolhos (Área A, sítios A3, A4 e A5) foi relacionada principalmente à natureza biogênica do fundo (REIS et al., 2016), além de estarem a maior distância da costa em relação aos sítios A1, A2 e A6. Os sítios A3 e A4 se destacaram por apresentar praticamente 100% de sedimentos biogênicos. Por outro lado, os Recifes Esquecidos (Área B) apresentaram presença marcante de sedimentos terrígenos. Na última campanha houve maior participação de greigita, mineral ferroso sintetizado por bactérias sulfato-redutoras (ANTHONY et al., 1990). Nos bancos de rodolitos próximos à foz do rio Doce (Área C) (Figura 15B) houve contribuição expressiva de sedimentos siliciclásticos, principalmente quartzo. A segregação das Áreas C e D está associada à maior deposição de sedimentos flúvio-terrígenos na porção sul da área de estudo, mais próxima da foz do rio Doce, incluindo sedimentos ferrosos.

Dentre as variações espaço-temporais nos recifes costeiros da APA Costa das Algas (Área D), a concentração de hematita se destaca como possível assinatura da descarga sedimentar do rio Doce, uma vez que ocorre atenuação linear persistente em função da distância da sua foz ($R^2 = 0,745$) (Figura 15C e D). Embora a detecção de sedimentos ferrosos não represente nexo causal inequívoco com o rompimento, **a presença destes sedimentos revela a ampla abrangência das plumas flúvio-costeiras na plataforma continental**. No entanto, ressalta-se que **a associação entre sedimentos ferrosos e o rompimento foi demonstrada** através de: 1) similaridades entre assinaturas microestruturais e químicas das partículas minerais ferrosas contidas em sedimentos coletados no mar e oriundos da barragem (RRDM 2021 e 2022); 2) detecção de partículas de óxidos de ferro sobre talos de macroalgas, com assinatura microestrutural e química similar aos sedimentos oriundos da barragem; 3) alterações celulares em macroalgas dos sítios costeiros da Área D e incorporação subcelular de íons de ferro (RRDM 2020, 2021, 2022). A detecção da contaminação por metais em esqueletos de corais, apresentada em CARDOSO et al. (2022), e em algas coralináceas formadoras de rodolitos (veja Item 4), confirmam a chegada de materiais associados ao rompimento em recifes e bancos de rodolitos.

Figura 16: Sedimentos capturados em armadilhas (janeiro de 2019 a outubro de 2023) em banco de rodolitos na Área A (A5), banco de rodolitos na área B (B1), recife “offshore” na Área A (A3), recife “inshore” na Area A (A6), recifes “inshore” na Area B (Esquecidos, B4 e B2). **Painel A:** proporção de minerais carbonáticos, siliciclásticos e ferrosos. **Painel B:** polimorfia. **Painel C:** taxas de sedimentação ($\text{g} \cdot \text{semana}^{-1}$).



Armadilhas de sedimentos fornecem informações sobre taxas de sedimentação e são fontes de amostras de sedimentos finos. Nos relatórios anteriores (RRDM, 2021; RRDM, 2022), análises de componentes principais (PCAs) com dados mineralógicos e granulométricos oriundos de armadilhas, evidenciaram grupos formados pelas amostras das Área A e B, padrão mantido em 2023.

Ao longo do monitoramento, a classe granulométrica predominante nas armadilhas foi areia (75% em média). Sedimentos mais grossos (cascalho) foram menos abundantes (5,3%), com exceção das armadilhas do banco de rodolitos da Área A (A5), onde houve maior contribuição de cascalho (16%). Sedimentos de origem continental foram mais abundantes nas armadilhas dos recifes costeiros (20-30%), seguidos pelas dos bancos de rodolitos da Área B (B1) e contrastando com as do banco de rodolitos da Área A (A5) e do Parcel dos Abrolhos (A3), estas últimas com mais de 80% de sedimentos carbonáticos (Figura 16). Ressalta-se o registro dos minerais ferrosos goetita e hematita em recifes costeiros, mais abundantes nas armadilhas dos Recifes Esquecidos (Área B), seguidas pelas dos recifes costeiros da Área A (Pedra de Leste e Sebastiao Gomes) (Figura 16).

As taxas de sedimentação nos Recifes Esquecidos (Área B) foram consistentemente maiores do que nas adjacências de Abrolhos (Área A) (PERMANOVA, $p < 0,001$) (Figura 16). Dentre os sítios recifais da Área A, as maiores taxas foram as de Pedra de Leste e Sebastião Gomes (A1 e A2), seguidas por Timbebas (A6) e Parcel dos Abrolhos (A3). Diversos sítios, tanto em rodolitos quanto em recifes, apresentaram aumento nas taxas de deposição a partir do primeiro semestre de 2022, possivelmente em resposta a forçantes meteoceanográficas. Essa mudança de regime foi associada a um aumento na participação de sedimentos ferrosos em todos os sítios recifais, com exceção do Parcel dos Abrolhos (A3). Nos sítios de rodolitos da Área A (A5) houve aumento de sedimentos de origem terrígena, também a partir de 2022.

Ressaltando-se a ausência de um conjunto de dados análogo e anterior ao rompimento da barragem, **é plausível supor que forçantes meteoceanográficas estejam contribuindo com a intensificação na ressuspensão e/ou transporte de sedimentos terrígenos, inclusive sedimentos ferrosos e sedimentos com material associado ao rompimento da barragem.** Assim, **não é possível rejeitar a hipótese de associação entre a mudança mineralógica nos sedimentos capturados em armadilhas com aportes da bacia do rio Doce e o rompimento da barragem.** Inclusive, o aumento na participação de sedimentos ferrosos foi consistentemente maior nos sítios recifais mais próximos da foz do rio Doce.

3.7 TAXAS DE COLONIZAÇÃO DE ORGANISMOS SÉSSEIS EM ESTRUTURAS RECIFAIS

Figura 17: Colonização em placas artificiais (Calcification Accretion Units - CAUs) durante ciclos anuais (eixo horizontal: ano de retirada). **Painéis A e B:** Cobertura relativa dos principais grupos (A) e razão construtores: não-construtores (B) após o rompimento da barragem (2018-19 a 2022-23) em recifes coralíneos, recifes adjacentes ao litoral e bancos de rodolitos das Áreas A (Abrolhos e adjacências) e B (Esquecidos). **Painéis C, D e E:** Cobertura relativa dos principais grupos (C), razão construtores: não-construtores (D) e Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (E) com amostras discriminadas por períodos e sítios antes (2012-13 a 2013-14) e depois (2016-17 a 2022-23) do rompimento, em dois sítios da Área A (Abrolhos e adjacências). O mapa (F) mostra a localização dos sítios, com círculos azuis indicando sítios de recifes, quadrados azuis indicando sítios em bancos de rodolitos, círculos pretos indicando recifes adjacentes ao litoral. As setas vermelhas evidenciam os dois sítios com dados pré e pós rompimento.

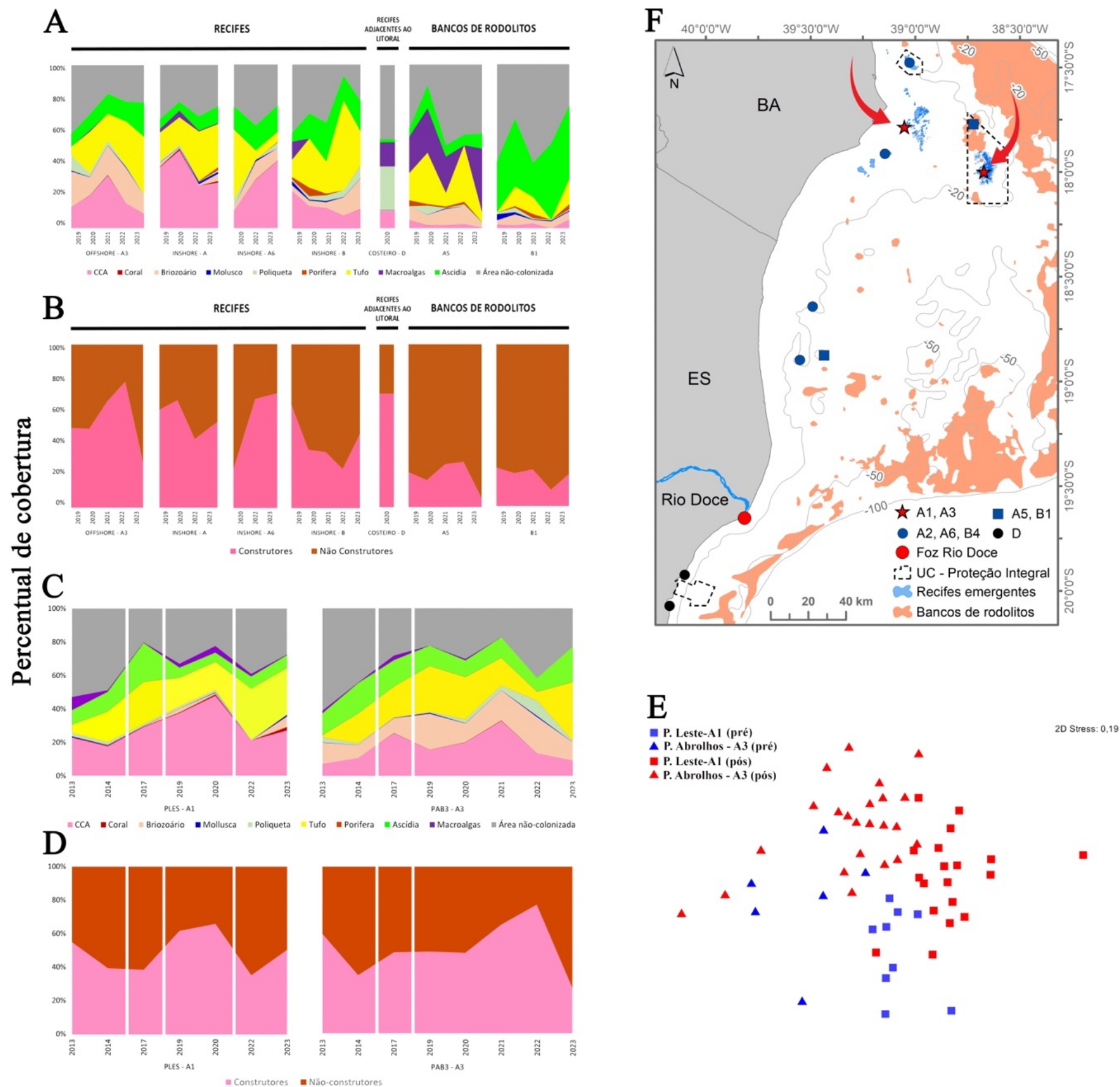


Tabela 3: Sumário da PERMANOVA com dados de cobertura das placas de colonização (CAUS) obtidos antes (2012-2013 e 2013-2014) e após (2016-2017, 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021; 2021-2022, 2022-2023) o rompimento da barragem em Pedra de Leste – A1 e Parcel dos Abrolhos – A3. Mesmos dados da Figura 17 C, D e E. Análise feita com dados não transformados e distância de Bray-Curtis. O fator “Barragem”, fixo, se refere à codificação das amostras como anteriores ou posteriores (2016 em diante) ao rompimento. Área não colonizada e grupos com baixa representatividade (<5% de cobertura) como crustáceos e poríferos foram removidos da análise. Valores significativos ($p < 0.05$) em negrito.

	gl	SQ	QM	Pseudo-F	P(perm)
Barragem	1	5388,8	5388,8	34,523	0,011
Sítio	1	10458	10458	77,682	0,002
Ano (Barragem)	6	9498,5	1583,1	37,756	0,001
Barragem x Sítio	1	403,59	403,59	0,29979	0,863
Ano (Barragem) x Sítio	5	7003,3	1400,7	33,405	0,001
Resíduos	42	17611	419,3		
Total	56	51326			

Ensaio com placas de colonização permitem acessar processos ecológicos chave em ambientes recifais, tais como a mineralização do CaCO_3 e o recrutamento, expressos por estimativas de taxas de colonização, diversidade de colonizadores e contribuição relativa de organismos construtores e não-construtores. Séries temporais dessas variáveis permitem avaliar flutuações naturais, tendências e respostas a forçantes antropogênicas.

Nas áreas A e B (Abrolhos e Esquecidos) as placas foram mais colonizadas por CCA e tufos (Figura 17A), com menor recrutamento de corais na Área B, mais próxima à foz do rio Doce (veja RRDM, 2023). Nos bancos de rodolitos, as placas da Área A apresentaram maior abundância de macroalgas e tufos, enquanto ascídias e turf foram mais abundantes nas da Área B (Figura 17A). De forma geral, placas em recifes apresentaram maiores coberturas por organismos construtores do que as placas em bancos de rodolitos (Figura 17B). Já a produção de CaCO_3 foi maior nos recifes adjacentes ao litoral da Área D (562 ± 154 g/m/ano), seguidos pelos bancos de rodolitos e recifes da Área A (332 ± 116 e 293 ± 77 , respectivamente) e da Área B (155 ± 77 e 150 ± 86 , respectivamente).

As análises baseadas em CAUs instaladas antes (2012-14) e após o rompimento da barragem (2016-23) nos sítios A1 (P. Leste) e A3 (P. Abrolhos) revelaram sete grupos de organismos construtores e três de não-construtores (Figura 17C). Em A1, os construtores majoritários foram CCA ($25,7 \pm 3,5$) e em A3 foram CCA e briozoários ($14,2 \pm 5,2$ e $16,1 \pm 4,9$, respectivamente) (Figura 17C). Os não construtores foram tufos ($15,4 \pm 6,2$ e $18,3 \pm 9,5$, em A1 e A3) respectivamente) e ascídias ($9,0 \pm 3,3$ e $14,1 \pm 3,0$, em A1 e A3). Conforme apresentado em RRDM (2023), houve aumento na massa calcária e no percentual de construtores após o rompimento (Figura 17D), o qual esteve associado a maiores coberturas por CCA (Figura 17C), principalmente no sítio Pedra de Leste. Em 2022 e 2023 houve tendência de redução das CCA em relação aos ciclos anteriores. A ordenação com dados de cobertura (Figura 17E), acompanhada por PERMANOVA (Tabela 3), discriminou os ciclos anteriores (2012-13, 2013-14) e

posteriores ao rompimento (2016-17 a 2022-23), **revelando uma associação entre o rompimento da barragem e alterações em processos de colonização**. Ainda que possa indicar intensificação do crescimento recifal, este aumento deve ser interpretado cautelosamente, pois foi associado à cobertura de CCA, organismos de sucessão primária e crescimento rápido.

O delineamento da PERMANOVA permitiu avaliar a diferença entre os períodos pré- e pós-rompimento, em cada sítio, considerando a variabilidade entre anos dentro de cada período (Tabela 3). As diferenças entre períodos e sítios, bem como a ausência de interação, indicam que, apesar das diferenças entre os sítios, eles se alteraram de forma semelhante após o rompimento. **Esse conjunto de resultados confirma uma associação entre o rompimento da barragem e alterações na colonização dos recifes**, sem retorno desse importante indicador de processos às condições anteriores ao evento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

Ao longo da execução do PMBA/Fest 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 cinco anos de monitoramento do PMBA/Fest, 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.

Indicador 1, Cobertura bêntica de recifes coralíneos. Nos recifes coralíneos, houve alteração na estrutura e na dinâmica das comunidades após o rompimento da barragem. 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.

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).

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 à fotossíntese e pigmentos clorofilianos e fotoprotetores mostraram variações espaciais dependentes dos regimes de luz incidente no fundo. Variações temporais foram marcadas essencialmente pelo evento de anomalia térmica no início de 2019, que levaram ao branqueamento de corais. De forma geral, o indicador oscilou de forma ampla ao longo dos 5 anos do monitoramento, sem apresentar relação causal direta com o rompimento.

Indicador 5, Diversidade genética de simbioses de corais. A riqueza e diversidade genética de zooxantelas e bactérias simbioses de corais mostram 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.

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 RRDM (2020, 2021, 2022), 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 adiante ("Considerações sobre os ambientes monitorados", abaixo).

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 materiais associados ao rompimento da barragem, com alterações detectadas nos níveis sub-celular, celular, metabólico, de indivíduos, comunidades e processos ecossistêmicos, muitas delas sem retorno às condições registradas antes do rompimento.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos para o Tema.

6 REFERÊNCIAS

- AMADO-FILHO, G.M., ANDRADE, L.R., KAREZ, C.S., FARINA, M., PFEIFFER, W.C. Brown algae species as biomonitors of Zn and Cd at Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Marine Environmental Research* 48(3): 213–224. 1999.
- AMADO-FILHO, G.M., BAHIA, R.G., PEREIRA-FILHO, G.H., LONGO, L.L. South Atlantic rhodolith beds: Latitudinal distribution, species composition, structure and ecosystem functions, threats and conservation status. *Rhodolith/Maërl Beds: A Global Perspective*, 299-317. 2017.

- 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.
- ANTHONY, J.W. Elements, sulfides, sulfosalts. Handbook of Mineralogy. (Elements, Sulfides, Sulfosalts). Mineralogical Society of America, 1. 1990.
- ANTHONY, K.R.N.; HOEGH-GULDBERG, O. Variation in coral photosynthesis, respiration and growth characteristics in contrasting light microhabitats: An analogue to plants in forest gaps and understoreys? Functional Ecology, 17 (2):246–59. 2003.
- 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.
- BEIJBOM, O., EDMUNDS, P. J., KLINE, D. I., MITCHELL, B.G. Automated Annotation of Coral Reef Survey Images. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2012.
- 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.
- 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.

- COELHO, A.L.N. Alterações hidrogeomorfológicas no médio-baixo rio Doce/ES. Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense. 2007
- 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.
- EVANGELISTA, H., et al. Using Nd and 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, 807(2). 2022.
- FEST, FUNDAÇÃO ESPÍRITO-SANTENSE DE TECNOLOGIA. Relatório Anual do PMBA/Fest. RT-43. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 193. 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., IWAOKI, 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.
- HOEGH-GULDBERG, O. et al. Coral reefs in peril in a record-breaking year. Science, 382 (6676): 1238–1240, 2023.
- 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.

- ILUZ, D., DUBINSKY, Z. Coral photobiology: New light on old views. 118(2): 71–78. 2015.
- JACOB, C. et al. Marine biodiversity offsets: Pragmatic approaches toward better conservation outcomes. Conservation letters, 13 (3). 2020.
- 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.
- MOURA, R. L., AMADO-FILHO, G. M., MORAES, F. C., BRASILEIRO, P. S., SALOMON, P. S., MAHIQUES, M. M., ... & THOMPSON, F. L. An extensive reef system at the Amazon River mouth. Science advances, 2(4), e1501252. 2016.
- MOURA, R. L., ABIERI, M. L., CASTRO, G. M., CARLOS-JÚNIOR, L. A., CHIROQUE-SOLANO, P. M., FERNANDES, N. C., ... & Bastos, A. C. Tropical rhodolith beds are a major and belittled reef fish habitat. Scientific reports, 11(1): 794. 2021.
- 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.
- PETER J.R., GADEMANN, R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity, Aquatic Botany, 82(3):222–237. 2005.
- R CORE DEVELOPMENT TEAM R. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org>. 2018.
- 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.
- RIBEIRO, F.V. et al. Benthic cyanobacterial diversity and antagonistic interactions in Abrolhos Bank: Allelopathy, susceptibility to herbivory, and toxicity. Frontiers in Marine Science, p.1887, 2022.
- 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, 6:e5419. 2018.

- 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.
- SALGADO, L. T.; ANDRADE, L. R.; AMADO FILHO, G. M. Localization of specific monosaccharides in cells of the brown alga *Padina gymnospora* and the relation to heavy-metal accumulation. *Protoplasma*, n. 225, p. 123–128, 2005.
- 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.
- SCHEUFEN, T. et al. Changes in the number of symbionts and Symbiodinium cell pigmentation modulate differentially coral light absorption and photosynthetic performance. *Frontiers in marine Science*, 4. 2017.
- 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.
- TEIXEIRA, C.; LEITÃO, R.; RIBEIRO, F.V.; MORAES, F. et al. Sustained mass coral bleaching (2016-2017) in Brazilian turbid-zone reefs: taxonomic, cross-shelf and habitat-related trends. *Coral Reefs*, 38:801–813. 2019.
- TEIXEIRA, C.D.; CHIROQUE-SOLANO, P.M.; RIBEIRO, F.V.; CARLOS-JÚNIOR, L.A. et al. Decadal (2006-2018) dynamics of Southwestern Atlantic's largest turbid zone reefs. *PLoS ONE*, 16, 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*, 64:531–545. 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.
- VARGAS-ÁNGEL B., RICHARDS C.L., VROOM P.S., PRICE N.N., SCHILS T., YOUNG C.W., SMITH J., JOHNSON M.D., BRAINARD R.E. Baseline Assessment of Net Calcium Carbonate Accretion Rates on U.S. Pacific Reefs. *PLoS ONE* 10(12): e0142196. 2015.
- VÉLEZ-RUBIO, G., ETCHEBEHERE, L.G., SCARABINO, F., TRINCHIN, R. Macroalgae morpho-functional groups in Southern marine ecosystems: rocky intertidal in the Southwestern Atlantic. *Marine Biology*, 168(10). 2021.
- 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.