

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

**RELATÓRIO ANUAL:**

**Anexo 3 Marinho – Fundos Recifais, Bancos de Rodólitos e  
Macroalgas**

**RT-19J RRDM/NOV19**

**Coordenação Geral**

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

## COORDENAÇÕES

### **Anexo 1**

Adalto Bianchini (FURG)

### **Anexo 3**

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

### **Subprojetos**

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

### **Anexo 4**

Jacqueline Albino (UFES)

### **Subprojetos**

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

### **Anexo 5**

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

### **Anexo 6**

Agnaldo Silva Martins (UFES)

### **Subprojetos**

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

### **Anexo 7**

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

### **Subprojetos**

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

### **Anexo 8**

Heitor Evangelista (UERJ)

### **Coordenação Técnica (CTEC)**

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

### **Coordenação Escritório de Projetos**

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

### **Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)**

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

## SUMÁRIO

<b>1. METODOLOGIA .....</b>	<b>21</b>
<b>1.1. PROBLEMA ABORDADO .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2. ABORDAGENS ANALÍTICAS .....</b>	<b>27</b>
<b>1.3. AMOSTRAGEM E ANÁLISE .....</b>	<b>28</b>
1.3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES DE BANCOS DE RODOLITOS .....	28
1.3.2. IDENTIFICAÇÃO TAXONÔMICA DE MACROALGAS .....	29
1.3.3. IDENTIFICAÇÃO TAXONÔMICA DAS ALGAS CORALINÁCEAS (CALCÁRIAS) INCRUSTANTES .....	29
1.3.4. ABUNDÂNCIA DE MACROALGAS E ORGANISMOS BENTÔNICOS NA ÁREA LITORÂNEA .....	29
1.3.5. CARACTERIZAÇÃO DA COMUNIDADE PRESENTE NAS CAUS E MEDIÇÕES COM DATALOGGERS ASSOCIADOS .....	30
1.3.6. CARACTERIZAÇÃO QUALI- E QUANTITATIVA DO SEDIMENTO DAS CAUS E ARMADILHAS DE SEDIMENTO	31
1.3.7. CARACTERIZAÇÃO DE COMUNIDADES RECIFAIS BENTÔNICAS .....	32
1.3.8. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA COLUNA D'ÁGUA .....	32
1.3.9. AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FISIOLÓGICA DE CORAIS .....	33
1.3.10. ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE ZOOXANTELAS .....	33
1.3.11. CARACTERIZAÇÃO GENÉTICA DE ZOOXANTELAS .....	34
1.3.12. ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO PLÂNCTON .....	35
1.3.13. QUANTIFICAÇÃO DE PIGMENTOS CLOROFILIANOS .....	36
<b>2. RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>2.1. ANÁLISES SEDIMENTOLÓGICAS .....</b>	<b>37</b>
2.1.1. SEDIMENTOS SUPERFICIAIS .....	37
2.1.2. ARMADILHAS DE SEDIMENTO .....	50
<b>2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES ASSOCIADAS A BANCOS DE RODOLITOS .....</b>	<b>53</b>

<b>2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES DE MACROALGAS E ORGANISMOS BENTÔNICOS NOS RECIFES ADJACENTES AO LITORAL NA APA COSTA DAS ALGAS E REVIS SANTA CRUZ (APA-REVIS), ÁREA D .....</b>	<b>86</b>
2.3.1. RIQUEZA E DIVERSIDADE DE MACROALGAS E ALGAS CORALINÁCEAS INCRUSTANTES NOS RECIFES COSTEIROS ADJACENTES AO LITORAL DA APA-REVIS .....	88
2.3.2. COMPARAÇÕES COM ESTUDOS PRÉVIOS .....	104
2.3.3. COBERTURA BENTÔNICA DOS RECIFES COSTEIROS ADJACENTES AO LITORAL DA APA-REVIS .....	108
<b>2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES ASSENTADAS EM ESTRUTURAS ARTIFICIAIS</b>	<b>112</b>
2.4.1. PRODUÇÃO DE CARBONATO DE CÁLCIO E MASSA NÃO CALCÁRIA.....	115
2.4.2. COBERTURA DE ORGANISMOS NAS CAUS.....	119
<b>2.5. CARACTERIZAÇÃO DE COMUNIDADES RECIFAIS BENTÔNICAS.....</b>	<b>123</b>
2.5.1. AMOSTRAGEM QUALI-QUANTITATIVA COM FOTOQUADRADOS NOS RECIFES DAS ÁREAS A E B .....	123
2.5.2. ESTABELECIMENTO DE UMA LINHA DE BASE (NOVEMBRO, 2018) PARA AS ÁREAS A E B.....	126
2.5.3. VARIAÇÃO NA ESTRUTURA DAS COMUNIDADES RECIFAIS DAS ÁREAS A E B. ....	138
2.5.4. CONTRASTES BEFORE-AFTER (2015-2019).....	146
<b>2.6. AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FISIOLÓGICA DE CORAIS E CARACTERIZAÇÃO DE SIMBIONTES.....</b>	<b>152</b>
2.6.1. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS ACESSADOS .....	152
2.6.2. PARÂMETROS X REGIME DE LUZ.....	153
2.6.3. FOTOSÍNTESE DOS CORAIS E ANOMALIA TÉRMICA .....	160
2.6.4. CARACTERIZAÇÃO DE ZOOXANTELAS POR SEQUENCIAMENTO GÊNICO.....	162
<b>2.7. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA .....</b>	<b>163</b>
<b>2.8. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES PLANCTÔNICAS ASSOCIADAS AOS FUNDOS RECIFAIS.....</b>	<b>184</b>
2.8.1. ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO PLÂNCTON POR CITOMETRIA DE FLUXO MULTIPARAMÉTRICA 187	
2.8.2. DIVERSIDADE CITOMÉTRICA DO PICO E NANOPLÂNCTON AUTOTRÓFICO .....	191
2.8.3. ANÁLISES QUALI- QUANTITATIVAS POR MICROSCOPIA.....	192

2.8.4. ANÁLISE QUALI-QUANTITATIVA DE COMUNIDADES PLANCTÔNICAS POR IMAGEAMENTO DINÂMICO EM FLUXO	193
2.8.5. ANÁLISE QUALI-QUANTITATIVA DE COMUNIDADES PLANCTÔNICAS POR MICROSCOPIA INVERTIDA .....	196
2.8.6. QUANTIFICAÇÃO DE PIGMENTOS POR ESPECTROFLUORIMETRIA.....	199
<b>2.9. COLETA E PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS PARA TOXICOLOGIA .....</b>	<b>205</b>
<b>3. DISCUSSÃO INTEGRADA DO AMBIENTE RECIFAL .....</b>	<b>205</b>
<b>3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL SOBRE OS AMBIENTES RECIFAIS DA REGIÃO ESTUDADA</b>	<b>210</b>
<b>3.2. REFERENCIAL CONCEITUAL DO DELINEAMENTO AMOSTRAL E DAS ANÁLISES.....</b>	<b>214</b>
<b>3.3. ANÁLISE INTEGRADA DOS AMBIENTES RECIFAIS .....</b>	<b>216</b>
3.3.1. APA COSTA DAS ALGAS .....	216
3.3.2. FOZ DO RIO DOCE .....	220
3.3.3. RECIFES ESQUECIDOS.....	221
3.3.4. ABROLHOS E ADJACÊNCIAS .....	223
<b>3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.....</b>	<b>226</b>
<b>4. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>234</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Região estudada, destacando-se as cinco Áreas (A-E) e a malha amostral do projeto, sobreposta à distribuição conhecida de recifes (veja Figura 2 para elementos complementares). O mapa inclui os códigos dos sítios amostrais usados no texto. Alguns sítios são adicionais ao Plano de Trabalho, nas Áreas A e C. ....24
- Figura 2: Batimetria (esquerda) e megahabitats bênticos (direita) da região estudada com sobreposição da malha do projeto (códigos das estações na Figura 1). Alguns sítios amostrais são adicionais ao Plano de Trabalho, nas Áreas A e C. ....25
- Figura 3: Unidades de Conservação na região estudada, com sobreposição da malha do projeto (códigos das estações na Figura 1) e dos recifes emergentes ou quase emergentes. ....26
- Figura 4: Análise de Componentes Principais (PCA) com dados mineralógicos dos sedimentos superficiais coletados nas Áreas C e D e outras variáveis ambientais (turbidez, distância da costa, latitude). Os pontos vermelhos representam campanhas costeiras e os pontos azuis representam campanhas embarcadas. Círculos menores representam as amostras e os maiores os centroides de cada grupo (amostras costeiras e embarcadas). ....39
- Figura 5: Análise de Componentes Principais (PCA) com dados mineralógicos dos sedimentos superficiais das Áreas C e D e outras variáveis ambientais (turbidez, distância da costa, latitude). Cores e símbolos discriminam sítios e campanhas. Círculos menores representam amostras e círculos maiores representam os centroides de cada grupo de amostras. ....41
- Figura 6: Regressão linear entre o teor de hematita no sedimento superficial dos recifes costeiros e a distância da foz do rio Doce. Campanha 1 (círculos)= setembro de 2018; Campanha 2 (triângulos)= dezembro de 2018; Campanha 3 (quadrados)= Maio 2019; Campanha 4 (cruzetas)= Julho 2019. Valores de R<sup>2</sup> em vermelho indicam  $p < 0,05$ . ....45
- Figura 7: Regressão linear entre o teor de hematita no sedimento superficial dos recifes costeiros e a distância da foz do rio Doce. Chave: Campanha 1 (círculos)= setembro 2018; Campanha 2 (triângulos)= dezembro 2018; Campanha 3 (quadrados)= maio 2019; Campanha 4 (cruzetas)= julho 2019. As cores dos símbolos representam as campanhas e a faixa cinza representa o intervalo de confiança ( $p < 0,05$ ). ....46
- Figura 8: Análise de Componentes Principais (PCA) das amostras dos sítios das Áreas C e D com base nas classes granulométricas (cascalho, areia e silte) e outras variáveis possivelmente influentes na distribuição e composição dos sedimentos superficiais das duas primeiras campanhas. Cores e símbolos discriminam os sítios e as campanhas. Círculos menores representam as amostras e os maiores representam os centroides de cada grupo de amostras. ....47
- Figura 9: Análise de Componentes Principais (PCA) das amostras dos recifes costeiros da Área D das duas primeiras campanhas com base na origem (terrígeno ou biogênico) e outras variáveis possivelmente influentes na distribuição dos sedimentos superficiais. Cores e símbolos discriminam sítios e campanhas. Círculos menores representam amostras e os maiores representam os centroides de cada grupo de amostras. ....47
- Figura 10: Fácies sedimentares e sítios amostrais da Área D (dados do subprojeto “Mapeamento”). 49

- Figura 11: Sítios recifais e bancos de rodolitos nas Áreas A e B onde foram instaladas armadilhas de sedimento, representados com preenchimento em amarelo (B3 mostrado apenas como referência espacial).....51
- Figura 12: Análise de Componentes Principais dos dados coletados nas armadilhas de sedimento instaladas nas áreas A e B, com base na origem (biogênico ou terrígeno), distância da costa, taxa de sedimentação, latitude e turbidez (Kd490). As cores discriminam os sítios. Círculos menores representam amostras e os maiores representam os centroides de cada grupo de amostras. ....53
- Figura 13: Distribuição das estações com bancos de rodolitos e concreções calcárias (pontos vermelhos), com rodolitos mortos (ponto cinza) e sedimentos não consolidados (pontos castanhos), Áreas C (foz do rio Doce) e D (APA Costa dos Corais e REVIS Santa Cruz). A estação D12 não foi amostrada por estar além da capacidade batimétrica dos instrumentos.....56
- Figura 14: Cobertura relativa por rodolitos vivos, mortos e concreções carbonáticas nas estações não dominadas por sedimentos (painel superior) e cobertura por invertebrados e macroalgas nessas mesmas estações (painel inferior).....57
- Figura 15: Imagens ortogonais (A-D) e panorâmica (E) de bancos de rodolitos e concreções carbonáticas, Áreas C e D. Chave: A= Sítio C4 (53 m de profundidade), B= Sítio D8 (70 m), C= Sítio C10 (70 m), D= Sítio D13 (45 m), E= Sítio D8 (70 m). ....58
- Figura 16: Fundos com contribuição expressiva de briozoários (briolitos), destacando-se *Celleporaria atlantica* (arborescente, rígida e marrom). A e B: Sítio D5 (39 m); C e D: Sítio D10 (42 m); E: Sítio D3 (45 m); F: Sítio D11 (60 m); G: Sítio C2 (64 m); H: Sítio C1 (63 m). A – F= Presença de briozoários em manchas; G= Briozoários em meio a rodolitos; H= Fragmentos de briozoários em meio a sedimentos. ....59
- Figura 17: Cobertura percentual por rodolitos vivos e mortos (Áreas C e D) em diferentes profundidades, em dezembro de 2018 e fevereiro de 2019. Asteriscos representam diferenças significativas ( $p < 0,05$ , PERMANOVA). As profundidades 30-39 e 40-49 m não foram amostradas em dezembro na Área C, nem tampouco abaixo de 70 m na Área D. ....60
- Figura 18: Análise de redundância (dbRDA) mostrando a influência preponderante da distância da costa na vitalidade das algas coralináceas (CCA, contemplando rodolitos e concreções calcárias) (DISTLM não mostrado). ....62
- Figura 19: Análise de Redundância baseada em Distâncias (dbRDA) com os dados de cobertura bêntica das duas campanhas na Área D. Os vetores correspondem às variáveis preditoras selecionadas pelo melhor modelo DISTLM (i.e., menor AIC) (Tabela 7). ....63
- Figura 20: Análise de redundância (dbRDA) baseada no modelo DISTLM com os dados de cobertura bêntica, Área D. Os vetores correspondem às variáveis preditoras selecionadas pelo melhor (i.e., menor AIC) modelo DISTLM (Tabela 8).....65
- Figura 21: Exemplos de macroalgas associadas a rodolitos. A. *Cryptonemia* sp. (C4); B, *Halymenia* sp. (D8). ....69
- Figura 22: Aspecto e estruturas reprodutivas de algas coralináceas formadoras de rodolitos na região estudada. Chave: A: *Neogoniolithon brassica-florida*. B: Conceptáculo uniporado, *N. brassica-florida*. C: *Lithophyllum* sp. 2 (crosta demarcada a lápis). D: Conceptáculos uniporados, *Lithophyllum* sp. 2. E:

*Melyvonnea erubescens*. F: Conceptáculos tetrasporangiais multiporados, *M. erubescens*. G: *Sporolithon* sp. 1. H: Soros, *Sporolithon* sp. 1.....70

Figura 23: Epibiontes em rodolitos e concreções calcárias - II. Chave A: alta concentração de macroalgas (Sítio A5, 8 m); B: Briozoários e esponjas (B1, 33 m); C: algas coralináceas incrustantes-CCA, ascídias e briozoários (C2, 63 m); D: CCA e ascídias (C4, 51 m); E e F: sedimento lamoso trapeado em meio a CCA (C10, 72 m); G: Briozoário *Stylopoma hastata* e CCA, (D3, 50 m); H: Briozoário *Celleporaria atlantica* e CCA (D6, 53 m). .....73

Figura 24: Epibiontes em rodolitos e concreções calcárias - II. Chave: A= Porção inferior de rodolito evidenciando sedimento lamoso trapeado em algas coralináceas incrustantes- CCA (Sítio D7, 63 m); B: rodolito morto com sedimento lamoso amarronzado (D7, 63 m); C: briozoário *Stylopoma hastata* (vermelho), CCA e coral *Madracis decactis* (D11, 66 m); D: briozoários *Reptadeonella* sp. e CCA (D10, 42 m); E: rodolito com alta vitalidade de CCA, ascídias e briozoários (D13, 49 m).....74

Figura 25: Abundância total e dos principais grupos de invertebrados bentônicos associados aos rodolitos em dezembro de 2018 (Campanha 1). As letras acima das barras de erro padrão indicam grupos homogêneos.....75

Figura 26: Abundância total e dos principais grupos de invertebrados bentônicos associados aos rodolitos em dezembro de 2018 (Campanha 1). As letras acima das barras de erro padrão indicam os grupos homogêneos.....76

Figura 27: Diagrama de dispersão do diâmetro médio (cm) dos rodolitos versus a profundidade (m). Chave: Vermelho= Área A; Verde= Área B; Roxo= Área C; Azul = Área D. ....79

Figura 28: Diagramas de Esfericidade dos rodolitos das diferentes áreas e profundidades. Cada ponto indica atributos de um dado rodolito. Classificação baseada em BOSENCE (1983a, 1983b) e GRAHAM; MIDLEY (2000). Chave: A= Área A, 8 m de profundidade; B= Área B, 33 m; C= Área C, 50-60 m; D= Área C, 61-70 m; E= Área D, 40-50 m; F= Área D, 51-60 m; G= Área D, 61-70 m.....80

Figura 29: Estrutura interna dos rodolitos da região estudada. A= Rodolito da Área A (A5), compacto e constituído por algas coralináceas incrustantes-CCA (coloração esbranquiçada), com bioerosores [bivalves (*Litophaga* spp., seta vermelha) e esponjas (*Cliona* spp., seta amarela), e sipúnculas (seta azul)]. B= Rodolito da Área B (B1), poroso, constituído por CCA e com presença de bioerosores (poliquetas tubulares) e outros organismos associados [sipúnculas (seta azul) e ofiuróides (setas verdes)]. C e D= Rodolitos da Área C (C02), porosos, formados majoritariamente por CCA e subordinadamente por briozoários (setas), com bioerosores [anelídeos e bivalves (*Litophaga* spp., seta vermelha)]. E e F= Rodolitos da Área D (D11 e D08), porosos, formados majoritariamente por CCA e com bioerosores (anelídeos poliquetas). Barra de escala = 1 cm.....84

Figura 30: Concreção calcária da Área C (C07), constituída majoritariamente por algas coralináceas incrustantes (ESQUERDA) e “briolito” da Área D (D11), formado unicamente por briozoários (representado por câmaras - exoesqueleto de calcário- branco/rosa) (DIREITA). Barra de escala = 1 cm. ....85

Figura 31: Análise de redundância dbRDA baseada no modelo DISTLM com dados de composição interna dos rodolitos de sítios das áreas C e D (dezembro de 2018). Vetores correspondem às variáveis selecionadas pelo melhor modelo DISTLM.....85

Figura 32: Recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D) - I. Imagens aéreas (drone) dos oito sítios costeiros A= D14; B= D15; C= D16; D= D17; E= D18; F= D19; G= D20; H= D21.....87

Figura 33: Recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D) - II. A: *Caulerpa cupressoides* (à frente) e *Padina* sp. (ao fundo). B: Estrutura recoberta por algas coralináceas e corais. C: *Sargassum* spp. D: Coleta de alga coralinácea incrustante em meio a *Sargassum* spp. E: *Halimeda* spp. Fotos: Rede Abrolhos. ....89

Figura 34: Recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D) - III. A e B: Ambientes rasos dominados por macroalgas. C: Zoantídeo (*Palythoa variabilis*) em meio a macroalgas. D: Macroalgas parda (*Padina* sp.) e vermelha (*Gracilaria* sp.). E: Algas coralináceas incrustantes e macroalgas. F: Coleta de *Dictyota* sp. em ambiente dominado por *Sargassum* spp. Fotos: Áthila Bertoncini/ Rede Abrolhos. ....90

Figura 35: Macroalgas representativas da comunidade bêntica dos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS. Chave: A=*Dichotomaria marginata*. B=*Plocamium brasiliense*. C=*Caulerpa racemosa*. D=*Codium isthmocladum*. E=*Botryocladia* sp. F=*Sargassum* sp. ....91

Figura 36: Estrutura taxonômica das assembleias de macroalgas nos recifes adjacentes ao litoral (Sítios D14 a D21, de norte para sul), em nível de Divisões. Chave: I= setembro 2018; II= janeiro 2019. ....92

Figura 37: Aspecto geral e estruturas reprodutivas de algas coralináceas incrustantes coletadas nos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D). Chave: A= *Harveyolithon roseum*. B= Conceptáculos uniporados de *Harveyolithon roseum*. C= *Lithophyllum* sp. 1. D:= Conceptáculos uniporados de *Lithophyllum* sp. 1. E= *Lithothamnion crispatum*. F= Conceptáculos tetrasporangiais multiporados de *L. crispatum* com depressões ao redor dos poros (característica diagnóstica). G= *Sporolithon episorum*. H= Soros de *S. episorum*. ....104

Figura 38: Cobertura por macroalgas nos recifes adjacentes ao litoral na Área D (APA-REVIS) estimadas em diferentes períodos do ano, por diferentes autores. Verão de 2012 (SCHERNER et al., 2013; GOLDER, 2016a), outono de 2016 (GOLDER, 2016a), primavera de 2018 e verão de 2019 (presente estudo). ....106

Figura 39: Escalonamento multidimensional (MDS) baseado na cobertura média dos principais grupos de macroalgas encontradas nos sítios D17 e D21 em período pré (verão de 2012) e pós desastre (verão de 2019). ....108

Figura 40: Cobertura bentônica dos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D, sítios acessados por terra). Chave: (P)= Primavera, setembro de 2018; (V)= Verão, janeiro de 2019. A. Abundância relativa (% de cobertura) de organismos bentônicos e sedimento por sítio de amostragem. B. Abundância relativa (% de cobertura) dos principais grupos de macroalgas.....110

Figura 41: Análise de redundância dbRDA baseada no modelo DISTLM com dados de cobertura dos recifes costeiros e um amplo conjunto de variáveis explicativas (dados das duas campanhas, variáveis detalhadas no texto).....111

Figura 42: Localização das estruturas artificiais de colonização (CAUs), incluindo informações sobre aquelas instaladas antes do PMBA. Os dados apresentados se referem a estruturas instaladas antes do PMBA, uma vez que o tempo de residência no recife deve ser de 12 meses.....114

Figura 43: Análise de Componentes Principais com a distribuição dos sítios (A1, A3, A5, B1, B2, B4) entre os eixos Dim1 e Dim2 a partir da incorporação das variáveis K490 (turbidez), latitude, temperatura, distância da costa, massa carbonática e massa orgânica. .... 118

Figura 44: Análise de Componentes Principais (PCA) com dados de cobertura dos diferentes grupos de organismos nas CAUs contrastando os Sítios A1 (Pedra de Leste), A3 (Parcel dos Abrolhos- PAB); A5 (Banco de rodolitos - Abrolhos), B1 (Banco de rodolitos – ES), B2 (Recifes Esquecidos Norte) e B4 (Recifes Esquecidos Sul). .... 122

Figura 45: Médias mensais (março a fevereiro) da SST entre os anos estudados (2012-2013, 2013-2014 e 2018-2019) para a região de Abrolhos (17°13'S, 39°04'W), indicando as temperaturas mínima e máxima. Dados obtidos na estação virtual da NOAA Coral Reef Watch (CRW) (coralreefwatch.noaa.gov/vs/data/abrolhos\_reefs.txt). .... 123

Figura 46: Representação esquemática dos pináculos conhecidos como "chapeirão", evidenciando suas formas mais típicas e a distribuição de alguns dos principais organismos sobre a estrutura. A estrutura representada à esquerda, em forma cogumelar com topos expandidos lateralmente, é típica das áreas mais rasas, onde os topos estão nivelados com o nível do mar (e.g. Área A, Parcel das Paredes) ou situados em profundidades de até cerca de 10 metros (e.g. Área A, Parcel dos Abrolhos). A morfologia do pináculo representado à direita, com topos estreitos, é típica das áreas mais profundas (e.g. Recife Califórnia). Formas intermediárias também são registradas na região estudada (e.g. Área B, Recifes Esquecidos). Imagem: Rede Abrolhos©. .... 125

Figura 47: Estrutura da comunidade bentônica registradas no topo dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). *Inserts:* I) Estrutura de um chapeirão com indicação do topo. II) Malha amostral (recifes emergentes ou quase-emergentes) mostrados em azul. Coral = Corais escleractíneos; Hidro = hidrocorais; Zoan = zoantídeos; Espon = esponjas; Macro = macroalgas; Turf = tufos de algas; CCA = algas coralináceas incrustantes; Ciano = cianobactérias. .... 127

Figura 48: Estrutura da comunidade bentônica registradas na parede dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). *Inserts:* I) Estrutura de um chapeirão com indicação da localização da parede. II) Malha amostral (recifes emergentes e quase-emergentes) mostrados em azul. Coral = escleractíneos; Hidro = hidrocorais; Zoan = zoantídeos; Espon = esponjas; Macro = macroalgas; Turf = tufos de algas; CCA = algas coralináceas incrustantes; Ciano = cianobactérias. .... 127

Figura 49: Cobertura relativa das principais espécies de corais registradas no topo dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). *Inserts:* I) Estrutura de um chapeirão com indicação do topo. II) Malha amostral (recifes emergentes e quase-emergentes) mostrados em azul. AGSP = *Agaricia* spp.; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; MISP = *Millepora* spp. .... 128

Figura 50: Cobertura relativa das principais espécies de corais registradas na parede dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). *Inserts:* I) Estrutura de um chapeirão com indicação da parede. II) Malha amostral (recifes emergentes e quase emergentes mostrados em azul). AGSP = *Agaricia* spp.; MADE = *Madracis decactis*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUHA = *Mussismilia harttii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; SISP = *Siderastrea* spp. .... 128

Figura 51: Principais espécies de corais registradas na área de estudo. I) *Agaricia fragilis*. II) *Montastraea cavernosa* (topo). III) *Mussismilia braziliensis*. IV) *Mussismilia harttii*. V) *Mussismilia hispida*. VI) *Porites astreoides*. VII) *Siderastrea* sp. VIII) *Millepora* sp. IX) *Montastraea cavernosa* (parede). .... 129

Figura 52: Correlograma com dados de cobertura dos topos dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *Favia gravida*; MADE = *Madracis decactis*; MOAR = *Monanchora arbuscula*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; PACA = *Palythoa caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; MISP = *Millepora* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp. .... 132

Figura 53: Análise de Componentes Principais (ACP) com dados de cobertura dos topos dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *F. gravida*; MADE = *M. decactis*; MISP = *Millepora* spp.; MOAR = *M. arbuscula*; MOCA = *M. cavernosa*; MUBR = *M. braziliensis*; MUHA = *M. harttii*; MUHI = *M. hispida*; PACA = *P. caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp. No painel superior a importância de cada variável está representada por um gradiente de cor e no painel inferior também estão sobrepostas as posições dos sítios no diagrama de ordenação. .... 133

Figura 54: Correlograma com dados de cobertura das paredes dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *Favia gravida*; MADE = *Madracis decactis*; MISP = *Millepora* spp.; MOAR = *Monanchora arbuscula*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUHA = *Mussismilia harttii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; PACA = *Palythoa caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp. .... 134

Figura 55: Análise de Componentes Principais com dados de cobertura das paredes dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *F. gravida*; MADE = *M. decactis*; MISP = *Millepora* spp.; MOAR = *M. arbuscula*; MOCA = *M. cavernosa*; MUBR = *M. braziliensis*; MUHA = *M. harttii*; MUHI = *M. hispida*; PACA = *P. caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp. No painel superior a importância de cada variável está representada por um gradiente de cor e no painel inferior as posições dos sítios estão sobrepostas ..... 135

Figura 56: Correlogramas com dados de cobertura dos topos (ESQUERDA) e paredes (DIREITA) dos recifes, e das variáveis ambientais no início do PMBA (novembro e dezembro de 2018). Ciano = Cianobactérias; CCA = Algas coralináceas incrustantes; Coral = Corais escleractíneos; iPAR = Radiação Fotossinteticamente Ativa; Kd490 = coeficiente de atenuação da luz; Profund = Profundidade; SST = Temperatura de Superfície do Mar; Zoant = Zoantídeos. .... 136

Figura 57: Análise de Componentes Principais com superposição da contribuição dos organismos e variáveis ambientais e da posição relativa das estações. Esquerda: topo. Direita: parede. Ciano=Cianobactérias; CCA=Algas coralináceas incrustantes; iPAR = Radiação Fotossinteticamente Ativa; Kd490 = coeficiente de atenuação; Profund = Profundidade; SST = Temperatura de Superfície do Mar; Zoant = Zoantídeos. .... 136

Figura 58: Variáveis ambientais obtidas por sensoriamento remoto e utilizadas nas Análises de Componentes Principais: A: Temperatura da superfície do mar (SST, dados da plataforma PODAAC-Physical Oceanography Active Archive Center), B: Atenuação da luz (Kd490) (iPAR, dados da plataforma ERDDAP- Easier Access to Scientific Data). Dezembro de 2018 (verão), *baseline* do PMBA. Fonte: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> ..... 137

Figura 59: Escalonamento Multidimensional (MDS) revelando afinidades espaço-temporais entre as estações amostradas nos topos (acima) e paredes (abaixo) dos recifes (cobertura temporal entre 2016 e 2019, variável para cada sítio). Coberturas relativas de táxons selecionados com base no seu poder discriminatório estão apresentados em gráficos tipo pizza (fatias de tamanho proporcional à influência do táxon), sobrepostos aos scores das amostras nos dois eixos. Chave: 2019.1 = abril; 2019.2 = julho; 2018 =março, 2018.2 = novembro. .... 142

Figura 60: Variação temporal (médias trimestrais) na temperatura da superfície do mar (SST) na região estudada. .... 143

Figura 61: Variação temporal (médias trimestrais) na turbidez (Kd490) na região estudada. .... 143

Figura 62: Análise de redundância baseada na distância (dbRDA) com o panorama espaço-temporal (2015-2019) de variação na cobertura dos recifes das Áreas A e B e sua associação com as variáveis selecionadas pelos modelos DISTLM (Kd490-turbidez, iPAR e latitude). As amostras de topos estão no painel superior e as de paredes no inferior. .... 144

Figura 63: Tendências temporais (2015 a 2019) da cobertura do recife das Áreas A e B, destacando o momento do Desastre e os períodos subsequentes de anomalias térmicas. ENOS= ENSO = *El Niño Southern Oscillation*. .... 148

Figura 64: Tendências temporais (2015 a 2019) da cobertura de macroalgas, *turf* e cianobactérias filamentosas nos topos dos recifes das Áreas A e B, destacando o momento do Desastre e os períodos subsequentes de anomalias térmicas. ENOS= ENSO = *El Niño Southern Oscillation*. .... 149

Figura 65: Tendências temporais (2015 a 2019) da cobertura de corais nos topos dos recifes de Pedra de Leste (A1) mostrando o momento do Desastre e anomalias térmicas subsequentes. O painel inferior mostra os resultados do teste *a posteriori* [apenas os referentes as espécies cujas diferenças foram significativas (ANOVA)]. A linha representa o intervalo de confiança para diferença entre duas campanhas (cor vermelha indica diferença significativa). Chave: AGSP: *Agaricia* spp.; FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastraea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *Mussismilia harttii*; MUHI: *Mussismilia hispida*; POSP: *Porites* spp.; SISP: *Siderastrea* spp.; MINI: *Millepora nitida*; MISP: *Millepora* spp. ENOS= ENSO = *El Niño Southern Oscillation*. .... 151

Figura 66: Fluorimetria com Diving-PAM aplicada sobre colônia de *Mussismilia braziliensis*, no sítio A1 (Parcel das Paredes)..... 154

Figura 67: Regime de luz descrito pela radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e profundidade ótica nos diferentes sítios em novembro e abril de 2019. As barras representam o desvio padrão. .... 155

Figura 68: Curvas rápidas de luz (RLC's) derivadas da taxa de transporte de elétrons em função do PAR actínico, por espécie. Chave: Faixa cinza = intervalos de confiança. Vermelho= novembro 2018, Azul = abril 2019. FAGR= *Favia gravida*; MOCA= *Montastraea cavernosa*; MUBR= *Mussismilia braziliensis*; MUHA= *Mussismilia harttii*; MUHI= *Mussismilia hispida*; PACA= *Palythoa caribaeorum*. .... 156

Figura 69: Regressão linear entre rETRM e densidade de zooxantelas. As retas das regressões lineares estão representadas por linhas azuis e as faixas cinza representam o intervalo de confiança. As cores dos pontos são relativas à temperatura da superfície do mar (SST). Chave: FAGR= *Favia gravida*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; PACA = *Palythoa caribaeorum*. .... 158

Figura 70: Regressão linear entre Fv/Fm, PAR e profundidade ótica. As retas de regressões lineares estão representadas por linhas azuis e as faixas cinza representam o intervalo de confiança. As cores dos pontos são relativas à temperatura da superfície do mar (SST). Chave: FAGR= *Favia gravida*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; PACA = *Palythoa caribaeorum*. .... 159

- Figura 71: Biovolume celular de zooxantelas em novembro 2018 (campanha 1, esq.), e em abril 2019 (campanha 2, dir.), em função da profundidade ótica. Cores e polígonos são relativos às espécies de coral: Chave: FAGR= *Favia gravida*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; PACA = *Palythoa caribaeorum*. ..... 160
- Figura 72: Série temporal da temperatura de superfície do mar (SST) e índice de semanas de aquecimento (DHW – *degree heating weeks*) em Abrolhos. As cores representam o nível de estresse fisiológico relativo ao branqueamento. Chave: Linha azul sólida = temperatura limiar do branqueamento; Linha tracejada = média máxima mensal de temperatura; + = climatologia mensal média; faixa cinza = amplitude de SST por 5 km, tracejado laranja = DHW 4 (inferior), 8 (superior). Extraído de NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://coralreefwatch.noaa.gov>, acessado em agosto de 2019). ..... 161
- Figura 73: Espécimes de *Montastraea cavernosa* (A,B) e *Mussismilia braziliensis* (C,D) antes da anomalia térmica em novembro de 2018 (A,C) e no início da anomalia em abril de 2019 (B,D). Barra de escala = 2cm. .... 162
- Figura 74: Diagramas TS baseados nos perfis verticais de temperatura (°C) e salinidade (PSU) obtidos nas quatro áreas (A, B, C e D). A profundidade (m) de medição de cada ponto está representada na escala de cores à direita de cada diagrama. .... 167
- Figura 75: Perfis verticais de intensidade de radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) nas quatro áreas (A, B, C e D). .... 168
- Figura 76: Perfis verticais de concentração de oxigênio dissolvido nas quatro áreas (A, B, C e D)... 169
- Figura 77: Perfis verticais de turbidez (Unidade Turbidimétrica de Formazina, FTU) nas quatro áreas (A, B, C e D). .... 172
- Figura 78: Perfis verticais de potencial hidrogeniônico (pH) nos sítios das (B, C e D). .... 173
- Figura 79: Perfis verticais de concentração de clorofila ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) nas quatro áreas (A, B, C e D). .... 175
- Figura 80: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 15m no sítio A1 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR), concentração de CO<sub>2</sub>. .... 177
- Figura 81: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 9m no sítio A3 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR). .... 178
- Figura 82: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 15m no sítio A5 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR). .... 179
- Figura 83: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 9m no sítio A6 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR), concentração de CO<sub>2</sub>. .... 180

Figura 84: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 15m no sítio A1 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR). ..... 181

Figura 85: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 7m no sítio A2 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR). ..... 182

Figura 86: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 19m no sítio A3 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR). ..... 183

Figura 87: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 9m no sítio A6 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR). ..... 184

Figura 88: Detecção de organismos planctônicos autotróficos (painéis da esquerda) e heterotróficos (painéis da direita) por citometria de fluxo. O painel da esquerda consta de citogramas biparamétricos de tamanho celular (Forward-scatter) vs. fluorescência da clorofila em amostras de superfície (estações A1 e B4) em novembro de 2018. As áreas em vermelho denotam maior densidade de células. O painel da direita consta de citogramas biparamétricos de tamanho relativo (SSC-H) vs. fluorescência do fluorocromo SYBR-Green I, em amostras coletadas na superfície (estações A2 e B4) em novembro de 2018. A fluorescência do fluorocromo indica o teor relativo de ácidos nucleicos, principalmente DNA. Os autótrofos, detectados pela fluorescência vermelha da clorofila, foram removidos da análise de heterótrofos com uso de portas lógicas aplicadas ao citograma. .... 188

Figura 89: Abundância de cianobactérias e eucariotos autotróficos na coluna d'água (em dois estratos: superfície e próximo ao fundo) determinada por citometria de fluxo multiparamétrica. Cianobactérias estão discriminadas em *Prochlorococcus* spp. e *Synechococcus* spp. Estações sem valores representam locais ou profundidades cuja amostragem não estava prevista ou que não foram amostrados devido a condições adversas. As campanhas estão representadas pela cor das barras: 1, azul (novembro de 2018); 2, verde (abril de 2019), 3, vermelho (junho de 2019). 4, magenta (setembro de 2019). Na campanha 4 somente a área A foi amostrada até o momento. .... 190

Figura 90: Abundância de bactérias e nanoeucariotos heterotróficos na coluna d'água (em dois estratos: superfície e próximo ao fundo) determinada por citometria de fluxo multiparamétrica. Estações sem valores representam locais ou profundidades cuja amostragem não estava prevista no plano de trabalho ou não amostrados devido a condições adversas. As campanhas estão representadas pela cor das barras: azul (novembro de 2018); verde (abril de 2019); vermelho (junho de 2019). Na campanha 4 somente a área A foi amostrada até o momento. .... 191

Figura 91: Índices de riqueza e diversidade citométrica de comunidades do fitoplâncton (picocianobactérias e eucariotos unicelulares) em amostras de superfície e próximas ao fundo. Riqueza de grupos citométricos refere-se ao índice D0 da série de Hill. Diversidade citométrica refere-se ao índice D1 da série de Hill (HILL, 1973), equivalente ao índice de Shannon-Weaver. Estações sem valores representam locais ou profundidades cuja amostragem não estava prevista no plano de trabalho ou que não puderam ser amostrados devido a condições adversas. Na campanha 4 somente a área A foi amostrada até o momento. .... 192

Figura 92: Indivíduos do fitoplâncton (painel da esquerda) e partículas detríticas (painel da direita) detectados nas amostras do plâncton através de imageamento dinâmico em fluxo (FlowCam) usando uma objetiva de 10X. A escala aplica-se a todas as células e partículas de ambos os painéis. .... 194

Figura 93: Concentração de protistas auto e heterotróficos na faixa dimensional 5-15µm; fitoplâncton >15µm e partículas detríticas detectados nas amostras do plâncton através do sistema de imageamento dinâmico em fluxo (FlowCam). Na primeira campanha a estação C2 não pode ser coletada por motivos climáticos (tempestade) e foi substituída pela estação C5. .... 195

Figura 94: Imagens de indivíduos do fitoplâncton nas amostras analisadas por microscopia. A: células do dinoflagelado *Ceratium tripos*; B e E: células de diatomáceas do gênero *Diploneis*; C: tricomas da cianobactéria filamentosa *Trichodesmium erythraeum*; D: diatomácea não identificada; F: célula do dinoflagelado *C. pentagonum*. Escala: A) 20 µm, B-F) 10 µm. .... 196

Figura 95: Abundância dos principais grupos de organismos do fitoplâncton e protozooplâncton na faixa dimensional >15µm em amostras de superfície e próximas ao fundo. Na primeira campanha a estação C2 não pode ser coletada por motivos climáticos (tempestade) e foi substituída pela estação C5. Por motivo de más condições climáticas, não foram feitas coletas na área A na campanha 3. Três amostras da campanha 3 (D4 superfície e fundo e D8 fundo) e as amostras da área A (A2, A3 e A6) da campanha 4 estão em análise. .... 197

Figura 96: Proporção relativa dos principais grupos do fito e protozooplâncton >15µm em amostras de superfície e próximas ao fundo nas Áreas A, B, C e D nas campanhas 1, 2 e 3. NC: não coletada. EA: em análise. .... 198

Figura 97: Concentração de pigmentos fotossintetizantes em amostras de água de superfície e fundo coletadas nas Áreas A, B, C e D. EA: em análise. .... 200

Figura 98: Análise de componentes principais utilizando as variáveis de abundância de componentes do pico, nano e microplâncton, pigmentos fotossintetizantes e variáveis abióticas. Painel superior: distribuição das amostras nas duas primeiras componentes principais; as cores indicam estações amostrais; os códigos são mês e ano da coleta de acordo com a legenda do painel inferior. Painel inferior: discriminação das amostras de acordo com o período da amostragem; os círculos maiores indicam a posição média para cada período; a espessura das setas é proporcional à contribuição de cada variável que explica a distribuição das amostras. Kd490: coeficiente de atenuação difusa da luz 490nm. SST: temperatura da superfície do oceano. .... 203

Figura 99: Análise de componentes principais (PCA) com dados de abundância e diversidade de componentes do pico, nanoplâncton na em amostras de superfície quantificados por citometria de fluxo multiparamétrica e variáveis abióticas. Painel superior: distribuição das amostras nas duas primeiras Componentes Principais; indicam mês e ano da amostragem e códigos representam as Áreas amostrais. Painel inferior: discriminação das amostras de acordo com a área de amostragem; os círculos maiores indicam a posição média para cada período; a espessura das setas é proporcional à contribuição de cada variável que explica a distribuição das amostras. Kd490: coeficiente de atenuação difusa da luz em 490nm. SST: temperatura da superfície do oceano. .... 204

Figura 100: Espécies coletadas para análises toxicológicas. A: *Padina gymnospora*. B: *Codium* sp.. C: *Tedania ignis*. D: *Siderastrea* sp. Fotos: F. Moraes ..... 205

Figura 101: Esquema conceitual simplificado da hierarquia e concatenação dos diferentes eixos de investigação do PMBA em ambientes recifais. .... 207

Figura 102: Região estudada, destacando-se as cinco Áreas (A-E) e a malha amostral integrada, sobreposta à distribuição conhecida de recifes emergentes. A malha da ictiofauna se refere apenas às amostragens de peixes recifais. ....	208
Figura 103: Batimetria (esquerda) e megahabitats bênticos (direita) da região estudada, com sobreposição da malha amostral integrada. A malha da ictiofauna se refere apenas às amostragens de peixes recifais.....	209
Figura 104: Unidades de Conservação na região estudada, com sobreposição da malha amostral integrada e dos recifes emergentes ou quase emergentes. A malha da ictiofauna se refere apenas às amostragens de peixes recifais. ....	210
Figura 105: Recifes e bancos de rodolitos da região de estudo. A: Recifes adjacentes ao litoral na APA Costa das Algas; B: Chapeirões coalescidos formando bancos recifais no Parcel das Paredes, arco interno; C: Chapeirões do Parcel dos Abrolhos, arco externo; D: Topo de estrutura com alta diversidade e cobertura coralínea; E: Parede de estrutura com baixa diversidade; F: Banco de rodolitos. Fotos: Rede Abrolhos.....	213
Figura 106: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais na área da APA Costa das Algas (APAC), Primeiro Ciclo do PMBA. ....	220
Figura 107: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais na área da foz do rio Doce, Primeiro Ciclo do PMBA. ....	221
Figura 108: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais na área dos Recifes Esquecidos, Primeiro Ciclo do PMBA. ....	223
Figura 109: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais em Abrolhos e adjacências, Primeiro Ciclo do PMBA. ....	225
Figura 110: Região estudada e coberturas temporais dos sítios e áreas amostrais em ambientes recifais, evidenciando que apenas sítios mais distantes da foz do rio Doce possuíam dados antecedentes ao rompimento da barragem da barragem. As legendas dos megahabitats bênticos são iguais às da Figura 103. ....	228
Figura 111: Mapa dos sítios amostrais em ambientes recifais e seus respectivos impactos. As legendas dos megahabitats bênticos são iguais às da Figura 103.....	229
Figura 112: Mapa da região estudada com indicações de aprimoramentos e adaptações para as amostragens em ambientes recifais no âmbito do PMBA. As legendas dos megahabitats bênticos é igual à da Figura 103. As setas indicam áreas prioritárias para mapeamento e aquisição de <i>baselines</i> biológicos (hachuradas). ....	231
Figura 113: Diagrama esquemático dos efeitos diretos e indiretos da poluição nos diferentes níveis organizacionais da biota e dos ecossistemas marinhos. Assim como a complexidade do sistema, a relevância ecológica dos efeitos aumenta na direção das maiores escalas espaciais e temporais. ...	233

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mineralogia do sedimento superficial coletado nas Áreas C e D (amostras das campanhas embarcadas, <i>offshore</i> ). Valores em % média. * = bancos de rodolitos. ....	42
Tabela 2: Granulometria do sedimento superficial dos sítios oceânicos das áreas C e D, terceira campanha (média %). ....	42
Tabela 3: Mineralogia do sedimento superficial nos recifes costeiros da área D (média %). ....	44
Tabela 4: Granulometria do sedimento superficial dos sítios costeiros da Área D, terceira e quarta campanhas (média %). ....	48
Tabela 5: Granulometria média (n = 3 armadilhas por sítio) dos sedimentos aprisionados nas armadilhas de sedimento instaladas nas Áreas A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos). Classificação de Wentworth (1922). ....	51
Tabela 6: Mineralogia média (n = 3) dos sedimentos aprisionados nas armadilhas de sedimento instaladas nas áreas A e B. Os valores estão em porcentagem (%) relativo dos minerais encontrados. ....	52
Tabela 7: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com os dados de cobertura bêntica das duas campanhas realizadas na Área D. ....	64
Tabela 8: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com dados de cobertura bêntica, Área D. ....	66
Tabela 9: Algas coralináceas incrustantes registradas nos bancos de rodolitos das Áreas A, B, C e D nas campanhas dezembro 2018 e fevereiro 2019. Os símbolos "+" indica presença e o símbolo "-" indica que a espécie não foi encontrada. ....	71
Tabela 10: Riqueza e índices de diversidade [Diversidade de Shannon (H') e Equitabilidade de Pielou (J')] calculados com base na abundância relativa das 265 morfoespécies de invertebrados associados aos rodolitos coletados em dezembro de 2018 e fevereiro de 2019. ....	77
Tabela 11: Diâmetros médio, mínimo e máximo (desvio padrão) e Índice de Esfericidade (%) dos rodolitos de diferentes áreas e profundidades da região da foz do rio Doce e áreas adjacentes. "n"=número de amostras. ....	78
Tabela 12: Organismos construtores, bioerosores e associados encontrados na parte interna dos rodolitos. ....	83
Tabela 13: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com dados com dados de composição interna dos rodolitos, áreas C e D, e amplo conjunto de variáveis explanatórias (dezembro 2018). As variáveis 1, 4 e 8 correspondem à distância do rio Reis Magos, teor de areia e distância da foz do rio Doce, respectivamente. ....	86
Tabela 14: Algas coralináceas incrustantes registradas nos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D). Os dados apresentados são referentes às três campanhas cuja composição específica não variou sazonalmente. O símbolo "+" indica presença e o símbolo "-" indica que a espécie não foi encontrada. ....	103

Tabela 15: Cobertura (%) média dos grupos de macroalgas no verão de 2012 (SCHERNER et al., 2013, compilado por GOLDBER, 2016a) e verão de 2019 (presente estudo) nos dois sítios amostrais da APA-Costa das Algas (D17 e D21) que constam dados pré e pós desastre. .... 107

Tabela 16: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com os dados com dados de cobertura dos recifes costeiros e um amplo conjunto de variáveis explanatórias (dados das duas campanhas, variáveis detalhadas no texto). As variáveis 1, 4 e 8 correspondem à distância do rio Reis Magos, teor de areia e distância da foz do rio Doce, respectivamente. .... 112

Tabela 17: Produção de carbonato de cálcio ( $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ), massa não calcária ( $\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) (média  $\pm$  DP) e razão (carbonático/massa não calcária) em A1 (Pedra de Leste), A3 (Parcel dos Abrolhos), A5 (Banco de Rodolito Raso), B2 (Recife Esquecido Norte), B4 (Recife Esquecido Sul), B1 (Banco de Rodolito ES) após um ano de colonização durante 2018-2019..... 116

Tabela 18: Produção de carbonato de cálcio ( $\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ), massa não calcária ( $\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) (média  $\pm$  DP) e razão (carbonático/massa não calcária) em A1 (Pedra de Leste) e A3 (Parcel dos Abrolhos) após um ano de colonização (2018-2019), em comparação com dados prévios (2012-2014) (REIS et al., 2016). .... 117

Tabela 19: Percentual médio total de cobertura (média  $\pm$  DP) dos organismos construtores e não construtores em cada sítio (A1, A3, A5, B1, B2 e B4) após um ano de colonização. .... 120

Tabela 20: Percentual médio de cobertura ( $\pm$  desvio padrão) de organismos construtores e não construtores em cada sítio (A1, A3, A5, B1, B2 e B4) após um ano de colonização (2018-2019)..... 121

Tabela 21: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distâncias (DISTLM) com os dados de cobertura dos topos e sete variáveis ambientais: (1) Distância da foz do rio Doce; (2) Distância da costa; (3) Kd490 (turbidez); (4) iPAR; (5) SST; (6) Tempo e (7) Latitude. .... 145

Tabela 22: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distâncias (DISTLM) com dados de cobertura das paredes e variáveis ambientais: (1) Distância da foz do rio Doce; (2) Distância da costa; (3) Kd490 (turbidez); (4) iPAR; (5) SST; (6) Tempo e (7) Latitude. .... 145

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1: Distribuição das amostragens para análises sedimentológicas com dados das armadilhas. AP = Amostrado e Processado; ANP = Amostrado e não processado; NC = Não coletado. Os dados da última retirada dependem da quarta campanha, em andamento. ....38
- Quadro 2: Amostragens para caracterização das comunidades de bancos de rodolitos no âmbito do PMBA. AP\* = Amostrado e Processado (em nível de grandes grupos); ANP = Amostrado e não processado; NA = Não amostrado; PR = Programado/em execução. ....55
- Quadro 3: Distribuição das amostragens das CAUs no âmbito do PMBA e dados pretéritos incorporados à análise (PELD). AP = Amostrado e Processado; NA = Não amostrado; PR = Programado/em execução; (n) = número de réplicas. ....113
- Quadro 4: Distribuição das amostragens quali-quantitativas com fotoquadrados no âmbito do PMBA e dados antecedentes incorporados às análises. As células hachuradas representam amostras processadas em resolução taxonômica máxima (gêneros e espécies) e utilizadas nos modelos e análises multivariadas. Os dados das células não hachuradas foram usados nas comparações temporais de abundância em nível de grandes grupos. Chave: AP= amostrado e processado (resolução taxonômica máxima); AP\*= amostrado e processado (em nível de grandes grupos); PR= programado/em execução; NA= não amostrado; ANP= amostrado e não processado. As linhas inferiores, destacadas, se referem a pontos não cobertos pelo PMBA, mas com dados disponíveis e relevantes no contexto do projeto. ....126
- Quadro 5: Cobertura amostral das medidas com PAM e parâmetros pareados nas Áreas A e B (veja Figura 1 para localização detalhada dos sítios). Chave: C = coletado, P = processado, A=analisado .....154
- Quadro 6: Material biológico coletado e andamento do processamento das amostras para caracterização gênica de zooxantelas. A tabela indica o número de amostras com DNA de qualidade aceitável para o prosseguimento das análises ( $A_{260}/A_{280} > 1,6$ ).....163
- Quadro 7: Execução do plano de amostragem dos parâmetros físico-químicos da coluna d'água. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista. ....165
- Quadro 8: Execução do plano de amostragem para o plâncton no estrato superficial para processamento por citometria de fluxo multiparamétrica. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; PR: coleta prevista; NA: não se aplica.....185
- Quadro 9: Execução do plano de amostragem do plâncton no estrato de fundo para processamento através de citometria de fluxo multiparamétrica. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista. ....185
- Quadro 10: Execução do plano de amostragem do plâncton nos estratos de superfície e fundo para processamento através de microscopia invertida. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista. ....186
- Quadro 11: Execução do plano de amostragem do plâncton nos estratos de superfície e fundo para processamento através de sistema de imageamento dinâmico em fluxo. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista. ....186

Quadro 12: Execução do plano de amostragem do plâncton nos estratos de superfície e fundo para quantificação de pigmentos clorofilianos através de espectrofluorimetria. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista..... 186

## ANEXO 3 MARINHO – FUNDOS RECIFAIS, BANCOS DE RODOLITOS E MACROALGAS

### 1. METODOLOGIA

#### 1.1. PROBLEMA ABORDADO

O rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, conhecido como Desastre de Mariana, em 5 de novembro de 2015, configurou-se como a maior tragédia ambiental já ocorrida no Brasil<sup>1</sup>, e um dos maiores desastres minerários ocorridos no mundo (OLIVEIRA-NEVES et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; CIONEK et al., 2019; FREITAS et al., 2019). Em 22 de novembro a lama de rejeitos chegou ao mar e se alastrou ao norte e ao sul da foz do rio Doce, atingindo pesqueiros e recifes, bem como diversas unidades de conservação existentes e planejadas (MARTA-ALMEIDA et al., 2016; RUDORFF et al., 2018). A extensão da contaminação e consequências do Desastre sobre as comunidades marinhas ainda são pouco compreendidas (SEGURA et al., 2016; HATJE et al., 2017; MAGRIS et al., 2019), sendo imperativo que ecossistemas criticamente importantes e sensíveis na área afetada, tais como recifes e bancos de rodolitos, sejam adequadamente caracterizados e monitorados no sentido de subsidiar medidas de mitigação e recuperação.

O objetivo geral do subprojeto Fundos Recifais, Bancos de Rodolitos e Macroalgas é caracterizar e monitorar ambientes recifais e bancos de rodolitos potencialmente impactados pelo Desastre, qualificando e quantificando seus efeitos no ecossistema. Especificamente, pretendemos:

- Caracterizar comunidades bentônicas recifais quanto à diversidade, estrutura, dinâmica e processos ecológicos chave;
- Caracterizar comunidades planctônicas associadas aos recifes quanto à sua abundância, diversidade, estrutura e dinâmica;
- Monitorar essas comunidades em áreas mais ou menos afetadas pelo Desastre;

---

<sup>1</sup> Pelo menos até o rompimento da Barragem 1 do Córrego do Feijão, em 25 de janeiro de 2019, cuja extensão de danos à Baía do São Francisco permanece desconhecida (Tragédia de Brumadinho).

- Avaliar o estado de saúde de corais em áreas sob distintas forçantes;
- Monitorar o estabelecimento de fauna e flora e sua produção de CaCO<sub>3</sub>;
- Caracterizar as macroalgas associadas a fundos recifais e bancos de rodolitos;
- Determinar taxas de sedimentação e composição do sedimento em recifes e bancos de rodolitos sob distintas forçantes oceanográficas e níveis de impacto.

A região de estudo (Figura 1) é uma das mais complexas e biodiversas do Atlântico Sul, historicamente submetida a estressores antropogênicos e climáticos (e.g. Moura et al., 2013), e foi atingida por um desastre com características e dimensões nunca antes observadas (e.g. Hatje et al., 2017). Portanto, a consecução dos objetivos do projeto não é tarefa trivial que se enfrenta em curto prazo com protocolos prontos e ferramentas ordinárias. Tratamos aqui de um enorme desafio científico que abrange desde o campo conceitual e seleção de indicadores até o desenvolvimento de ferramentas, delineamentos amostrais e modelos analíticos, formação de recursos humanos de alto nível para enfrentar o desafio em médio e longo prazo, e uma contínua adaptação e aprimoramento do projeto. A recuperação das áreas degradadas e a mitigação dos efeitos do Desastre sobre recifes e bancos de rodolitos é um desafio sem precedentes e eivado de incertezas, mas inexoravelmente dependente do embasamento a ser provido pelo Projeto de Monitoramento da Biota Aquática (PMBA).

O presente relatório cobre o primeiro ano de execução do subprojeto, iniciado em 15 de setembro de 2018. Durante esse período foi coberta toda a malha amostral proposta (Figura 1), a qual está distribuída por quatro áreas onde ocorrem recifes e bancos de rodolitos, a saber: Área A (Parque Nacional Marinho de Abrolhos e adjacências), Área B (Recifes Esquecidos, entre Abrolhos e a foz do rio Doce), Área C (plataforma média e externa ao largo da foz do rio Doce), Área D (APA Costa das Algas e REVIS de Santa Cruz, ao sul da foz do rio Doce). Em caráter complementar, foram coletados materiais em uma localidade recifal adjacente a Guarapari, ES (Área E). Na Área D, os recifes costeiros adjacentes ao litoral foram acessados por via terrestre, ao passo que as demais campanhas amostrais foram embarcadas. O documento aqui apresentado é baseado, principalmente, nos dados das duas ou três primeiras campanhas realizada em cada área, a depender de cada aspecto ou variável estudada. Os dados de campanhas subsequentes continuam em processamento ou em aquisição, em função das diversas dificuldades encontradas com o agendamento e utilização de embarcações, atrasos na execução financeira (e.g. adequações em laboratórios) e do próprio cronograma do projeto, que prevê a emissão de um relatório final logo após a última campanha.

Em contrapartida, as análises apresentadas incorporam dados pretéritos ao Desastre, bem como dados cobrindo o hiato de três anos em que a região afetada permaneceu sem o monitoramento sistemático

do PMBA. Esse conjunto de informações prévias abrange menos parâmetros e uma cobertura espacial mais limitada, tendo sido obtido no âmbito do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD/CNPq/FAPES), do *International Ocean Discovery Program* (CAPES/IODP), e de outros projetos desenvolvidos pela equipe executora na área do Parque Nacional Marinho (PARNAM) de Abrolhos e adjacências (Área A). Para as áreas ao sul do PARNAM, a cobertura amostral é mais fragmentada e inclui informações dispersas em bases de dados e na literatura, exigindo que a integração e reconstrução de cenários seja feita ao longo do desenvolvimento do projeto. Para a Área B, os resultados dos experimentos com estruturas artificiais de colonização, bem como as primeiras estimativas de cobertura dos recifes, são baseados em amostragens feitas antes do PMBA, por iniciativa independente da equipe executora. Para a Área C, trazemos um panorama inédito, visto que não havia linha de base sobre a cobertura dos recifes e bancos de rodolitos. Com exceção dos recifes adjacentes ao litoral da Área D, alvo de estudos prévios, o *baseline* acerca dos recifes e bancos de rodolitos da APA Costa das Algas e do RVS de Santa Cruz também é inédito e servirá para embasar o acompanhamento dos efeitos do Desastre.

Figura 1: Região estudada, destacando-se as cinco Áreas (A-E) e a malha amostral do projeto, sobreposta à distribuição conhecida de recifes (veja Figura 2 para elementos complementares). O mapa inclui os códigos dos sítios amostrais usados no texto. Alguns sítios são adicionais ao Plano de Trabalho, nas Áreas A e C.

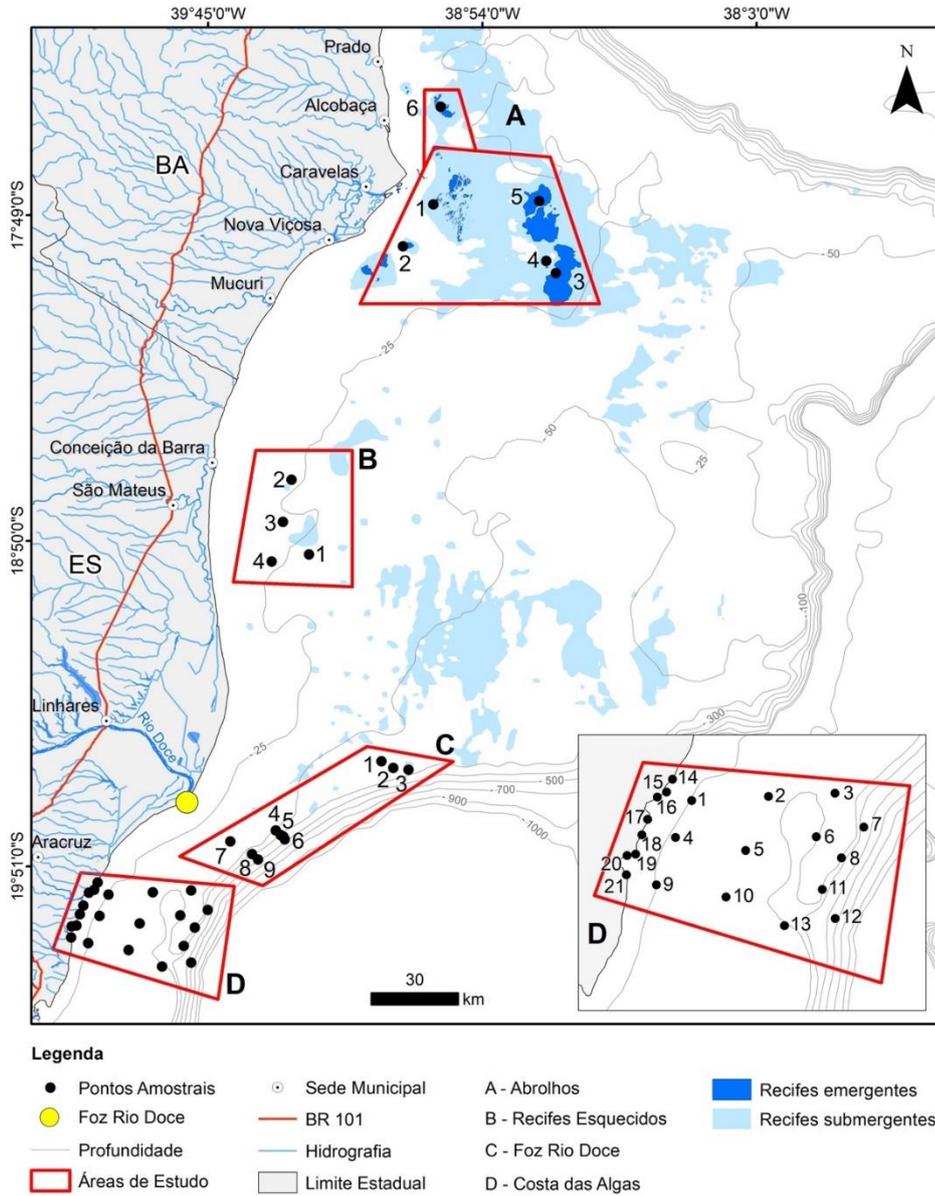


Figura 2: Batimetria (esquerda) e megahabitats bênticos (direita) da região estudada com sobreposição da malha do projeto (códigos das estações na Figura 1). Alguns sítios amostrais são adicionais ao Plano de Trabalho, nas Áreas A e C.

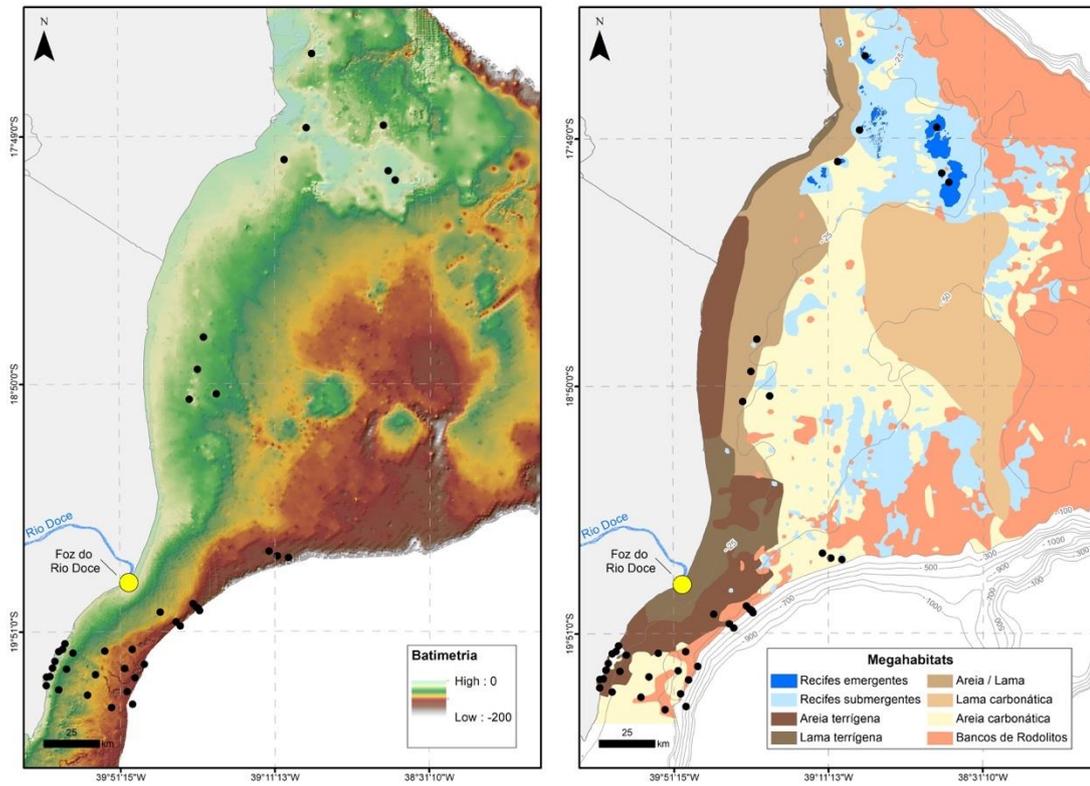
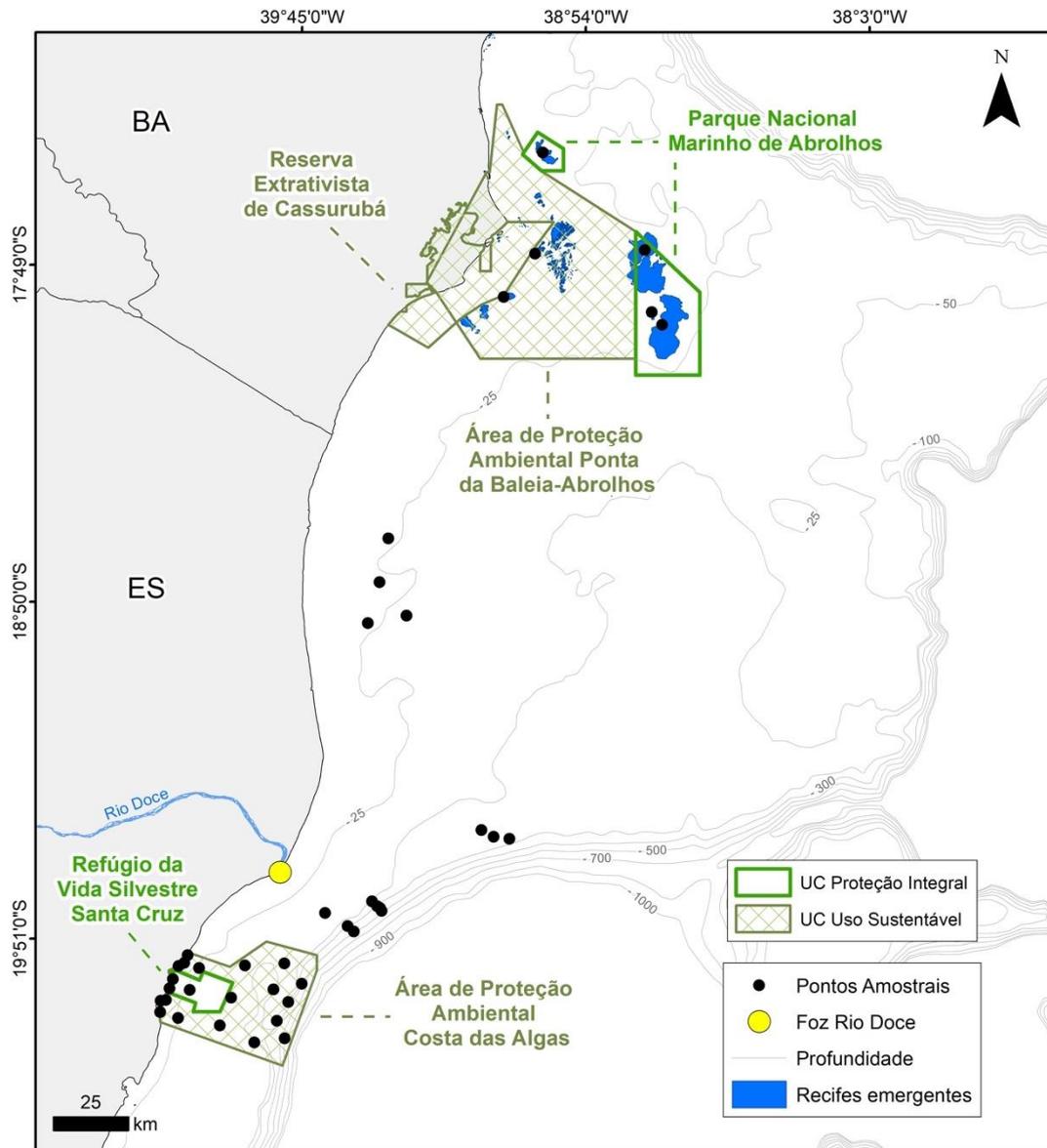


Figura 3: Unidades de Conservação na região estudada, com sobreposição da malha do projeto (códigos das estações na Figura 1) e dos recifes emergentes ou quase emergentes.



## 1.2. ABORDAGENS ANALÍTICAS

Os conjuntos de dados brutos, inseridos inicialmente em planilhas Excel, foram codificados e formatados na plataforma R (R CORE DEVELOPMENT TEAM, 2018) e em softwares comerciais (e.g. PRIMER; CLARKE; WARWICK, 2001), sempre passando por procedimentos básicos de controle de qualidade. Os pacotes utilizados para tratamento e controle de qualidade, bem como para as análises exploratórias, incluíram Dplyr, Psych e tidyverse, ggplot2 e GGally para compor as visualizações, e pca, FactoMineR, factoextra para as análises multivariadas, com emprego da biblioteca ggbiplot para visualização. A maior parte dos dados possui estrutura de alta dimensionalidade, dado o grande número de variáveis exploradas simultaneamente. As análises envolveram técnicas multivariadas de ordenação, visando descobrir padrões em dimensões reduzidas, incluindo Análise de Componentes Principais (PCA), Escalonamento Multidimensional (MDS), modelos lineares, e análises de redundância baseadas em distâncias (e.g. DISTLM e dbRDA).

Nas análises de PCA, novas componentes de dimensão reduzida são criadas com base em projeções ortogonais, com o objetivo de minimizar a variação residual e maximizar a variabilidade explicada no espaço euclidiano (CLARKE; WARWICK, 2001). Os mapas fatoriais mostram a relação entre as variáveis originais e os dois componentes principais (Dim 1 e 2, ou PC 1 e 2), indicando a contribuição de cada uma delas na ordenação. O MDS, também denominado Análise de Redução de Dimensão Sem Restrição, foca na preservação da ordem das dissimilaridades para uma escolha de dimensões, previamente definidas. O algoritmo do MDS busca construir um "mapa de configuração" para posicionar espécies e amostras minimizando o estresse (medida que reflete quão bem a distância euclidiana representa a dissimilaridade original). O estresse varia entre zero e um, com zero indicando uma configuração perfeita (CLARKE; WARWICK, 1994a).

Os modelos lineares buscam representar a relação "linear" entre duas variáveis, mensurando o impacto das variáveis preditoras (e.g. variáveis ambientais) sobre a variável resposta (e.g. cobertura de corais, abundância de rodólitos), baseado em suposições probabilísticas (MCCULLAGH; NELDER, 1989). Os Modelos Lineares Baseados em Distâncias (DISTLM), amplamente utilizados no trabalho, modelam a regressão linear multivariada com base em uma matriz de similaridades (dissimilaridades) e um procedimento de permutação que atenua premissas de normalidade (LEGENDRE; ANDERSON, 1999). A Análise de Redundância Baseada em Distâncias (dbRDA) é uma técnica de redução de dimensões com restrições, baseada nos resultados do DISTLM, fornecendo um panorama completo das variáveis a reduzir e das covariáveis (variáveis ambientais) (LEGENDRE; ANDERSON, 1999). Os passos das rotinas de MDS, DISTLM e dbRDA estão detalhadamente descritos por CLARKE; GORLEY (2015).

### 1.3. AMOSTRAGEM E ANÁLISE

#### 1.3.1. Caracterização das comunidades de bancos de rodolitos

Para determinar a estrutura dos bancos de rodolitos foram usados quadros estáticos obtidos com *dropcameras*. Foram analisados o percentual de cobertura, densidade, vitalidade, forma e fauna e flora associada. Os parâmetros quantitativos foram analisados através da plataforma *CoralNet* (<https://coralnet.ucsd.edu/>), a qual permite automatizar classificações (=identificação dos organismos) com diferentes níveis de supervisão. O sistema utiliza um algoritmo de *machine learning* que reconhece padrões de cor e textura das imagens (BEIJBOM et al., 2015). Foram obtidas pelo menos 5 imagens por estação amostral, e cada imagem foi processada usando 50 pontos aleatoriamente distribuídos. Parâmetros qualitativos foram analisados a partir do material coletado.

**Vitalidade e forma.** A vitalidade dos rodolitos também foi estimada a partir dos fotoquadrados. Foi considerado rodolito vivo aquele cuja alga coralinácea formadora apresentou pigmentação (i.e., talo róseo, vináceo, ou avermelhado), e morto aquele que não apresentou tal coloração ou que esteve com a superfície de esqueleto carbonático aparente, esbranquiçada. A partir desta metodologia, adaptada de Bahia et al. (2010), foi calculado o percentual de cobertura de alga coralinácea viva em cada estação amostral. O grau de esfericidade foi utilizado para determinar a forma do rodolito, segundo Bosence e Pedley (1982) e Perry (2005), com base em medições dos diâmetros mínimo, intermediário e máximo de cada nódulo. Esses dados foram inseridos no programa Tri-plot v1.3 (GRAHAM; MIDGLEY, 2000), o qual qualifica as formas em esférica, discóide ou elipsoide. Os resultados foram expressos em valores percentuais de cada forma por estação amostral, e também graficamente através do diagrama triangular gerado pelo programa.

**Fauna associada.** Para a análise qualitativa, os organismos presentes na superfície de cada um dos 30 rodolitos coletados por estação foram separados, fotografados e identificados no menor nível taxonômico possível, a partir da visualização de caracteres morfoanatômicos sob microscópio. Adicionalmente, foi analisada a composição dos organismos incrustantes no interior dos rodolitos. Para isso, rodolitos selecionados foram seccionados longitudinalmente em seu maior eixo. A análise da estrutura interna e dos grupos de organismos que compõem cada amostra foi realizada sob microscópio estereoscópico e lupa de mão. As imagens foram capturadas com o software *Scope Image Dynamic Pro*. Os principais grupos de organismos (e.g. algas coralináceas, briozoários, corais), inclusive bioerosores, foram identificados com base em Flügel (2009). A quantificação dos grandes grupos foi realizada com os métodos descritos para análises de fotoquadrados.

### 1.3.2. Identificação taxonômica de macroalgas

As macroalgas coletadas foram acondicionadas em formol 4% e transportadas para o laboratório, onde foram lavadas e dispostas em bandejas com água do mar. Para o estudo das estruturas vegetativas e reprodutivas foi feita dissociação com estiletos e/ou cortes anatômicos com lâminas de aço para observação microscópica. As macroalgas foram identificadas com base em Guiry e Guiry (2019), Littler e Littler (2000), e Guimarães (2006). Exemplares testemunho foram depositados no Herbário do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (RB).

### 1.3.3. Identificação taxonômica das algas coralináceas (calcárias) incrustantes

No laboratório, as algas coralináceas incrustantes (ACI) foram fotografadas e separadas em morfotipos, de acordo com sua forma de crescimento (WOELKERLING et al., 1993), tipos de estruturas reprodutivas (conceptáculos uniporados, multiporados ou soros) e variações morfológicas (e.g., elevado, plano, afundado, dimensões). Em exemplares selecionados foram combinadas três técnicas de identificação: análises de sequências de DNA, cortes histológicos (microscopia óptica) e fragmentos (MEV). A extração de DNA seguiu o protocolo de Broom (2008). O marcador plastidial (psbA), um dos principais marcadores para identificação molecular de ACI, foi amplificado com os *primers* psbAF1 e psbAR2 (YOON et al., 2002), conforme Saunders (2005). As sequências foram editadas no programa *Geneious* 11.15 e comparadas com aquelas de espécimes-tipo disponíveis no *GenBank*, com auxílio da ferramenta BLAST.

A metodologia para os cortes histológicos foi adaptada de Maneveldt e van der Merwe (2012) e a metodologia utilizada para as análises em MEV seguiu Bahia et al. (2010). Os espécimes foram identificados com base em Woelkerling (1988), Harvey e Woelkerling (2007), Bahia (2014) e van der Merwe (2015), bem como através de comparações com espécimes tipo. Exemplares testemunho serão depositados no Herbário do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (RB).

### 1.3.4. Abundância de macroalgas e organismos bentônicos na área litorânea

O percentual de cobertura dos principais grupos bentônicos na área litorânea da APA Costa das Algas e RVS Santa Cruz foi estimado com base em imagens adquiridas em fotoquadrados e processadas com uso plataforma *CoralNet*, descrita acima. Em cada estação foram dispostos, aleatoriamente, 10 fotoquadrados, cada um composto por um mosaico de 15 fotos contíguas totalizando 0,7 m<sup>2</sup>. Para estimativa do percentual de cobertura de cada táxon ou categoria foram empregados 15 pontos distribuídos aleatoriamente sobre cada imagem (225 pontos por quadrado), conforme Francini-Filho et al. (2013). As macroalgas abaixo de cada ponto foram identificadas no menor nível taxonômico possível e os demais organismos identificados em grandes grupos (e.g. coral, esponja, zoantídeo, ACI, algas

calcárias articuladas, tufo). A comunidade de macroalgas foi categorizada através de estimativas de riqueza (S) e índices de diversidade, cuja similaridade foi determinada pelo índice de Kulczynski ou análogos. As porcentagens de cobertura serão avaliadas quanto à variação espaço-temporal através de Análises de Variância (ANOVA) ou outras ferramentas estatísticas uni e multivariadas.

### 1.3.5. Caracterização da comunidade presente nas CAUs e medições com dataloggers associados

**Procedimento pós-retirada das CAUs.** As CAUs foram removidas dos locais onde foram instaladas após um ano e acondicionadas em sacos plásticos, a fim de manter o sedimento depositado e preservar a integridade de organismos frágeis (e.g. ascídias, tufos). Ainda em campo, as placas foram desmontadas sobre bandejas e “rinsadas” com água do mar. Os sedimentos foram armazenados em recipientes refrigerados. Cada face de cada placa foi fotografada e as placas preservadas em formalina a 10%, protegidas da luz. As imagens das placas foram utilizadas para identificar e determinar a abundância de organismos colonizadores (%) com uso do software *ImageJ* 1.48. A área de cada organismo foi obtida através do contorno de seu perímetro com uso de mesa digitalizadora. O percentual de cobertura foi relativo à área total da superfície da CAU (400 cm<sup>2</sup>). Organismos calcificadores e não calcificadores foram identificados e comparados com REIS et al. (2016).

**Análise de sedimento nas CAUs.** Em laboratório, as amostras foram decantadas e o excesso de água removido com bomba peristáltica. Os sedimentos foram lavados duas vezes com água deionizada, centrifugados e liofilizados. A mineralogia foi determinada através de difração de raios X em um *PANalytical X' Pert Pro Multipurpose Powder Diffractometer* (geometria Bragg-Brentano, radiação CuK $\alpha$ , gerador: 40 mA and 40 kV, amplitude angular 5-90° 2 $\theta$ , tomada a cada 0,02°, 180 s por medida). As análises difratométricas foram feitas em triplicata e as amostras foram previamente moídas 2 vezes, por 10 min., e filtradas em malha de 2 $\mu$ m. A identificação das fases cristalinas, na forma de picos no difratograma, foi feita no 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).

**Produção de CaCO<sub>3</sub> nas CAUs.** As placas foram lavadas separadamente (3x) em solução de hidróxido de cálcio em água deionizada (pH 10), para evitar desmineralização, e posteriormente secas a 60 °C por 5-6 dias até o peso se estabilizar. O material seco foi raspado, triturado em moinho de bolas e pesado para obtenção da massa total (calcária e não calcária). Em seguida, alíquotas pulverizadas de 50 mg foram analisadas por difração de raios-x, conforme descrito acima. Após a difratometria o material foi calcinado a 500°C por 6 dias ou até apresentar peso constante. A massa orgânica foi obtida

pela subtração da massa total da massa calcinada. O restante do material foi submerso em solução a 5% de  $\text{HNO}_3$  por 5 h, para dissolução do  $\text{CaCO}_3$ , e posteriormente lavado com água deionizada, centrifugado, seco a  $60^\circ\text{C}$  durante 5 dias e pesado. A massa carbonática foi obtida subtraindo a massa calcinada da massa de cinzas. Para determinar a produção de  $\text{CaCO}_3$ , a massa carbonática foi normalizada em função da área da CAU e do tempo total de colonização (t), resultando numa taxa de acúmulo líquido de  $\text{CaCO}_3$  ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{t}^{-1}$ )

Os contrastes foram feitos com análises de variância (ANOVA) ou outras ferramentas estatísticas uni e multivariadas. Para identificar afinidades entre grupos de organismos colonizadores foram utilizadas estatísticas multivariadas (e.g. escalonamento multidimensional não-métrico - NMDS). A contribuição das variáveis abióticas (e.g. PAR, temperatura) foi avaliada com análises de redundância, regressões múltiplas multivariadas, ou modelos lineares, com uso dos softwares *PRIMER*, *PERMANOVA* e *STATISTICA*, ou no ambiente R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

**Temperatura e luminosidade.** Sensores *HOBO Pendant Light Data Logger* (64K-UA-002-64) implantados junto às CAUs fizeram o registro da temperatura da água a cada 3 h no período de 12 meses. A intensidade da luz foi estimada em LUX, usando os dados dos primeiros 10 dias após a instalação. Valores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foram obtidos com base em fatores de conversão para  $\mu\text{E}$ . A extração dos dados foi feita com o software *Hoboware*.

### 1.3.6. Caracterização quali- e quantitativa do sedimento das CAUs e armadilhas de sedimento

As armadilhas de sedimento foram recolhidas, transportadas para a superfície com tampas herméticas e reinstaladas, trimestralmente. Os sedimentos foram transportados em recipientes plásticos refrigerados, no escuro, após decantação e remoção do excesso de água. Alíquotas de 50 mg do sedimento de cada estação ( $n=3$  réplicas por estação) foram liofilizadas, trituradas em moinho de bolas e filtradas em malha de  $25\ \mu\text{m}$  para analisados por difração de raios-x, conforme protocolo acima. Para granulometria foram coletadas 3 alíquotas de cada estação, totalizando  $\sim 100$  g. O material foi seco por liofilização durante 48 h e passado por peneiras (4, 2 e 1 mm; 500, 250, 100, 50, 25 e  $4\ \mu\text{m}$ ) empilhadas sobre agitador eletromagnético, durante 1 h. Cada peneira foi pesada em balança digital antes e depois da filtragem, para cálculo da porcentagem de sedimentos retidos. Os sedimentos foram classificados com base na escala 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).

#### 1.3.6.1. Processamento de amostras para toxicologia

As amostras para estudos toxicológicos no âmbito do Anexo 1 abrangem uma espécie de macroalga, uma espécie de esponja e duas espécies de corais, coletadas semestralmente. As amostras foram

aliquotadas para análises de metais e biomarcadores, sendo preservadas com identificação individual em freezer e nitrogênio líquido, respectivamente.

### 1.3.7. Caracterização de comunidades recifais bentônicas

**Amostragem quali-quantitativa com fotoquadrados.** A abordagem para detectar a dinâmica das assembleias bêmicas recifais foi centrada em amostras repetidas realizadas em parcelas fixas, de forma a controlar a heterogeneidade espacial. Esse monitoramento foi baseado em imagens obtidas com os fotoquadrados cujas dimensões estão descritas acima e cujo posicionamento foi fixado com vergalhões metálicos fincados ao recife. Cada sítio contou com pelo menos 10 parcelas distribuídas aleatoriamente no tempo zero, ao longo de transecções com 30–50 m, tanto no topo (iluminado e aproximadamente horizontal) quanto na parede (sombreado e inclinado) das estruturas recifais. O processamento das imagens foi feito na plataforma *CoralNet* conforme descrito acima, porém com uso de 30 pontos de anotação por imagem. Os dados de cobertura bêmica foram processados com os softwares *PRIMER*, *PERMANOVA* e no ambiente R, buscando estabelecer contrastes espaciais e temporais, bem como associações com os parâmetros físico-químicos.

### 1.3.8. Parâmetros Físico-químicos da coluna d'água

Em cada estação foi realizada perfilagem com CTD e ADCP, aos quais foi acoplado instrumental multiparamétrico para aquisição de dados de turbidez, fluorescência e pH (Plataforma *Seaguard, Aanderaa*). Em estações representativas da área de estudo também foram feitas medidas contínuas (fundeios), quando possível, abrangendo pelo menos um ciclo de marés (e.g. ATAMANCHUK et al., 2015; WESSLANDER et al., 2011). Os dados físico-químicos foram descarregados e checados a bordo, com pré-processamento no software *AADI Real Time Collector* e *Data Studio*.

Complementarmente foram extraídos, através de sensoriamento remoto, dados de atenuação da luz (turbidez), temperatura superficial do mar (SST), clorofila a (Chla) e radiação fotossinteticamente ativa (iPAR), na escala regional e para os períodos amostrais cobertos pelo projeto. A extração, processamento e exploração dessas variáveis foram feitas em ambiente R, integrado ao Sistema de Informação Geográfica (SIG) do projeto (ArcGIS/ESRI). Os produtos processados são derivados do sensor MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*), acoplado ao satélite Aqua e disponíveis em série histórica de 15 anos (2003-2018) com resolução temporal de dois dias e resolução espacial de 4 km. As variáveis foram obtidas em repositórios da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos EUA. Os valores de Kd490 (*Diffuse Attenuation Coefficient, 490nm*), Chla e iPAR foram obtidas no ERDDAP (*Easier Access to Scientific Data*), com dados calibrados pelo *Ocean Biology Processing Group* (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), ao passo que os valores de SST (*4μ nighttime*) foram adquiridos na PO.DAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*).

### 1.3.9. Avaliação da condição fisiológica de corais

A condição fisiológica de corais foi avaliada por fluorimetria de pulso modulado (RALPH; GADEMANN, 2005). Essa abordagem permite acessar a atividade fotossintética dos endossimbiontes por meio de curvas rápidas de luz (i.e. *Rapid Light Curves* - RLC's), bem como descrever o estado atual de seu aparato fotossintético e fazer inferências sobre o regime de luz ao qual o coral foi recentemente submetido. Os dados extraídos do fluorímetro (Diving-PAM I, blue light) foram pré-processados com o software *WinControl* (WALZ, Germany) e analisados de acordo com Ralph e Gademann (2005), visando obter: capacidade fotossintética máxima (rETR<sub>m</sub>), irradiância mínima saturante (E<sub>k</sub>) e Rendimentos Quânticos Complementares ( $\phi$ PSII,  $\phi$ NPQ,  $\phi$ NO). Esses parâmetros foram analisados no ambiente R, com o objetivo de estabelecer contrastes espaciais e temporais, bem como associações com parâmetros físico-químicos do ambiente. Nesse sentido, também foram feitas comparações entre curvas, análises fatoriais e análises multivariadas (e.g. PCA).

### 1.3.10. Análise qualitativa e quantitativa de zooxantelas

**Coleta e estimativa da área dos corais.** Zooxantelas foram coletadas pela raspagem de tecido de fragmentos de espécimes de corais coletados manualmente por mergulhadores. Amostras de tecido de ca. 15cm<sup>2</sup> foram raspadas, diluídas em água do mar filtrada e alíquotadas para quantificação e caracterização morfométrica e genética dos simbiontes. As imagens dos corais coletados em campo, dos quais foram raspados os tecidos, foram processadas em laboratório para estimativas de área para posterior normalização da densidade de simbiontes e pigmentos. A área correspondente a remoção do tecido do espécime foi estimada usando o programa *Coral Point Count with Excel extensions*, CPCe (KÖHLER; GILL, 2006) com a opção de análise de área e comprimento na seção de medições. A escala das fotos foi calibrada convertendo-se o valor de pixels em cm usando como base a régua da imagem. A partir desse valor de calibração a área da região de onde o tecido foi removido é calculada pelo programa.

**Caracterização citométrica de zooxantelas.** As suspensões de tecido de corais foram processadas em campo e fixadas em paraformoldeído 1%, homogeneizadas em vortex e sonicadas com sonda de 3mm de diâmetro (*Cole Palmer CPX 130*) por 30 segundos (pulsos intervalados de 1 segundo, a 20% de amplitude) para romper grumos de células. A suspensão foi filtrada em malha de nylon de 45  $\mu$ m para remoção de partículas maiores (sedimento, fragmentos de esqueleto). Esferas de poliestireno fluorescentes (diâmetro nominal de 3 $\mu$ m) foram adicionadas a cada amostra como controles internos. Alíquotas da suspensão foram analisadas por citometria de fluxo multiparamétrica (*Cytoflex*, *Beckman-Coulter*) utilizando laser azul (488nm) para excitação, a um fluxo de 50 a 100 $\mu$ L min<sup>-1</sup> por 2 a 5 min. Células de *Symbiodinium* spp. foram discriminadas em citogramas de luz espalhada frontalmente (FSC-H, proxy para tamanho celular) por fluorescência da clorofila (FL3-H). Dados de contagens, sinais de

espalhamento de luz e fluorescência da clorofila foram exportados com software do fabricante. Os valores de FSC-H e FL3-H foram normalizados por valores das *beads* de cada amostra (FL3-H, 670 nm). Densidades de *Symbiodinium* spp. foram expressas por unidade de área (cm<sup>2</sup>) de cada coral.

**Caracterização morfológica de zooxantelas.** Para as análises morfométricas e estimativas de biovolume de zooxantelas, uma alíquota da suspensão de tecido de cada coral foi analisada em um sistema de imageamento em fluxo (*FlowCam*® model VS, *Fluid Imaging Technologies*, USA) com célula de fluxo FOV de 90µm a um fluxo de 100µL min<sup>-1</sup>. As células de *Symbiodinium* spp. foram imageadas em uma objetiva de 20X de aumento a uma taxa de aquisição de 20 imagens por segundo. Células 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<sup>3</sup> célula<sup>-1</sup>) através de aproximação do formato de um esferóide prolado (SUN; LIU, 2003; Figura 1B).

### 1.3.11. Caracterização genética de zooxantelas

**Extração de DNA.** As amostras preservadas em nitrogênio líquido foram descongeladas no gelo e no escuro, e uma alíquota de 300 µL de cada amostra foi posta em um microtubo com 500 µL de *CHAOS Buffer* (4M Tiocianato de Guanidina, 0.1% Solução de N-lauroyl sarcosina, 10 mM Tris pH8, 0.1M 2-mercaptoetanol (FUKAMI et al., 2004), por uma semana. À mistura de tecido e CHAOs foi adicionado volume equivalente de buffer de extração de fenol (*Phenol extraction Buffer* PEB -100 mM TrisCl pH8, 10 mM EDTA, 0.1% SDS). O DNA total foi extraído pelo método Fenol/Clorofórmio, precipitação por etanol e ressuspenso em TE (10 mM Tris, pH 7.5, 1 mM EDTA) com RNase (10 mg/ml).

**Amplificação e sequenciamento.** Para caracterização genética, foi utilizada análise da região nuclear do espaçador interno do transcrito do DNA ribossomal (ITS2), amplamente utilizada para caracterização de Symbiodiniaceae (LAJEUNESSE; PINZÓN, 2007; STAT et al., 2011). Foram usados iniciadores descritos em POCHON et al. (2001) com sequência adaptadora para sequenciamento<sup>2</sup> na plataforma Illumina (QUIGLEY et al., 2016). A amplificação foi realizada adicionando ca. 40 ng de DNA, 0,4µM de cada iniciador, 0,2mM de dNTPs, 1 U de enzima *HotStar HiFidelity* (Quiagen), 2,5mM de MgCl<sub>2</sub> e 1% DMSO em 25µL de reação. O ciclo de temperatura para amplificação foi: 95°C por 2 minutos, 35 ciclos a 95°C por 45 segundos, 45 seg. a 56°C e 45 seg. a 72°C, finalizando a 72°C por 5 min. Os produtos foram verificados em eletroforese em gel de agarose (1,5%). O sequenciamento está sendo feito seguindo protocolos em ARIF et al. (2014) e ALANAGREH et al. (2017). Os dados brutos

---

<sup>2</sup> ITS2A1gF, TCGTCGGCAGCGTCAGATGTGTATAAGAGACAGGTGAATTGCAGAACTCCGTG; ITS2A1g RGTCTCGTGGGCTCGGAGATGTGTATAAGAGACAGCCTCCGCTTACTTATATGCTT.

serão tratados no software *MOTHUR* (SCHLOSS et al., 2009) e as sequências com baixos valores de qualidade (QC<30) e tamanhos menores do que 200 pares de bases serão retiradas. As sequências de ITS2 para cada biblioteca serão ranqueadas de acordo com sua frequência de ocorrência. As dez sequências mais frequentes serão comparadas ao banco de dados *GenBank*. A identificação será baseada nos valores de identidade mínimos de 50 e *E-value* de  $1 \times 10^{-5}$ . Análises filogenéticas serão realizadas pelo método Bayesiano no software *MRBAYES 3.2.3* (RONQUIST; HUELSENBECK, 2003).

### 1.3.12. Análise qualitativa e quantitativa do plâncton

**Coleta.** A coleta de água destinada à dosagem de pigmentos clorofilianos e análise dos organismos planctônicos (microscopia invertida, citometria e imageamento dinâmico em fluxo) foi realizada com garrafa Niskin de 5L, em duas profundidades (superfície e a 1m do fundo), em dois (Áreas B, C, D) ou três (Área A) pontos amostrais.

**Quantificação por citometria de fluxo multiparamétrica.** As frações do pico-, nano- e parte do microplâncton mais abundantes nas amostras foram quantificadas por citometria de fluxo multiparamétrica em um citômetro de fluxo modelo *Cytoflex* (*Beckman Coulter*) equipado com lasers violeta (405nm), azul (488nm) e vermelho (628nm). As amostras armazenadas em N-líquido foram descongeladas à temperatura ambiente e ao abrigo da luz. A fração autotrófica (cianobactérias e eucariotos unicelulares clorofilados) foi analisada de acordo com DUBELAR; JONKER (2000) e MARIE et al. (2014). O limiar de detecção (*threshold*) foi aplicado ao sinal de fluorescência vermelha emitida pela clorofila (canal FL3-H). Amostras foram aspiradas a uma velocidade entre 50 e 100  $\mu\text{L min}^{-1}$  por 1 a 5 min. Foram coletados sinais de luz espalhada (FSC-H e SSC-H) e de fluorescência da clorofila e dos pigmentos acessórios ficoeritrina e ficocianina nos sensores correspondentes aos picos de emissão destes pigmentos. A fração heterotrófica (bactérias e eucariotos unicelulares) foi analisada de acordo com MARIE et al. (1997). Alíquotas de 180 $\mu\text{L}$  foram coradas com 20 $\mu\text{L}$  do fluorocromo para ácidos nucleicos SYBR Green I (*Thermo Scientific*, referência S-7567) diluído 1000 vezes do original. Esferas fluorescentes de poliestireno de 1 $\mu\text{m}$  foram adicionadas como controle interno. As amostras foram incubadas a temperatura ambiente por 15 min. e então analisadas por citometria de fluxo. O limiar de detecção foi aplicado ao sinal de fluorescência verde emitida pelo fluorocromo (canal FL1-H). Amostras foram aspiradas a uma velocidade entre 20 e 50  $\mu\text{L min}^{-1}$  por 1 a 2 min. Foram coletados os sinais de luz espalhada (FSC-H e SSC-H) e os sinais de fluorescência do SYBR Green I e pigmentos fotossintéticos. Para o processamento dos dados citométricos, os arquivos gerados pelo citômetro de fluxo no formato FCS foram analisados no programa *FlowJo* (*FlowJo*, LLC, OR), para delimitação de populações alvo e cálculos de concentração de células.

**Diversidade citométrica.** Os dados citométricos foram exportados em formato padrão de citometria de fluxo (FCS) para o software *FlowJo* (*FlowJo*, LLC, OR) para remoção de partículas detriticas, ruído

eletrônico e a população de esferas usadas como controle interno. A estimativa da diversidade citométrica utilizou os arquivos FCS previamente tratados seguindo a rotina de PROPS et al. (2016), implementada no programa R (v.3.2.1) (*R Core Team*, 2015). Os parâmetros de interesse selecionados para as análises de diversidade citométrica foram o espalhamento de luz frontal e lateral (FSC-H e SSC-H) e os sinais de fluorescência dos pigmentos naturais das células (clorofila, ficoeritrina e ficocianina). A partir dos dados citométricos foram calculados os índices  $D_0$  e  $D_1$  da série de Hill (1973), que correspondem à riqueza e diversidade exponencial de *Shannon*, respectivamente.

**Análises quali- quantitativas por microscopia.** Em laboratório, amostras de 2L fixadas em formaldeído 2% foram pré-concentradas através de sedimentação por 7 dias e posterior remoção de 90% do volume do sobrenadante por sifonamento. O volume restante, contendo as células sedimentadas, foi transferido para frasco âmbar de 250mL e estocado em geladeira. As amostras concentradas foram analisadas através de um sistema automatizado de imageamento em fluxo e através de microscopia invertida, conforme descrito a seguir.

**Imageamento dinâmico em fluxo.** Células na faixa dimensional entre 5 e 100 $\mu$ m foram analisadas em sistema automatizado de imageamento em fluxo, *FlowCam®* (*Fluid Imaging Technologies*) (SIERACKI et al., 1998). Alíquotas de 10 mL das amostras concentradas foram filtradas em malha de nylon com abertura de 100 $\mu$ m para remoção de partículas grandes. As análises foram realizadas em modo *Autoimage*, com fluxo de 100 $\mu$ L min<sup>-1</sup> por 20 a 30 min, com célula de fluxo FOV de 90  $\mu$ m e objetiva 10X. A classificação e análise morfométrica das imagens foi feita com o programa *VisualSpreadSheet*.

**Microscopia invertida.** Organismos do fito- e protozooplâncton maiores que 15 $\mu$ m foram quantificados pelo método de sedimentação (UTHERMÖL, 1958; LUND et al., 1958), usando 10 a 100mL de amostra sedimentados por 24 a 72h. Os organismos foram quantificados sob microscópio invertido de campo claro em aumento de 20X ou 40X. A identificação dos organismos foi feita ao menor nível taxonômico possível (TOMAS, 1997; SOURNIA, 1986; CHRÉTIENNOT-DINET, 1990).

### 1.3.13. Quantificação de pigmentos clorofilianos

A análise qualitativa e quantitativa de pigmentos clorofilianos no tecido de corais e na coluna d'água (plâncton) foi feita através de extração em acetona e detecção por espectrofluorimetria. Organismos contidos em volumes de 0,5 a 1L foram coletados em filtros de fibra de vidro (GF/F) e estocados congelados. A extração dos pigmentos foi realizada em acetona 90%. Para isso, as amostras foram filtradas em filtros GF/F de 47 mm de diâmetro para concentrar a suspensão celular e retirar o excesso de água. Os filtros foram transferidos para tubos de vidro contendo 6 mL de acetona 90% e macerados com bastão de vidro. Após esta etapa, os tubos foram selados com *Parafilm®* e sonicados por 2 min. a 4°C. As amostras foram armazenadas a -20°C por 12h, centrifugadas a 2500 rpm por 10 min., e as

fluorescências dos extratos medidas em espectrofluorímetro *VARIAN (CARY ECLIPSE)*. As concentrações pigmentares foram calculadas segundo protocolo em NEVEUX; LANTOINE (1993), modificado por VANZAN et al. (2015). Para isso, foi feita a aquisição de 31 espectros de emissão de fluorescência entre 615 e 715nm com resolução de 2nm, com excitação entre 390 e 480 nm com resolução de 3nm.

## 2. RESULTADOS

### 2.1. ANÁLISES SEDIMENTOLÓGICAS

As análises sedimentológicas foram baseadas em dados obtidos por métodos de amostragem complementares entre si, incluindo coletas do sedimento superficial e armadilhas de sedimento. Os dados obtidos por dragagens se referem às três primeiras campanhas embarcadas (dezembro de 2018, fevereiro de 2019 e julho de 2019) nas Áreas C e D, e às quatro campanhas nos sítios costeiros da Área D e E (setembro de 2018, janeiro de 2019, maio de 2019 e julho de 2019). Os dados oriundos de armadilhas de sedimento (Quadro 1) nas Áreas A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos) se referem às armadilhas instaladas em janeiro de 2019 e retiradas em abril de 2019. As armadilhas instaladas na Área D, em dezembro de 2018, serão recolhidas em dezembro de 2019. Os dados sedimentológicos foram explorados através de Análise de Componentes Principais (PCA), com incorporação de dados de turbidez obtidos por sensoriamento remoto (veja Figura 61), latitude, distância da foz do rio Doce, distância da costa e de drenagens costeiras.

#### 2.1.1. Sedimentos superficiais

Nos sedimentos superficiais foram encontradas diversas fases minerais, agrupadas em função de suas composições elementares: quartzo, caulinita e moscovita, pertencendo a classe dos “silicatos”; hematita, greigita e gormanita, no grupo dos minerais “ferrosos”; e calcita, calcita magnesiânica e aragonita, no grupo dos “carbonatos”.

A PCA evidenciou uma clara separação no gradiente costa-oceano (*cross-shelf*) dos sedimentos (Figura 4). Minerais de origem continental, como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e greigita ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ), se relacionaram com sítios costeiros, sob maior turbidez, ao passo que carbonatos (aragonita, calcita e calcita magnesiânica) predominaram nos sítios mais afastados da costa (*offshore*). As amostras dos sítios *offshore* se apresentaram mais dispersas no eixo associado à latitude (PC2) (Figura 4), muito embora a hematita, abundante em sedimentos costeiros, também tenha apresentado variação latitudinal. Minerais ferruginosos como a gormanita ( $(\text{Fe,Mg})_3\text{Al}_4(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) foram registrados *offshore* nas Áreas C e D, especialmente em sítios próximos a foz do rio

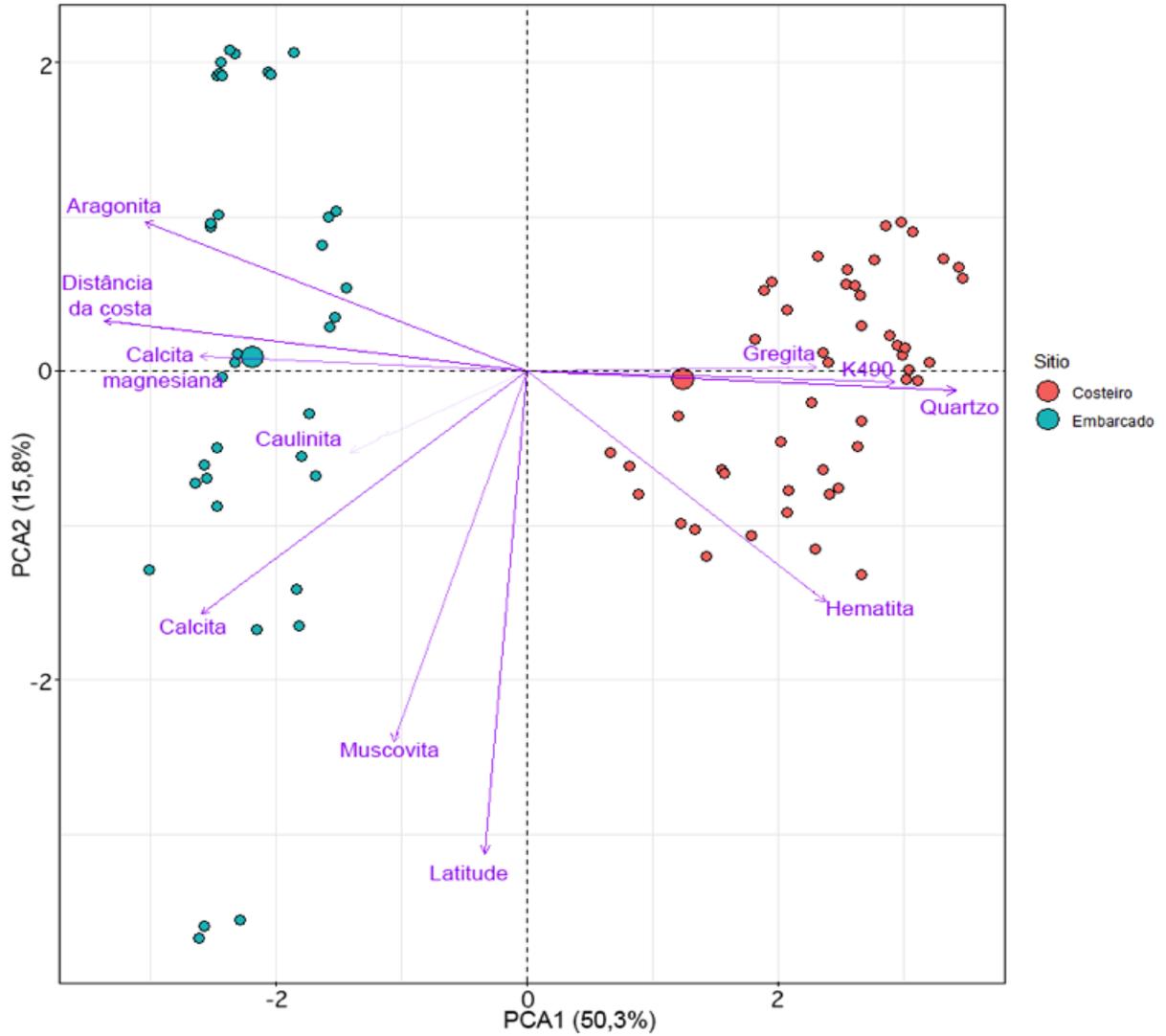
Doce (C4, C10, D7, D10 e D13). Foi observado maior percentual de silicatos (quartzo, moscovita e caulinita) nas estações das campanhas de dezembro de 2018 e julho de 2019 (Tabela 1).

As três formas cristalinas de carbonatos são biogênicas, sendo a calcita magnesiana produzida principalmente por algas coralináceas e briozoários, ao passo que a aragonita é típica dos corais. A calcita, por sua vez, é produzida principalmente por bivalves e gastrópodes (LEBRATO et al., 2016). Dentre os sedimentos terrígenos, o quartzo representa um dos minerais mais abundantes do planeta, base dos silicatos de rochas e sedimentos continentais. Dentre os silicatos de alumínio, a caulinita ( $Al_2Si_2O_5(OH)$ ) é abundante em solos formados por intemperismo químico em regiões de clima quente e úmido (ANTHONY et al., 1995, 2017). Já a moscovita ( $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ ), comum em regiões costeiras, é componente primário de rochas ígneas, além de ser encontrada em rochas metamórficas (e.g. gnaisses) e sedimentares detríticas (e.g. arenitos e argilitos) (WOODARD, 1951). Moscovita e hematita tendem a ser mais abundantes em locais de mineração (YODER; EUGSTER, 1955). A greigita é associada à presença de água doce, sendo principalmente formada por bactérias magnéticas e sulfato-redutoras (QIANG et al., 2018). A gormanita é um minério de ferro fosfatado raro, alvo de mineração em Minas Gerais (<http://rruff.info/Gormanite/R080075>).

Quadro 1: Distribuição das amostragens para análises sedimentológicas com dados das armadilhas. AP = Amostrado e Processado; ANP = Amostrado e não processado; NC = Não coletado. Os dados da última retirada dependem da quarta campanha, em andamento.

Área	Sítios	instalação e retirada	
		novembro/18 - abril/19	abril/19 - julho/19
A	A1	AP	ANP
	A2	AP	ANP
	A3	NC	ANP
	A4	AP	ANP
	A6	NC	ANP
B	B1	AP	ANP
	B2	AP	ANP
	B4	AP	ANP

Figura 4: Análise de Componentes Principais (PCA) com dados mineralógicos dos sedimentos superficiais coletados nas Áreas C e D e outras variáveis ambientais (turbidez, distância da costa, latitude). Os pontos vermelhos representam campanhas costeiras e os pontos azuis representam campanhas embarcadas. Círculos menores representam as amostras e os maiores os centroides de cada grupo (amostras costeiras e embarcadas).



A variação temporal na fração de sedimentos terrígenos (silicatos e minerais ferruginosos) tendeu a ser menor em estações dominadas por rodolitos (Tabela 1), mas o aporte continental está presente nesse sistema, revelado não apenas pela presença, mas também pelo componente sazonal de terrígenos nos sedimentos superficiais.

A vazão média do rio Doce, em dezembro, é quatro vezes maior do que em setembro e duas vezes maior do que em maio e julho (COELHO, 2007), ao passo que o aporte e remobilização desses sedimentos envolve fluxos ao sul e a nordeste da foz do rio Doce (MARTA-ALMEIDA et al., 2016; RUDORFF et al., 2018), os quais ainda não são plenamente conhecidos. A variação espacial e temporal nos sedimentos superficiais nas Áreas C e D, inclusive sobre os bancos de rodolitos, está possivelmente relacionada à interação entre o ciclo hidrológico e à remobilização e transporte dos sedimentos superficiais. Por exemplo, processos de remobilização podem ter induzido uma parte da heterogeneidade espaço-temporal nos dados aqui reportados (Tabela 1), a qual também se reflete no segundo eixo da ordenação (PC2) (e.g. Figura 4 e Figura 5). Dentre os sítios dominados por rodolitos, D3 exemplifica bem esse tipo de heterogeneidade, com variação temporal no teor de caulinita. Além desse, os sítios *offshore* D5, D7 e D10, dominados por sedimento mais finos (Figura 8 e Tabela 2), apresentaram minerais ferrosos. Na Área C, de forma semelhante, os sítios apresentam composição rica em sedimento fino. C4 e C10 (Tabela 2) também apresentaram minerais ferrosos (Tabela 1). Um quadro mais completo acerca da deposição de sedimentos terrígenos nos bancos de rodolitos depende da finalização das análises do primeiro ciclo e de réplicas temporais, bem como dos modelos hidrodinâmicos e de transporte em construção no âmbito do PMBA.

Figura 5: Análise de Componentes Principais (PCA) com dados mineralógicos dos sedimentos superficiais das Áreas C e D e outras variáveis ambientais (turbidez, distância da costa, latitude). Cores e símbolos discriminam sítios e campanhas. Círculos menores representam amostras e círculos maiores representam os centroides de cada grupo de amostras.

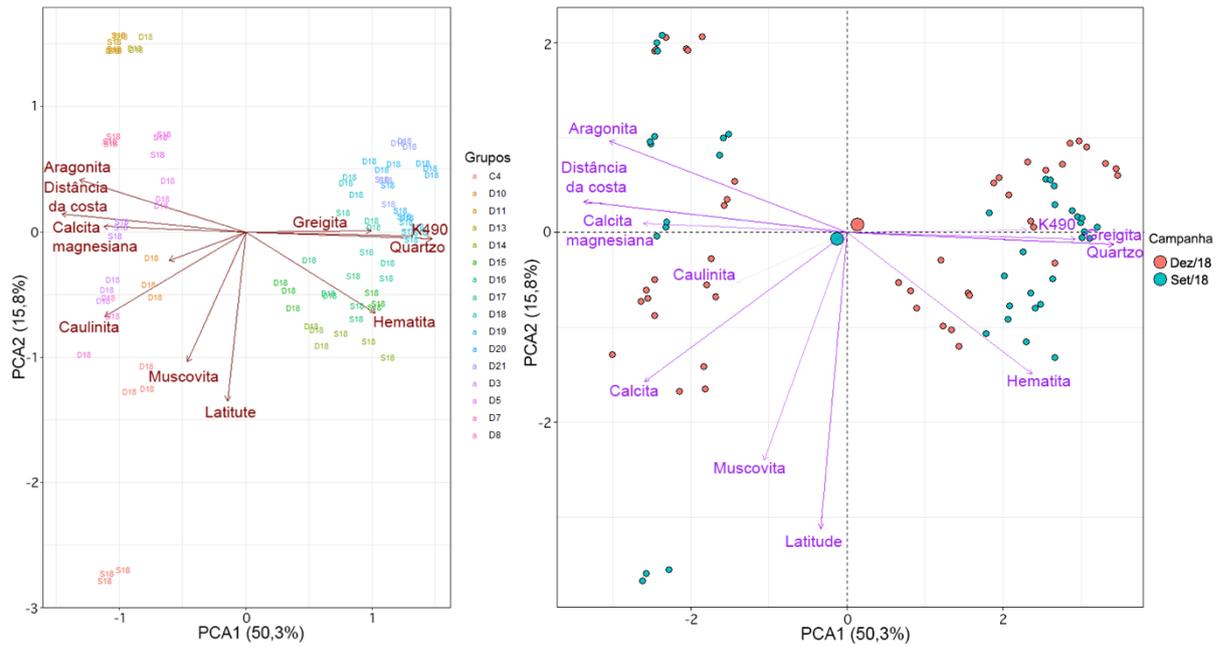


Tabela 1: Mineralogia do sedimento superficial coletado nas Áreas C e D (amostras das campanhas embarcadas, *offshore*).

Valores em % média. \* = bancos de rodolitos.

Estações	Campanha	Silicatos	Ferrosos	Carbonatos
C4*	Set 2018	16,9	1,3	81,8
D3*		3,7	0,0	96,4
D5		2,2	1,2	96,7
D8*		0,7	0,0	99,4
D11*		0,0	0,0	100
C4*	Dez 2018	14,7	2,5	83,9
D3*		35,4	0,0	64,5
D5		40,9	0,0	59,1
D7		31,3	2,2	65,5
D10*		19,2	0,8	80
D11*		0,0	0,0	100
D13*		3,9	0,9	95,2
C2	Maio 2019	12,26	0	87,72
C4*		19,05	2,23	78,7
C10		48,07	1,5	50,41
D2		19,25	0	80,73
D3*		8,32	0	91,66
D6		6,3	0	93,67
D7		7,78	1,4	90,79
D10*		2,94	2,14	93,69
D11*		6,68	0	92,54
D13*		2	0	97,89

Tabela 2: Granulometria do sedimento superficial dos sítios oceânicos das áreas C e D, terceira campanha (média %).

Estações	Campanha	Cascalho	Areia	Silte
C2	Maio 2019	16,35	62,09	21,56
C4*		22,47	60,14	17,39
C10		16,01	54,14	29,85
D2		34,54	57,99	7,47
D3*		30,76	57,36	11,88
D6		8,81	84,11	7,08
D7		14,69	77,79	7,52
D10*		16,88	82,35	0,77
D11*		41,18	55,09	3,72
D13*		4,29	90,91	4,81

**Sedimentos superficiais nos recifes adjacentes ao litoral na Área D (APA Costa das Algas).** Esses sedimentos apresentaram menor variação mineralógica do que os sedimentos coletados *offshore*

(Tabela 3). Apesar dessa maior homogeneidade há uma clara variação latitudinal (Figura 5), expressa pela maior participação de sedimentos biogênicos nas estações mais ao norte (D14 a D17). Nos sedimentos coletados nas terceira e quarta campanhas (maio e junho de 2019) houve aumento médio de 80% na participação de sedimentos biogênicos, em todas as estações, principalmente nos sítios D17 ao D21 (Tabela 3), mais afastados da foz do rio Doce.

Dentre as variações espaço-temporais observadas na Área D, a hematita se destacou como possível assinatura da descarga sedimentar proveniente do rio Doce. Esse mineral apresentou atenuação linear importante com relação à distância da foz e aumento sazonal no período de maior vazão do rio (Figura 6, Figura 7). Apesar de não representar evidência direta da presença do rejeito, o aumento na concentração da hematita em função da proximidade da foz pode ser considerado evidência indireta (q.v. Sub-projeto “Sedimentologia”, Anexo 3). Outros sedimentos terrígenos não apresentam atenuação em relação à distância da foz, podendo estar associados a outros aportes, inclusive de drenagens locais tais como os rios Reis Magos, Laranjeiras e Piraquê-Açu. A maior participação de sedimentos terrígenos nas estações costeiras ao sul do rio Laranjeiras (D18 a D21), nas duas primeiras campanhas, acompanharam o contraste latitudinal nas fácies sedimentares costeiras (veja Figura 10). Dentre os carbonatos, a maior contribuição relativa da calcita magnésiana, em relação à aragonita, está possivelmente associada à preponderância de algas coralináceas nos recifes costeiros e intertidais, onde corais são raros ou ocorrem predominantemente como fósseis (DECHNICK et al., 2019). O mosaico sedimentar detectado nos recifes costeiros complementa as evidências de múltiplas fontes e processos de deposição e transporte, também registradas na mineralogia dos sedimentos *offshore*. Sazonalmente, houve menor participação de carbonatos em dezembro (especialmente nos sítios mais ao norte, D14-D16) em relação ao teor de quartzo e outros minerais terrígenos (Tabela 3). O aumento dos sedimentos carbonáticos nos sítios mais ao sul, nas terceira e quarta campanhas (Tabela 3), corrobora a sazonalidade de aportes terrígenos e a variação da produção de sedimentos biogênicos, mostrando a importância de amostragens em longo prazo, em diferentes estações do ano.

Os sedimentos dos recifes adjacentes ao litoral também se discriminaram das amostras *offshore* com relação à granulometria, acessada nas categorias cascalho, areia e silte (classificação simplificada de WENTWORTH, 1922) nas duas primeiras campanhas (Figura 10). Esse padrão se repetiu nas campanhas posteriores, com sítios *offshore* com grande quantidade de sedimentos grossos (cascalho) e finos (silte), enquanto sedimentos de tamanho médio dominaram sítios costeiros (Tabela 2, Tabela 4). Além disso, os sítios D14, D16-D17 e D19- D20 foram positivamente relacionados a sedimentos de menor granulometria, enquanto os dos sítios D18 e D21, próximos às fozes dos rios Laranjeiras e Reis Magos, apresentaram maior granulometria, revelando preponderância da fonte em relação à energia no ambiente deposicional. Por outro lado, sítios mais próximos ao rio Piraquê-Açu, D16 e D17, não apresentaram esse padrão de maiores granulometrias, revelando a contexto-dependência na interação entre a fonte dos sedimentos e a energia no ambiente deposicional (MIOT DA SILVA, 2002).

Tabela 3: Mineralogia do sedimento superficial nos recifes costeiros da área D (média %).

Estações	Campanha	Silicatos	Ferrosos	Carbonatos
D14	Set 2018	49,0	3,0	48,0
D15		58,6	2,2	39,1
D16		48,1	2,1	49,8
D17		57,8	1,7	40,6
D18		74,5	2,6	22,9
D19		70,9	3,7	25,4
D20		75,2	2,4	22,4
D21		73,8	1,6	24,5
D14	Dez 2018	38,0	2,9	59,1
D15		30,8	2,4	66,8
D16		37,7	3,4	58,9
D17		65,7	3,0	31,3
D18		61,8	2,0	36,1
D19		62,0	4,4	33,7
D20		82,1	5,2	12,7
D21		79,5	3,8	16,7
D14	Maio 2019	27,5	1,2	71,1
D15		38,9	1,1	59,9
D16		34,3	1,3	64,2
D17		12,5	1,8	85,6
D18		22,1	1,0	76,9
D19		39,6	1,2	59,1
D20		58,1	0,8	41,0
D21		24,3	1,0	74,6
E1		21,7	0	78,2
D14	Jul 2019	33,2	1,9	64,7
D15		36,3	2,2	61,4
D16		32,5	2,3	65,1
D17		11,2	1,9	86,8
D18		25,4	1,7	72,7
D19		42,7	1,9	55,2
D20		57,5	0,9	41,4
D21		26,3	2,2	71,4

Figura 6: Regressão linear entre o teor de hematita no sedimento superficial dos recifes costeiros e a distância da foz do rio Doce. Campanha 1 (círculos)= setembro de 2018; Campanha 2 (triângulos)= dezembro de 2018; Campanha 3 (quadrados)= Maio 2019; Campanha 4 (cruzetas)= Julho 2019. Valores de R<sup>2</sup> em vermelho indicam p < 0,05.

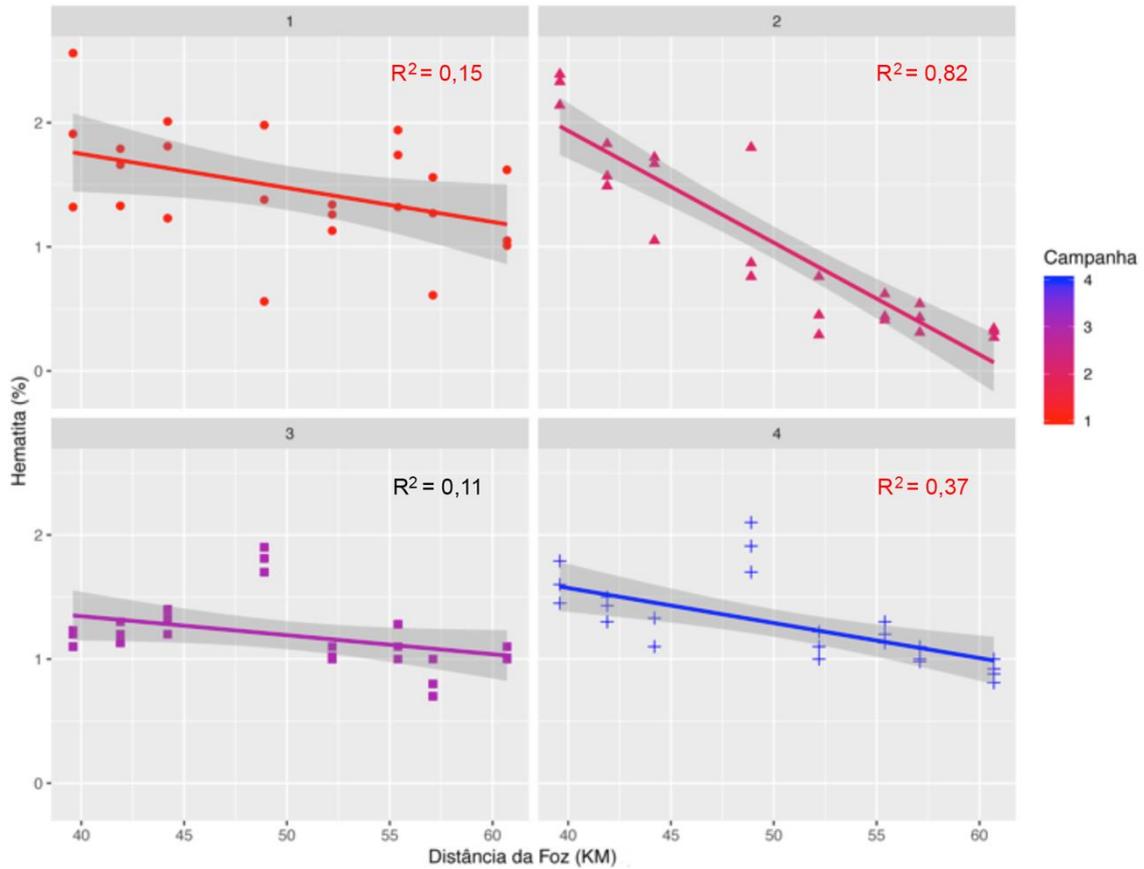


Figura 7: Regressão linear entre o teor de hematita no sedimento superficial dos recifes costeiros e a distância da foz do rio Doce. Chave: Campanha 1 (círculos)= setembro 2018; Campanha 2 (triângulos)= dezembro 2018; Campanha 3 (quadrados)= maio 2019; Campanha 4 (cruzetas)= julho 2019. As cores dos símbolos representam as campanhas e a faixa cinza representa o intervalo de confiança ( $p < 0,05$ ).

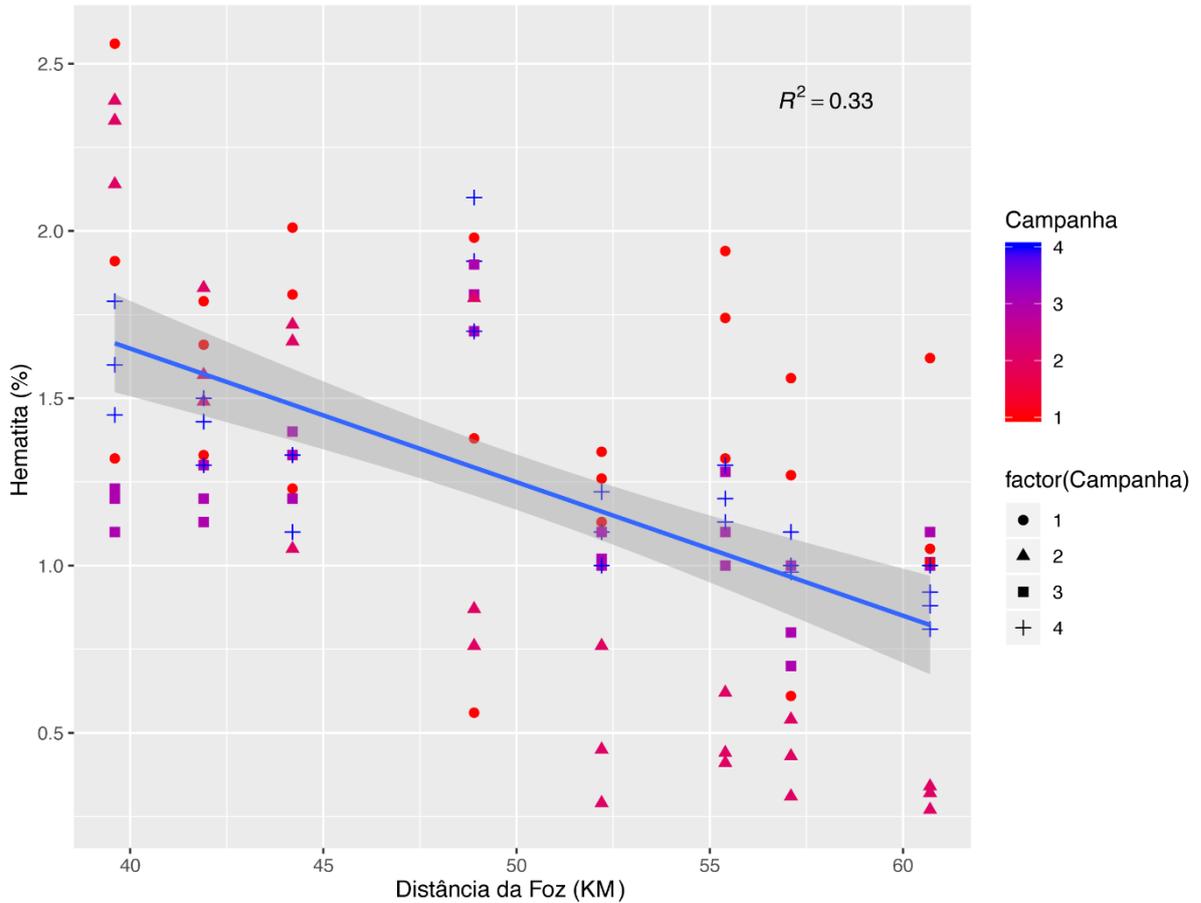


Figura 8: Análise de Componentes Principais (PCA) das amostras dos sítios das Áreas C e D com base nas classes granulométricas (cascalho, areia e silte) e outras variáveis possivelmente influentes na distribuição e composição dos sedimentos superficiais das duas primeiras campanhas. Cores e símbolos discriminam os sítios e as campanhas. Círculos menores representam as amostras e os maiores representam os centroides de cada grupo de amostras.

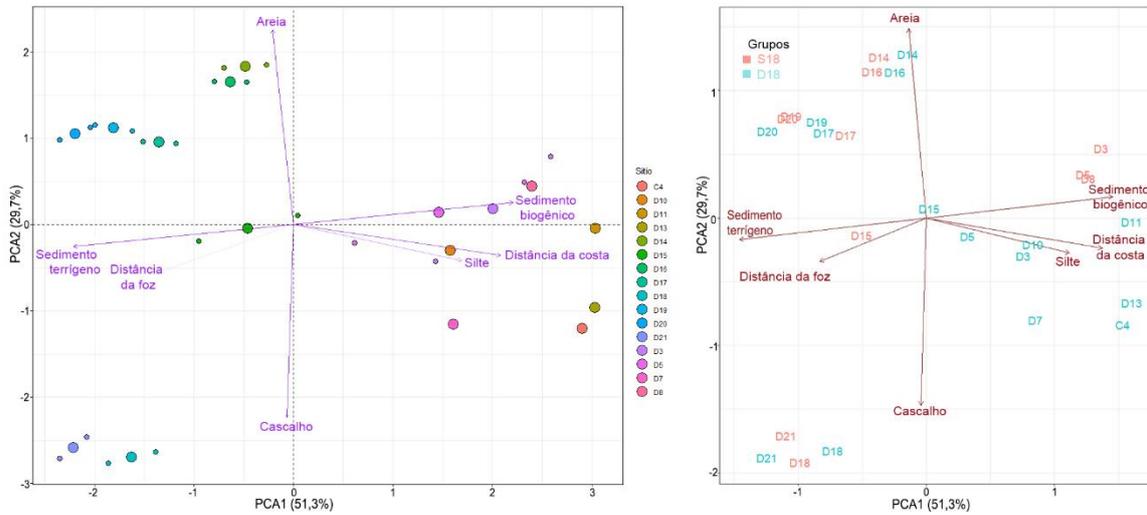


Figura 9: Análise de Componentes Principais (PCA) das amostras dos recifes costeiros da Área D das duas primeiras campanhas com base na origem (terrígeno ou biogênico) e outras variáveis possivelmente influentes na distribuição dos sedimentos superficiais. Cores e símbolos discriminam sítios e campanhas. Círculos menores representam amostras e os maiores representam os centroides de cada grupo de amostras.

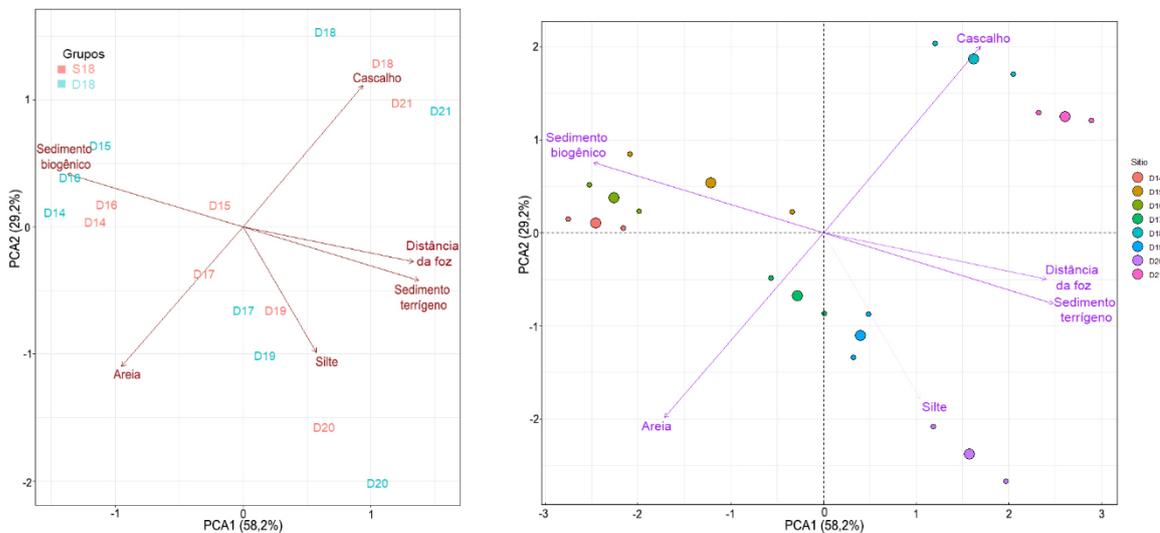
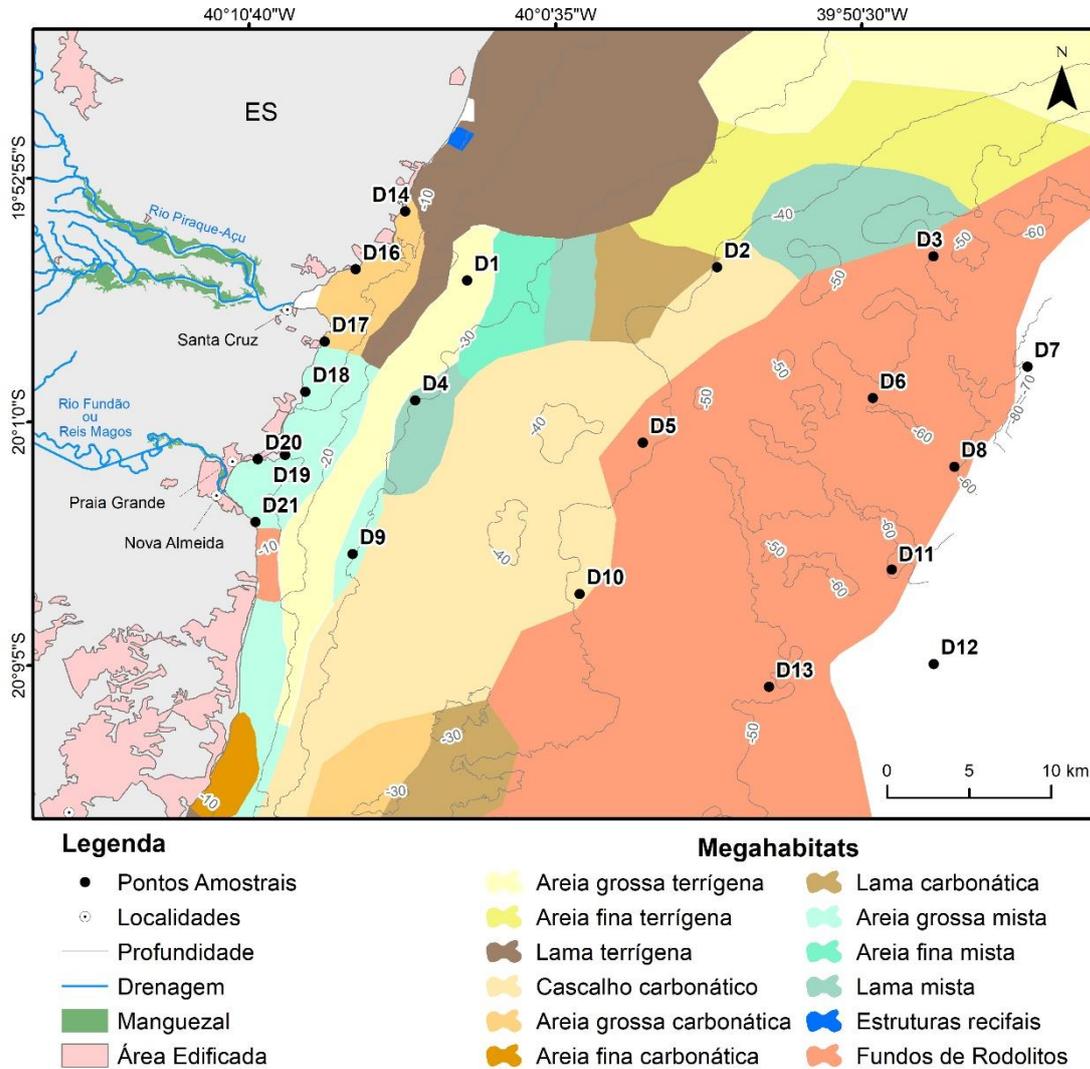


Tabela 4: Granulometria do sedimento superficial dos sítios costeiros da Área D, terceira e quarta campanhas (média %).

Estações	Campanha	cascalho	areia	silte
D14	Maio 2019	1,64	95,91	2,45
D15		18,19	77,19	4,62
D16		0,00	96,54	3,46
D17		1,27	98,44	0,30
D18		3,82	94,39	1,79
D19		15,49	84,15	0,36
D20		1,75	97,58	0,68
D21		31,08	62,36	6,55
D14	Jul 2019	0,25	93,90	5,85
D15		9,78	88,90	1,33
D16		4,35	94,98	0,67
D17		6,25	89,39	4,36
D18		21,01	77,21	1,78
D19		11,41	87,97	0,62
D20		1,17	87,92	10,92
D21		6,87	76,71	16,42

Figura 10: Fácies sedimentares e sítios amostrais da Área D (dados do subprojeto “Mapeamento”).



### 2.1.2. Armadilhas de sedimento

A análise dos sedimentos coletados em armadilhas (Figura 11, Quadro 2) nas Áreas A e B foi baseada nos dados do primeiro ciclo de residência dos instrumentos sobre recifes e bancos de rodolitos (instalação: novembro 2018, retirada: abril 2019). Dados do segundo ciclo de residência estão em análise (instalação: abril 2018, retirada: julho de 2019), e as armadilhas recolocadas em julho de 2019 foram reamostradas em setembro/outubro. Portanto, as análises possíveis até o momento envolveram contrastes espaciais de taxas, mineralogias e granulometrias.

A classe areia (2 mm a 64  $\mu$ m) representou a maioria dos sedimentos aprisionados nas armadilhas, seguida por silte (< 64  $\mu$ m). A classe cascalho (> 2mm) foi rara, tendo representando <0,5% dos sedimentos. Valores extremos (*outliers*) nessa última classe se referem a fragmentos de bivalves e algas coralináceas. Sebastião Gomes (A2) foi o sítio com maior contribuição percentual de areia (85%), seguido pelo Arquipélago de Abrolhos (B4, 70%), Recifes Esquecidos (B1-B4, 61-67%) e, por fim, Pedra de Leste e Timbebas (65%) (Tabela 5). As maiores taxas de sedimentação foram registradas em Sebastião Gomes (A2: 48 g.mês<sup>-1</sup>) e Esquecidos Sul (B4: 63 g/mês), seguidas por Esquecidos Central (B2: 25 g.mês<sup>-1</sup>), Arquipélago (B4, 23 g.mês<sup>-1</sup>), e demais sítios (10-15 g.mês<sup>-1</sup>) (Tabela 5).

A mineralogia indicou a presença ubíqua de sedimentos dos tipos silicatos (quartzo, caulinita, calcita magnesiana, aragonita, calcita, moscovita) e ferrosos (greigita), com exceção do Parcel dos Abrolhos (A3) (Tabela 6), onde só ocorreram sedimentos carbonáticos biogênicos (calcita magnesiana, aragonita e calcita). Na Área A, as armadilhas do Arquipélago (A4) e dos sítios mais próximos à costa (A1, A2 e A6) apresentaram contribuição expressiva de sedimentos terrígenos, tais como quartzo (especialmente em A4, onde quartzo representou 26%) e caulinita (especialmente em A1 e A2, onde caulinita representou 38-42%). Em Timbebas (A6), sítio costeiro mais ao norte da região de estudo, quartzo representou 5% e caulinita representou 28% dos sedimentos, convergindo com os sítios da Área B (com 20-27% de caulinita e 5-11% de quartzo). Os resultados da Área A são compatíveis com os de REIS et al. (2016), em estudo baseado em estruturas artificiais de colonização (CAU), que demonstrou maior influência de sedimentos continentais nos sítios A1 e A2. Embora o Parcel dos Abrolhos (A3) seja próximo ao Arquipélago dos Abrolhos (A4), nossos resultados apontam para contribuição elevada de silicatos (quartzo, caulinita e moscovita) nesse último, a qual se explica pela proximidade do costão insular formado por rochas ígneas e sedimentares (IBAMA, 1991), com recobrimento mais esparsa de algas coralináceas, corais e outros produtores de carbonato de cálcio (FRANCINI-FILHO et al., 2013).

Figura 11: Sítios recifais e bancos de rodolitos nas Áreas A e B onde foram instaladas armadilhas de sedimento, representados com preenchimento em amarelo (B3 mostrado apenas como referência espacial).

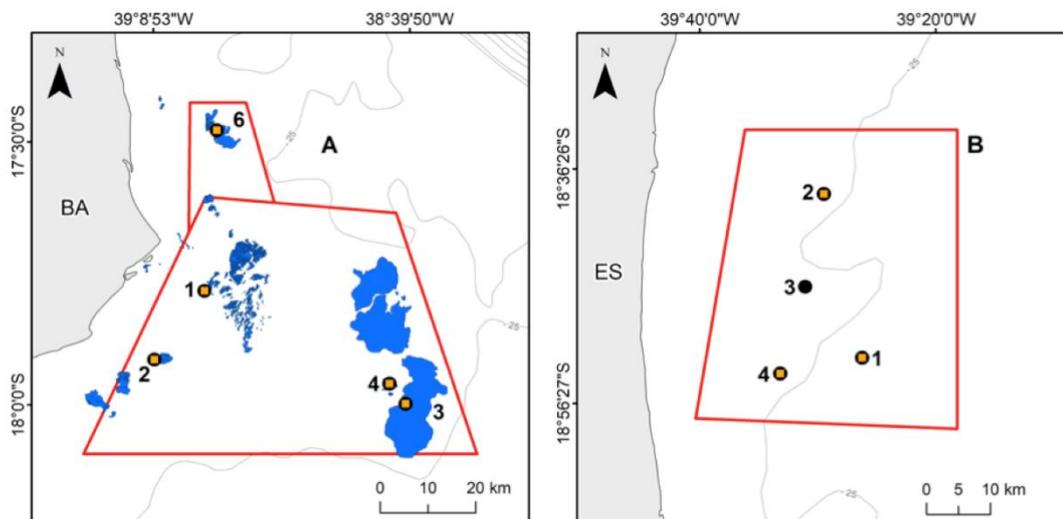


Tabela 5: Granulometria média (n = 3 armadilhas por sítio) dos sedimentos aprisionados nas armadilhas de sedimento instaladas nas Áreas A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos). Classificação de Wentworth (1922).

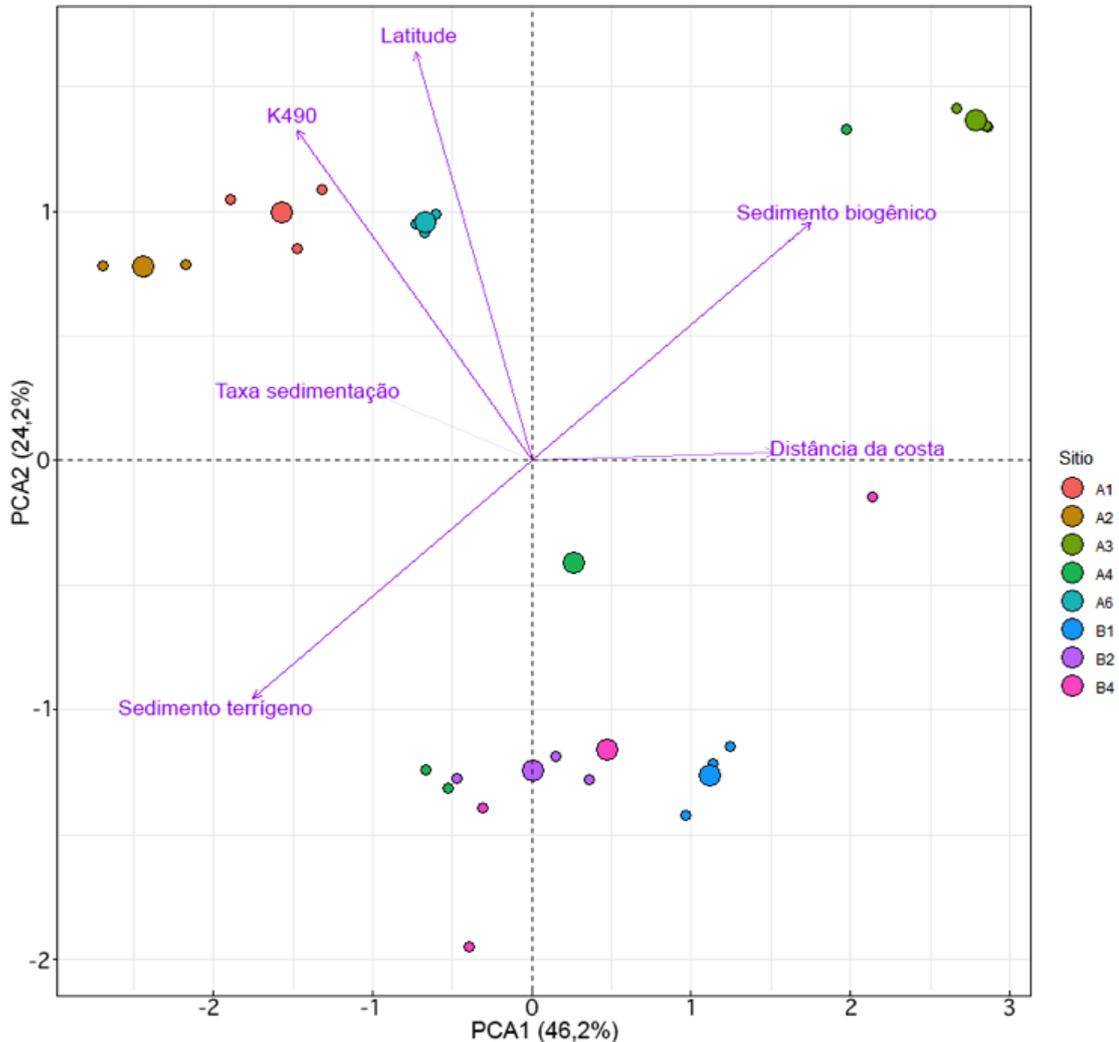
Local	Cascalho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Taxa de sedimentação (g/mês)
A1	0,28	65,10	34,62	14,7
A2	0,35	84,96	14,68	48,1
A3	0,48	59,74	39,78	10,9
A4	10,06	70,32	19,62	22,9
A6	1,31	65,32	33,37	15,9
B1	0,89	66,22	32,89	12,7
B2	4,60	66,53	28,87	24,9
B4	4,10	61,33	34,57	63,3

Tabela 6: Mineralogia média (n = 3) dos sedimentos aprisionados nas armadilhas de sedimento instaladas nas áreas A e B. Os valores estão em porcentagem (%) relativo dos minerais encontrados.

Sítio	Silicatos	Ferrosos	Carbonatos
A1	41,06	0,08	57,55
A2	46,17	0,46	50,68
A3	0	0	100
A4	17,55	0,72	55,47
A6	29,73	1,4	64,33
B1	24,45	0,71	69,5
B2	29,76	0,93	58,75
B4	24,19	0,7	68,05

As Análises de Componentes Principais (PCA) dos dados coletados nas armadilhas, considerando origem dos sedimentos, taxa de sedimentação e outras variáveis possivelmente importantes como indutoras dos padrões observados (Figura 12), agrupou os sítios costeiros da Área A (A1, A2 e A6) no quadrante superior esquerdo, associado à turbidez e à alta taxa de deposição em Sebastião Gomes (B3). As amostras do Parcel dos Abrolhos (A3) foram claramente discriminadas no quadrante superior direito, associado à origem biogênica. As amostras do Arquipélago (A4) estiveram associadas aos quadrantes inferiores (q.v. centroide), destacando-se os dados de uma das três armadilhas, mais agrupada às amostras do Parcel dos Abrolhos (A3), corroborando a heterogeneidade das fontes peculiares ao Arquipélago (A4). Os quadrantes inferiores agruparam as amostras dos Recifes Esquecidos (B), revelando associação positiva com sedimentos terrígenos e associações negativas com turbidez e taxas de sedimentação relativamente baixas, muito embora essa última variável tenha sido a menos influente na ordenação (Figura 12). Além disso, as amostras da Área B estiveram negativamente associadas com a latitude (matriz com dados em UTM), uma variável altamente colinear com a profundidade. Os recifes da Área B são mais profundos do que os da Área A, o que pode contribuir para explicar taxas menores na produção de carbonato de cálcio.

Figura 12: Análise de Componentes Principais dos dados coletados nas armadilhas de sedimento instaladas nas áreas A e B, com base na origem (biogênico ou terrígeno), distância da costa, taxa de sedimentação, latitude e turbidez (Kd490). As cores discriminam os sítios. Círculos menores representam amostras e os maiores representam os centroides de cada grupo de amostras.



## 2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES ASSOCIADAS A BANCOS DE RODOLITOS

As comunidades bênticas em áreas com possível ocorrência de bancos de rodolitos foram caracterizadas por imageamento do fundo e coletas por dragagens, prioritariamente nas Áreas C (foz do rio Doce) e D (APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz) (Figura 13), cujos baselines são incipientes. Essas amostragens foram complementadas por estações mais isoladas, uma na Área A (PARNAM Abrolhos e adjacências), para onde existem dados prévios (e.g. AMADO-FILHO et al., 2012; MOURA et al., 2013; BASTOS et al., 2015) e outra na área B (adjacente aos Recifes Esquecidos), visando comparações futuras. O Quadro 2 apresenta o status das amostragens e análises correspondentes. Os resultados aqui apresentados se referem às duas primeiras campanhas nas Áreas

C e D, uma entre 10-13 de dezembro (2018) e outra entre 18-22 de fevereiro (2019), cujos dados estão processados em resolução suficiente para prover um panorama geral.

**Percentual de cobertura de rodolitos, vitalidade e estrutura das comunidades associadas.**

Sedimentos inconsolidados, algas coralináceas, macroalgas e invertebrados foram as categorias dominantes na malha amostral, nessa ordem (Figura 14). Estações dominadas por algas coralináceas estiveram associadas às maiores coberturas por macroalgas e outros organismos macrobênticos, uma vez que propiciam substrato adequado de fixação. Bryozoa foi o grupo de invertebrados predominante na maioria dos sítios, na condição de nódulos carbonáticos peculiares (briolitos) nos sítios D3, D5 e D10 (Figura 16), justamente na transição *cross-shelf* entre o estrato dominado por rodolitos (D6, D7, D8, D11 e D13) e fácies sedimentares mais costeiras.

Na Área C (foz do rio Doce), rodolitos ocorreram nos sítios ao norte da foz (C1, C2, C3), e também em C4, próximo à foz, tendo estado ausentes dos demais sítios a sudoeste e a leste da foz (C7 apresentou rodolitos mortos) (veja Figura 13). Esse padrão está possivelmente associado à descarga sedimentar do rio Doce, com deposição preferencial ao sul da foz, mas com interação com a dinâmica de remobilização e transporte (BASTOS et al., 2015; QUARESMA et al., 2015), com fluxos a sudoeste e a nordeste (e.g. MARTA-ALMEIDA et al., 2016; RUDORFF et al., 2018). O detalhamento das fácies sedimentares em frente à foz do rio Doce (Área C), bem como os modelos hidrológicos e de transporte, irão permitir a construção de um quadro mais holístico acerca da distribuição e das forças que condicionam a ocorrência de bancos de rodolitos nessa área, e sua possível dinâmica de soterramento e exposição. A partir da foz do rio Doce, a norte, os bancos de rodolitos parecem ganhar maior extensão e amplitude *cross-shelf* (e.g. sítios C1, C2, C3), conectando-se com os enormes bancos conhecidos no Banco dos Abrolhos (AMADO-FILHO et al., 2012). Em contrapartida, a carga de sedimentos continentais parece constranger mais fortemente seu desenvolvimento ao sul da foz, uma vez que rodolitos foram ausentes das estações C5, C6, C7, C8, C9.

No trecho entre o sul da Área C e o norte da Área D, rodolitos e concreções calcárias são mais esparsos, ocorrendo em manchas isoladas ou ao longo de uma estreita faixa adjacente ao talude. Essas formações ganham, gradativamente, maior amplitude *cross-shelf* ao sul, em direção à Área D, onde passam novamente a dominar a plataforma média e externa na parte sul da APA Costa das Algas (Figura 15). Na Área D, rodolitos dominaram os sítios D6, D7, D8, D11 e D13 (*offshore*), D10 (posição *cross-shelf* intermediária, no sul da APA Costa das Algas), e foram ausentes dos sítios D1, D4 e D9 (costeiros) (veja Figura 13). No sítio D5, ao sul de D10 mas na mesma posição *cross-shelf* intermediária, só foram registrados nódulos mortos (veja Figura 13). O panorama de distribuição dos bancos de rodolitos na Área D, aqui apresentado, mostrou-se congruente com as fácies sedimentares descritas no âmbito do PMBA (veja Figura 10), relacionado com o depósito terrígeno fluvial da plataforma interna e o lobo deltaico que se estende até 30 m de profundidade (BASTOS et al., 2015). Com o aumento da distância da costa, a morfologia do fundo se torna mais plana, com uma transição para fácies arenosas,

enquanto um aumento do teor de carbonato é observado em profundidades maiores que 40 m. Assim, ao longo do gradiente *cross-shelf*, os bancos de rodolitos passam a ser dominantes na plataforma externa em profundidades maiores que 40 m (veja Figura 10) corroborando o panorama apresentado por BASTOS et al. (2015) e QUARESMA et al. (2015).

Além da configuração espacial descrita acima foi observada uma resposta da cobertura de rodolitos à profundidade (Figura 17), bem como os primeiros indícios de uma dinâmica de soterramento e exposição dos nódulos em algumas áreas. Essa dinâmica, quando for mais bem conhecida, pode compor um aspecto chave do monitoramento de bancos de rodolitos em áreas de sedimentação mista, especialmente no contexto dos efeitos de médio e longo prazo do Desastre. As maiores coberturas de rodolitos vivos foram registradas entre 50 e 70 m de profundidade, e a diferença sazonal na cobertura por rodolitos se revelou entre 60 e 70 m. Essa diferença está associada a maiores abundâncias registradas em dezembro de 2018, na Área D em relação à Área C (*PERMANOVA*;  $F = 11,031$ ;  $p = 0,001$ ), e menores abundâncias em fevereiro de 2019 (*PERMANOVA*;  $F = 4,9432$ ;  $p = 0,0412$ ). No entanto, um panorama adequado acerca da sazonalidade na cobertura dos bancos de rodolitos depende das análises e amostragens em andamento, e da replicação temporal prevista no PMBA.

Quadro 2: Amostragens para caracterização das comunidades de bancos de rodolitos no âmbito do PMBA. AP\* = Amostrado e Processado (em nível de grandes grupos); ANP = Amostrado e não processado; NA = Não amostrado; PR = Programado/em execução.

	Sítios	Dez/18	Fev/19	Jul/19	Set-Out/19
Área A	A5	AP*	AP*	NA	PR
Área B	B1	AP*	AP*	NA	PR
Área C	C1 a C3	NA	AP*	ANP	PR
	C4 a C10	AP*	AP*	ANP	PR
	C11	NA	NA	ANP	PR
Área D (embarcado)	D1 a D8	AP*	AP*	ANP	PR
	D9	NA	NA	ANP	PR
	D10 a D11	AP*	AP*	ANP	PR
	D12	NA	AP*	ANP	PR
	D13	AP*	AP*	ANP	PR

Figura 13: Distribuição das estações com bancos de rodolitos e concreções calcárias (pontos vermelhos), com rodolitos mortos (ponto cinza) e sedimentos não consolidados (pontos castanhos), Áreas C (foz do rio Doce) e D (APA Costa dos Corais e REVIS Santa Cruz). A estação D12 não foi amostrada por estar além da capacidade batimétrica dos instrumentos.

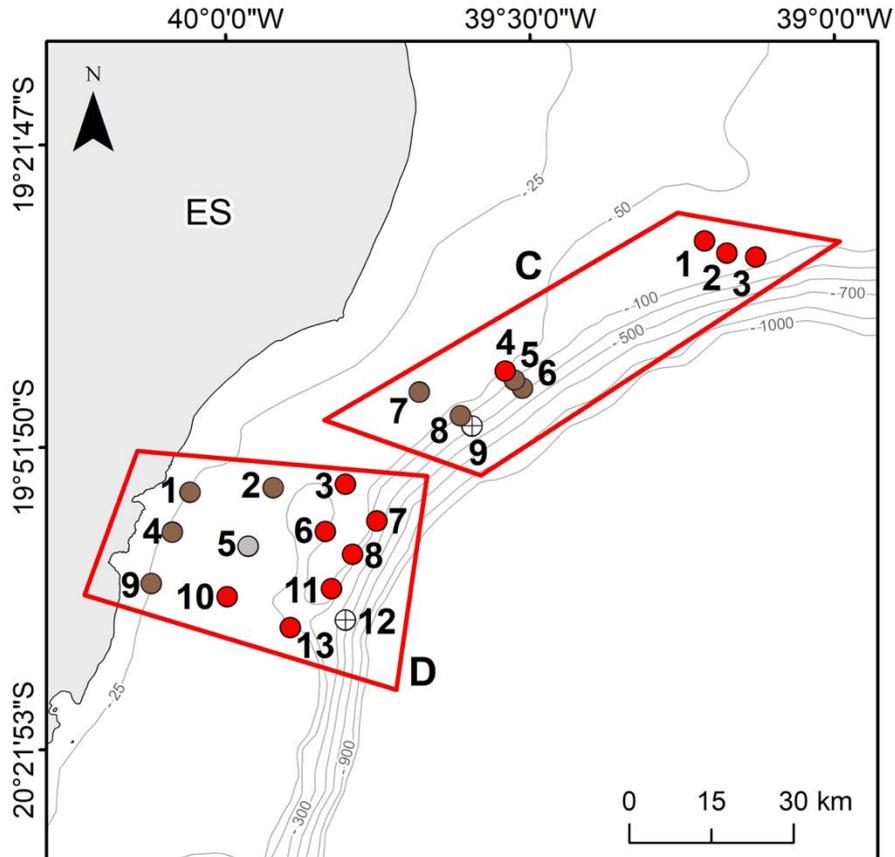


Figura 14: Cobertura relativa por rodolitos vivos, mortos e concreções carbonáticas nas estações não dominadas por sedimentos (painel superior) e cobertura por invertebrados e macroalgas nessas mesmas estações (painel inferior).

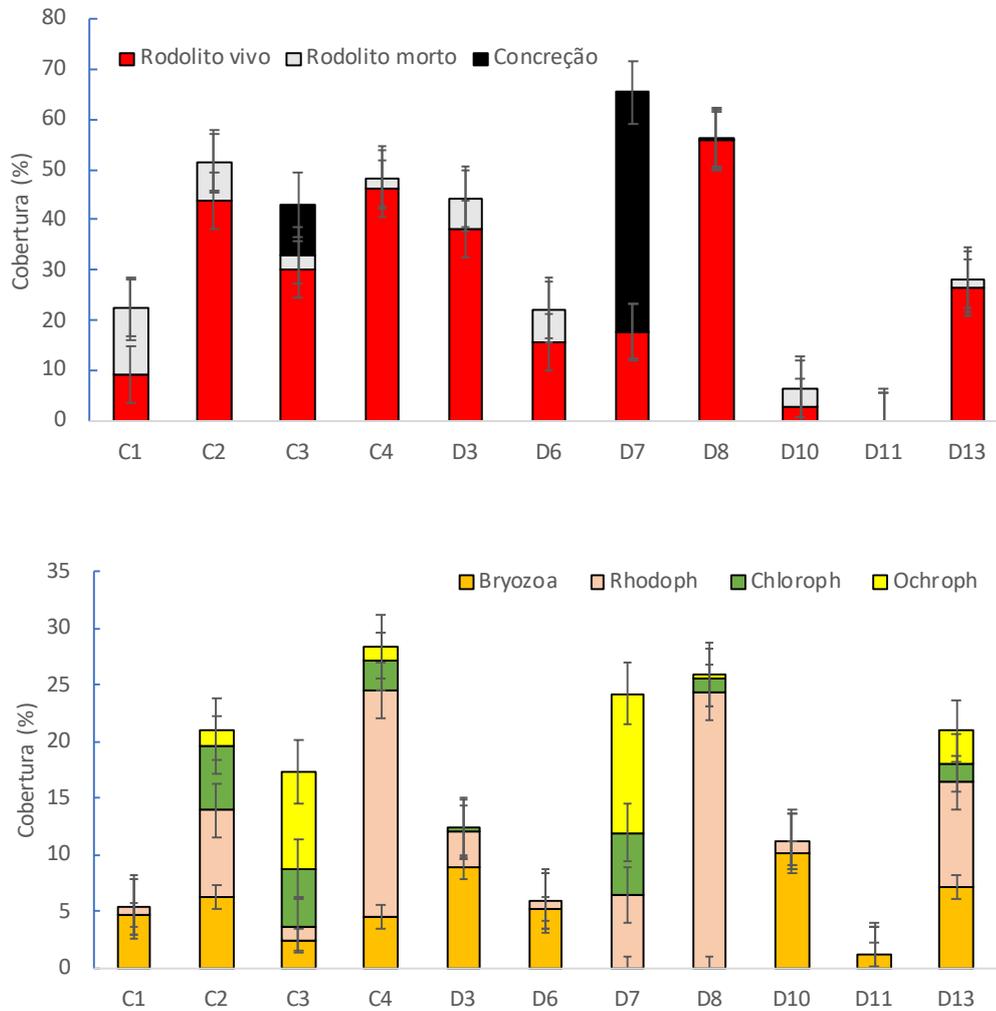


Figura 15: Imagens ortogonais (A-D) e panorâmica (E) de bancos de rodolitos e concreções carbonáticas, Áreas C e D. Chave: A= Sítio C4 (53 m de profundidade), B= Sítio D8 (70 m), C= Sítio C10 (70 m), D= Sítio D13 (45 m), E= Sítio D8 (70 m).

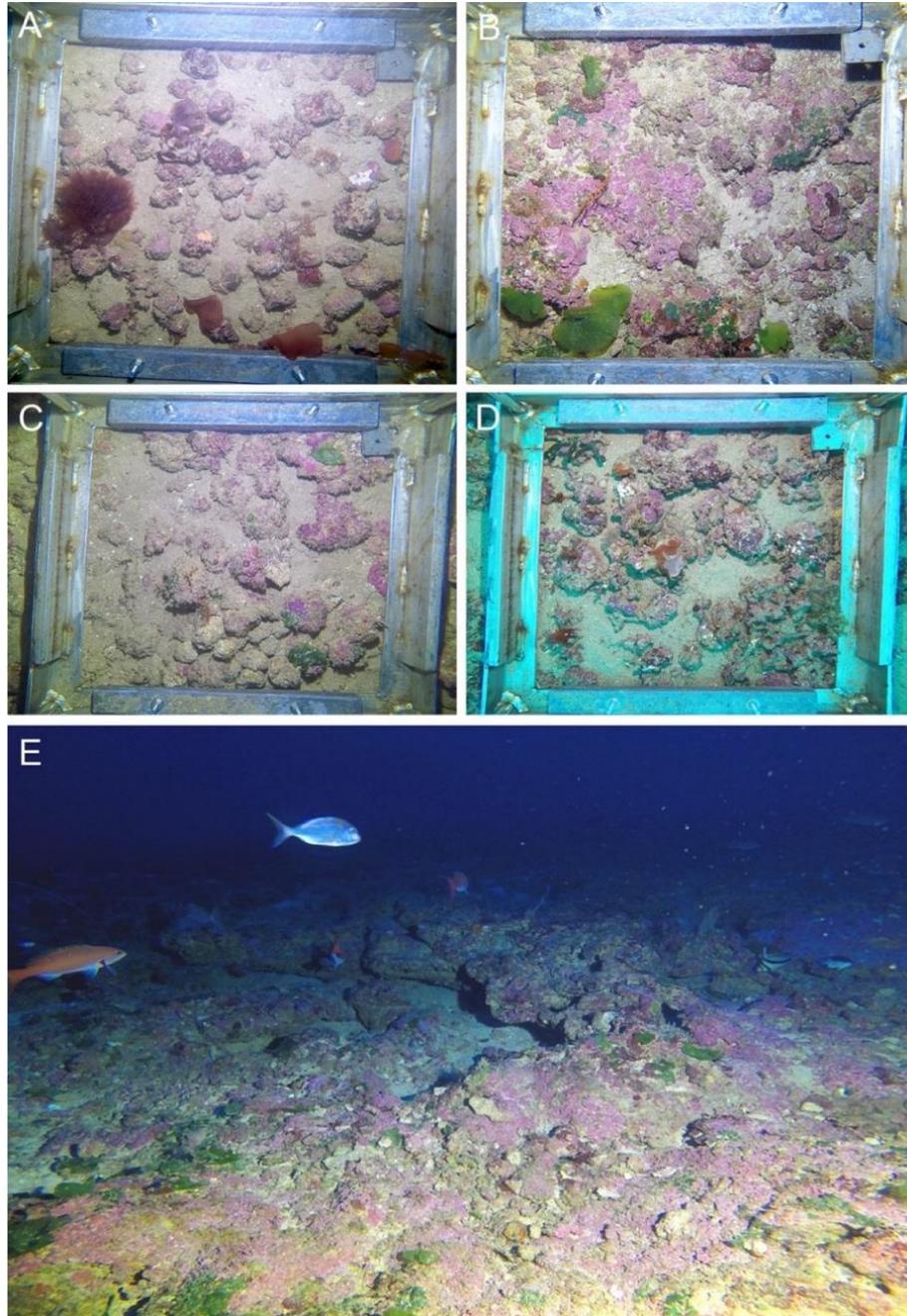


Figura 16: Fundos com contribuição expressiva de briozoários (briolitos), destacando-se *Celleporaria atlantica* (arborescente, rígida e marrom). A e B: Sítio D5 (39 m); C e D: Sítio D10 (42 m); E: Sítio D3 (45 m); F: Sítio D11 (60 m); G: Sítio C2 (64 m); H: Sítio C1 (63 m). A – F= Presença de briozoários em manchas; G= Briozoários em meio a rodolitos; H= Fragmentos de briozoários em meio a sedimentos.

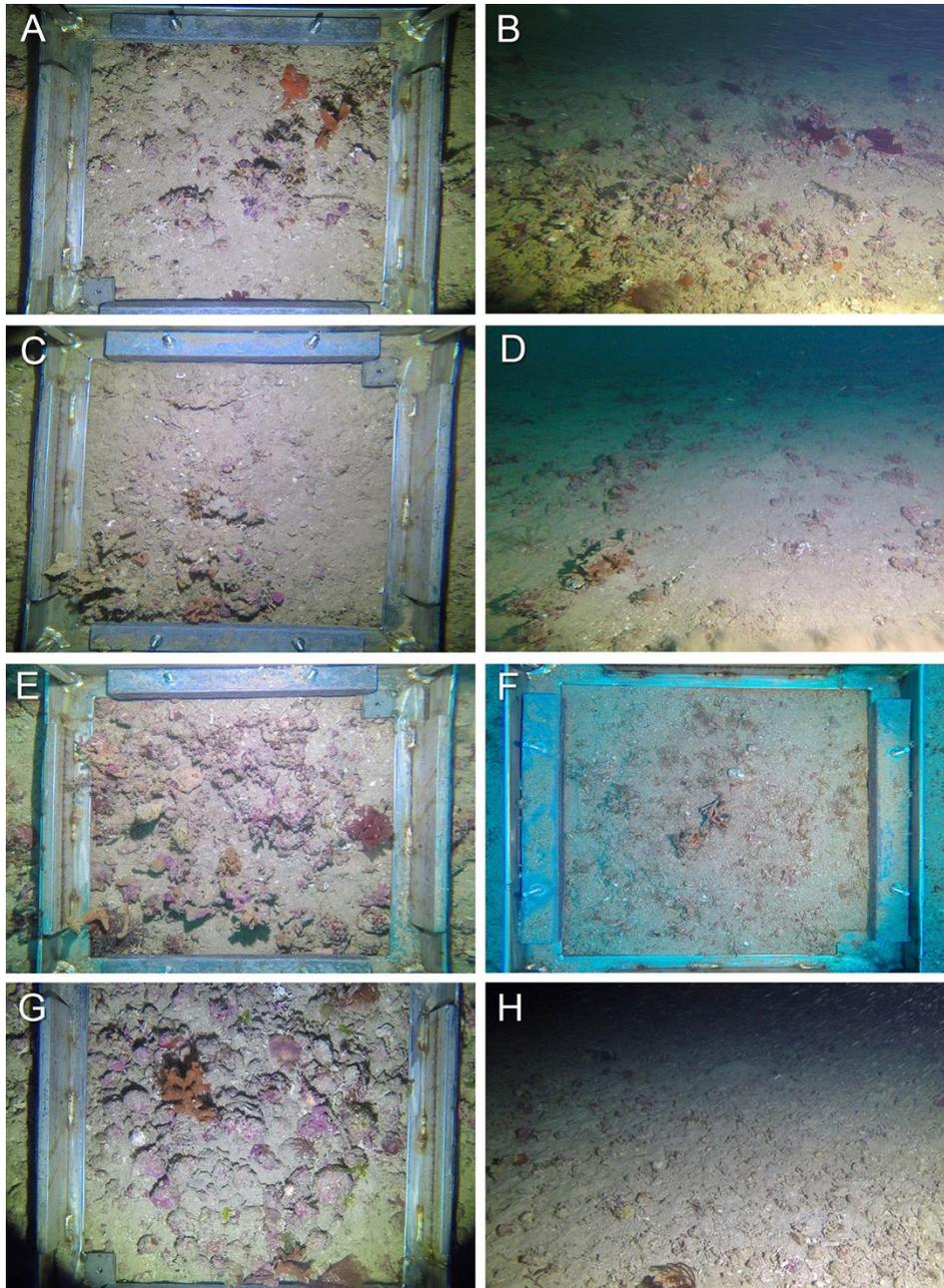
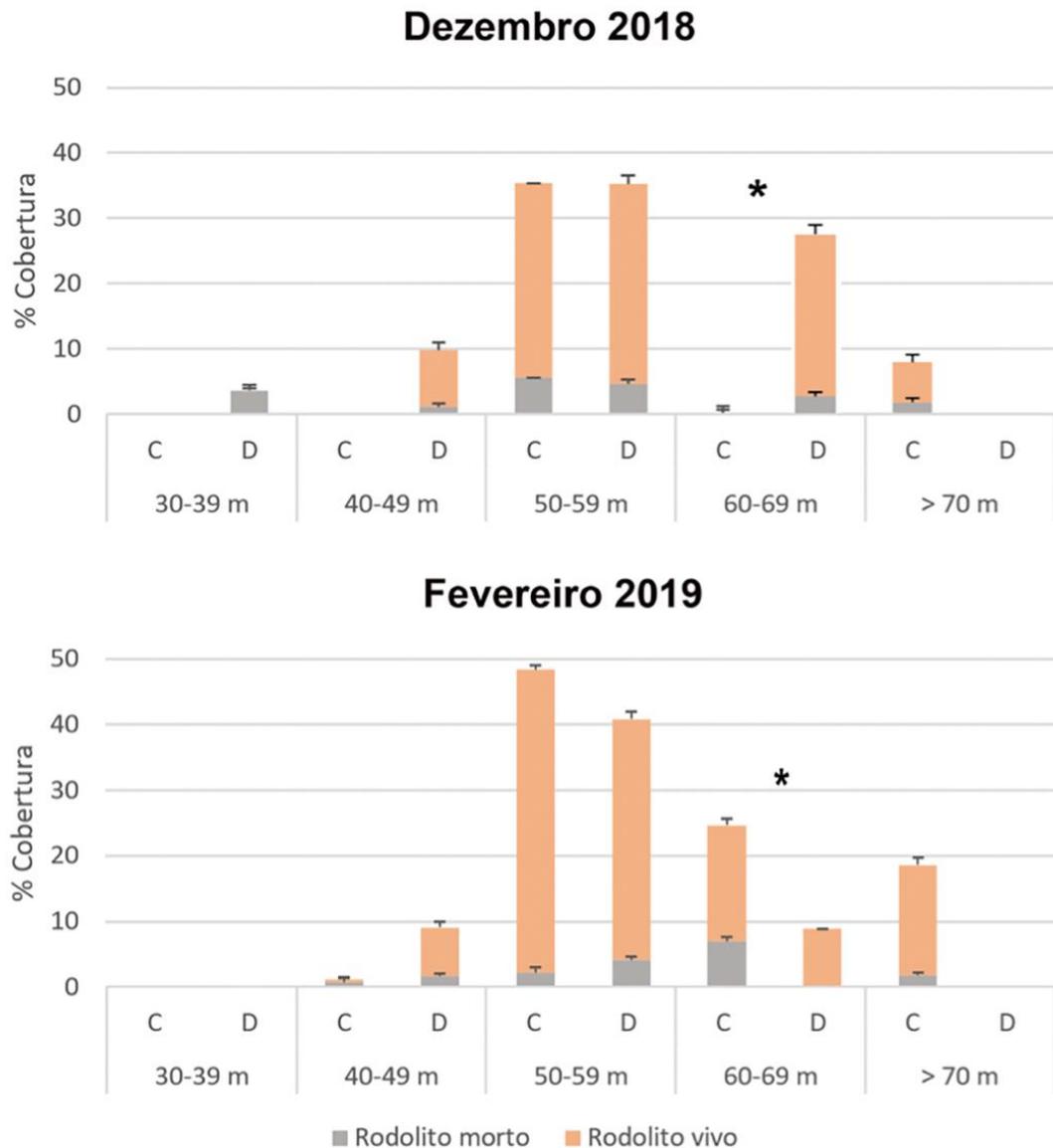


Figura 17: Cobertura percentual por rodolitos vivos e mortos (Áreas C e D) em diferentes profundidades, em dezembro de 2018 e fevereiro de 2019. Asteriscos representam diferenças significativas ( $p < 0,05$ , PERMANOVA). As profundidades 30-39 e 40-49 m não foram amostradas em dezembro na Área C, nem tampouco abaixo de 70 m na Área D.



Com base nas análises espaciais e nas estatísticas exploratórias, a estrutura das comunidades e sua variação foram modeladas, nas Áreas A e B, incorporando alguns dos possíveis indutores. Para isso, usamos Modelos Lineares (DISTLM) e análises de redundância baseadas em distâncias (dbRDA), após avaliar colinearidade (o que nos levou a excluir os dados de clorofila, colineares com Kd490) e possíveis assimetrias (*skewness*) nas variáveis empregadas. Quando necessário, os dados foram transformados (raiz quarta). Na medida em que os resultados do PMBA forem consolidados, novas variáveis poderão ser incorporadas a esses modelos, que também incorporarão replicação temporal mínima (dois ciclos

amostrais). Por termos utilizado dados oriundos de duas campanhas, cujas imagens já foram totalmente processadas, não incluímos o tempo como variável preditora nos modelos. No entanto, a partir do deslocamento dos *scores* das amostras das diferentes campanhas, já é possível observar variações de natureza temporal. Nesse esforço inicial de síntese destacam-se como indutores da estrutura e dinâmica dos bancos, por sua seleção recorrente nos modelos, a latitude, distância da costa, distância da foz do rio Doce, turbidez (Kd490), e temperatura da superfície do mar (SST). A Figura 60 e Figura 61 mostram a variação trimestral na SST e na turbidez em projeções espaciais cobrindo toda a região estudada, visando facilitar as interpretações.

Destacamos, primeiramente, que o modelo confirmou a distância da costa como variável preponderantemente influente na vitalidade das algas coralináceas incrustantes que compõe os bancos de rodólitos e concreções calcárias (Figura 18). Em um modelo subsequente, visando explorar as forçantes da cobertura dos diferentes grupos de macroalgas, algas coralináceas, invertebrados e sedimentos, elaboramos um modelo linear baseado em distâncias (DISTLM), o qual revelou a influência significativa da distância da costa, distância da foz e latitude (variáveis 1-3, Tabela 7, Figura 1). Considerando apenas a Área D (Figura 20), a influência da distância da foz é diminuída, ao passo que a distância da costa e a SST se revelam como principais indutoras da estrutura das comunidades, especialmente evidentes nos grupos morfofuncionais de macroalgas. Destaca-se a ortogonalidade (i.e. independência) entre essas duas variáveis (Figura 20, Tabela 7). A ausência de dados pretéritos ainda impede conclusões robustas acerca dos efeitos do Desastre nessas comunidades, mas a detecção da influência do rio na estrutura das comunidades bentônicas demonstra a importância do monitoramento desses bancos.

Figura 18: Análise de redundância (dbRDA) mostrando a influência preponderante da distância da costa na vitalidade das algas coralíneas (CCA, contemplando rodolitos e concreções calcárias) (DISTLM não mostrado).

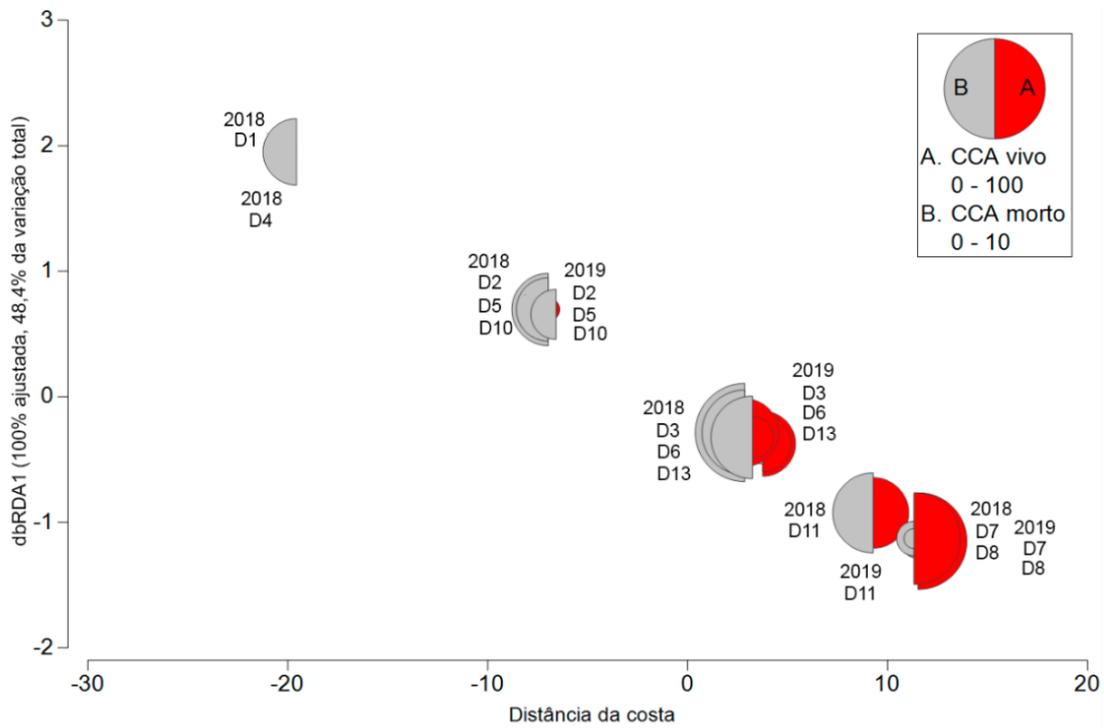


Figura 19: Análise de Redundância baseada em Distâncias (dbRDA) com os dados de cobertura bêntica das duas campanhas na Área D. Os vetores correspondem às variáveis predictoras selecionadas pelo melhor modelo DISTLM (i.e., menor AIC) (Tabela 7).

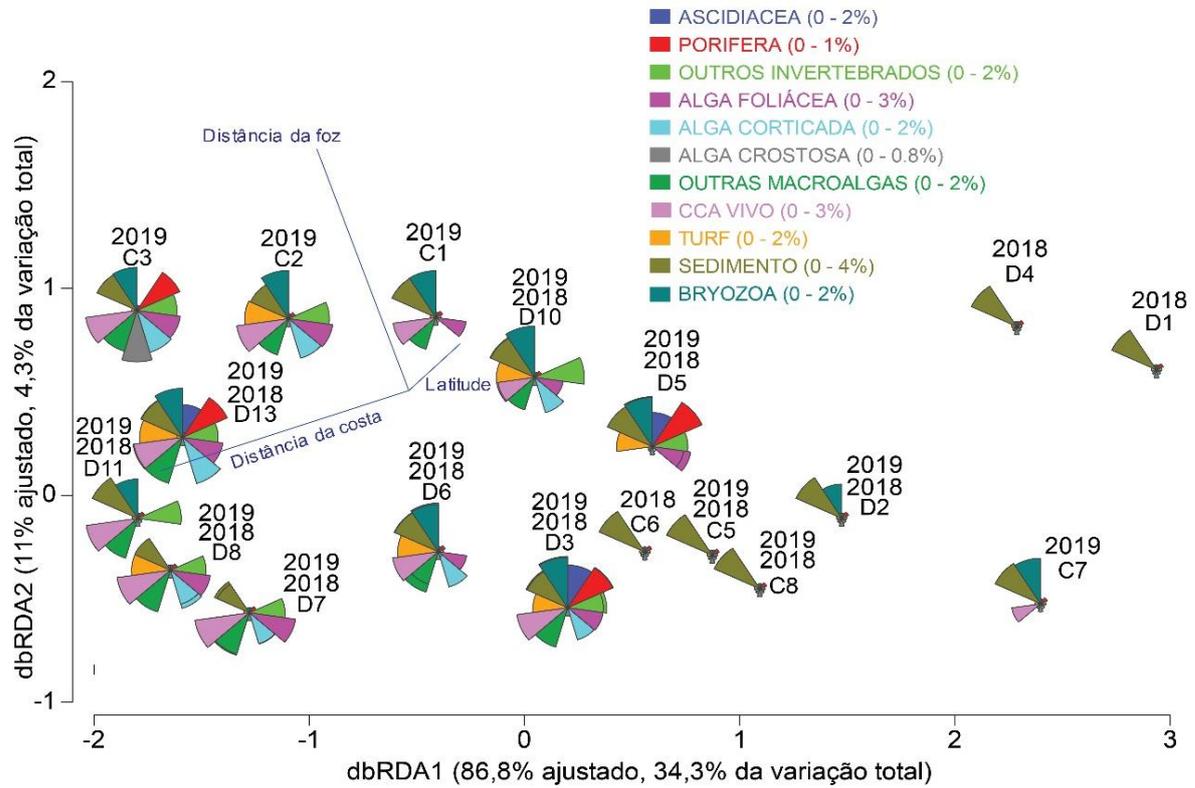


Tabela 7: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com os dados de cobertura bêntica das duas campanhas realizadas na Área D.

<b>Testes Marginais</b>				
	<b>SS</b>	<b>Pseudo-F</b>	<b>P</b>	<b>Prop.</b>
Distância da foz (2)	20,888	4,1231	0,0126	0,13248
Distância da costa (3)	27,998	5,8298	0,0018	0,17758
Latitude (1)	3,4723	0,608	0,6311	0,02202
Kd490 (5)	6,2471	1,1139	0,3064	0,03962
iPAR (6)	0,82351	0,14176	0,998	0,00522
SST (7)	13,553	2,539	0,0576	0,08596
<b>Melhores Soluções Globais</b>				
<b>AIC</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RSS</b>	<b>No. Vars</b>	<b>Seleções</b>
42,522	0,39516	95,364	3	1-3
42,931	0,42746	90,272	4	1-3;5
42,948	0,42711	90,326	4	1-3;7
43,392	0,45704	85,609	5	1-3;5;7

Figura 20: Análise de redundância (dbRDA) baseada no modelo DISTLM com os dados de cobertura bêntica, Área D. Os vetores correspondem às variáveis preditoras selecionadas pelo melhor (i.e., menor AIC) modelo DISTLM (Tabela 8Tabela 8).

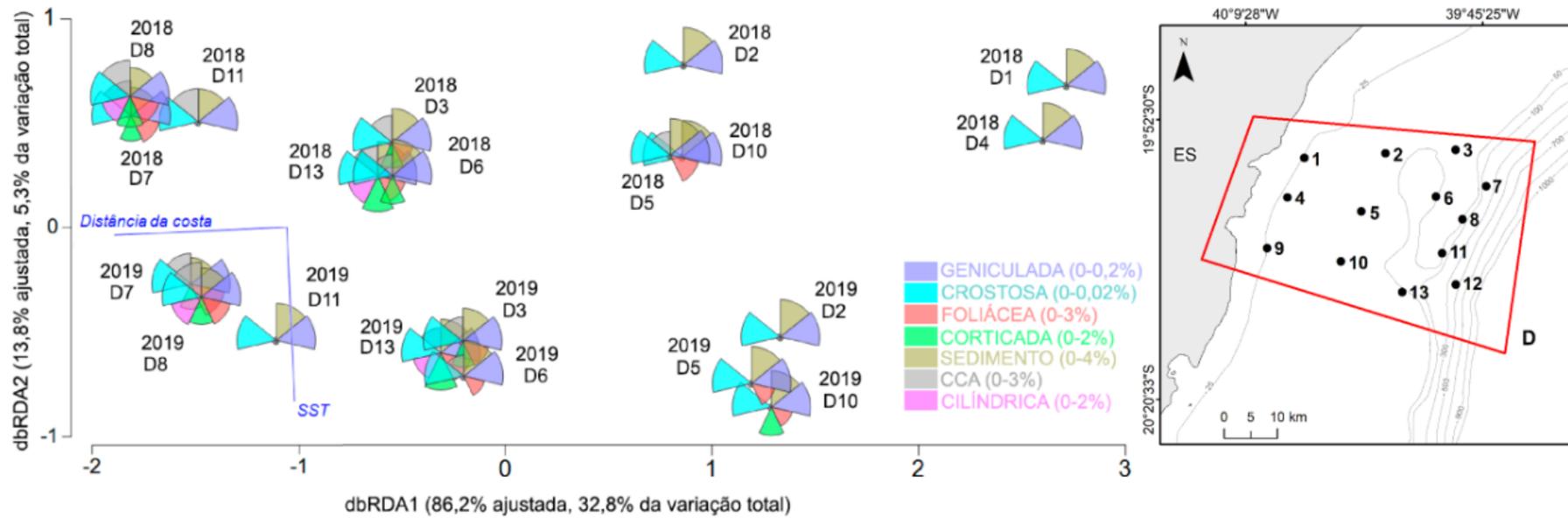


Tabela 8: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com dados de cobertura bêntica, Área D.

Testes Marginais				
	SS	Pseudo-F	P	Prop.
Distância da costa (3)	36,068	8,5749	0,0001	0,32267
SST (7)	16,884	3,2025	0,0272	0,15104
Latitude (1)	5,7037	0,96786	0,394	0,05103
Kd490 (5)	10,835	1,9321	0,0971	0,09693
iPAR (6)	1,5611	0,25495	0,9796	0,01397
Melhores Soluções Globais				
AIC	R <sup>2</sup>	RSS	No. Vars	Seleções
30,823	0,38101	69,191	2	3;7
32,044	0,40465	66,549	3	3;5;7
32,139	0,40181	66,866	3	1;3;7
32,218	0,39944	67,131	3	3;6;7

**Identificação das macroalgas associadas aos rodolitos.** Com base nos dados das campanhas de dezembro de 2018 e fevereiro de 2019 foram identificados 47 táxons associados aos rodolitos das Áreas C e D, sendo que 13 deles correspondem a algas coralináceas incrustantes conhecidas por formar rodolitos. O inventário, como um todo, revelou uma flora cerca de três vezes mais pobre do que aquela encontrada em associação a bancos de rodolitos em regiões relativamente próximas (e.g. BRASILEIRO et al., 2016). Essa flora menos diversa parece ser característica da área estudada, mas ressalta-se, novamente, a ausência de um *baseline*. Portanto, não se pode descartar a influência parcial de distúrbios antropogênicos, tais como influência de contaminantes e/ou sedimentos finos oriundos do Desastre. Por exemplo, a macroalga parda de grande porte, *Laminaria abyssalis*, ainda não foi registrada nos levantamentos conduzidos no âmbito do presente subprojeto. Trata-se de uma espécie endêmica de *kelp*, com distribuição entre 19°06'S (sul do Banco Abrolhos) e 23°09'S (Cabo Frio) em profundidades entre 45-120 m, a qual se fixa prioritariamente a rodolitos (OLIVEIRA FILHO, 1976; OLIVEIRA FILHO; QUÉGE, 1978; YONESHIGUE-VALENTIN et al., 2006; MARINS et al., 2012, 2014). No cenário estudado, era esperado encontrar essa espécie conspícua, ao menos no verão, quando a mesma apresenta frondes desenvolvidas e maiores biomassas e densidade (MARINS et al., 2014). Para outras espécies de *kelp* são conhecidos declínios na taxa de adesão do zoósporo e nas taxas de sobrevivência e crescimento dos gametófitos com o aumento da carga de sedimentos finos (WATANABE et al., 2016). Além disso, partículas de sedimentos menores têm efeitos negativos ainda maiores no estágio inicial de diversas algas formadoras de dossel (e.g. ARAKAWA et al., 2012; CHAPMAN; FLETCHER, 2002; PARK; HWANG, 2010).

**Lista taxonômica das macroalgas associadas a rodolitos nas Áreas C e D** (os símbolos diferentes correspondem ao ranque taxonômico).

•RHODOPHYTA

➤FLORIDEOPHYCEAE

▪CERAMIALES

•Rhodomelaceae

◆ *Bostrychia montagnei* Harvey

◆

◆ *Melanothamnus tongatensis* (Harvey ex Kützing) Díaz-Tapia & Maggs

◆ *Osmundaria obtusiloba* (C.Agardh) R.E.Norris

▪GIGARTINALES

•Phylloporaceae

◆ *Petroglossum undulatum* C.W.Schneider

▪GRACILARIALES

•Gracilariaceae

◆ *Crassiphycus caudatus* (J.Agardh) Gurgel, J.N.Norris & Fredericq

◆ *Gracilaria abyssalis* Gurgel & Yoneshigue-Valentin

◆ *G. domingensis* (Kütz.) Sonder ex Dickie

▪HALYMENIALES

•Halymeniaceae

◆ *Cryptonemia crenulata* (J.Agardh) J.Agardh

◆ *Cryptonemia* sp.

◆ *Halymenia brasiliana* S.M.P.B.Guimarães & M.T.Fujii

◆ *Halymenia* sp. 1

◆ *Halymenia* sp. 2

◆ *Halymenia* sp. 3

◆ cf. *Halymenia*

▪PEYSSONNELIALES

•Peyssonneliaceae

◆ *Peyssonnelia* sp.

◆ cf. *Peyssonnelia*

▪RHODYMENIALES

•Rhodymeniaceae

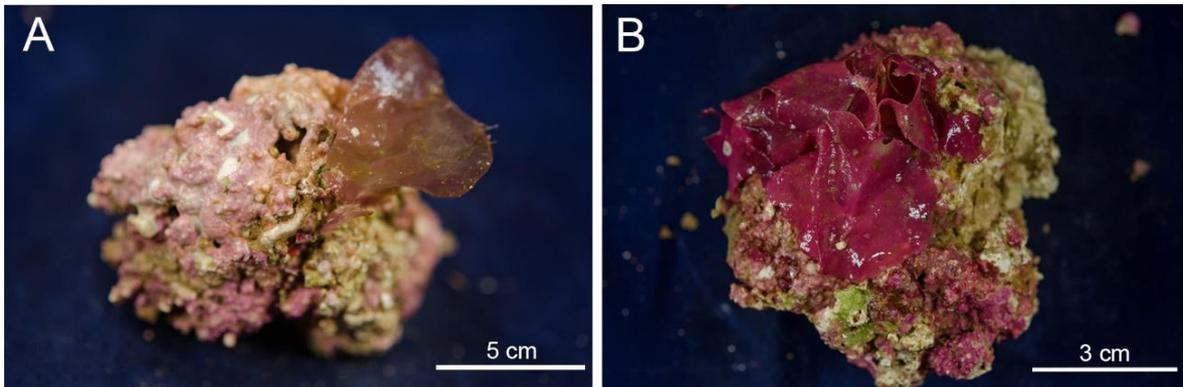
◆ *B. shanksii* E.Y.Dawson

◆ *Rhodymenia divaricata* E.Y.Dawson

◆ *R. pseudopalmata* (J.V.Lamouroux) P.C.Silva

- ◆ *Rhodymenia* sp.
- ULVOPHYCEAE
- PLOCAMIALES
- ULVALES
- Plocamiaceae
- Ulvaceae
- ◆ *Plocamium brasiliense* (Greville) M.Howe & W.R.Taylor
- ◆ *U. rigida* C.Agardh
- ◆ *Ulva* sp.
- HETEROKONTOPHYTA
- CLADOPHORALES
- PHAEOPHYCEAE
- Anadyomenaceae
- DICTYOTALES
- ◆ *Microdictyon boergesenii* Setchell
- Dictyotaceae
- Cladophoraceae
- ◆ *Canistrocarpus cervicornis* (Kütz.) De Paula & De Clerck
- ◆ *Chaetomorpha aerea* (Dillwyn) Kützing
- ◆ *D. justii* J.V.Lamouroux
- ◆ *C. linum* (O.F.Müller) Kützing
- ◆ *Dictyota* sp.
- Valoniaceae
- ◆ *Lobophora variegata* (J.V. Lamour.) Womersley ex E.C. Oliveira
- ◆ *V. macrophysa* Kützing
- ◆ *Padina* sp.
- BRYOPSISDALES
- Halimedaceae
- CHLOROPHYTA
- ◆ *Halimeda discoidea* Decne.

Figura 21: Exemplos de macroalgas associadas a rodolitos. A. *Cryptonemia* sp. (C4); B. *Halymenia* sp. (D8).



**Identificação de algas coralináceas formadoras de rodolitos.** Com base na integração de dados morfoanatômicos e sequências de DNA plastidial do marcador *psbA* foram identificados 13 táxons de algas coralináceas incrustantes (Tabela 9, Figura 22) nos bancos de rodolitos das Áreas A, B, C e D. Como já esperado para um grupo de organismos perene e de crescimento lento, não foi registrada diferença temporal na composição específica. Cada sítio apresentou, em média, 2 ( $\pm 1,6$ ) espécies. Os sítios com maior riqueza foram C4 (53 m de profundidade, 30 km de distância da foz do rio Doce) e D13 (45 m, 56 km), ao passo que o de menor riqueza foi C10, esse último já discriminado em análises anteriores (veja Figura 13 e Figura 14 ) em função de suas características intermediárias quanto à natureza sedimentar. A maioria dos taxa é conhecida por formar rodolitos no Sudeste e Nordeste do Brasil (e.g. BRASILEIRO et al., 2016; AMADO-FILHO et al., 2017). As duas espécies de algas coralináceas incrustantes mais comuns como formadoras de rodolitos no Brasil (AMADO-FILHO et al., 2017), *Lithothamnion crispatum* e *Melyvonnea erubescens*, foram as espécies com a distribuição mais ampla na área de estudo, tendo ocorrendo em 50% dos sítios.

O levantamento de algas coralináceas formadoras de rodolitos na APA-Costa das Algas (Área D) feito por GOLDER (2016a), no âmbito da avaliação do Desastre, reportou 6 taxa, ou seja, menos de 50% da riqueza aqui relatada. Tal discrepância pode estar relacionada à diferenças no esforço amostral e às abordagens utilizadas, uma vez que utilizamos dados morfoanatômicos e moleculares, enquanto que o estudo antecedente se restringiu a dados morfoanatômicos, uma abordagem considerada insuficiente para um grupo com alto nível de diversidade críptica ou pseudo-críptica (SISSINI et al., 2014; HERNANDEZ-KANTUN et al., 2016). Esse tipo de constatação reforça a necessidade do uso combinado de dados morfológicos e ferramentas moleculares na medida em que o PMBA for progredindo e evoluindo, trazendo mais acurácia aos dados de biodiversidade coligidos e disponibilizados pelo Programa. É evidente que a identificação molecular, pelo menos num primeiro ciclo, é relativamente custosa e demorada (em função do desenvolvimento dos protocolos específicos para cada grupo) mas, em longo prazo, os benefícios tendem a ser muitos e múltiplos, e os custos tendem a declinar rapidamente.

Figura 22: Aspecto e estruturas reprodutivas de algas coralináceas formadoras de rodolitos na região estudada. Chave: A: *Neogoniolithon brassica-florida*. B: Conceptáculo uniporado, *N. brassica-florida*. C: *Lithophyllum* sp. 2 (crosta demarcada a lápis). D: Conceptáculos uniporados, *Lithophyllum* sp. 2. E: *Melyvonnea erubescens*. F: Conceptáculos tetrasporangiais multiporados, *M. erubescens*. G: *Sporolithon* sp. 1. H: Soros, *Sporolithon* sp. 1.

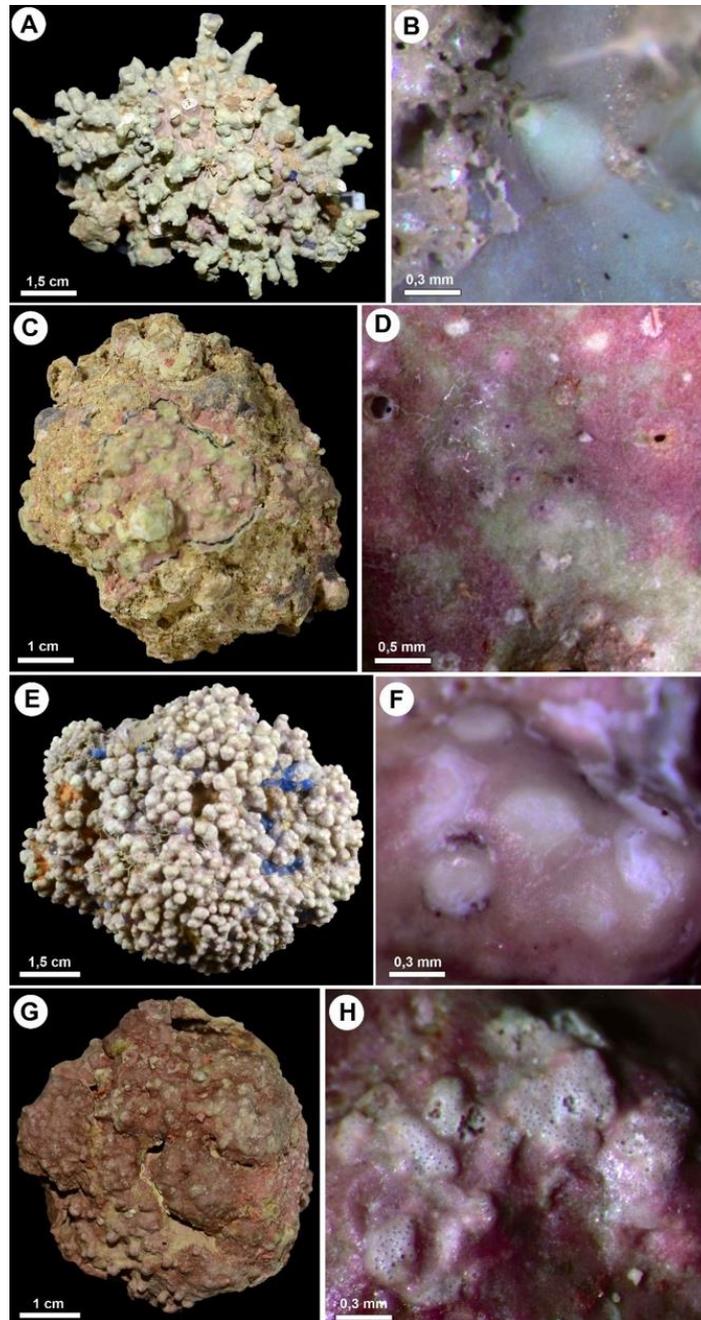


Tabela 9: Algas coralináceas incrustantes registradas nos bancos de rodolitos das Áreas A, B, C e D nas campanhas dezembro 2018 e fevereiro 2019. Os símbolos “+” indica presença e o símbolo “-” indica que a espécie não foi encontrada.

	Sítio												
	A5	B1	C2	C4	C10	D3	D5	D6	D7	D8	D10	D11	D13
Corallinales													
<i>Harveylithon rupestre</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Lithophyllum corallinae</i>	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lithophyllum prototypum</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+
<i>Lithophyllum pustulatum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-
<i>Lithophyllum sp. 2</i>	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-
<i>Neogoniolithon brassica-florida</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+
Hapalidiales													
<i>Melyvonnea erubescens</i>	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+
<i>Mesophyllum sp.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-		+	-	-	-
<i>Lithothamnion crispatum</i>	+	+		+		+	+		+	-	-	-	-
<i>Lithothamnion sp.2</i>	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Lithothamnion sp.1</i>	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Sporolithales													
<i>Sporolithon sp. 1</i>	-	+	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+
<i>Sporolithon sp. 2</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

**Fauna de invertebrados associada aos rodolitos.** O assentamento larval e a metamorfose de diversas espécies de invertebrados ocorrem preferencialmente, ou mesmo exclusivamente, na presença de algas coralináceas (e.g. MORSE; MORSE, 1991; ROBERTS, 2001; HARRINGTON et al., 2004). No entanto, a importância dos bancos de rodolitos como habitat de invertebrados ainda é pouco conhecida, no Brasil em geral (mas veja MOURA et al., 2016, que associa esse ecossistema à produção de lagostas) e na região de estudo em particular (mas veja estudo metagenômico de CAVALCANTI et al., 2013). Aspectos básicos, tais como a relação entre a diversidade de epibiontes e a complexidade estrutural (e.g. STELLER et al., 2003), ainda permanecem pouco exploradas (TÂMEGA et al., 2014).

Reportamos aqui o material coletado em 12 sítios com rodolitos, nas quatro áreas, nas campanhas de dezembro 2018 e fevereiro 2019. Esse material foi analisado, com base na morfologia dos espécimes (e.g. Figura 24, Figura 25), quanto à fauna associada à superfície dos nódulos (i.e. epibiontes), tendo sido registradas 265 morfoespécies de invertebrados. Bryozoa (74,9 %), Ascidiacea (13,3%), Porifera (4,1 %), Mollusca (3,1%) e Polychaeta (2%) foram os grupos mais abundantes, ao passo que Crustacea, Echinodermata, Cnidaria e Sipuncula representaram menos de 1 % cada (e.g. Figura 25, Figura 26). Os morfotipos de Bryozoa mais abundantes foram formas incrustantes, geralmente associadas a algas coralináceas vivas ou mortas, corroborando a hipótese de que esses organismos são importantes contribuidores na formação de estruturas carbonáticas (e.g., BASTOS et al., 2018).

Dentre Ascidiacea, um grupo bastante representativo (NELSON et al., 2012), a espécie colonial incrustante *Didemnum galacteum* predominou nas duas campanhas. Porifera foi representado majoritariamente por espécies incrustantes (e.g., *Clathria* sp., *Monanchora* sp., Suberitida e Ancorinidae), seguidas por poucas espécies maciças (e.g., *Aiolochoia crassa*, *Chelonaplysilla erecta* e *Hyattela cavernosa*) conhecidas por aglutinar rodolitos e facilitar a formação de recifes (WULFF; BUSS, 1979; PEREIRA-FILHO et al., 2015). A diversidade de Bryozoa e Porifera tendeu a ser maior em ambientes mesofóticos e mais afastados da costa, possivelmente devido a menor competição com organismos foto-autotróficos (SCIBERRAS et al., 2009; BASTOS et al., 2018). Mollusca foi representado majoritariamente por gastrópodes vermetídeos e bivalves.

A composição da fauna epibionte variou significativamente entre as campanhas (*PERMANOVA*:  $F = 13,84$ ;  $p < 0,001$ ), com maior riqueza em fevereiro de 2019. Em dezembro de 2018, C10 apresentou a menor densidade total de invertebrados, o que pode ser atribuído à menor contribuição de Bryozoa, cuja presença na superfície de fundos duros, recifes ou rodolitos, pode ter uma componente sazonal. O sítio D13 apresentou maior densidade de invertebrados, associada à dominância de ascídias (Figura 25). Em fevereiro de 2019, os sítios D3 e D7 apresentam a maior e menor densidade de invertebrados, respectivamente (Figura 26).

O cálculo de índices de diversidade e equitabilidade, recomendado no TR, não contribuiu para discriminar as amostras (veja Tabela 10), e sugerimos que essa abordagem seja desconsiderada nas próximas etapas do projeto, podendo ser substituída por outras abordagens, tal como a avaliação, isolada e conjunta, dos componentes de aninhamento e *turnover* da beta-diversidade (e.g. BASELGA et al., 2017).

Figura 23: Epibiontes em rodolitos e concreções calcárias - II. Chave A: alta concentração de macroalgas (Sítio A5, 8 m); B: Briozoários e esponjas (B1, 33 m); C: algas coralináceas incrustantes-CCA, ascídias e briozoários (C2, 63 m); D: CCA e ascídias (C4, 51 m); E e F: sedimento lamoso trapeado em meio a CCA (C10, 72 m); G: Briozoário *Styloporoma hastata* e CCA, (D3, 50 m); H: Briozoário *Celleporaria atlantica* e CCA (D6, 53 m).

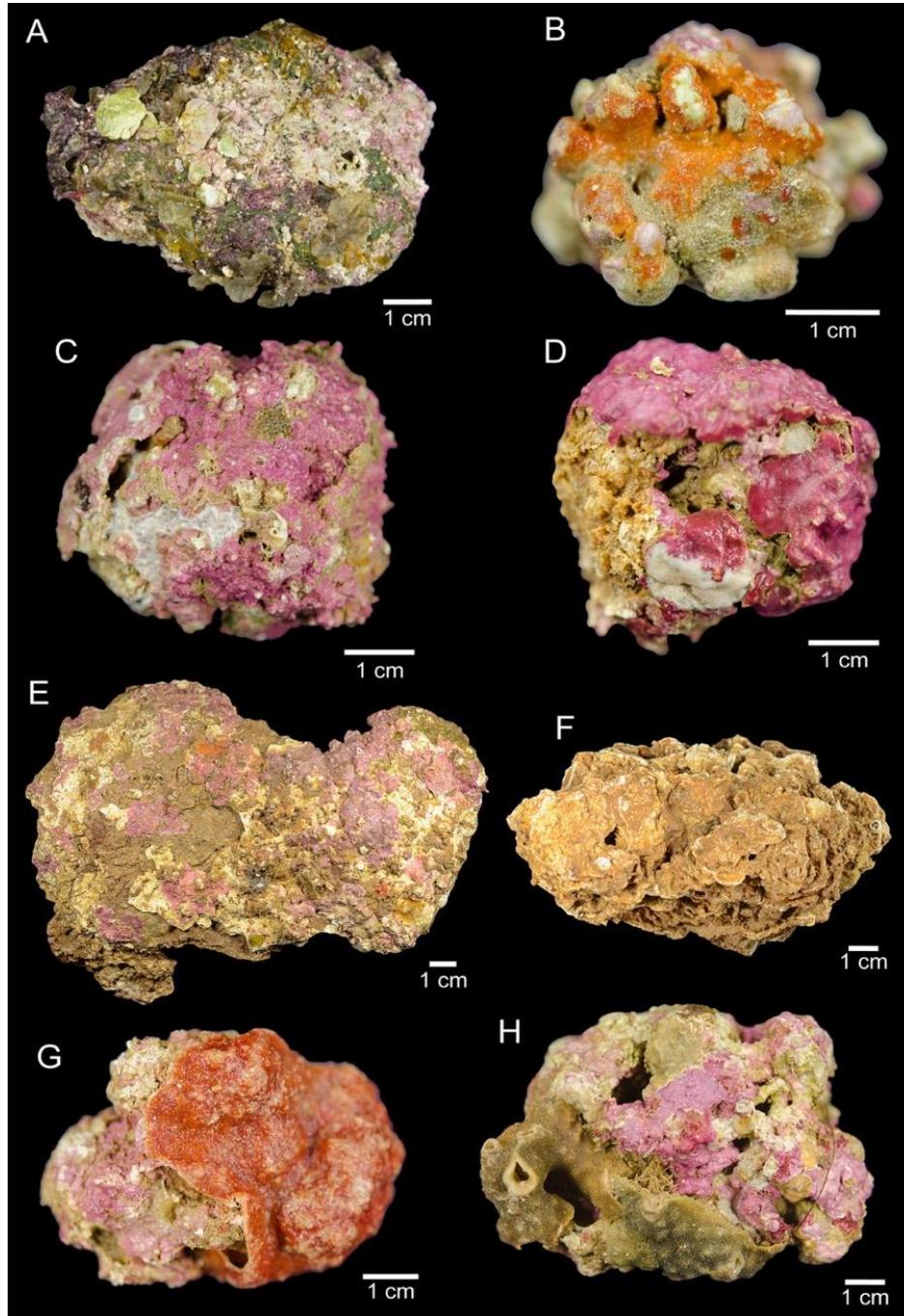


Figura 24: Epibiontes em rodolitos e concreções calcárias - II. Chave: A= Porção inferior de rodolito evidenciando sedimento lamoso trapeado em algas coralináceas incrustantes- CCA (Sítio D7, 63 m); B: rodolito morto com sedimento lamoso amarronzado (D7, 63 m); C: briozoário *Stylopoma hastata* (vermelho), CCA e coral *Madracis decactis* (D11, 66 m); D: briozoários *Reptadeonella* sp. e CCA (D10, 42 m); E: rodolito com alta vitalidade de CCA, ascídias e briozoários (D13, 49 m).

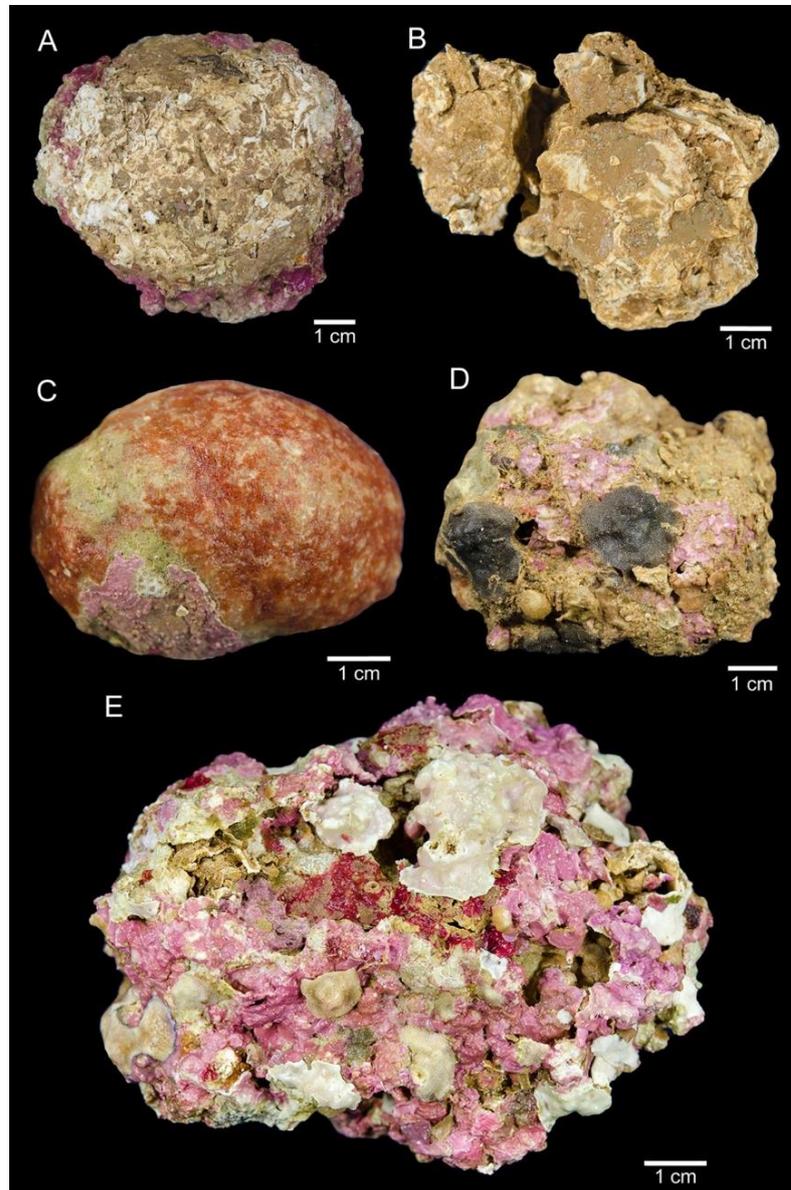


Figura 25: Abundância total e dos principais grupos de invertebrados bentônicos associados aos rodolitos em dezembro de 2018 (Campanha 1). As letras acima das barras de erro padrão indicam grupos homogêneos.

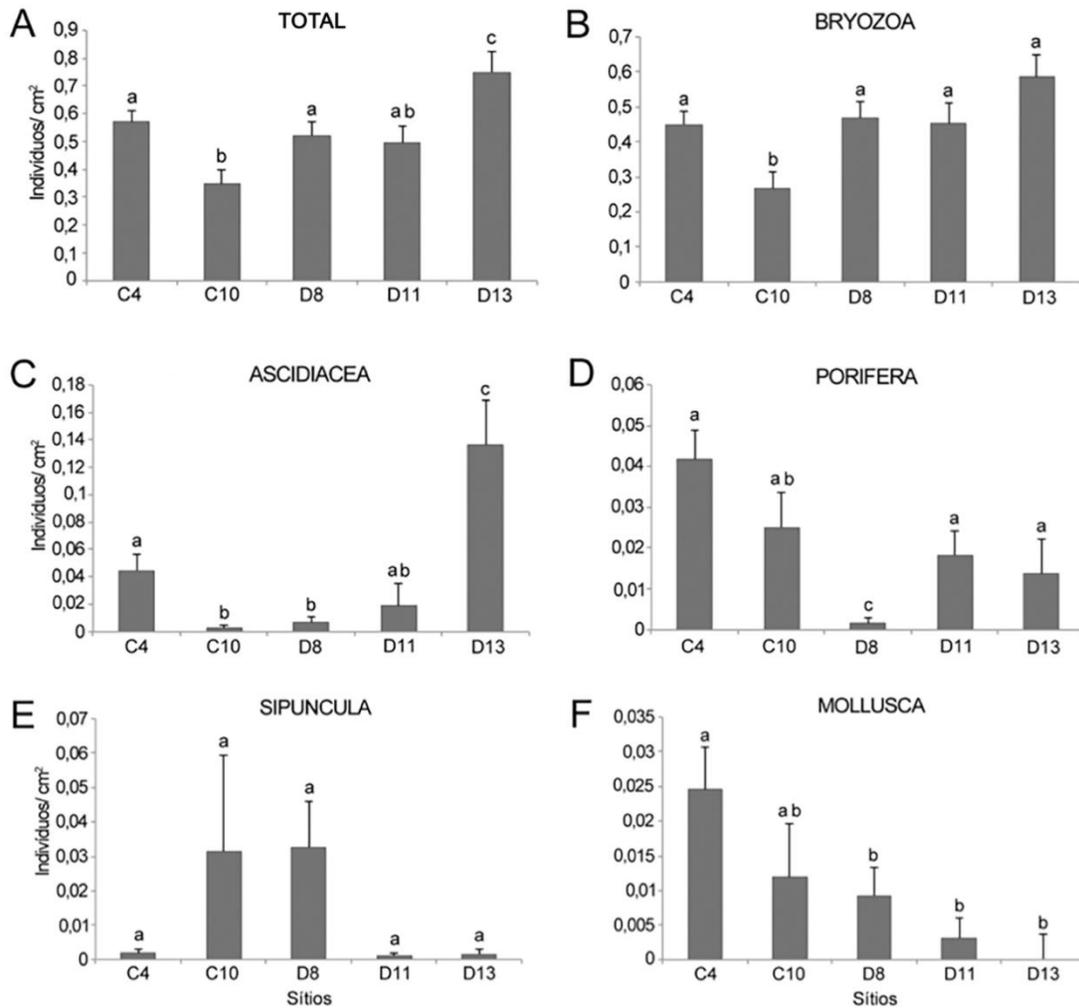


Figura 26: Abundância total e dos principais grupos de invertebrados bentônicos associados aos rodolitos em dezembro de 2018 (Campanha 1). As letras acima das barras de erro padrão indicam os grupos homogêneos.

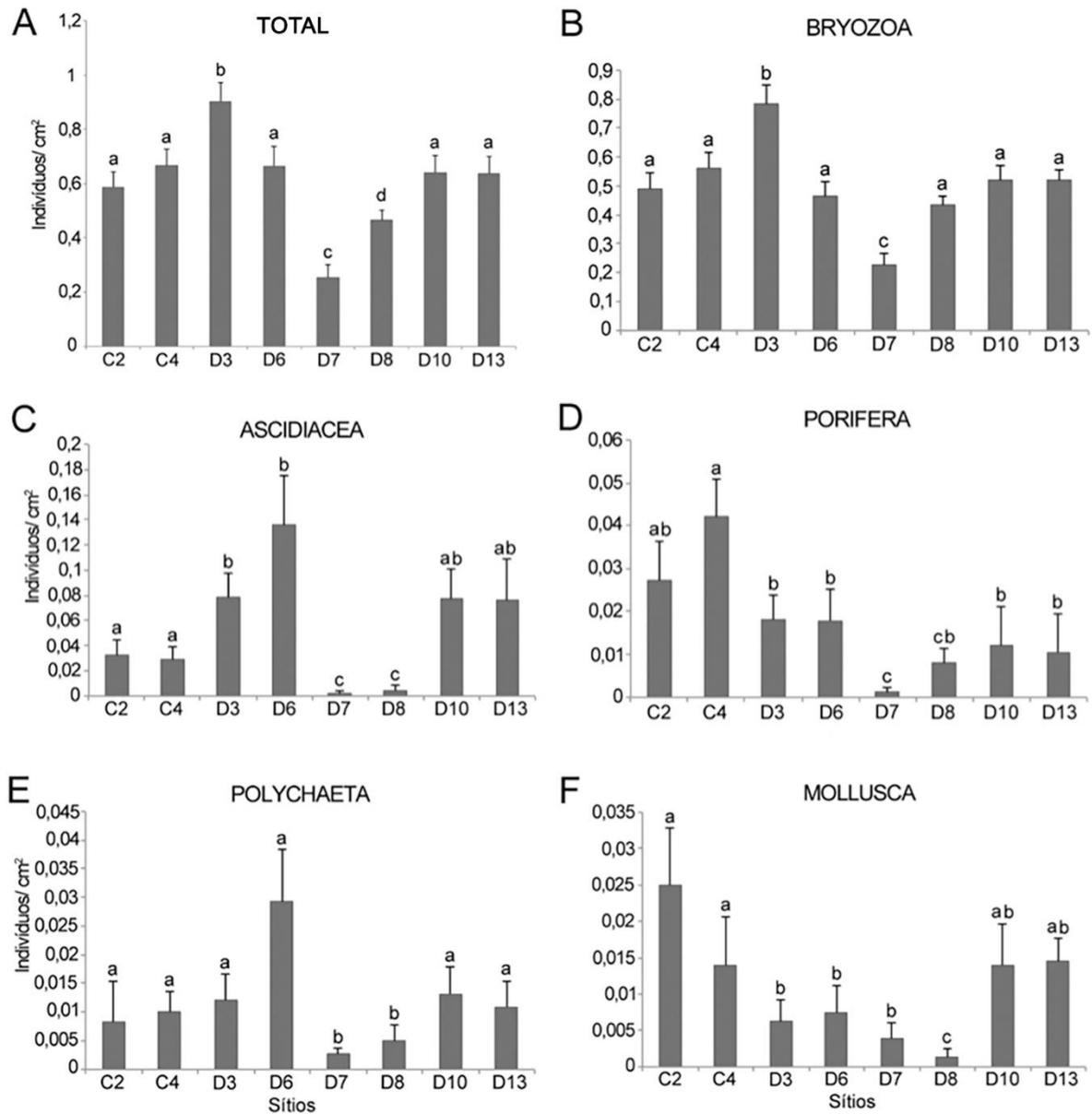


Tabela 10: Riqueza e índices de diversidade [Diversidade de Shannon (H') e Equitabilidade de Pielou (J')] calculados com base na abundância relativa das 265 morfoespécies de invertebrados associados aos rodolitos coletados em dezembro de 2018 e fevereiro de 2019.

Campanha	Sítios	Riqueza	Diversidade	Equitabilidade
Dez 2018	C4	32	4,1	0,8
	C10	34	4,4	0,9
	D8	25	3,9	0,8
	D11	32	4,3	0,9
	D13	35	4,3	0,8
Fev 2019	C2	41	4,4	0,8
	C4	39	4,3	0,8
	D3	53	4,3	0,8
	D6	59	4,7	0,8
	D7	44	4,8	0,9
	D8	42	4,2	0,8
	D10	51	4,3	0,8
	D13	53	4,3	0,8

**Tamanho e esfericidade dos rodolitos.** A forma e a estrutura dos rodolitos são predominantemente controladas pela temperatura, luz, sedimentos associados, profundidade e hidrodinamismo (FOSTER, 2001; BAHIA et al., 2010). Não se espera alteração na forma como resposta imediata a estressores ambientais e antropogênicos, agudos ou crônicos, uma vez que as taxas de crescimento de espécies formadoras de rodolitos são relativamente baixas (e.g. 1- 1,5 mm.ano<sup>-1</sup> em Abrolhos; AMADO FILHO et al., 2012, podendo alcançar 2,7 mm.ano<sup>-1</sup>; BÖHM et al., 1978; FRANTZ et al., 2005). Entretanto, em longo prazo, os nódulos podem apresentar alterações estruturais em resposta a alterações na acreção e erosão, associadas a mudanças nas condições ambientais, o que reforça a importância da construção de um *baseline* acerca da morfologia dos nódulos nas áreas atingidas pelo Desastre e em regiões controle (e.g. adjacências do PARNAM Abrolhos).

O diâmetro médio dos rodolitos foi similar entre áreas e profundidades, variando entre 4,7 e 6,5 cm (Tabela 11, Figura 27). Bahia et al. (2010) sugerem que em plataformas extensas com inclinação suave, os rodolitos são maiores e mais discoidais ou elipsoidais em maiores profundidades. Por outro lado, em plataforma estreitas de inclinação acentuada, os rodolitos tendem a ser menores em maiores profundidades. Apesar da Área D estar localizada numa área relativamente estreita da plataforma, o tamanho dos nódulos não respondeu à profundidade. Na verdade, formas subesferoidais e esferoidais foram predominantes em todas as Áreas e profundidades (Tabela 11, Figura 27, Figura 28). Entretanto, a representatividade das formas esferoidais e subesferoidais diminuiu com o aumento da profundidade, com aumento da representatividade das formas subdiscóide-a-discóide e subelipsóide-a-elipsoide (Tabela 11, Figura 27, Figura 28). Essa tendência já havia sido registrada na APA Costa das Algas (GOLDER, 2016a) e outras regiões (e.g. VILLAS-BOAS, 2009; VALE et al., 2018).

Tabela 11: Diâmetros médio, mínimo e máximo (desvio padrão) e Índice de Esfericidade (%) dos rodolitos de diferentes áreas e profundidades da região da foz do rio Doce e áreas adjacentes.

"n"=número de amostras.

Área	n	Faixa de prof. (m)	Diâmetro médio (cm)	Menor diâmetro (cm)	Maior diâmetro (cm)	Esferoidal (%)	Sub-esferoidal (%)	Elipsoidal (%)	Sub-elipsoidal (%)	Discoidal (%)	Sub-discoidal (%)
A	60	0-10	6,52 (0,67)	3 (0,97)	12,6 (2,41)	10	68,3	0	0	0	21,7
B	60	30-40	5,73 (0,66)	2,3 (0,76)	11,27 (3,21)	11,67	76,7	0	5	0	6,67
C	60	50-60	5,27 (0,77)	2,7 (1,17)	11,9 (3,97)	58,33	35,01	0	3,33	0	3,33
C	60	61-70	4,75 (1,41)	0,4 (1,76)	13,7 (6,17)	35,59	13,56	0	2,11	20,34	3,39
D	140	40-50	6,81 (0,8)	3,1 (1,61)	14,2 (4,13)	22,14	60	0	7,86	0	10
D	90	51-60	5,77 (1,14)	2,1 (0,98)	18,1 (6,48)	7,78	38,89	2,22	23,33	10	17,77
D	30	61-70	4,84 (1,05)	1,6 (2,02)	10,9 (3,65)	20	33,33	0	3,33	0	43,33

Figura 27: Diagrama de dispersão do diâmetro médio (cm) dos rodolitos versus a profundidade (m). Chave: Vermelho= Área A; Verde= Área B; Roxo= Área C; Azul = Área D.

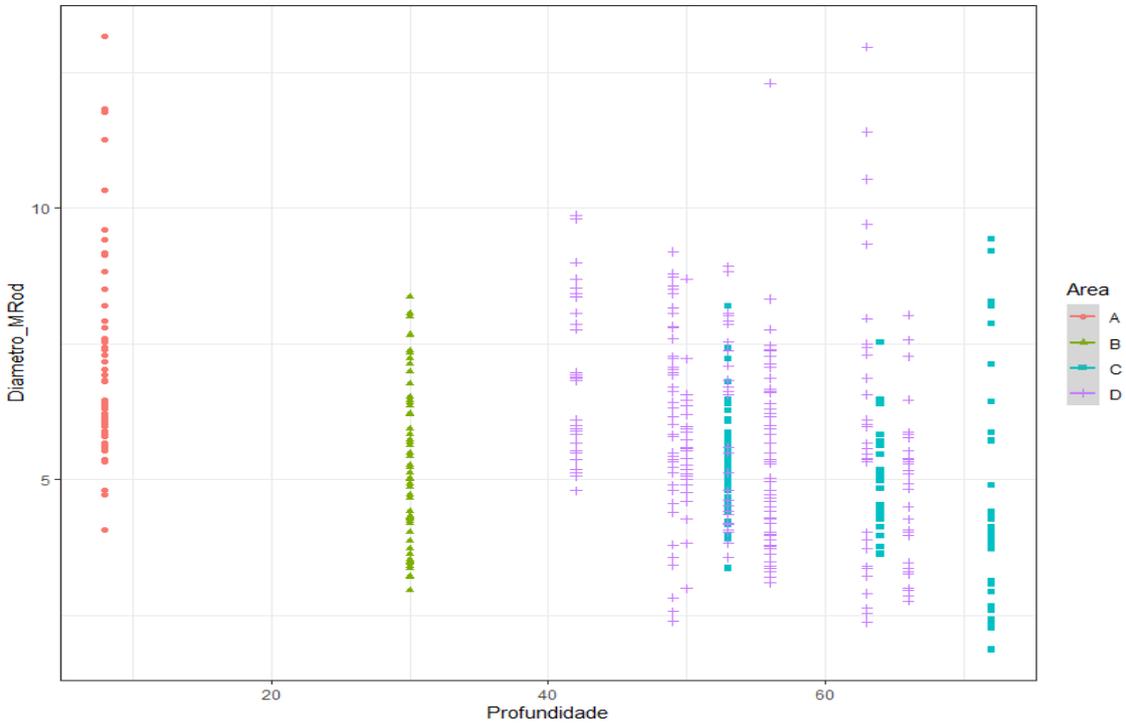
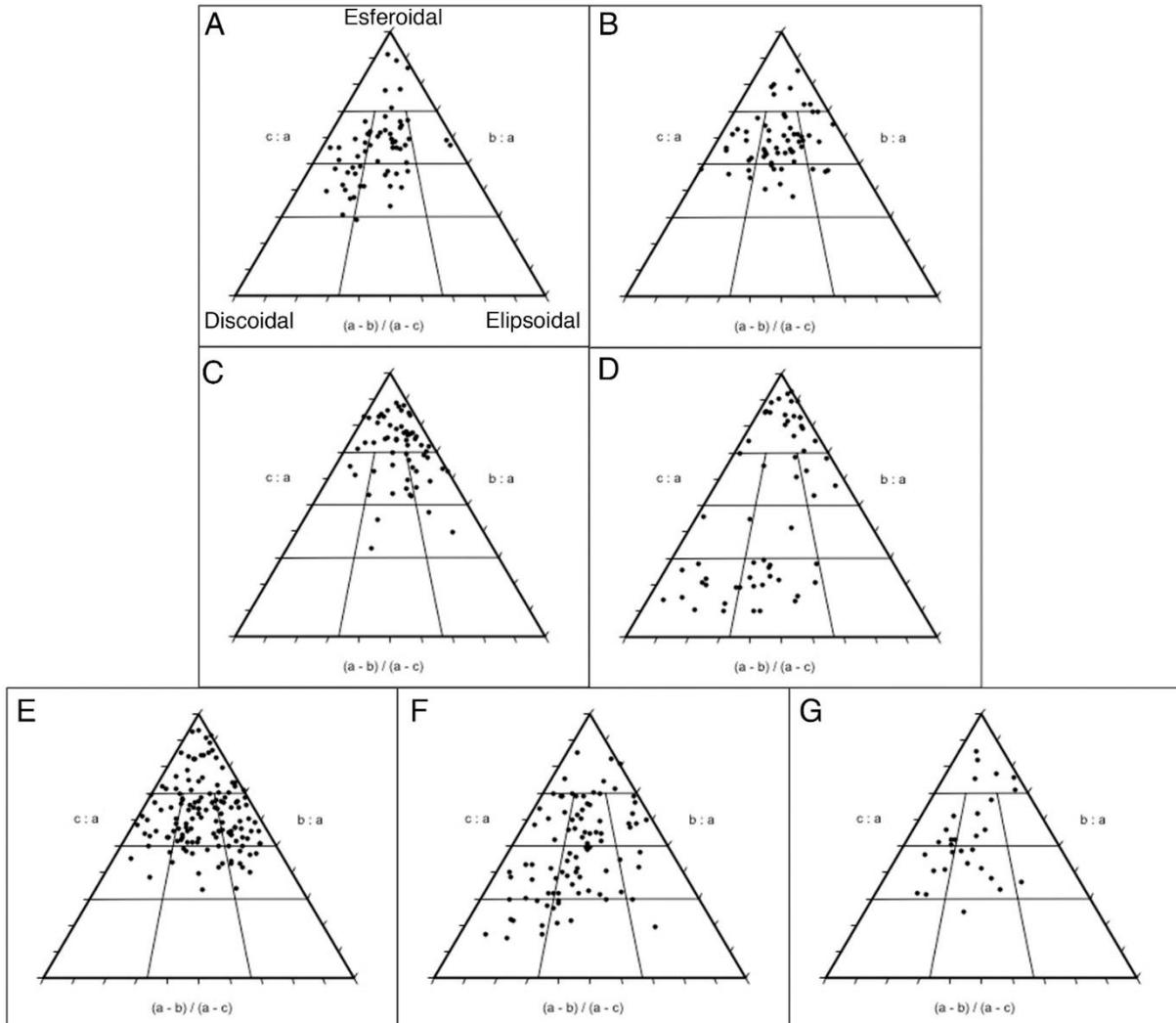


Figura 28: Diagramas de Esfericidade dos rodolitos das diferentes áreas e profundidades. Cada ponto indica atributos de um dado rodolito. Classificação baseada em BOSENCE (1983a, 1983b) e GRAHAM; MIDLEY (2000). Chave: A= Área A, 8 m de profundidade; B= Área B, 33 m; C= Área C, 50-60 m; D= Área C, 61-70 m; E= Área D, 40-50 m; F= Área D, 51-60 m; G= Área D, 61-70 m.



**Composição interna dos rodolitos.** A composição interna dos rodolitos é configurada ao longo de dezenas, ou mesmo centenas de anos. Apesar de ser indicadora paleoecológica e paleoambiental (síntese regional em BRASILEIRO et al., 2018), a estrutura interna (composição e arranjo) dos nódulos pouco responde a mudanças ambientais de curto prazo, na escala de meses a poucos anos. Microanálises baseadas em bandas de crescimento, previstas para os próximos ciclos de execução do PMBA, se apresentam como estratégia para registrar a extensão e magnitude das assinaturas biogeoquímicas do Desastre sobre os nódulos. No entanto, os dados coligidos nesse primeiro ciclo de execução do PMBA compõem um *baseline* imprescindível sobre a estrutura dos nódulos.

Em estudo recente, complementar e convergente com os resultados aqui apresentados, BRASILEIRO et al. (2018) compararam a estrutura interna de rodolitos da Área A (PARNAM Abrolhos e adjacências)

com aquela de rodolitos da coletados ao sul da Área D (APA Costa das Algas). Os nódulos descritos por Brasileiro et al. para o ES são semelhantes aos que amostramos na Área D, sendo categorizados como *boundstones* algais (classificação de FLUGEL, 2004), com briozoários exercendo papel subordinado na construção. Trata-se de estruturas porosas e com preenchimento por sedimentos (Figura 29), contrastando com os nódulos da Área A, os quais apresentam estrutura mais compacta e menos estratificada, coberta por uma lâmina fina de algas coralináceas incrustantes. Os rodolitos da Área A apresentaram fragmentos do núcleo com idades de radiocarbono variando entre ~7,000 (75 m) e ~ 2,000 anos AP (65 m), ao passo que os rodolitos do ES foram consistentemente mais jovens, sempre com menos de 700 anos. Esse contraste está possivelmente associado ao aporte continental siliciclástico e à natureza mais complexa do mosaico de fácies nas áreas B, C e D, bem como com uma dinâmica de soterramento e descobrimento mais intensa, a qual não se observa na maior parte da Área A onde ocorrem bancos de rodolitos (AMADO-FILHO et al., 2012; MOURA et al., 2013; BASTOS et al., 2015). As condições na Área A definitivamente favorecem maiores tempos de residência dos rodolitos no fundo, resultando nas estruturas mais compactas aqui relatadas para a área nas adjacências do PARNAM Abrolhos (Área A).

Além das algas coralináceas, principais componentes formadores dos rodolitos em praticamente toda a malha amostral, organismos construtores foram observados nas Áreas B, C e D, incluindo briozoários e corais nas Áreas B e D. Os resultados confirmam o importante papel dos briozoários, suspensívoros, como bioconstrutores importantes dos recifes tropicais brasileiros, tal como recentemente reportado para Abrolhos (BASTOS et al., 2018) e para foz do Rio Amazonas (MOURA et al., 2018; VALE et al., 2018). Nossos resultados não apenas reforçam a importância funcional desse grupo, mas também chamam atenção para seu potencial uso como bioindicadores (e.g. SOULE; SOULE, 1975; SOULE et al., 1995; SMITH, 1995). Por fim, registra-se a ocorrência ubíqua de bioerosores na estrutura interna dos rodolitos, sendo que esponjas foram encontradas apenas nas Áreas A e D.

Partindo desse panorama geral, apresentamos a seguir uma síntese dos resultados específicos acerca da composição interna dos rodolitos, baseadas no exame de um corte longitudinal ao longo do maior eixo de 10-30 nódulos das diferentes Áreas do estudo (veja Figura 1).

**Área A** (PARNAM e adjacências): Rodolitos construídos majoritariamente por algas coralináceas incrustantes (CCA), com ocorrência de bioerosores, tais como anelídeos (poliquetas), bivalves (*Litophaga* spp.) e esponjas (*Cliona* spp.) (Figura 29, Tabela 12).

**Área B** (Recifes Esquecidos): Rodolitos formados majoritariamente por algas coralináceas e, bioerosores do que na área A, incluindo anelídeos (poliquetas) e bivalves (moluscos) (Figura 29, Tabela 12).

**Área C** (Foz do Rio Doce): Rodolitos formados majoritariamente por algas coralináceas

e Peyssonneliaceae, e subordinadamente por briozoários. Foi registrada a presença de organismos bioerosores, tais como anelídeos (poliquetas) e bivalves (*Litophaga*) (Figura 29, Tabela 12).

**Área D** (APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz): Rodolitos formados majoritariamente por algas coralináceas e Peyssonneliaceae, e subordinadamente por briozoários e corais (*Mussismilia* sp.) (Figura 29, Tabela 12). Bioerosores incluíram anelídeos (poliquetas), bivalves (moluscos) e esponjas (*Petromica* sp.). Alguns nódulos foram compostos apenas por briozoários (“briolitos”) (Figura 30), estes últimos sem bioerosores.

Especificamente em relação as Áreas C e D, mais próximas a foz do rio Doce e mais sujeitas ao efeitos dos rejeitos oriundos do Desastre, a análise quali-quantitativa da composição interna de seus rodolitos revelou que esta composição não varia em função da distância da foz do rio Doce, respondendo primariamente à “profundidade” e também, com menor contribuição, à “distância da costa” (Figura 31). Variáveis associadas à profundidade, como luz, sedimentação e hidrodinamismo, podem afetar a diversidade da flora/fauna associada e abundância dos organismos bentônicos nos bancos de rodolitos (BASSO, 1998; RIOSMENA-RODRIGUEZ et al., 1999; WILSON et al., 2004), bem como a variação da composição interna dos nódulos. Por exemplo, na composição da estrutura interna, observa-se, com o aumento da profundidade, uma transição na dominância de algas coralináceas para algas Peyssonneliaceae e, por fim, para foraminíferos incrustantes (RASSER, 1994; RASSER; PILLER, 1997).

Tabela 12: Organismos construtores, bioerosores e associados encontrados na parte interna dos rodolitos.

Chave: "+"= presente; "-" = ausente.

		Sítios											
		A	B	C2	C4	C10	D3	D6	D7	D8	D10	D11	D13
Construtores	Alga coralinácea	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Bryozoa	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	+
	Cnidaria	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
	Peyssonnelia	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+
Erosores/ perfurantes	Bivalve	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+	-
	Polychaeta	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	+
	Porifera	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+

Figura 29: Estrutura interna dos rodolitos da região estudada. A= Rodolito da Área A (A5), compacto e constituído por algas coralíneas incrustantes-CCA (coloração esbranquiçada), com bioerosores [bivalves (*Litophaga* spp., seta vermelha) e esponjas (*Cliona* spp., seta amarela), e sipúnculas (seta azul)]. B= Rodolito da Área B (B1), poroso, constituído por CCA e com presença de bioerosores (poliquetas tubulares) e outros organismos associados [sipúnculas (seta azul) e ofiuróides (setas verdes)]. C e D= Rodolitos da Área C (C02), porosos, formados majoritariamente por CCA e subordinadamente por briozoários (setas), com bioerosores [anelídeos e bivalves (*Litophaga* spp., seta vermelha)]. E e F= Rodolitos da Área D (D11 e D08), porosos, formados majoritariamente por CCA e com bioerosores (anelídeos poliquetas). Barra de escala = 1 cm.

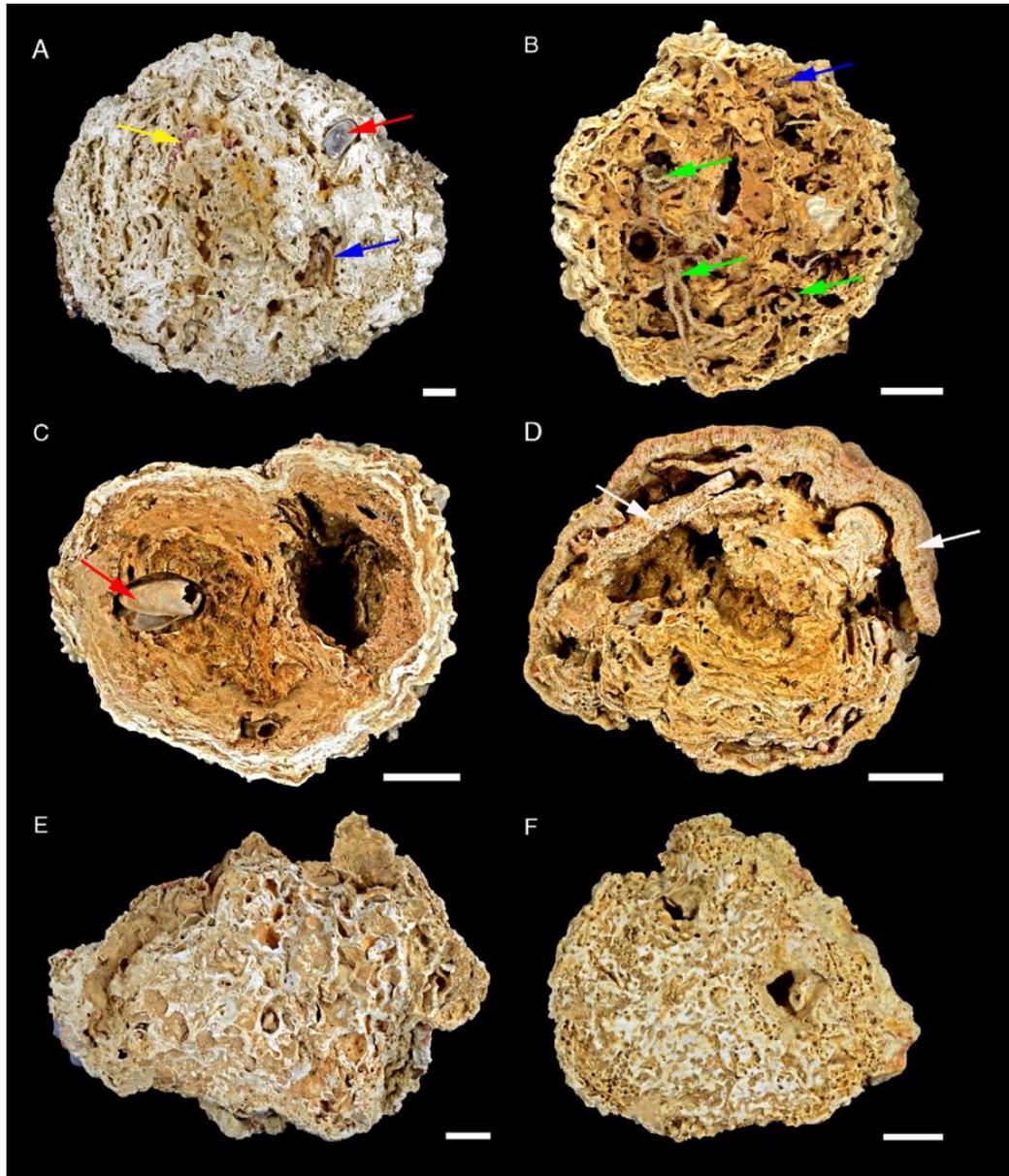


Figura 30: Concreção calcária da Área C (C07), constituída majoritariamente por algas coralináceas incrustantes (ESQUERDA) e “briolito” da Área D (D11), formado unicamente por briozoários (representado por câmaras - exoesqueleto de calcário-branco/rosa) (DIREITA). Barra de escala = 1 cm.

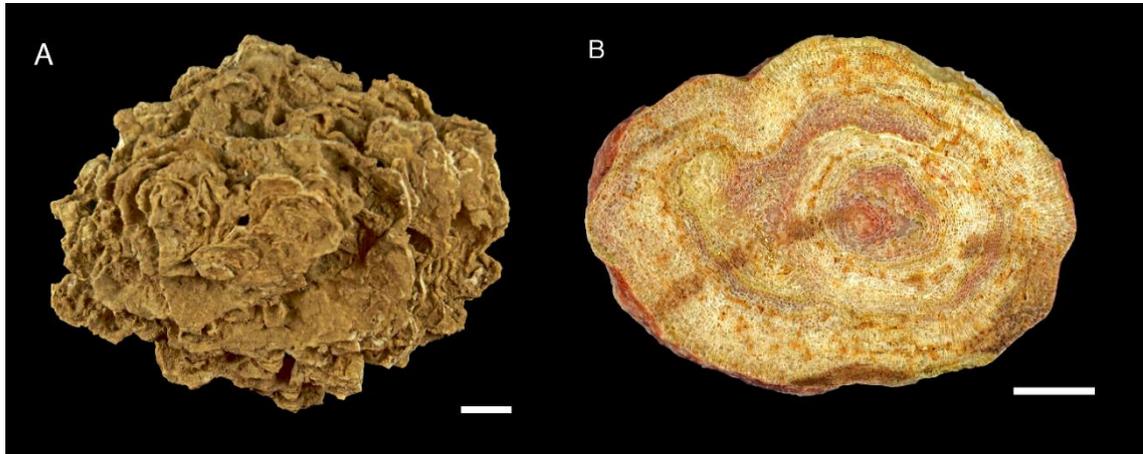


Figura 31: Análise de redundância dbRDA baseada no modelo DISTLM com dados de composição interna dos rodolitos de sítios das áreas C e D (dezembro de 2018). Vetores correspondem às variáveis selecionadas pelo melhor modelo DISTLM.

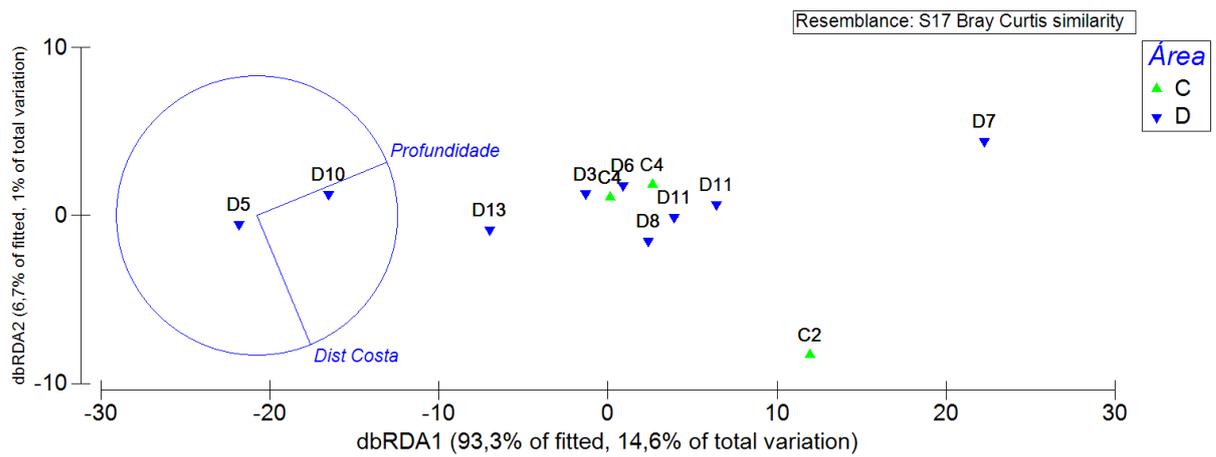


Tabela 13: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com dados de composição interna dos rodólitos, áreas C e D, e amplo conjunto de variáveis explanatórias (dezembro 2018). As variáveis 1, 4 e 8 correspondem à distância do rio Reis Magos, teor de areia e distância da foz do rio Doce, respectivamente.

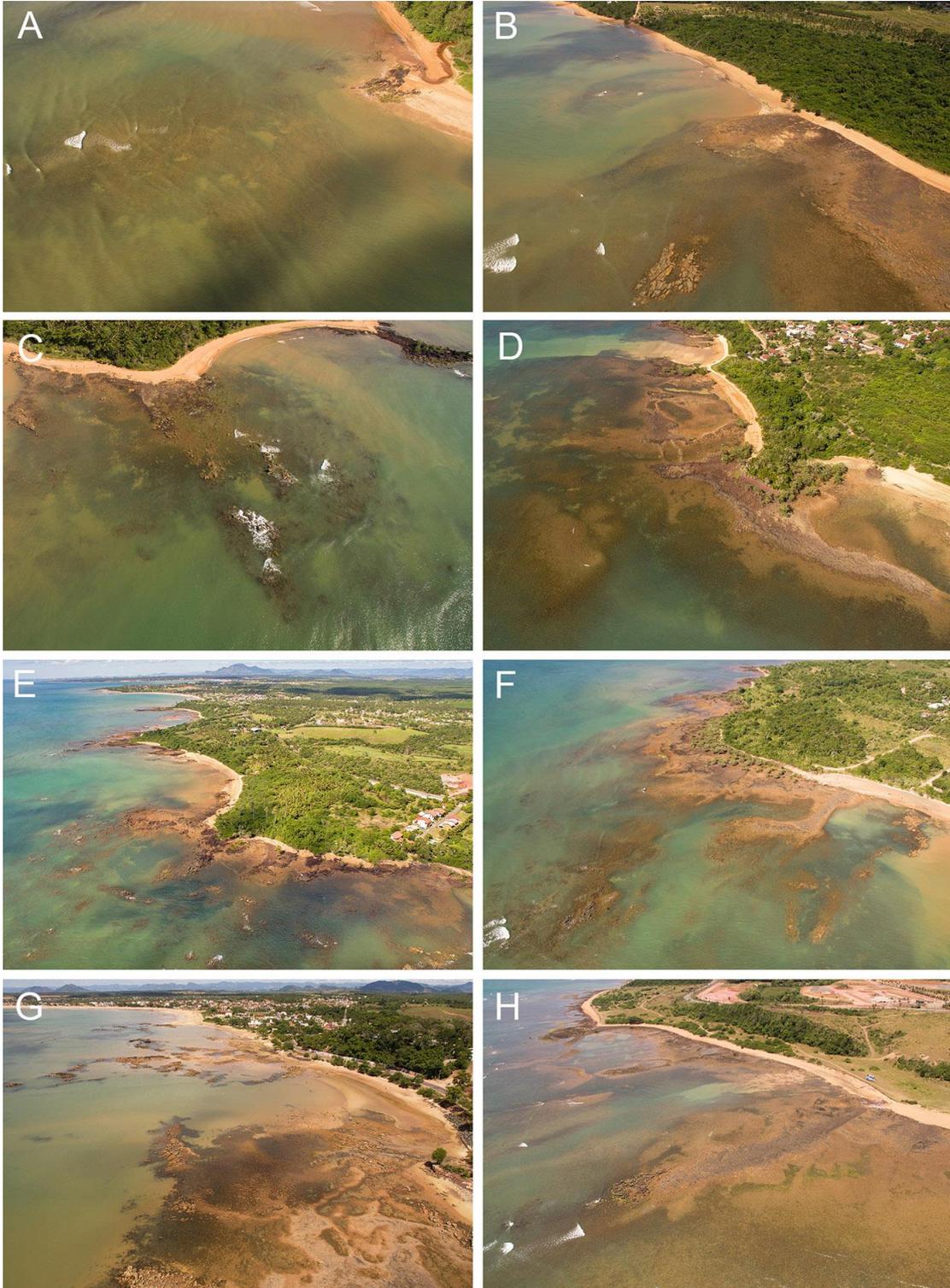
<b>Testes Marginais</b>				
<b>Variável</b>	<b>SS</b>	<b>Pseudo-F</b>	<b>P</b>	<b>Prop.</b>
Dist. Costa	4224,5	4,9501	0,0088	0,00869
Profundidade	6595,3	8,1643	0,0004	0,1357
Dist. Foz	3,3701	0,8325	0,0567	0,06046
<b>Melhores Soluções Globais</b>				
<b>AIC</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RSS</b>	<b>No. Vars</b>	<b>Seleções</b>
14,61	0,15647	3380,4	2	1;2

### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES DE MACROALGAS E ORGANISMOS BENTÔNICOS NOS RECIFES ADJACENTES AO LITORAL NA APA COSTA DAS ALGAS E REVIS SANTA CRUZ (APA-REVIS), ÁREA D

Dada a enorme importância socioambiental, e o próprio caráter emblemático (*flagship*) da elevada abundância e diversidade de algas na região da APA Costa das Algas (Área D), apresentamos os resultados sobre comunidades bentônicas dos recifes adjacentes ao litoral em dois blocos, um deles dedicado exclusivamente às macroalgas e algas coralináceas incrustantes, e outro dedicado à estrutura da comunidade como um todo. O primeiro bloco traz um inventário mais detalhado e foi baseado principalmente no material coletado, ao passo que a estrutura das comunidades foi acessada com base em fotoquadrados.

Esses recifes adjacentes ao litoral (Figura 32), amostrados em sua porção intertidal, compõe um compartimento de alta diversidade dentro do mosaico de ecossistemas costeiros do centro-sul do Espírito Santo, sendo estruturados na forma de costões rochosos com couraças lateríticas e prateleiras carbonáticas, em interação próxima com sistemas pluviais e estuarinos. Extensos manguezais são encontrados não somente nos estuários, mas também adjacentes às praias e costões de lateritas. No centro desta área peculiar encontra-se a região de Santa Cruz, município de Aracruz, a qual apresenta grande biodiversidade de algas, considerada uma das maiores do Brasil.

Figura 32: Recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D) - I. Imagens aéreas (drone) dos oito sítios costeiros A= D14; B= D15; C= D16; D= D17; E= D18; F= D19; G= D20; H= D21.



### 2.3.1. Riqueza e diversidade de macroalgas e algas coralináceas incrustantes nos recifes costeiros adjacentes ao litoral da APA-REVIS

Nos recifes adjacentes ao litoral da APA-REVIS foram identificados 203 taxa de macroalgas (Chlorophyta, 46 taxa; Ochrophyta, 42; Rhodophyta, 115) e 12 de algas coralináceas incrustantes (consolidação dos dados das campanhas setembro 2018, janeiro 2019 e maio 2019) (Figura 33, Figura 34 e Figura 35). Rhodophyta apresentou maior riqueza e abundância, padrão típico do Atlântico ocidental subtropical e tropical (LUNING, 1990; YONESHIGUE-VALENTIN et al., 2006; FIGUEIREDO et al., 2008, AMADO-FILHO et al., 2010, COSTA et al., 2012). A presença das ordens Bryopsidales (Ulvophyceae), Dictyotales e Fucales (Phaeophyceae), bem como de Ceramiales e Corallinales (Rhodophyta), também é típica da porção tropical do Atlântico Ocidental (MARINS et al., 2008, FIGUEIREDO et al., 2008, COSTA et al., 2012, NUNES; ANDRADE, 2017). As famílias mais representativas foram Rhodomelaceae (24 taxa), Dictyotaceae (22), Corallinaceae (11) e Sargassaceae (11). A riqueza total de macroalgas foi cinco vezes superior àquela reportada em estudos pretéritos, os quais incluem dados obtidos três anos antes (no verão) (SCHERNER et al., 2013) e 6 meses após o Desastre (GOLDER, 2016a, 2016b) (no outono).

A assembleia de macroalgas foliosas foi dominada por espécies com talos elaborados, do tipo macrófita corticado (80 espécies), tais como *Bryothamnion seaforthii*, *Cryptonemia crenulata*, *Dichotomaria marginata*, *Gracillaria* spp, *Sargassum* spp., *Meristotheca gelidium*, *Dictyurus occidentalis*, *Enantiocladia duperreyi*, *Plocamium brasiliense* e *Lobophora variegata*, apontando para uma comunidade em estado de clímax sucessional (BOROWITSKA, 1972; STENECK; DETHIER, 1994). Embora não possa ser visto como única evidência da ocorrência ou não de impacto, espécies de talos elaborados não são comuns em áreas afetadas por distúrbios severos, sendo a flora, nesses casos, dominada por espécies de talo simples e de crescimento rápido (filamentoso). Borowitska (1972) sugere que a dominância por formas filamentosas indica maior instabilidade ambiental, com comunidades pioneiras ocorrendo recorrentemente, o que não se verificou no presente estudo e nem tampouco em amostragens realizadas em 2016 (GOLDER, 2016a).

Figura 33: Recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D) - II. A: *Caulerpa cupressoides* (à frente) e *Padina* sp. (ao fundo). B: Estrutura recoberta por algas coralináceas e corais. C: *Sargassum* spp. D: Coleta de alga coralinácea incrustante em meio a *Sargassum* spp. E: *Halimeda* spp. Fotos: Rede Abrolhos.

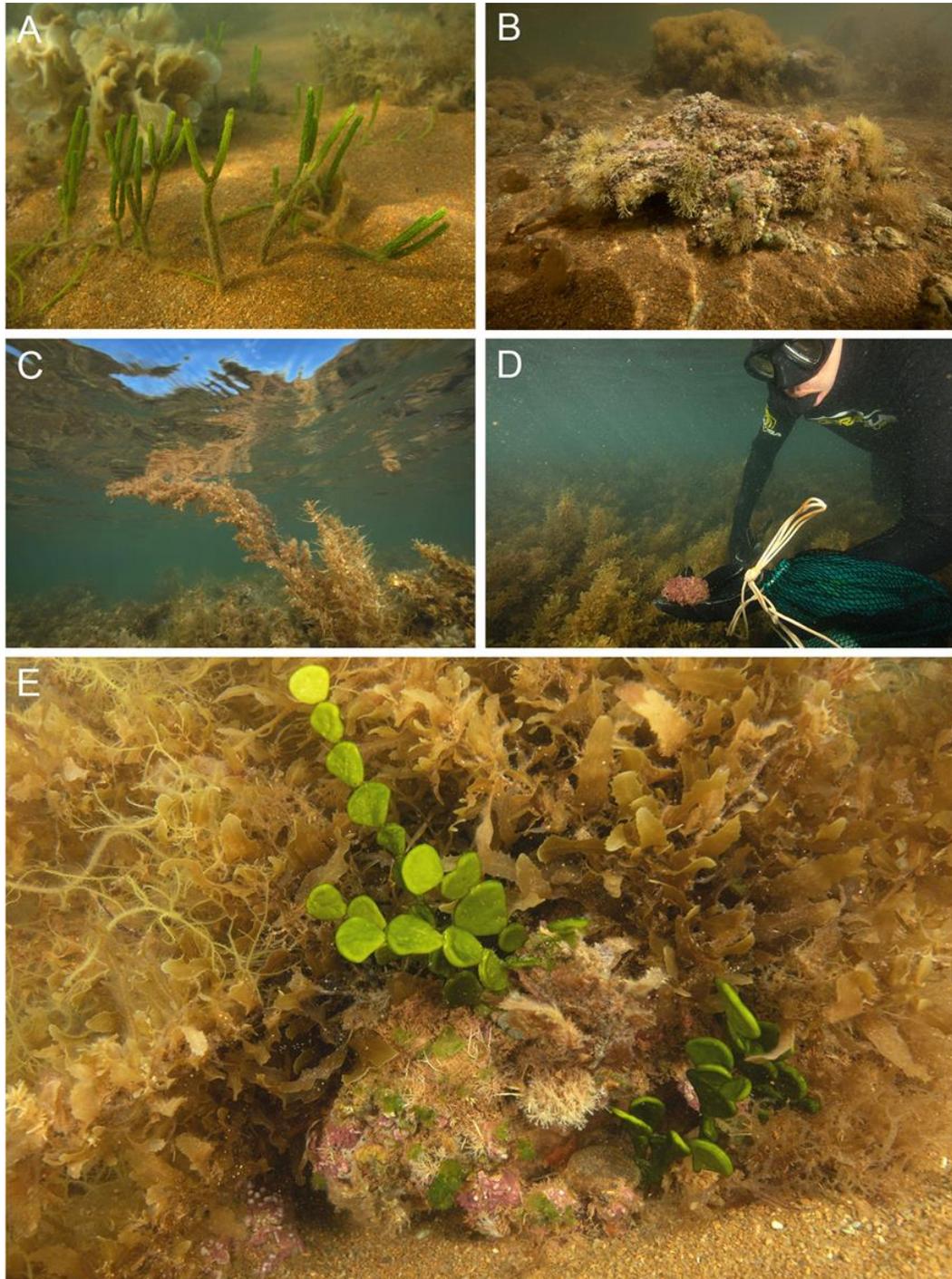


Figura 34: Recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D) - III. A e B: Ambientes rasos dominados por macroalgas. C: Zoantídeo (*Palythoa variabilis*) em meio a macroalgas. D: Macroalgas parda (*Padina* sp.) e vermelha (*Gracilaria* sp.). E: Algas coralíneas incrustantes e macroalgas. F: Coleta de *Dictyota* sp. em ambiente dominado por *Sargassum* spp. Fotos: Áthila Bertoncini/ Rede Abrolhos.

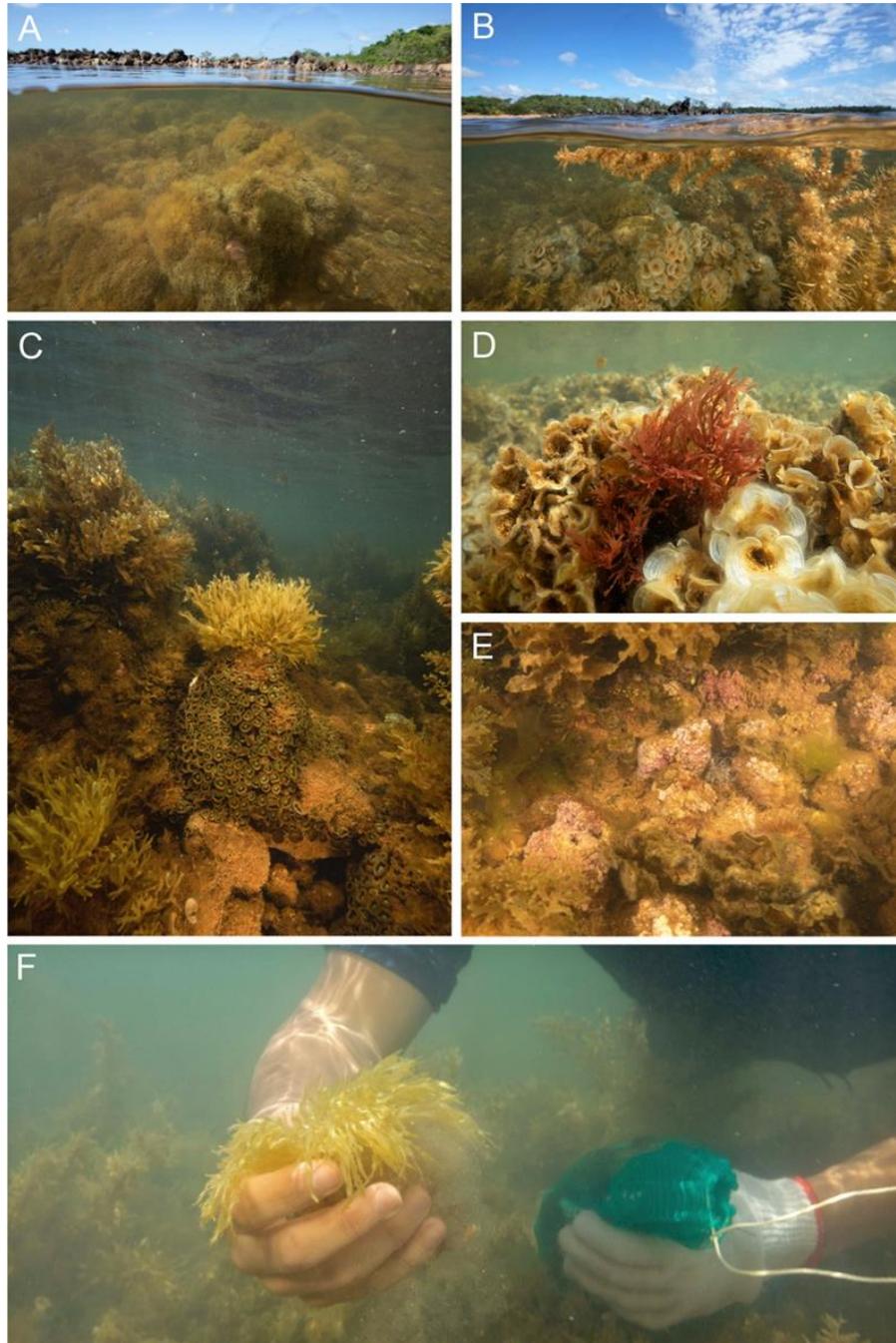


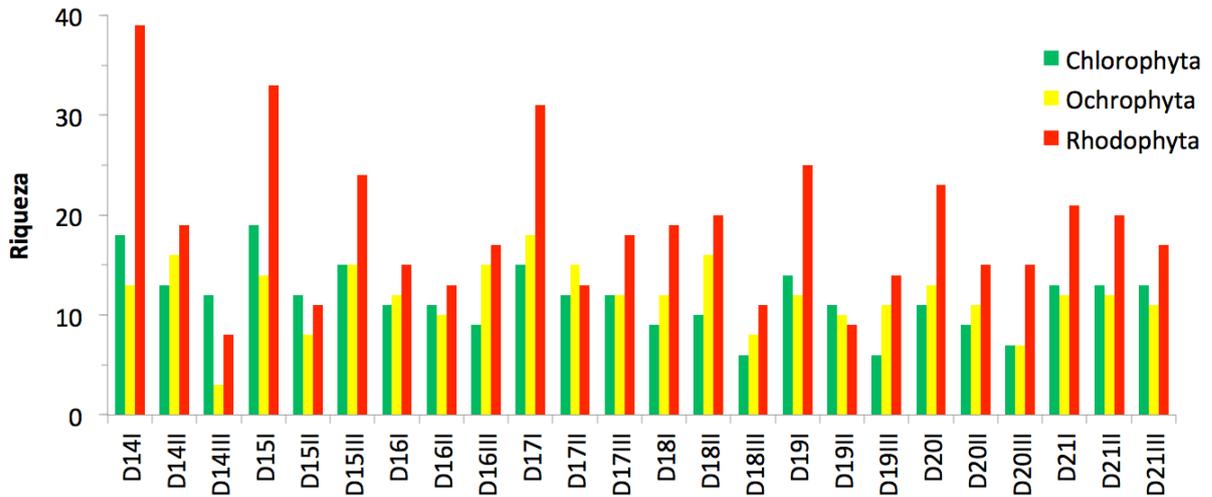
Figura 35: Macroalgas representativas da comunidade bêntica dos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS. Chave: A=*Dichotomaria marginata*. B=*Plocamium brasiliense*. C=*Caulerpa racemosa*. D=*Codium isthmocladum*. E=*Botryocladia* sp. F=*Sargassum* sp.



A estrutura taxonômica das assembleias de macroalgas nos recifes costeiros, pelo menos em nível de Divisões, foi bastante homogênea, sem variação latitudinal ou sazonal evidente (Figura 36), muito embora esse panorama ainda seja incompleto, pois depende da incorporação dos dados em aquisição ou processamento, e de replicação temporal em ciclos anuais subsequentes. O sítio com maior riqueza de algas pardas foi D17 (25 táxons, considerando todas as campanhas), um padrão semelhante ao reportado por Gomes et al. (1989), que registrou 27 táxons de Ochrophyta em um sítio localizado em

Santa Cruz, ES, amostrado entre março 1986 e setembro de 1987. A menor riqueza de algas pardas (3 táxons) foi registrada em D14 (maio de 2019), mas a riqueza nesse sítio tendeu a ser semelhante aos demais.

Figura 36: Estrutura taxonômica das assembleias de macroalgas nos recifes adjacentes ao litoral (Sítios D14 a D21, de norte para sul), em nível de Divisões. Chave: I= setembro 2018; II= janeiro 2019.



**Lista das macroalgas registradas nos recifes costeiros (APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz, Área D)** (os símbolos diferentes correspondem ao ranque taxonômico).

- ❖ RHODOPHYTA
  - FLORIDEOPHYCEAE
    - CORALLINALES
      - Corallinaceae
        - ◆ *Amphiroa anastomosans*  
Weber Bosse
        - ◆ *A. brasiliiana* Decaisne
        - ◆ *A. fragilissima* (Linnaeus)  
J.V.Lamouroux
        - ◆ *A. rigida* J.V.Lamouroux
        - ◆ *Corallina officinalis*  
Linnaeus
        - ◆ *C. panizzoi* R.Schnetter &  
U.Richter
        - ◆ *Jania adhaerens*  
J.V.Lamouroux
        - ◆ *J. cubensis* Montagne ex  
Kützing
        - ◆ *J. rubens* (Linnaeus)  
J.V.Lamouroux
      - Hydrolithaceae
        - ◆ *Hydrolithon farinosum*  
(J.V.Lamouroux) Penrose  
& Y.M.Chamberlain
      - Lithophyllaceae
        - ◆ *Lithophyllum prototypum*  
(Foslie) Foslie
    - NEMALIALES
      - Galaxauraceae
        - ◆ *Dichotomaria marginata*  
(J.Ellis & Solander)  
Lamarck
        - ◆ *D. obtusata* (J.Ellis &  
Solander) Lamarck
        - ◆ *Dichotomaria* sp.
        - ◆ *Galaxaura rugosa* (J.Ellis  
& Solander)  
J.V.Lamouroux

- ◆ *Tricleocarpa cylindrica*  
(J.Ellis & Solander)  
Huisman & Borowitzka
- ◆ *T. fragilis* (L.) Huisman &  
R.A.Townsend
- Liagoraceae
  - ◆ *Gloiocallis dendroidea*  
(P.Crouan & H.Crouan)  
Showe M.Lin, Huisman &  
D.L.Ballantine
  - ◆ *Liagora ceranoides*  
J.V.Lamouroux
- Scinaiaceae
  - ◆ *Scinaia halliae* (Setchell)  
Huisman
- CERAMIALES
  - Callithamniaceae
    - ◆ *Aglaothamnion herveyi*  
(M.Howe) N.E.Aponte,  
D.L.Ballantine, &  
J.N.Norris
  - Ceramiaceae
    - ◆ *Centroceras gasparrinii*  
(Meneghini) Kützing
- ◆ *Ceramium brevizonatum*  
var. *caraibicum*  
H.E.Petersen & Børgesen
- ◆ *C. codii* (H.Richards)  
Mazoyer
- ◆ *C. dawsonii* A.B.Joly
- ◆ *C. luetzelburgii*  
O.C.Schmidt
- ◆ *Ceramium* sp.
- ◆ *Gayliella flaccida* (Harvey  
ex Kützing) T.O.Cho &  
L.J.Mclvor
- Dasyaceae
  - ◆ *Dasya corymbifera*  
J.Agardh
  - ◆ *D. rigidula* (Kützing)  
Ardissone
- Delesseriaceae
  - ◆ *Acrosorium ciliolatum*  
(Harvey) Kylin
  - ◆ *Cryptopleura ramosa*  
(Hudson) L.Newton
  - ◆ *Dictyurus occidentalis*  
J.Agardh

- ◆ *Heterosiphonia crispella*  
(C.Agardh) M.J.Wynne
- ◆ *H. gibbesii* (Harvey)  
Falkenberg
- ◆ *Taenioma perpusillum*  
(J.Agardh) J.Agardh
- ◆ *Thuretia borneyi* Vickers
- Rhodomelaceae
  - ◆ *Acanthophora spicifera*  
(M.Vahl) Børgesen
  - ◆ *Alsidium seaforthii* (Turner)  
J.Agardh
  - ◆ *Bostrychia binderi* Harvey
  - ◆ *B. tenella* (J.V.Lamouroux)  
J.Agardh
  - ◆ *Carradoriella denudata*  
(Dillwyn) A.M.Savoie &  
G.W.Saunders
  - ◆ *Dipterosiphonia dendritica*  
(C.Agardh) F.Schmitz
  - ◆ *Herposiphonia nuda*  
Hollenberg
  - ◆ *H. secunda* (C.Agardh)  
Ambronn
  - ◆ *H. tenella* (C. Agardh)  
Ambronn
  - ◆ *Laurencia arbuscula*  
Sonder
  - ◆ *L. dendroidea* J.Agardh
  - ◆ *L. intricata* J.V.Lamouroux
  - ◆ *L. oliveirana* Yoneshigue
  - ◆ *Laurencia* sp.
  - ◆ *Melanothamnus ferulaceus* (Suhr ex  
J.Agardh) Díaz-Tapia &  
Maggs
  - ◆ *M. gorgoniae* (Harvey)  
Díaz-Tapia & Maggs
  - ◆ *M. tongatensis* (Harvey ex  
Kützing) Díaz-Tapia &  
Maggs
  - ◆ *Neosiphonia sertularioides*  
(Grateloup) K.W.Nam &  
P.J.Kang
  - ◆ *Osmundaria obtusiloba*  
(C.Agardh) R.E.Norris
  - ◆ *Palisada corallopsis*  
(Montagne) Senties, Fujii  
& Díaz-Larrea

- ◆ *P. furcata* (Cordeiro-Marino & M.T.Fujii)  
Cassano & M.T.Fujii
- ◆ *P. perforata* (Bory)  
K.W.Nam
- ◆ *Polysiphonia subtilissima*  
Montagne
- Spyridiaceae
  - ◆ *Spyridia clavata* Kützing
  - ◆ *S. filamentosa* (Wulfen)  
Harvey
- Wrangeliaceae
  - ◆ *Griffithsia globulifera*  
Harvey ex Kützing
  - ◆ *G. schousboei* Montagne
  - ◆ *Wrangelia argus*  
(Montagne) Montagne
- GELIDIALES
  - Gelidiaceae
    - ◆ *Gelidium capense*  
(S.G.Gmelin) P.C.Silva
    - ◆ *G. floridanum* W.R.Taylor
    - ◆ *Gelidium* sp.
  - Gelidiellaceae
    - ◆ *Gelidiella acerosa*  
(Forsskål) Feldmann & Hamel
    - ◆ *G. ligulata* E.Y.Dawson
    - ◆ *Parviphycus trinitatis*  
(W.R.Taylor) M.J.Wynne
  - Pterocladaceae
    - ◆ *Pterocladia bartlettii*  
(W.R.Taylor) Santelices
    - ◆ *P. beachiae* Freshwater
    - ◆ *P. capillacea* (S.G.Gmelin)  
Santelices & Hommersand
- GIGARTINALES
  - Caulacanthaceae
    - ◆ *Catenella caespitosa*  
(Withering) L.M.Irvine
  - Cystocloniaceae
    - ◆ *Hypnea brasiliensis*  
P.B.Jesus, Nauer & J.M.C.Nunes
    - ◆ *H. cervicornis* J.Agardh

- ◆ *H. pseudomusciformis*  
Nauer, Cassano &  
M.C.Oliveira
- ◆ *Hypnea* sp.
- Gigartinaceae
  - ◆ *Chondracanthus acicularis*  
(Roth) Fredericq
- Phylloporaceae
  - ◆ *Gymnogongrus griffithsiae*  
(Turner) C.Martius
  - ◆ *Petroglossum undulatum*  
C.W.Schneider
- Rhizophyllidaceae
  - ◆ *Ochtodes secundiramea*  
(Montagne) M.Howe
- Solieriaceae
  - ◆ *Meristotheca gelidium*  
(J.Agardh) E.J.Faye &  
M.Masuda
  - ◆ *Solieria filiformis* (Kützinger)  
P.W.Gabrielson
- GRACILARIALES
  - Gracilariaceae
    - ◆ *G. cearensis* (A.B.Joly &  
Pinheiro) A.B.Joly &  
Pinheiro
    - ◆ *G. cervicornis* (Turner)  
J.Agardh
    - ◆ *G. cuneata* Areschoug
    - ◆ *G. domingensis* (Kütz.)  
Sonder ex Dickie
    - ◆ *G. flabelliformis* subsp.  
simplex Gurgel, Fredericq  
& J.N.Norris
    - ◆ *Gracilaria* sp.
    - ◆ *Hydropuntia rangiferina*  
(Kützinger) Gurgel &  
Fredericq
- HALYMENIALES
  - Halymeniaceae
    - ◆ *Cryptonemia seminervis*  
(C. Agardh) J. Agardh
    - ◆ *Grateloupia filicina*  
(J.V.Lamouroux) C.Agardh
    - ◆ *Halymenia brasiliiana*  
S.M.P.B.Guimarães &  
M.T.Fujii
    - ◆ *H. floridana* J.Agardh

- ◆ cf. *Halymenia*
- ◆ *Plocamium brasiliense* (Greville) M.Howe & W.R.Taylor
- PEYSSONNELIALES
  - Peyssonneliaceae
    - ◆ *Peyssonnelia* sp.
- ◆ *Plocamium brasiliense* (Greville) M.Howe & W.R.Taylor
- ❖ HETEROKONTOPHYTA
  - PHAEOPHYCEAE
    - ECTOCARPALES
      - Acinetosporaceae
        - ◆ *Acinetospora filamentosa* (Noda) Yaegashi, Uwai & Kogame
        - ◆ *Feldmannia irregularis* (Kützinger) Hamel
        - ◆ *F. mitchelliae* (Harvey) H.-S.Kim
      - Scytosiphonaceae
        - ◆ *Chnoospora minima* (Hering) Papenfuss
        - ◆ *Colpomenia sinuosa* (Mertens ex Roth) Derbès & Solier
        - ◆ *Hydroclathrus clathratus* (C.Agardh) M.Howe
- RHODYMENIALES
  - Champiaceae
    - ◆ *Champia feldmannii* Diaz-Piferrer
    - ◆ *C. vieillardii* Kützinger
  - Lomentariaceae
    - ◆ *Ceratodictyon planicaule* (W.R.Taylor) M.J.Wynne
    - ◆ *C. variabile* (J.Agardh) R.E.Norris
  - Rhodymeniaceae
    - ◆ *Botryocladia occidentalis* (Børgesen) Kylin
    - ◆ *B. wynnei* Ballantine
- PLOCAMIALES
  - Plocamiaceae
- DICTYOTALES
  - Dictyotaceae

- ◆ *Canistrocarpus cervicornis* (Kütz.) De Paula & De Clerck
  - ◆ *C. crispatus* (J.V.Lamouroux) De Paula & De Clerck
  - ◆ *Dictyopteris delicatula* J.V.Lamouroux
  - ◆ *D. plagiogramma* (Mont.) Vickers
  - ◆ *D. polypodioides* (A.P.De Candolle) J.V.Lamouroux
  - ◆ *Dictyota cf. caribea*
  - ◆ *D. ciliolata* Sonder ex Kützing
  - ◆ *D. crenulata* J.Agardh
  - ◆ *D. jamaicensis* W.R.Taylor
  - ◆ *D. mertensii* (C.Martius) Kütz.
  - ◆ *D. menstrualis* (Hoyt) Schnetter, Hörning & Weber-Peukert
  - ◆ *Dictyota* sp.
  - ◆ *Lobophora variegata* (J.V. Lamour.) Womersley ex E.C. Oliveira
  - ◆ *Padina antillarum* (Kützing) Piccone
  - ◆ *P. boergesenii* Allender & Kraft
  - ◆ *P. gymnospora* (Kützing) Sonder
  - ◆ *P. sanctae-crucis* Børgesen
  - ◆ *Padina* sp.
  - ◆ *Spatoglossum schroederi* (C.Agardh) Kützing
  - ◆ *Zonaria tournefortii* (J.V.Lamouroux) Montagne
  - ◆ *Z. zonata* C.Agardh
- FUCALES
- Sargassaceae
    - ◆ *Sargassum cymosum* C.Agardh
    - ◆ *S. cymosum* var. *nanum* E.de Paula & E.C.Oliveira

- ◆ *S. filipendula* C.Agardh
- ◆ *S. furcatum* Kützing
- ◆ *S. hystrix* J.Agardh
- ◆ *S. novae-hollandiae*  
P.C.Silva
- ◆ *S. polyceratium* Montagne
- ◆ *S. ramifolium* Kützing
- ◆ *S. rigidulum* Kützing
- ◆ *S. stenophyllum* C.Martius
- ◆ *S. vulgare* C.Agardh
- SCYTOTHAMNALES
  - Bachelotiaceae
    - ◆ *Bachelotia antillarum*  
(Grunow) Gerloff
- SPHACELARIALES
  - Sphacelariaceae
    - ◆ *Sphacelaria rigidula*  
Kützing
- ❖ CHLOROPHYTA
  - ULVOPHYCEAE
    - ULVALES
      - Ulvaceae
        - ◆ *Ulva fasciata* Delile
        - ◆ *U. flexuosa* Wulfen
        - ◆ *U. lactuca* Linnaeus
        - ◆ *U. rigida* C.Agardh
        - ◆ *Ulva* sp.
    - CLADOPHORALES
      - Anadyomenaceae
        - ◆ *Anadyomene stellata*  
(Wulfen) C.Agardh
      - Boodleaceae
        - ◆ *Boodlea struveoides*  
M.Howe
        - ◆ *Cladophoropsis membranacea* (Hofman  
Bang ex C.Agardh)  
Børgesen
      - Cladophoraceae
        - ◆ *Chaetomorpha antennina*  
(Bory) Kützing
        - ◆ *C. brachygona* Harvey

- ◆ *C. minima* Collins & Hervey  
Marino) C.W.Nascimento  
Moura & J.C.DeAndrade
- ◆ *Cladophora coelothrix*  
Kützing
- ◆ *C. laetevirens* (Dillwyn)  
Kützing
- ◆ *C. prolifera* (Roth) Kützing
- ◆ *C. vagabunda* (Linnaeus)  
Hoek
- ◆ *Cladophora* sp.
- ◆ *Willeella ordinata*  
Børgesen
- Siphonocladaceae
- ◆ *Dictyosphaeria versluysii*  
Weber Bosse
- Valoniaceae
- ◆ *Valonia aegagropila*  
C.Agardh
- ◆ *V. macrophysa* Kützing
- DASYCLADALES
- Polyphysaceae
- ◆ *Parvocaulis myriosporus*  
(A.B.Joly & Cordeiro-
- BRYOPSIDALES
- Caulerpaceae
- ◆ *Caulerpa ambigua*  
Okamura
- ◆ *C. chemnitzia* (Esper)  
J.V.Lamouroux
- ◆ *C. cupressoides* (Vahl)  
C.Agardh
- ◆ *C. cupressoides* var.  
*lycopodium* Weber Bosse
- ◆ *C. fastigiata* Montagne
- ◆ *C. lanuginosa* J.Agardh
- ◆ *C. mexicana* Sonder ex  
Kützing
- ◆ *C. prolifera* (Forssk.)  
J.V.Lamouroux
- ◆ *C. racemosa* (Forsskål)  
J.Agardh
- ◆ *C. sertularioides*  
(S.G.Gmel.) M.Howe
- ◆ *C. verticillata* J.Agardh

- ◆ *C. webbiana* Montagne Carvalho, Verbruggen & S.M.B.Pereira
- Codiaceae
  - ◆ *Codium intertextum* Collins & Hervey
  - ◆ *C. isthmocladum* Vickers
  - ◆ *C. taylorii* P.C.Silva
- Derbesiaceae
  - ◆ *Derbesia marina* (Lyngbye) Solier
- Dichotomosiphonaceae
  - ◆ *Avrainvillea nigricans* Decaisne
- Halimedaceae
  - ◆ *Halimeda discoidea* Decne.
  - ◆ *H. jolyana* Ximenes, Bandeira-Pedrosa, Cassano, Oliveira-
- Udoteaceae
  - ◆ *Penicillus capitatus* Lamarck
- ❖ TRACHEOPHYTA
  - MAGNOLIOPSIDA
    - ALISMATALES
      - Cymodoceaceae
        - ◆ *Halodule wrightii* Ascherson
- ❖ CYANOBACTERIA
  - CYANOPHYCEAE
    - OSCILLATORIALES
      - Microcoleaceae
        - ◆ *Microcoleus* sp.

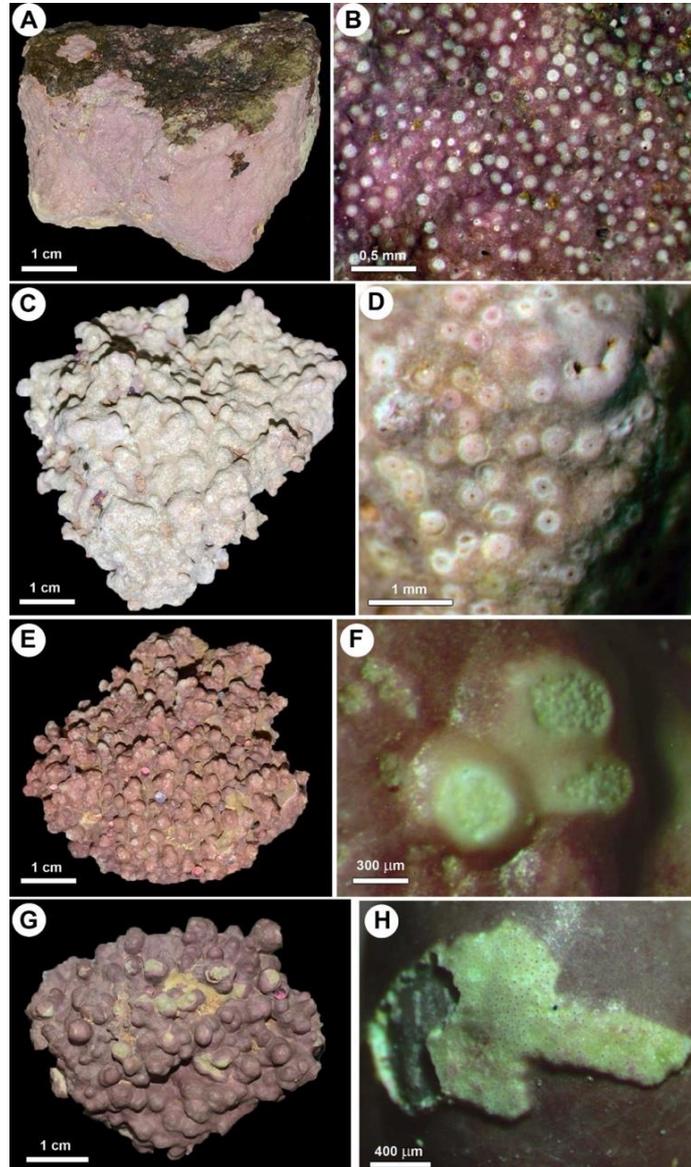
No que concerne às algas coralináceas incrustantes (Tabela 14 e Figura 37), identificadas com base na integração de dados morfoanatómicos e sequências de DNA plastidial do marcador psbA, foram identificados 12 táxons de nos recifes adjacentes ao litoral da Área D. Como já esperado para um grupo de organismos perene e de crescimento lento, não foi registrada diferença na composição específica das espécies de algas coralináceas incrustantes ao longo das três campanhas (setembro de 2018, janeiro de 2019 e maio de 2019). Além disso, não foi registrada variação na riqueza entre sítios de coleta que pudesse estar relacionada ao gradiente de distância da foz do Rio Doce.

Destaca-se que *Lithophyllum* sp. 1 constitui espécie nova para a ciência e *Harveyolithon roseum*, recentemente descrita para Taiwan por Liu et al. (2018), teve sua ocorrência conhecida expandida para o Brasil. O estudo de Golder (2016a) reportou apenas 5 taxa de algas coralináceas incrustantes para a mesma área: *Hydrolithon* sp., *Lithothamnion* sp. 1, *Lithothamnion* sp. 2, *L. crispatum* e *Sporolithon* sp. Essas diferenças podem estar relacionadas a diferenças no esforço amostral e às abordagens utilizadas, uma vez que utilizamos dados morfoanatômicos e moleculares, enquanto o estudo antecedente se restringiu a dados morfoanatômicos. Esta última abordagem é considerada insuficiente para um grupo com alto nível de diversidade críptica e/ou pseudo-críptica (SISSINI et al., 2014; HERNANDEZ-KANTUN et al., 2016)

Tabela 14: Algas coralináceas incrustantes registradas nos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D). Os dados apresentados são referentes às três campanhas cuja composição específica não variou sazonalmente. O símbolo "+" indica presença e o símbolo "-" indica que a espécie não foi encontrada.

	Sítio de coleta							
	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21
Corallinales								
<i>Harveyolithon roseum</i>	+	-	-	+	-	-	-	+
<i>Hydrolithon farinosum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Lithophyllum corallinae</i>	-	-	-	+	-	-	-	-
<i>Lithophyllum prototypum</i>	-	+	-	-	-	-	-	-
<i>Lithophyllum</i> sp. 1	-	+	-	-	+	+	-	+
<i>Neogoniolithon brassica-florida</i>	-	+						
Hapalidiales								
<i>Mesophyllum</i> sp.	+	+	-	-	-	+	-	-
<i>Phymatolithon</i> sp.	-	-	+	-	-	-	-	-
<i>Lithothamnion crispatum</i>	+	+	+	+		+	+	+
<i>Lithothamnion</i> sp.1	-	+	-	-	+	+	-	-
Sporolithales								
<i>Sporolithon episporum</i>	-	+	+	-	-	-	-	-
<i>Sporolithon</i> sp. 1	-	-	-	-	+	-	-	-

Figura 37: Aspecto geral e estruturas reprodutivas de algas coralináceas incrustantes coletadas nos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D). Chave: A= *Harveyolithon roseum*. B= Conceptáculos uniporados de *Harveyolithon roseum*. C= *Lithophyllum* sp. 1. D:= Conceptáculos uniporados de *Lithophyllum* sp. 1. E= *Lithothamnion crispatum*. F= Conceptáculos tetrasporangiais multiporados de *L. crispatum* com depressões ao redor dos poros (característica diagnóstica). G= *Sporolithon episporum*. H= Soros de *S. episporum*.



### 2.3.2. Comparações com estudos prévios

A costa centro-norte do Espírito Santo abriga alta diversidade de macroalgas, com ocorrência sintópica de espécies características do Nordeste e do Sul-Sudeste (GUIMARÃES, 2003), resultando numa das floras marinhas mais diversas da costa brasileira (HORTA et al., 2001; GUIMARÃES, 2003; 2006). No entanto, dados quantitativos pretéritos ao Desastre são escassos. Os chamados bancos de macroalgas foram alvo de estudo prévio (GOLDER, 2016a) com diversos sítios de amostragem comuns aos do

PMBA, no qual os sítios D15-17 (ao norte da APA) foram tratados como afetadas pelo Desastre, enquanto D19-21 (ao sul da APA) foram consideradas “controles”. Os sítios D17 e D21 também foram alvo de outro estudo prévio ao Desastre, no verão de 2012 (SCHERNER et al., 2013; GOLDER, 2016a). Entretanto, as amostragens de 2016 (GOLDER, 2016a) e 2018 (1ª campanha do PMBA) são distintas sazonalmente dos dados pré-Desastre (verão 2012). Apesar dessas limitações, inerentes à variação sazonal e falta de replicação temporal robusta, um contraste entre os resultados do PMBA e os dos estudos prévios revela variações importantes (Figura 38 e Tabela 15). Ao se confrontar valores médios de cobertura de macroalgas no verão de 2012 (SCHERNER et al., 2013; GOLDER, 2016a) com aqueles do verão de 2019 (2ª campanha do presente estudo) é possível observar aumento expressivo na cobertura de *Sargassum* spp., juntamente com redução na cobertura de algas calcárias articuladas e *Caulerpa* spp.. Entre 2012 e 2019 nota-se também redução de cerca de 22% na cobertura total de macroalgas em D17 (sítio considerado “afetado” nos estudos prévios) e aumento de cerca de 10% em D21 (“controle”) (Figura 39). No ponto D17 houve redução substancial na cobertura de *Ulva* sp., de 13,9 % em 2012 para 0% em 2019. Durante o mesmo período, a mesma espécie teve aumento de 0,2 a 4,27% de cobertura no sítio D21.

KAWAMATA et al. (2011, 2012) demonstraram que *Sargassum* pode apresentar alta tolerância a soterramento parcial por sedimento, prosperando em ambientes com deposição de sedimento fino (0,5-2 mm). Portanto, uma possível deposição de sedimento fino oriundo do Desastre pode estar relacionada com o aumento expressivo na abundância de *Sargassum*. No sentido oposto, a redução de *Ulva* spp. em D17 também pode ser resultado deste processo, uma vez que a deposição e ressuspensão de sedimento fino podem reduzir sua sobrevivência e biomassa (SFRISO; MARCOMINI, 1996; PARK; HWANG, 2010). Como apresentado nos resultados sedimentológicos (veja Item 2), o sítio D17 apresentou granulometria mais fina em relação a D21 (dominância por areia e cascalho, respectivamente). Por ora, como não há grande disponibilidade de dados pretéritos que permitam aferir padrões da dinâmica temporal natural dessas espécies na região, não é possível inequivocadamente atribuir as alterações na cobertura de macroalgas diretamente ao Desastre. Por outro lado, a marcante variação observada na cobertura de macroalgas entre os períodos anteriores e posteriores ao Desastre (Figura 39) demonstra claramente o imperativo de se monitorar a flora marinha local, já que somente assim o efeito direto de diferentes forçantes pode ser evidenciado sobre as comunidades ao longo do tempo. Também fica evidente a precariedade dos *baselines* ambientais em áreas marinho-costeiras vulneráveis a acidentes com barragens de rejeitos, visto que o inventário de macroalgas foi ampliado em todos os sítios, alguns deles com mais do triplo de espécies identificadas por empresas de consultoria ambiental antes do desastre (e.g. D15) e até com registros de espécies novas para a ciência.

Figura 38: Cobertura por macroalgas nos recifes adjacentes ao litoral na Área D (APA-REVIS) estimadas em diferentes períodos do ano, por diferentes autores. Verão de 2012 (SCHERNER et al., 2013; GOLDER, 2016a), outono de 2016 (GOLDER, 2016a), primavera de 2018 e verão de 2019 (presente estudo).

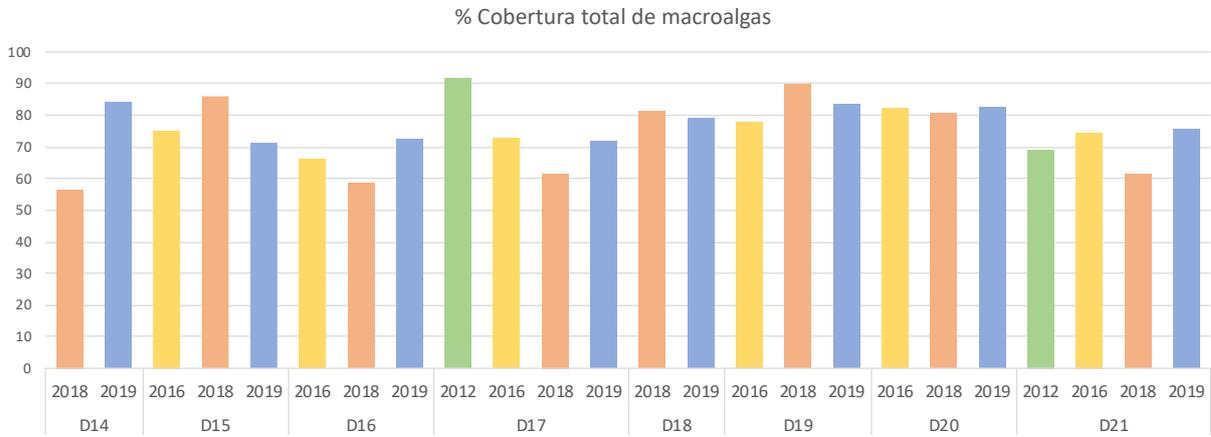
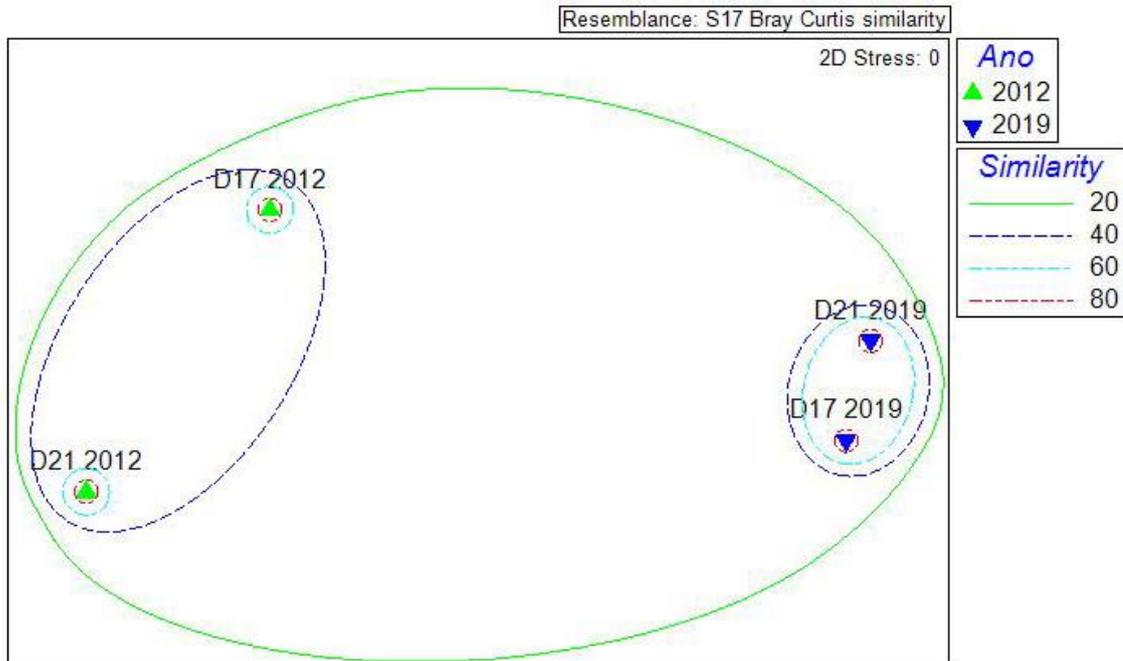


Tabela 15: Cobertura (%) média dos grupos de macroalgas no verão de 2012 (SCHERNER et al., 2013, compilado por GOLDER, 2016a) e verão de 2019 (presente estudo) nos dois sítios amostrais da APA-Costa das Algas (D17 e D21) que constam dados pré e pós desastre.

Tabela 1	Sítio de coleta			
	D17		D21	
	2012	2019	2012	2019
Rhodophyta				
Calcária articulada	15,1	1,2	15,8	3,29
Calcária incrustante	0,0	0,9	0,0	11,73
Ochrophyta				
<i>Colpomenia</i> spp.	0,2	0,1	1,4	0,36
Dictyota/Dictyopteris	0,1	10,6	0,8	0,80
<i>Lobophora</i> spp.	0,1	2,4	0,0	1,07
<i>Padina</i> spp.	0,0	2,8	5,0	0,44
<i>Sargassum</i> spp.	11,8	37,5	0,0	49,78
<i>Zonaria</i> spp.	0,2	1,6	0,0	0,00
Chlorophyta				
<i>Anadyomene stellata</i> (Wulfen) C.Agardh	0,6	0,0	3,8	0,1
<i>Caulerpa</i> spp.	9,8	0,2	3,8	0,36
<i>Cladophora</i> spp.	0,0	4,4	0,0	0,00
<i>Codium</i> spp.	0,5	0,0	8,5	0,09
<i>Halimeda</i> spp.	7,0	0,4	1,1	1,33
<i>Ulva</i> spp.	13,9	0,0	0,2	4,27
Tufos*	0,0	1,8	17,0	0,09
Outras macroalgas	32,1	8,1	11,6	1,86
Total	91,4	71,8	69,0	75,6

Figura 39: Escalonamento multidimensional (MDS) baseado na cobertura média dos principais grupos de macroalgas encontradas nos sítios D17 e D21 em período pré (verão de 2012) e pós desastre (verão de 2019).



### 2.3.3. Cobertura bentônica dos recifes costeiros adjacentes ao litoral da APA-REVIS

A cobertura dos recifes costeiros adjacentes ao litoral foi acessada em duas campanhas (dados da terceira e quarta campanhas em processamento), uma em setembro (“primavera”) de 2018 e outra em janeiro (“verão”) de 2019. Macroalgas dominaram a cobertura, variando entre 47-81% em setembro e entre 69-84% em janeiro (Figura 40), com aumento significativo no verão (PERMANOVA;  $F = 3,916$ ;  $p = 0,0066$ ). Esse resultado, embora preliminar, corrobora a sazonalidade já apontada para a flora marinha do Espírito Santo (AMADO-FILHO et al., 2007, 2010; GUIMARÃES; AMADO-FILHO, 2008; MARINS et al., 2014). O percentual de cobertura de “turf” diminuiu entre as campanhas (PERMANOVA;  $F=14,37$ ;  $p=0,0002$ ) e o de sedimento se manteve constante (PERMANOVA;  $F=0,667$ ;  $P = 0,4802$ ). Em setembro, *Sargassum* spp. foi dominante, com cobertura média de 38%, seguido por *Ulva* e *Padina*, com 2,8 e 2,5%, respectivamente. Em janeiro *Sargassum* spp. se manteve dominante, com média de 44%, seguido por *Dictyota* (4,2%) e *Cladophora* (4%). Invertebrados (0-13%) foram os componentes menos abundantes, sendo os zoantídeos os invertebrados mais representativos (Figura 40). Não foi observado nenhum padrão latitudinal consistente na variação da diversidade. A diversidade de Shannon e a equitabilidade de Pielou foram maiores em janeiro, no sítio 16 ( $H' = 2,95$ ;  $J = 0,82$ ), enquanto que valores menores foram observados no sítio 19, em janeiro ( $H' = 1,59$ ;  $J = 0,43$ ).

Dadas as características peculiares desses recifes, submetidos a múltiplas fontes locais de variação, juntamente com a possível influência regional do Desastre, elaboramos um modelo DISTLM associado

a uma análise de redundância (dbRDA) com dados da cobertura dos principais organismos, nas duas campanhas (Figura 41). Esse modelo incorporou um conjunto abrangente de possíveis forçantes: distância da desembocadura dos rios Doce, Reis Magos e Piraque-Açú, granulometria dos sedimentos (areia, silte e cascalho), área dos recifes (estimada a partir de imagens de satélite), distância da foz do rio Doce, teor de cascalho, teor de areia, teor de silte. Por termos utilizado dados oriundos de apenas duas campanhas cujas imagens já foram totalmente processadas, não incluímos o tempo como variável preditora. No entanto, a partir do deslocamento dos scores das amostras das diferentes campanhas, já é possível observar algumas variações de natureza temporal (Figura 41 e Tabela 16), o que será explorado na medida em que os dados do PMBA vão sendo consolidados.

Nesse esforço inicial de síntese destacaram-se, como indutores da estrutura e da dinâmica dos recifes costeiros, a influência preponderante das drenagens locais, especialmente do rio local mais antropizado (Reis Magos), da fração de areia depositada nos recifes (indicando proximidade da fonte e hidrodinamismo) e a distância da foz do rio Doce (Figura 41). Ressaltamos que os rios Laranjeiras (menor) e Piraquê-Açu (mais bem conservado), se mostraram menos influentes do que o Reis Magos, mais impactado por atividades humanas. Além disso, a distância do rio Doce foi uma variável menos importante, porém significativa, na estruturação das comunidades dos recifes costeiros, demonstrando que a dinâmica do rio Doce pode influenciar as comunidades recifais em escala regional, confirmando a relevância do monitoramento em longo prazo, com replicação temporal. A deterioração crônica das condições do rio Doce pode acarretar no aumento de sua importância relativa na estruturação das comunidades bentônicas.

Figura 40: Cobertura bentônica dos recifes adjacentes ao litoral na APA-REVIS (Área D, sítios acessados por terra). Chave: (P)= Primavera, setembro de 2018; (V)= Verão, janeiro de 2019. A. Abundância relativa (% de cobertura) de organismos bentônicos e sedimento por sítio de amostragem. B. Abundância relativa (% de cobertura) dos principais grupos de macroalgas.

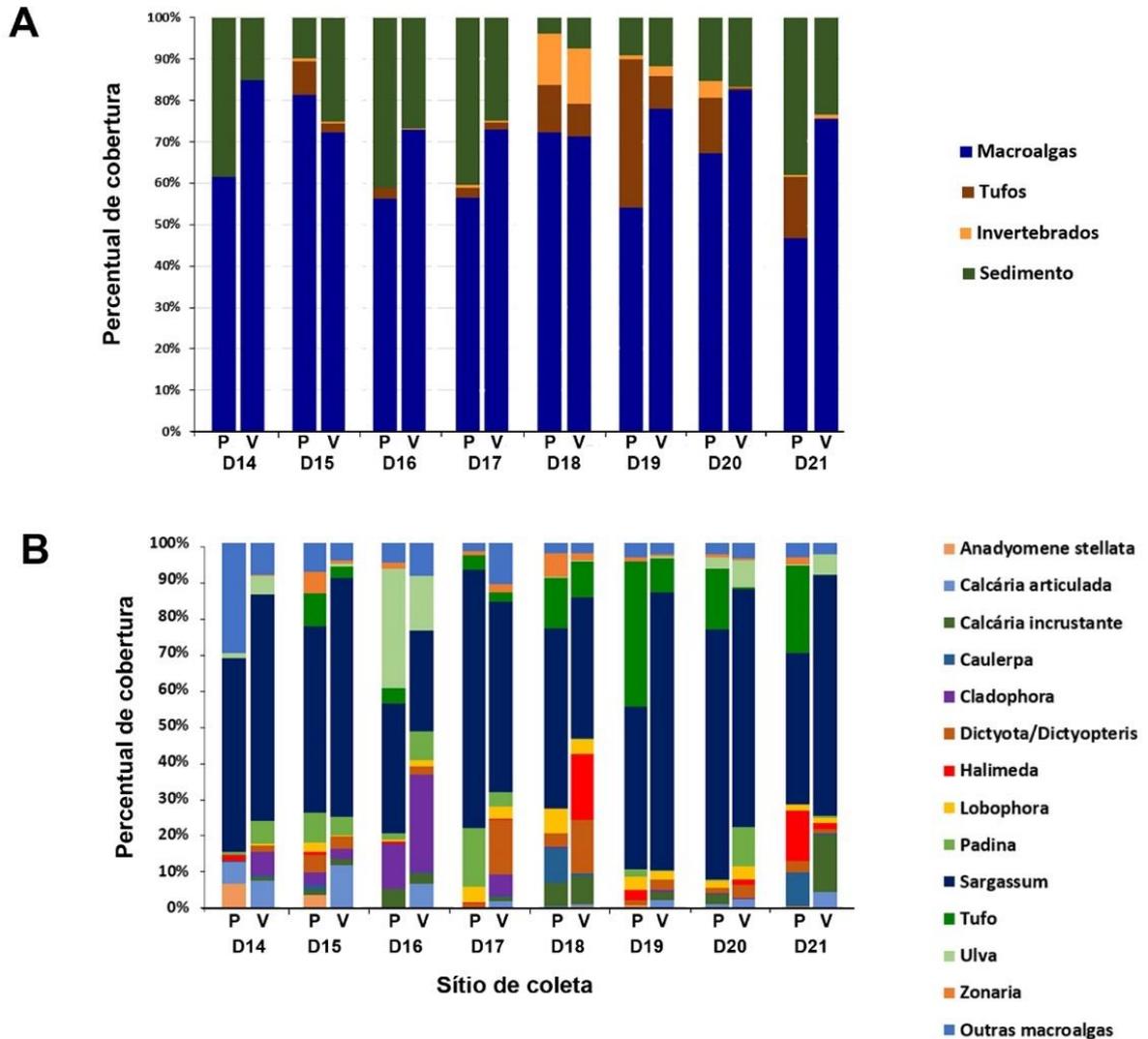


Figura 41: Análise de redundância dbRDA baseada no modelo DISTLM com dados de cobertura dos recifes costeiros e um amplo conjunto de variáveis explicativas (dados das duas campanhas, variáveis detalhadas no texto).

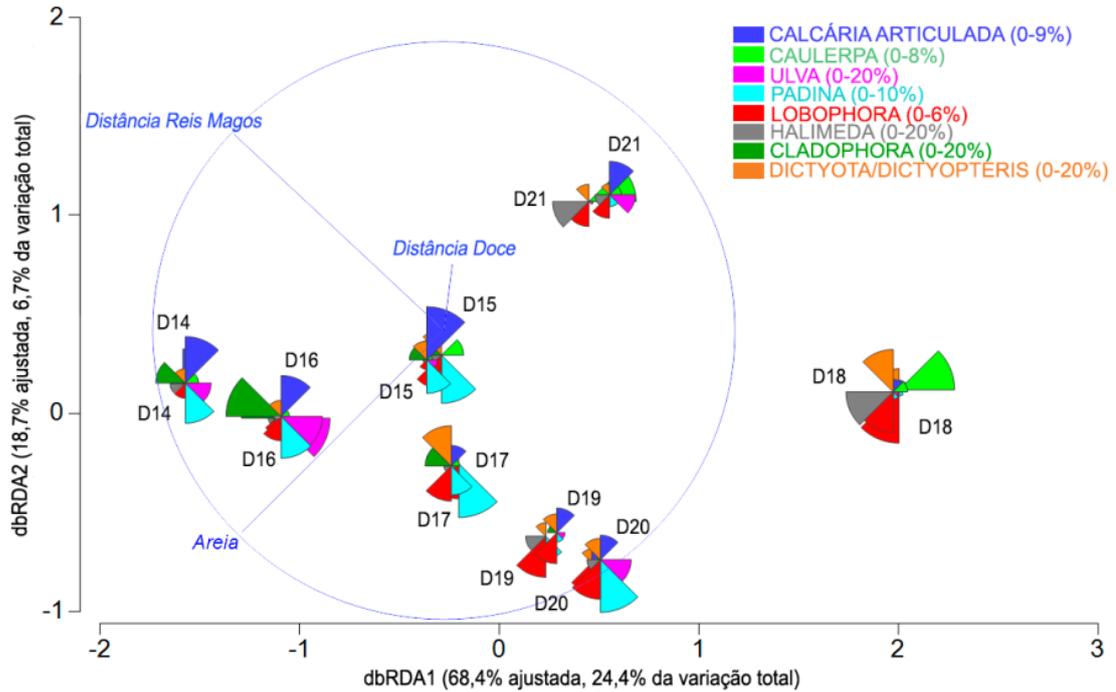


Tabela 16: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distância (DISTLM) com os dados com dados de cobertura dos recifes costeiros e um amplo conjunto de variáveis explanatórias (dados das duas campanhas, variáveis detalhadas no texto). As variáveis 1, 4 e 8 correspondem à distância do rio Reis Magos, teor de areia e distância da foz do rio Doce, respectivamente.

<b>Testes Marginais</b>				
<b>Variável</b>	<b>SS</b>	<b>Pseudo-F</b>	<b>P</b>	<b>Prop.</b>
Dist. Rio Doce	9,5938	2,2669	0,0386	0,13936
Cascalho	10,946	2,6469	0,0189	0,159
Areia	11,047	2,6758	0,0197	0,16046
Silte	3,5702	0,76575	0,6172	0,05186
Dist. Reis Magos	10,241	2,4464	0,0242	0,14875
Dist. Piraquê Açú	5,3812	1,1871	0,2951	0,07817
Área	4,793	1,0476	0,3851	0,06962
<b>Melhores Soluções Globais</b>				
<b>AIC</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RSS</b>	<b>No. Vars</b>	<b>Seleções</b>
24,306	0,35605	44,332	3	1;4;8
24,307	0,356	44,335	3	1;3;8
24,481	0,34895	44,821	3	4;8;9
24,49	0,34861	44,844	3	3;8;9

#### 2.4. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES ASSENTADAS EM ESTRUTURAS ARTIFICIAIS

As CAUs (“Calcification Accretion Unit”) são estruturas artificiais de colonização, padronizadas e construídas em material atóxico (PRICE et al. 2012; REIS et al. 2016). Essas estruturas mimetizam habitats recifais expostos à luz e ao hidrodinamismo, bem como habitats mais crípticos, sendo utilizadas como alternativa a medições feitas diretamente na superfície do recife. Trata-se de uma ferramenta que, embora possa ser seletiva, permite controlar fontes de variabilidade difíceis de medir no substrato natural. A partir de medições na variação na massa das CAUs e de sua composição é possível estimar a produção de CaCO<sub>3</sub> no ambiente estudado em um determinado período, guardando relação com os diferentes organismos bentônicos colonizadores. Dentre as principais aplicações desta metodologia destaca-se a detecção de alterações nas taxas de calcificação da comunidade bentônica recifal, bem como a quantificação da massa dos organismos calcificadores e não-calcificadores, as quais representam proxies da saúde do sistema recifal (REIS et al. 2016).

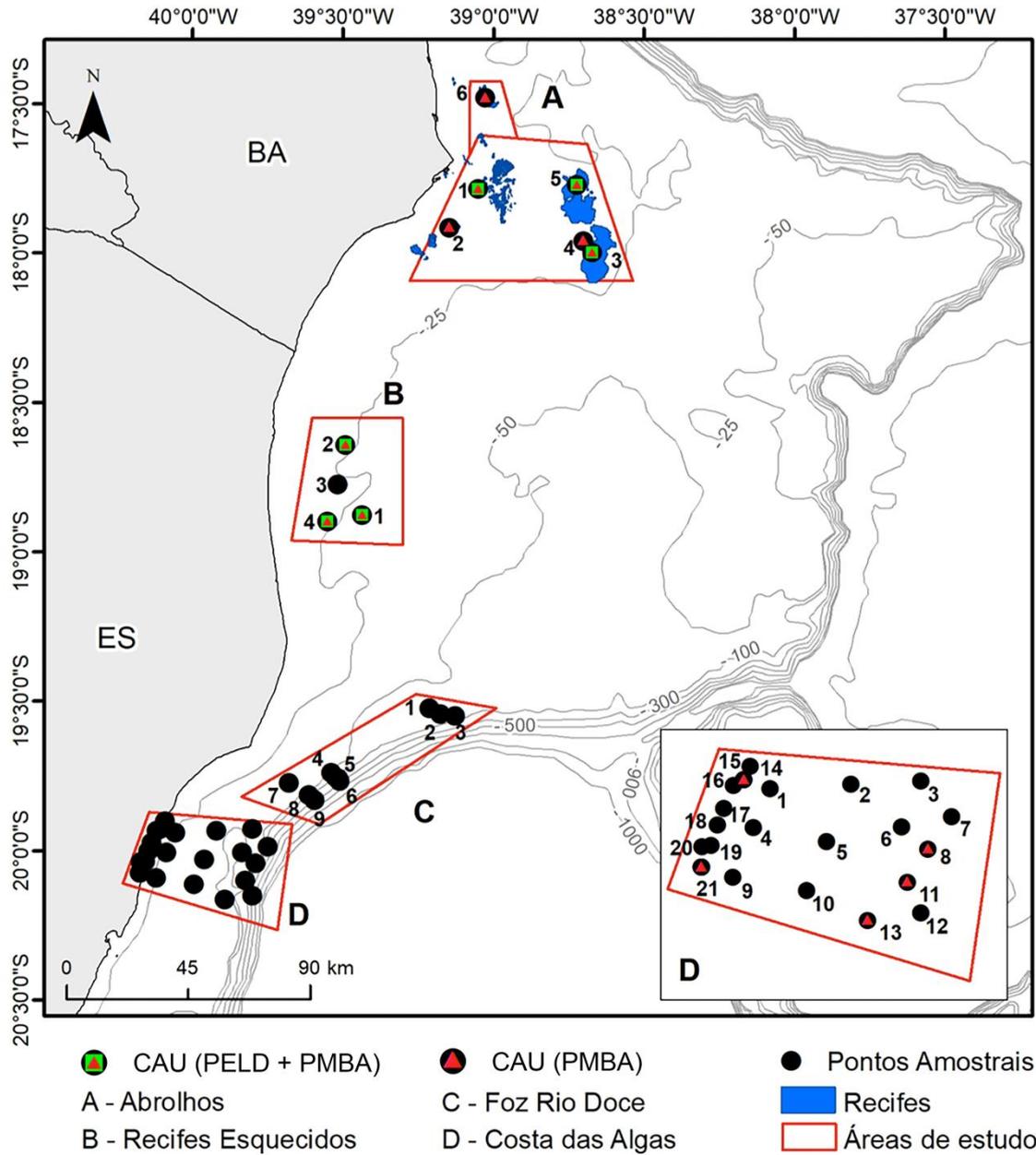
Uma vez que as estruturas artificiais precisam residir no recife por pelo menos um ano, os dados aqui apresentados foram obtidos com base em estruturas construídas e instaladas antes da implementação do PMBA, no âmbito do PELD Abrolhos, instaladas nas Áreas A (Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos). Portanto, os resultados se referem a uma malha amostral ainda incompleta, mas já informativa acerca do balanço carbonático da região afetada pelo Desastre, trazendo os primeiros dados acerca do balanço carbonático nos Recifes Esquecidos, mais próximos à foz do rio Doce, e

também os primeiros resultados com estruturas de colonização em bancos de rodolitos (Sítio A5). A Figura 42 e Quadro 3 trazem um resumo da malha amostral e do status dos experimentos com CAUs.

Quadro 3: Distribuição das amostragens das CAUs no âmbito do PMBA e dados pretéritos incorporados à análise (PELD). AP = Amostrado e Processado; NA = Não amostrado; PR = Programado/em execução; (n) = número de réplicas.

Área	Código da estação	PELD (Inst Abril/18, Retir Mar/19)			PMBA (Inst. janeiro/19, Retirada dez/19)		
		Status	CAUs (n)	Dataloggers (n)	Status	CAUs (n)	Dataloggers (n)
A	A1	AP	3	2	PR	5	2
	A2	NA			PR	5	2
	A3	AP	3	0	PR	5	2
	A4	NA			PR	5	2
	A5	AP	3	0	PR	5	2
	A6	NA			PR	5	2
B	B1	AP	3	2	PR	5	2
	B2	AP	3	2	PR	5	2
	B4	AP	3	2	PR	5	2
D	D8	NA			PR	5	2
	D11				PR	5	2
	D13				PR	5	2
	D15				PR	5	2
	D21				PR	5	2

Figura 42: Localização das estruturas artificiais de colonização (CAUs), incluindo informações sobre aquelas instaladas antes do PMBA. Os dados apresentados se referem a estruturas instaladas antes do PMBA, uma vez que o tempo de residência no recife deve ser de 12 meses.



#### 2.4.1. Produção de carbonato de cálcio e massa não calcária

Durante o período de 2018-2019, a produção média de  $\text{CaCO}_3$  diferiu entre áreas (ANOVA;  $F = 13.83$ ;  $p = 0.0018$ ), tendo alcançado  $307 \pm 79 \text{ g. m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$  nos recifes de Abrolhos (Área A) e  $167 \pm 80 \text{ g. m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$  nos Recifes Esquecidos (Área B). Em relação aos sítios, A1 ( $300 \pm 8 \text{ g. m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ ) e A5 ( $346 \pm 107 \text{ g. m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ ) apresentaram maior produção de  $\text{CaCO}_3$  em relação a B2 ( $100 \pm 22 \text{ g. m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ ) (ANOVA;  $F = 5.14$ ;  $0.0094$ ) (Tabela 17).

A média de massa não calcária também diferiu entre áreas (ANOVA;  $F = 7.4$ ;  $p = 0.0151$ ), alcançando  $64 \pm 45 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$  nos recifes de Abrolhos (Área A) e  $23 \pm 11 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$  nos Recifes Esquecidos (Área B). Em relação aos sítios, A5, um banco de rodolitos, apresentou a maior massa não calcária (ANOVA;  $F = 22.075$ ;  $p = 0.0001$ ) (Tabela 17). A razão entre a massa calcária e não calcária também foi calculada, de maneira exploratória. Apesar dos sítios terem apresentado diferenças entre as massas calcárias e não calcárias, a razão entre a massa calcária e não calcária não diferiu entre as áreas (ANOVA;  $F = 7.363$ ;  $p = 0.195$ ).

Dados publicados por REIS et al. (2016) para 2012-2014, na Área A, foram utilizados para comparar a produção média de  $\text{CaCO}_3$  e de massa orgânica nos sítios A1 e A3 em relação ao período aqui enfocado (2018-19). Dessa forma, foi possível observar que a produção de  $\text{CaCO}_3$  em A1 não apresentou diferença entre períodos (ANOVA;  $F = 0.7133$ ;  $p = 0.6014$ ), assim como não houve diferenças na massa orgânica (ANOVA;  $F = 2.7381$ ;  $p = 0.0894$ ) (Tabela 18). Em A3, a produção de  $\text{CaCO}_3$  também não diferiu entre anos (ANOVA;  $F = 0.69$ ;  $p = 0.5373$ ), assim como a massa orgânica, que permaneceu similar (ANOVA;  $F = 0.83$ ;  $p = 0.4805$ ) (Tabela 18). No entanto, a razão massa carbonática/orgânica em A1 demonstrou diferença entre os períodos (ANOVA;  $F = 23,74$ ;  $p = 0,0014$ ), associada ao fato de 2018-19 ter apresentado maior proporção de massa. Por outro lado, A3 não apresentou diferenças nessa razão entre períodos (ANOVA;  $F = 0,71$ ;  $p = 0,5287$ ). Conclui-se que, durante os períodos avaliados (2012-14 e 2018-19), o balanço entre massa carbonática e orgânica se manteve positivo na Área A.

Uma Análise de Componentes Principais (ACP) considerando a massa carbonática (CARBONÁTICO) e orgânica (ORGÂNICO) nos seis sítios estudados, e incorporando turbidez (K490), SST e distância da costa (DistCosta), foi realizada para explorar a variabilidade nos dados (Figura 43). A variável turbidez em Dim 1 esteve associada à discriminação de A1 (Pedra de Leste), costeiro, em relação aos demais sítios (a variável distância da costa foi inversamente relacionada à turbidez). Os outros sítios de Abrolhos (A3, Parcel dos Abrolhos e A5, um banco de rodolitos), abrangeram o quadrante superior esquerdo do diagrama de ordenação, associado às variáveis massa orgânica, massa carbonática e latitude. Mesmo que a produção de  $\text{CaCO}_3$  não tenha apresentado diferenças entre sítios da área A (Tabela 16), a discriminação de A1 (Pedra de Leste) reforça a influência da sedimentação continental, principalmente por se tratar de um sítio mais próximos à costa, em oposição a A3 e A5, localizados no

arco externo. Os dados das armadilhas a serem analisadas no segundo ciclo de execução do PMBA irão complementar esse panorama. Em relação à massa orgânica, A5 demonstrou diferença em relação a todos os demais (Tabela 17), corroborando o distanciamento desse sítio no quadrante superior esquerdo da PCA. Essa distinção está relacionada ao fato de A5 representar um banco de rodolitos, com participação expressiva de organismos construtores de crescimento lento, como CCA (AMADO-FILHO et al. 2012). Em relação a Área B, os sítios se agruparam no quadrante superior direito da PCA, em oposição aos sítios da Área A. Este resultado é congruente com menor produção de  $\text{CaCO}_3$  e massa orgânica das CAUs da Área B (Tabela 17). Mesmo que os sítios desta área possam apresentar fisionomias e características físicas diferentes, tanto entre si quanto com relação aos de Abrolhos (Área A), o monitoramento do balanço entre a produção de  $\text{CaCO}_3$  e a massa orgânica é crucial para o entendimento da dinâmica recifal e a saúde do ecossistema (HUGHES et al. 2010).

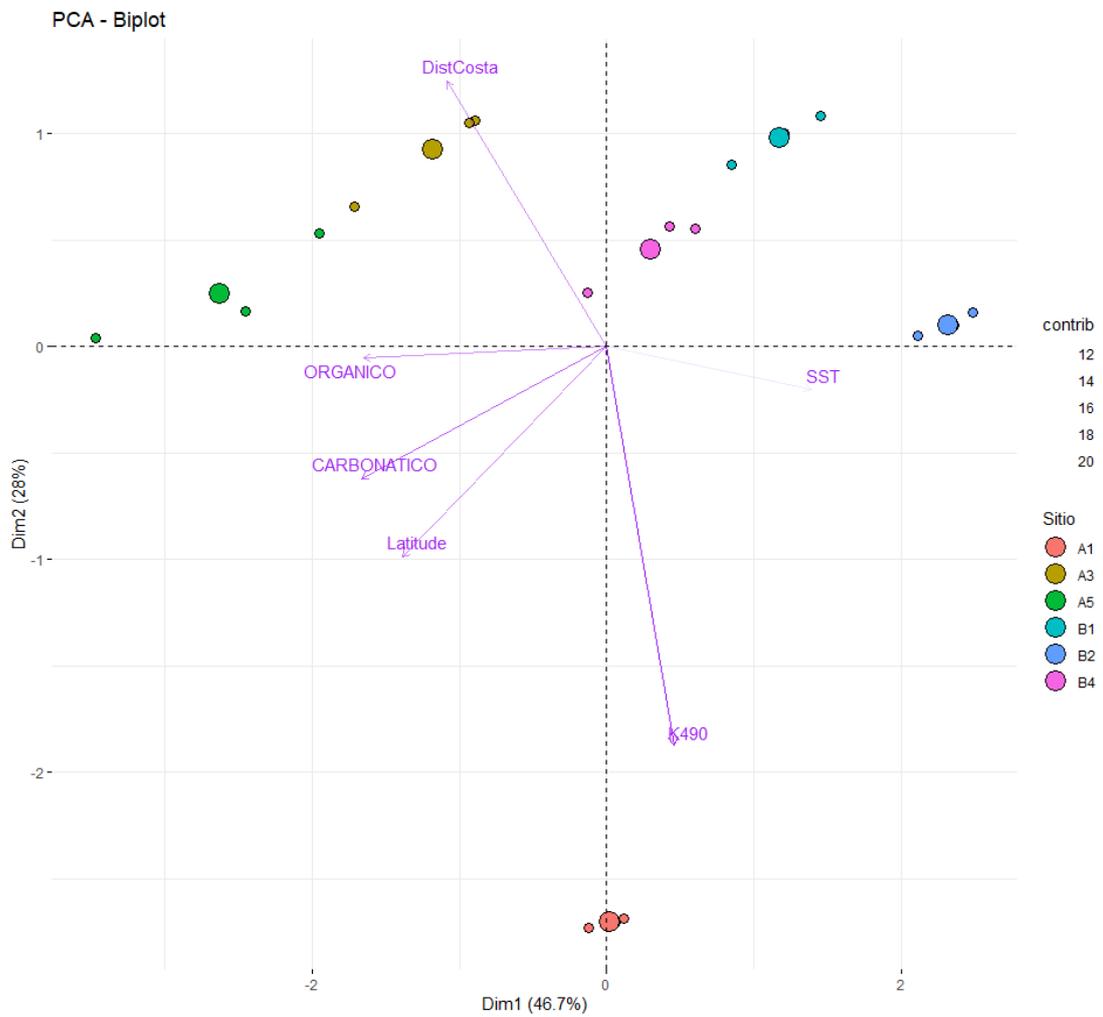
Tabela 17: Produção de carbonato de cálcio ( $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ), massa não calcária ( $\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) (média  $\pm$  DP) e razão (carbonático/massa não calcária) em A1 (Pedra de Leste), A3 (Parcel dos Abrolhos), A5 (Banco de Rodolito Raso), B2 (Recife Esquecido Norte), B4 (Recife Esquecido Sul), B1 (Banco de Rodolito ES) após um ano de colonização durante 2018-2019.

	Sítios	Produção de carbonato ( $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	Massa não calcária ( $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ )	Razão carbonático/ massa não calcária
2018-2019	A1	300 $\pm$ 8	38 $\pm$ 6	8.0 $\pm$ 1.2
	A3	275 $\pm$ 99	35 $\pm$ 1	7.9 $\pm$ 3.1
	A5	346 $\pm$ 107	119 $\pm$ 32	3.0 $\pm$ 1.2
	B2	100 $\pm$ 22	14 $\pm$ 7	7.8 $\pm$ 2.5
	B4	248 $\pm$ 76	34 $\pm$ 8	7.5 $\pm$ 2.5
	B1	155 $\pm$ 49	20 $\pm$ 5	7.8 $\pm$ 0.7

Tabela 18: Produção de carbonato de cálcio ( $\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ), massa não calcária ( $\text{g.m}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) (média  $\pm$  DP) e razão (carbonático/massa não calcária) em A1 (Pedra de Leste) e A3 (Parcel dos Abrolhos) após um ano de colonização (2018-2019), em comparação com dados prévios (2012-2014) (REIS et al., 2016).

	Sítios	Produção de carbonato ( $\text{g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	Massa não calcária ( $\text{g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )	Razão carbonático/massa não calcária
2012-2013	A1	218 $\pm$ 105	68 $\pm$ 23	3.1 $\pm$ 1.0
	A3	228 $\pm$ 52	46 $\pm$ 16	5.7 $\pm$ 3.4
2013-2014	A1	263 $\pm$ 5	64 $\pm$ 7	4.2 $\pm$ 0.5
	A3	299 $\pm$ 68	36 $\pm$ 10	9.1 $\pm$ 4.0
2018-2019	A1	300 $\pm$ 8	38 $\pm$ 6	8.0 $\pm$ 1.1
	A3	275 $\pm$ 99	35 $\pm$ 1	7.9 $\pm$ 3.1

Figura 43: Análise de Componentes Principais com a distribuição dos sítios (A1, A3, A5, B1, B2, B4) entre os eixos Dim1 e Dim2 a partir da incorporação das variáveis K490 (turbidez), latitude, temperatura, distância da costa, massa carbonática e massa orgânica.



#### 2.4.2. Cobertura de organismos nas CAUs

A estrutura das comunidades que colonizaram as CAUs foi diferente entre Áreas (ANOVA;  $F = 7,69$ ;  $p = 0,0089$ ) (Tabela 19), muito embora o percentual total de organismos construtores não tenha diferido (ANOVA;  $F = 1,3$ ;  $p = 0,2709$ ) (Tabela 19 e Tabela 20). A PCA discriminou os sítios B1 e A5, bancos de rodolitos, dos demais sítios recifais, em ambas Áreas. As CAUs do banco de rodolitos da Área A se discriminaram das do banco de rodolitos da Área B por apresentarem mais macroalgas e *turf*, um padrão possivelmente relacionado ao ambiente deposicional distinto, à maior profundidade e menor incidência luminosa em B1 (30 m), bem como ao gradiente regional de riqueza de macroalgas (Figura 44). Por exemplo, é possível que a menor incidência luminosa em B1 não favoreça a colonização por macroalgas folhosas. Além disso, o único grupo de organismos não construtores nas CAUs de B1 foi Ascidiacea. Esse contraste de B1 fica evidente ao se comparar a cobertura de grupos não construtores, que revela diferença significativa entre locais (*PERMANOVA*;  $F = 7,198$ ;  $p = 0,0002$ ).

Ressalta-se também que recrutas de corais só ocorreram em A1 (Pedra de Leste) e A3 (Parcel dos Abrolhos), indicando maior limitação no recrutamento na Área B e também ao longo do gradiente *cross-shelf*. O aporte terrígeno e a turbidez estiveram associados à variação entre os sítios recifais, discriminando as CAUs do Parcel dos Abrolhos das demais (Pedra de Leste e Área B), em posição mais costeira. Em oposição ao padrão observado para os recrutas de corais, na Área A os briozoários foram mais abundantes em A3 (Parcel dos Abrolhos), corroborando a estrutura descrita por Bastos et al. (2018), que identificaram esse grupo como o principal construtor recifal no Parcel dos Abrolhos. Briozoários são sensíveis à altas taxas de sedimentação e turbidez (TAYLOR, 2005; AZEVEDO et al., 2006), o que pode explicar a baixa cobertura desse grupo nas CAUs da Pedra de Leste, um recife mais próximo à costa e com maior aporte de sedimentos. Em resumo, a abundância e composição de organismos colonizadores nas CAUs indica que a Área B (recifes e banco de rodolitos), mais próxima à foz do rio Doce, corresponde a um ambiente menos produtivo em comparação à Área A, representando um sistema recifal mais degradado e possivelmente menos resiliente, como indica o baixo recrutamento de corais observado nessa Área.

Registros diários da temperatura superficial da água do mar (SST) obtidos na estação virtual *Coral Reef Watch* (CRW) ([coralreefwatch.noaa.gov](http://coralreefwatch.noaa.gov)) para Abrolhos (17°13'S, 39°04'W), bem como os dados dos *loggers* (HOBO Pendant UA-002-64, em processamento), revelam que o período da residência das CAUs, entre março de 2018 e fevereiro de 2019, foi positivamente anômalo (Figura 45). As temperaturas *in situ* variaram de 24,5°C a 29,7°C, sendo que as médias anuais desses sítios foram 26,0 °C (B1 e B2), 26,3 (B4) e 26,8 (A3). Esses dados de temperatura *in situ* serão incorporados nas análises e modelos com os dados das CAUs instaladas no âmbito do PMBA. Veja também a Figura 72.

Tabela 19: Percentual médio total de cobertura (média  $\pm$  DP) dos organismos construtores e não construtores em cada sítio (A1, A3, A5, B1, B2 e B4) após um ano de colonização.

Sítios	Construtores	Não construtores
A1	41,40 $\pm$ 3,49	27,49 $\pm$ 1,74
A3	38,12 $\pm$ 5,74	39,54 $\pm$ 2,3
A5	13,07 $\pm$ 0,53	47,86 $\pm$ 5,33
B1	9,77 $\pm$ 1,96	31,087 $\pm$ 8,45
B2	24,15 $\pm$ 2,82	21,28 $\pm$ 3,27
B4	36,04 $\pm$ 4,29	13,65 $\pm$ 2,72

Tabela 20: Percentual médio de cobertura ( $\pm$  desvio padrão) de organismos construtores e não construtores em cada sítio (A1, A3, A5, B1, B2 e B4) após um ano de colonização (2018-2019).

Organismo construtor	Sítios					
	A1	A3	A5	B1	B2	B4
Briozoário	2,36 $\pm$ 1,87	23,23 $\pm$ 3,04	8,19 $\pm$ 1,17	2,45 $\pm$ 1,46	2,27 $\pm$ 0,36	4,06 $\pm$ 1,41
CCA	25,45 $\pm$ 1,14	12,58 $\pm$ 1,9	4,76 $\pm$ 0,77	7,15 $\pm$ 0,70	16,12 $\pm$ 1,29	25,58 $\pm$ 4,74
Coral	0,39 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,03	0	0	0	0
Gastrópode	0,09 $\pm$ 0,07	0,60 $\pm$ 0,17	0	2,50 $\pm$ 1,18	4,13 $\pm$ 1,56	0,11 $\pm$ 0,09
Pelecypoda	0	0	0,03 $\pm$ 0,01	1,19 $\pm$ 0,98	0,03 $\pm$ 0,03	0,93 $\pm$ 0,35
Peyssonneliales	12,00 $\pm$ 1,52	3,06 $\pm$ 1,54	0	0	0,37 $\pm$ 0,22	4,73 $\pm$ 1,19
Polychaeta	1,10 $\pm$ 0,76	0,42 $\pm$ ,26	0,09 $\pm$ 0,07	1,00 $\pm$ 0,53	1,22 $\pm$ 0,40	0,62 $\pm$ 0,51
<b>Organismo não construtor</b>						
Turf	17,12 $\pm$ 0,84	27,38 $\pm$ 2,1	16,57 $\pm$ 1,91	0	8,89 $\pm$ 1,94	11,85 $\pm$ 3,47
Ascídia	22,91 $\pm$ 0,69	12,16 $\pm$ 1,084	15,36 $\pm$ 1,63	31,08 $\pm$ 8,57	9,49 $\pm$ 2,508	1,29 $\pm$ 0,4
Chlorophyta	1,86 $\pm$ 0,9	0	0	0	0	0
Ovos de peixe	0	0	0,093 $\pm$ 0,08	0	0	0,46 $\pm$ 0,38
Phaeophyta	0,52 $\pm$ 0,42	0	7,39 $\pm$ 1,47	0	0	0
Rodophyta	0	0	14,89 $\pm$ 4,86	0	0	0
Porífera	0,03 $\pm$ 0,003	0	1,00 $\pm$ 2,54	0	2,89 $\pm$ 1,61	0,04 $\pm$ 0,03

Figura 44: Análise de Componentes Principais (PCA) com dados de cobertura dos diferentes grupos de organismos nas CAUs contrastando os Sítios A1 (Pedra de Leste), A3 (Parcel dos Abrolhos- PAB); A5 (Banco de rodolitos - Abrolhos), B1 (Banco de rodolitos – ES), B2 (Recifes Esquecidos Norte) e B4 (Recifes Esquecidos Sul).

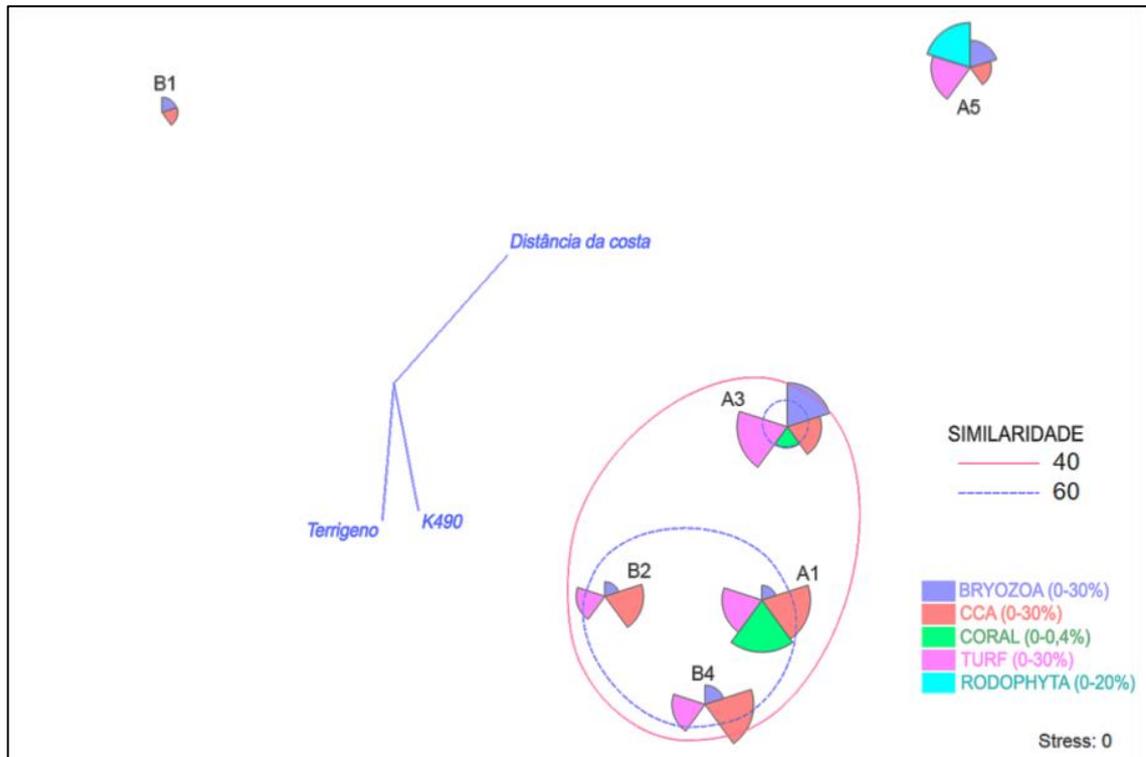
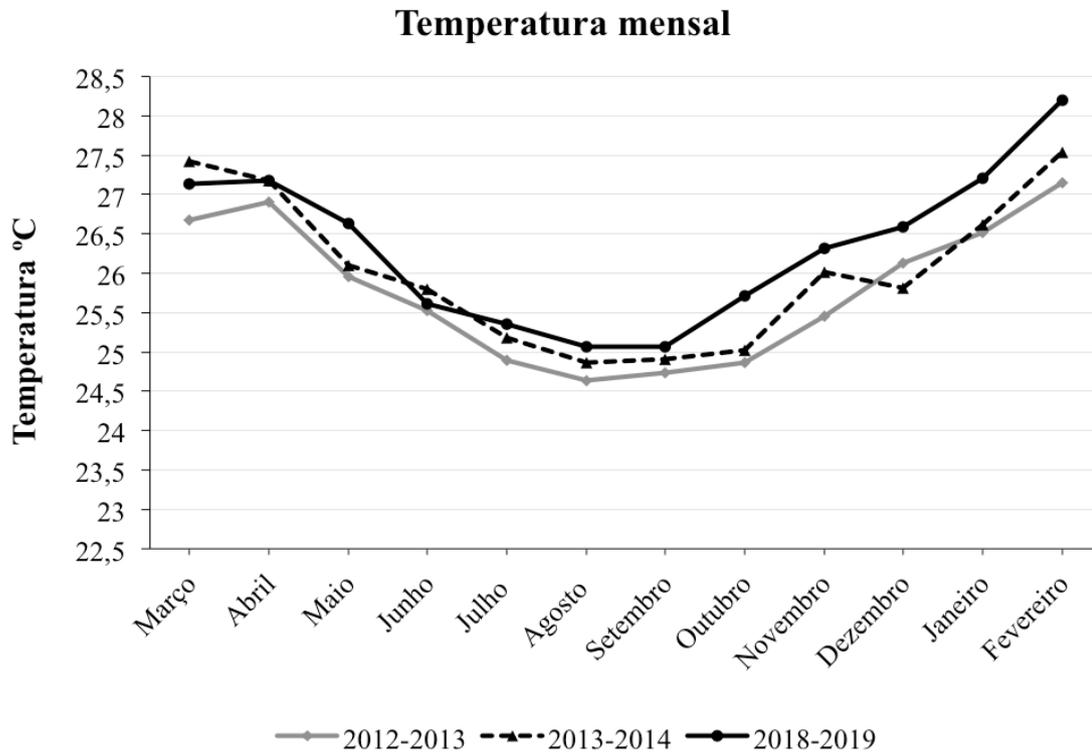


Figura 45: Médias mensais (março a fevereiro) da SST entre os anos estudados (2012-2013, 2013-2014 e 2018-2019) para a região de Abrolhos (17°13'S, 39°04'W), indicando as temperaturas mínima e máxima. Dados obtidos na estação virtual da NOAA Coral Reef Watch (CRW) (coralreefwatch.noaa.gov/vs/data/abrolhos\_reefs.txt).



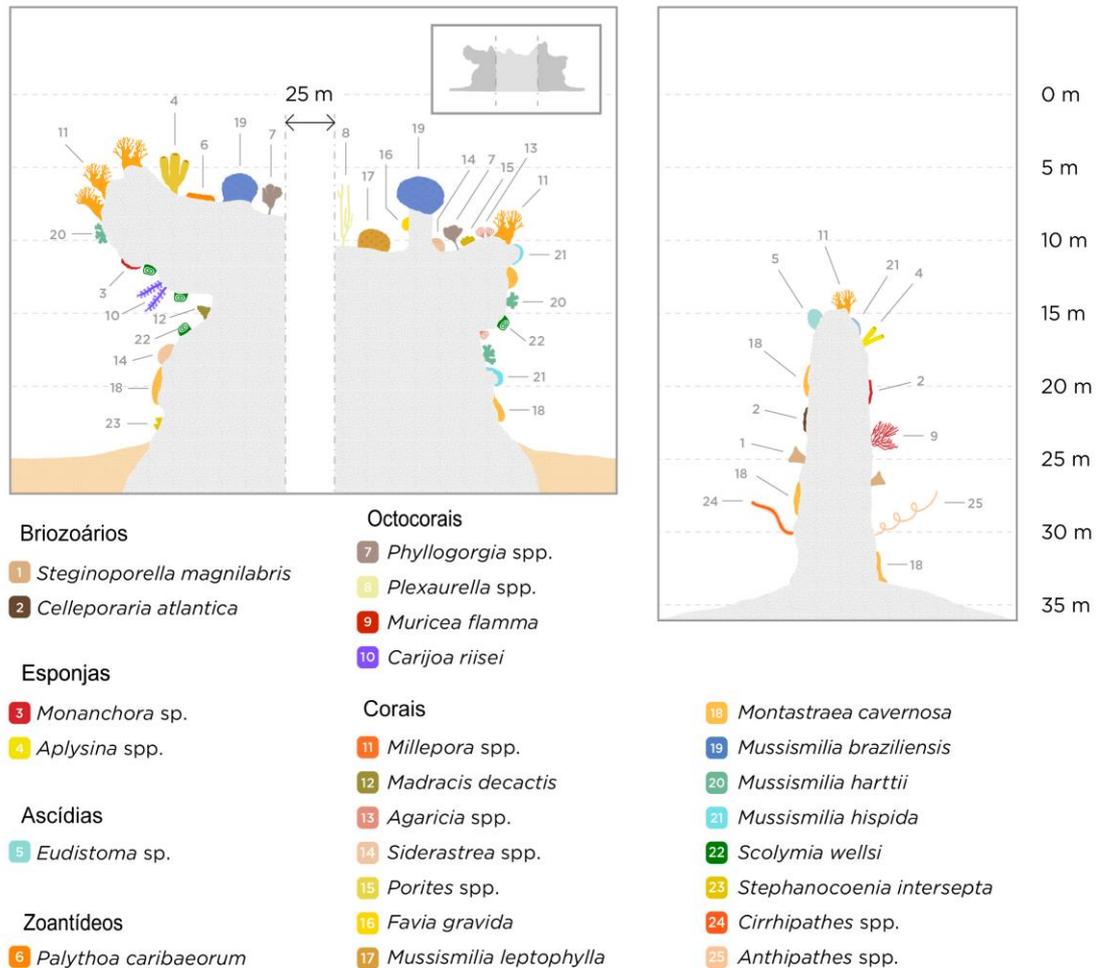
## 2.5. CARACTERIZAÇÃO DE COMUNIDADES RECIFAIS BENTÔNICAS

### 2.5.1. Amostragem quali-quantitativa com fotoquadrados nos recifes das Áreas A e B

Foram instaladas 190 parcelas fixas cobrindo 10 sítios com recifes coralíneos, distribuídos nas Áreas A (PARNAM e adjacências) e B (Recifes Esquecidos) (veja Figura 1). Como alguns desses locais já vinham sendo monitorados no âmbito do PELD Abrolhos, em alguns casos a intervenção *in situ* inicial envolveu apenas a troca de vergalhões desgastados por vergalhões novos, preservando as posições iniciais. Todas essas parcelas foram amostradas na primeira campanha, provendo um *baseline* da cobertura recifal ao início do PMBA (Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 52, Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56, Figura 57e Figura 58). Esses sítios foram subsequentemente amostrados em 2018 e 2019, compondo as análises apresentadas na Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62. Também foram utilizados dados antecedentes ao PMBA, com menor resolução taxonômica (grandes grupos). Esses dados antecedentes estão disponíveis apenas para alguns sítios da Área A (Figura 63, Figura 64 e Figura 65) e foram analisados em separado, de maneira a produzir contrastes temporais robustos e com fontes de variação espacial mais controladas.

O processamento de imagens foi feito na plataforma *CoralNET* (BEIJBOM et al., 2012). A principal fonte de variação na estrutura da comunidade bêntica recifal foi o habitat (topos e paredes), uma vez que boa parte dos recifes da região possuem forma de pináculos (Figura 46) os chamados “chapeirões” (BASTOS et al., 2018). O sítio A4, no Arquipélago dos Abrolhos, é uma exceção notável com relação à essa morfologia peculiar, pois consiste num talude rochoso sobre o qual se desenvolvem corais esparsos ou recifes carbonáticos em franja. Ao nível dos sítios amostrais, a arquitetura ímpar dos pináculos condiciona um regime altamente contrastante de incidência de luz e outras forçantes oceanográficas. Nesse contexto, isolar essa fonte de variação, natural e preponderante, é fundamental para que se possa compreender a estrutura e a dinâmica das comunidades recifais (e.g. FRANCINI-FILHO et al., 2013; RIBEIRO et al., 2018), inclusive no contexto da avaliação dos impactos do Desastre sobre as áreas submetidas à pluma de turbidez (mais restritas) e dispersão de contaminantes dissolvidos na água do mar (mais amplas) (BIANCHINI, 2016).

Figura 46: Representação esquemática dos pináculos conhecidos como "chapeirão", evidenciando suas formas mais típicas e a distribuição de alguns dos principais organismos sobre a estrutura. A estrutura representada à esquerda, em forma cogumelar com topos expandidos lateralmente, é típica das áreas mais rasas, onde os topos estão nivelados com o nível do mar (e.g. Área A, Parcel das Paredes) ou situados em profundidades de até cerca de 10 metros (e.g. Área A, Parcel dos Abrolhos). A morfologia do pináculo representado à direita, com topos estreitos, é típica das áreas mais profundas (e.g. Recife Califórnia). Formas intermediárias também são registradas na região estudada (e.g. Área B, Recifes Esquecidos). Imagem: Rede Abrolhos©.



Quadro 4: Distribuição das amostragens quali-quantitativas com fotoquadrados no âmbito do PMBA e dados antecedentes incorporados às análises. As células hachuradas representam amostras processadas em resolução taxonômica máxima (gêneros e espécies) e utilizadas nos modelos e análises multivariadas. Os dados das células não hachuradas foram usados nas comparações temporais de abundância em nível de grandes grupos. Chave: AP= amostrado e processado (resolução taxonômica máxima); AP\*= amostrado e processado (em nível de grandes grupos); PR= programado/em execução; NA= não amostrado; ANP= amostrado e não processado. As linhas inferiores, destacadas, se referem a pontos não cobertos pelo PMBA, mas com dados disponíveis e relevantes no contexto do projeto.

		PELD				PMBA			
		2015	2016	2017	2018	2018	2019		
		fev-mar	fev-mar	fev-mar	mar	nov	abr	jul	set
A1	Pedra de Leste, PLES	AP*	AP*	AP	AP	AP	AP	AP	ANP
A2	Sebastião Gomes, SG	NA	AP*	AP	AP	AP	AP	AP	ANP
A3	Parcel dos Abrolhos, PAB3	AP*	AP*	AP	AP	AP	AP	AP	ANP
A4	Portinho Norte, PNOR	AP*	AP*	AP	AP	AP	AP	AP	ANP
A6	Timbebas, TIM	NA	ANP	AP	NA	AP	AP	AP	ANP
B2	Esquecidos Norte	NA	NA	AP	AP	NA	AP	AP	PR
B3	Esquecidos Central	NA	NA	NA	NA	AP	AP	AP	PR
B4	Esquecidos Sul	NA	NA	AP	AP	AP	AP	AP	PR
Parcel dos Abrolhos, PAB2		AP*	AP*	AP*	AP*	NA	ANP	NA	NA
Parcel dos Abrolhos, PAB5		AP*	AP*	AP*	AP*	NA	ANP	NA	NA

### 2.5.2. Estabelecimento de uma linha de base (novembro, 2018) para as Áreas A e B.

Destacaram-se, por recobrir a maior parte dos recifes (>95%) em novembro de 2018 (início do PMBA), oito grandes grupos de organismos: corais, hidrocorais, zoantídeos, esponjas, macroalgas, tufos (*turf*), algas calcárias incrustantes e cianobactérias (Figura 47 e Figura 48). O recobrimento por corais variou entre 5 a 28% dos topos (estações A2 e A4) (Figura 49) e entre 2 a 60 % das paredes (estações A3 e A2) (Figura 50). As principais espécies de corais estão apresentadas na Figura 51.

Por apresentarem abundância preponderante (e.g. cianobactérias filamentosas, *turf*, macroalgas) e/ou desempenharem papéis chave nos ecossistemas recifais (e.g. corais e algas coralíneas incrustantes), os grupos de organismos destacados nessa seção compõem variáveis de interesse para o entendimento das forças ambientais e da dinâmica desses ecossistemas. Portanto, são candidatos a serem empregados como sentinelas e/ou indicadores de impactos, em nível de comunidades, ao longo do desenvolvimento do PMBA. No caso dos corais, dado seu papel chave, o monitoramento foi, e continuará sendo feito em resolução taxonômica máxima, ao nível de gênero ou espécie.

Figura 47: Estrutura da comunidade bentônica registradas no topo dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). *Inserts:* I) Estrutura de um chapéu com indicação do topo. II) Malha amostral (recifes emergentes ou quase-emergentes) mostrados em azul. Coral = Corais escleractíneos; Hidro = hidrocorais; Zoan = zoantídeos; Espon = esponjas; Macro = macroalgas; Turf = tufo de algas; CCA = algas coralíneas incrustantes; Ciano = cianobactérias.

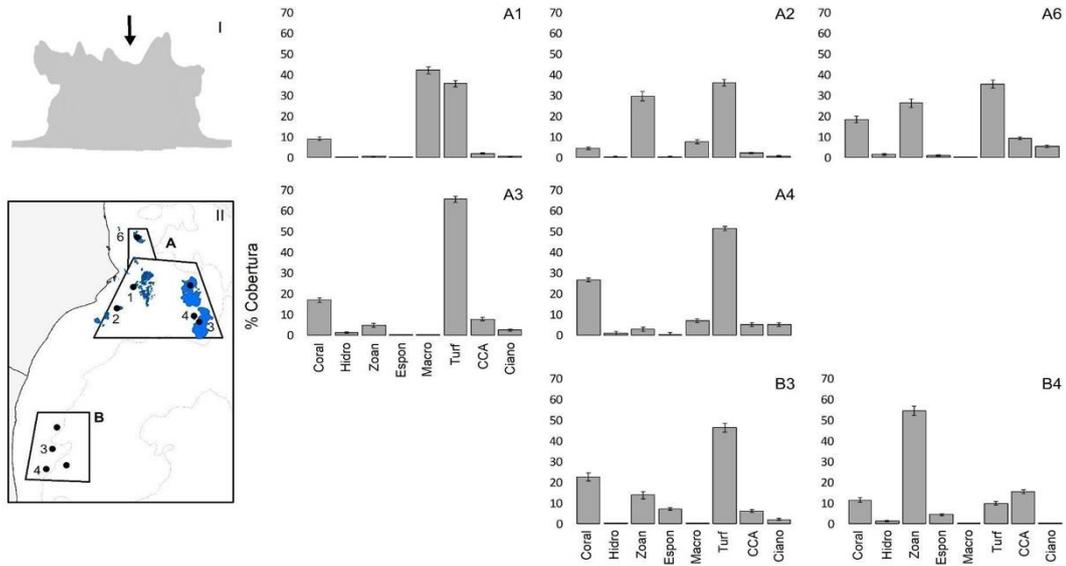


Figura 48: Estrutura da comunidade bentônica registradas na parede dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). *Inserts:* I) Estrutura de um chapéu com indicação da localização da parede. II) Malha amostral (recifes emergentes e quase-emergentes) mostrados em azul. Coral = escleractíneos; Hidro = hidrocorais; Zoan = zoantídeos; Espon = esponjas; Macro = macroalgas; Turf = tufo de algas; CCA = algas coralíneas incrustantes; Ciano = cianobactérias

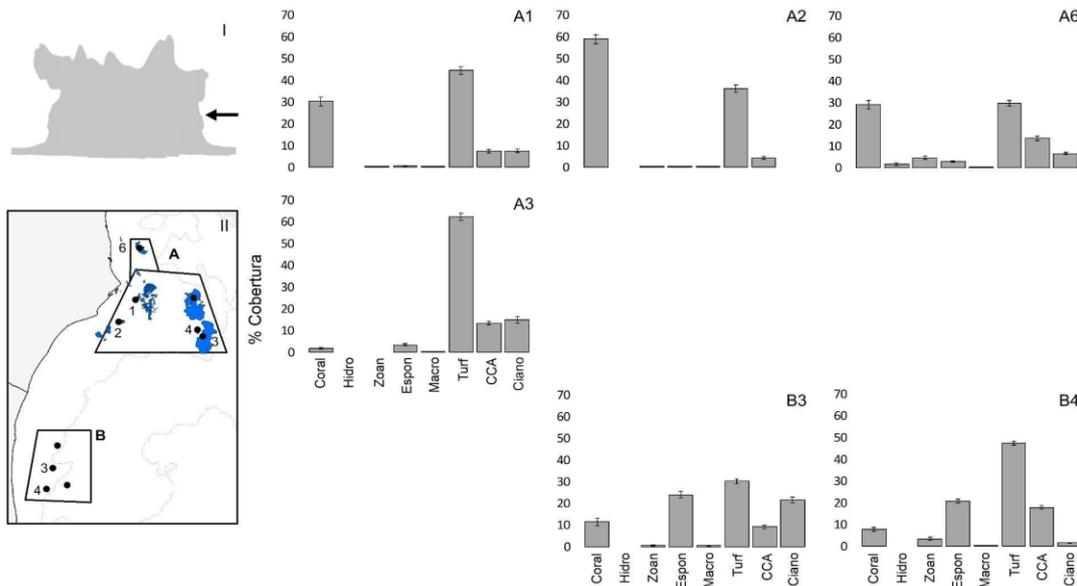


Figura 49: Cobertura relativa das principais espécies de corais registradas no topo dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). Inserts: I) Estrutura de um chapéu com indicação do topo. II) Malha amostral (recifes emergentes e quase-emergentes) mostrados em azul. AGSP = *Agaricia* spp.; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia hartii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; MISP = *Millepora* spp.

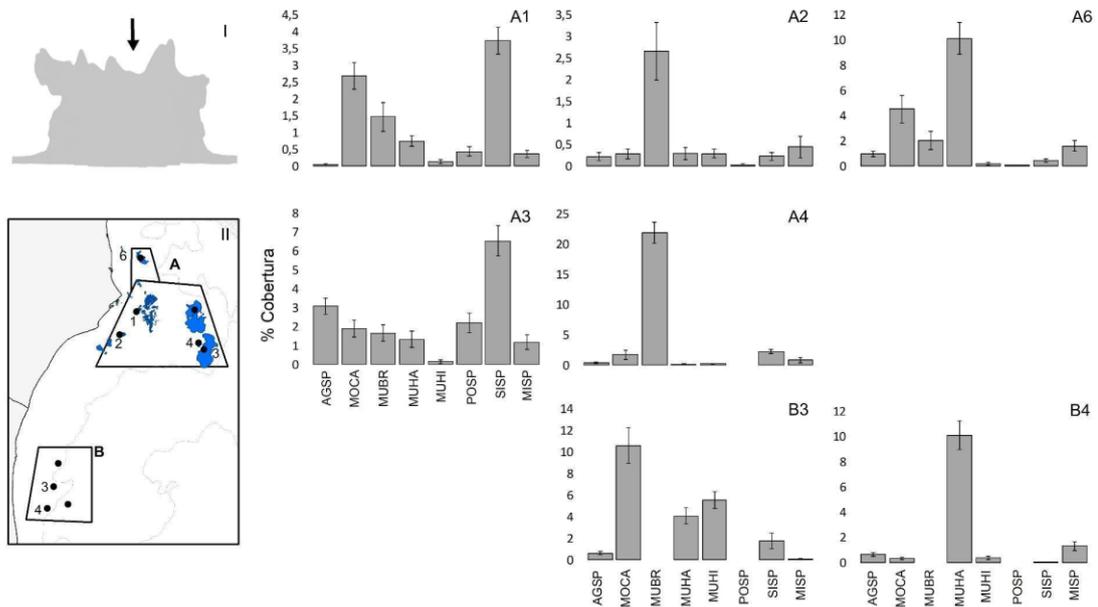


Figura 50: Cobertura relativa das principais espécies de corais registradas na parede dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). Inserts: I) Estrutura de um chapéu com indicação da parede. II) Malha amostral (recifes emergentes e quase emergentes mostrados em azul). AGSP = *Agaricia* spp.; MADE = *Madracis decactis*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUHA = *Mussismilia hartii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; SISP = *Siderastrea* spp.

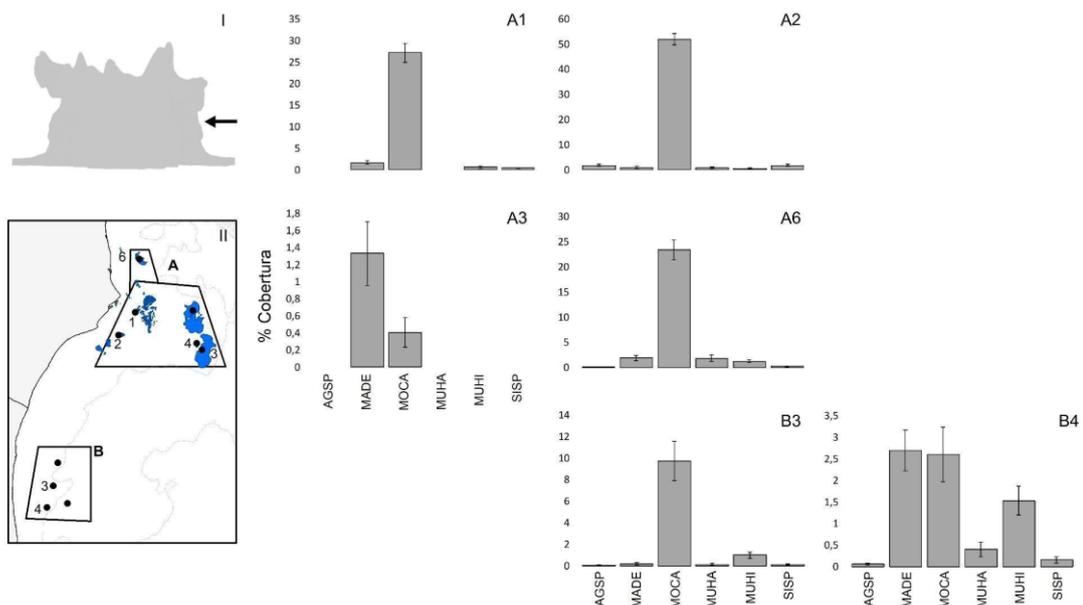
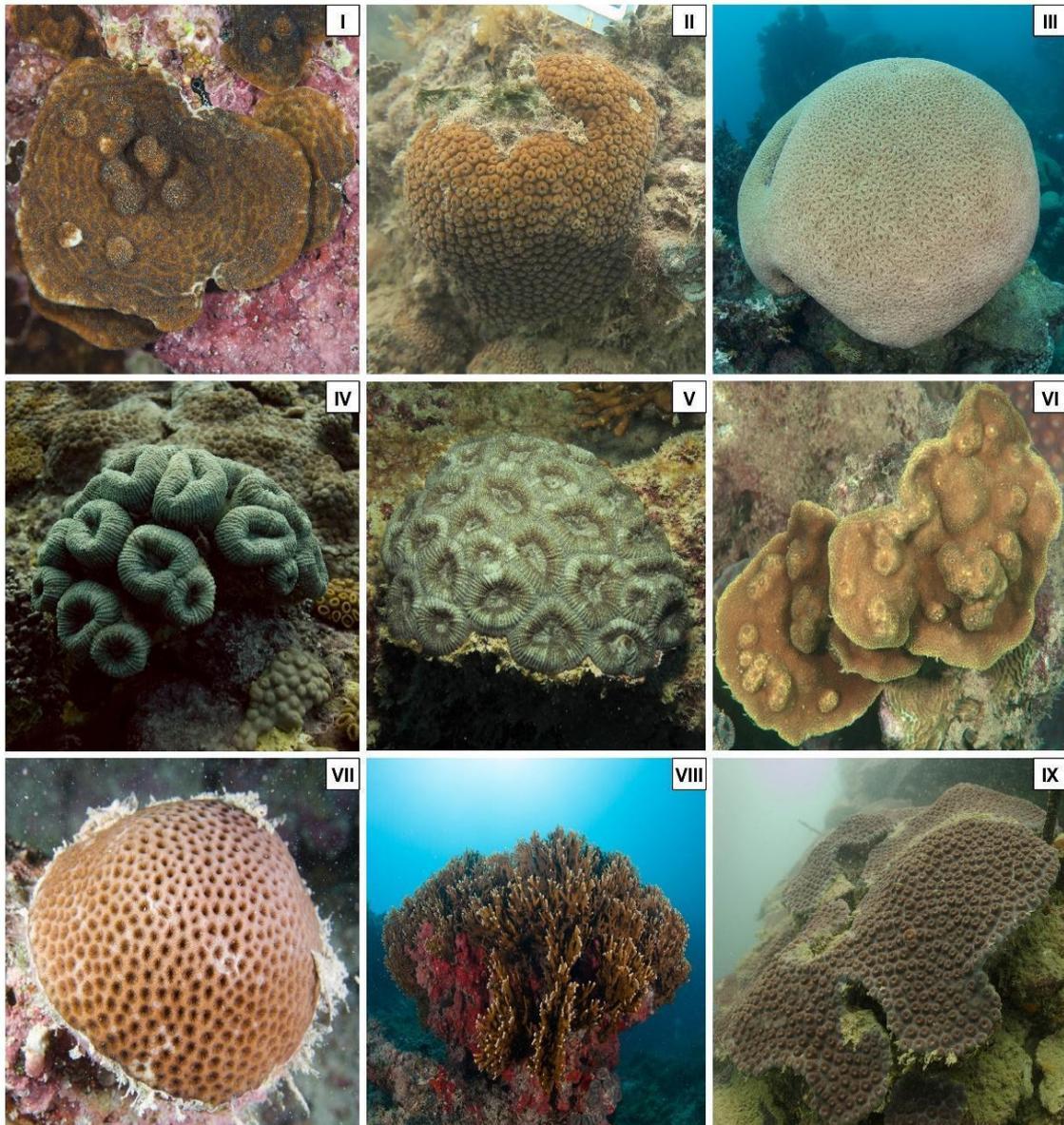


Figura 51: Principais espécies de corais registradas na área de estudo. I) *Agaricia fragilis*. II) *Montastraea cavernosa* (topo). III) *Mussismilia braziliensis*. IV) *Mussismilia harttii*. V) *Mussismilia hispida*. VI) *Porites astreoides*. VII) *Siderastrea* sp. VIII) *Millepora* sp. IX) *Montastraea cavernosa* (parede).



A estrutura das comunidades bênticas recifais, em novembro de 2018 (início do PMBA), também foi descrita através de ordenações por Componentes Principais (PCA, ou ACP) (MANLY; ALBERTO, 2017), com o objetivo de reduzir a estrutura multivariada a um número menor de dimensões, de forma que a relação entre as variáveis possa ser mais prontamente compreendida. Para cada habitat (topo e parede) foram produzidos: i) correlogramas mostrando a força e o sinal (+ ou -) da associação entre pares de variáveis (categorias de organismos), ii) mapas fatoriais com as distribuições das espécies em relação aos dois primeiros componentes principais (Dim 1 e 2) e a contribuição relativa de cada espécie ao componente principal (Dim 1), e iii) *biplots* com a superposição da contribuição de cada

variável com as estações amostrais, também evidenciando associações (Figura 52 a Figura 55). Resumidamente, as variáveis correlacionadas com Dim 1 e Dim 2 são as mais importantes para explicar a variabilidade no conjunto de dados. Além disso, quanto mais próxima uma variável estiver do círculo de correlações, melhor terá sido sua representação e mais importante foi sua contribuição, enquanto variáveis mais próximas ao centro do gráfico foram menos importantes.

Para o topo dos recifes, o correlograma evidenciou associação significativa entre as variáveis (teste de Bartlett de esfericidade<sup>3</sup>,  $p < 2,2 \cdot 10^{-6}$ ) (Figura 52). A proporção da variância explicada por Dim 1 foi 34,5% enquanto a variância explicada por Dim 2 foi 23,9% (Figura 53). Dim 1 foi um eixo positivamente associado com zoantídeos (*Zoanthus* sp.) e hidrocorais (*Millepora* spp.) (Figura 53), altamente correlacionados (veja Figura 52), e também com o coral de crescimento rápido (*weedy*) *F. grävada*, todos influentes nas comunidades dos recifes Sebastião Gomes (A2) e Timbebas (A6), no arco recifal costeiro da Área A. A contribuição do coral-cérebro *M. braziliensis* se destacou nas estações A3 e A4 (Arquipélago e Parcel dos Abrolhos), no arco recifal externo da Área A, enquanto que as do coral *M. harttii* e do zoantídeo *P. caribaeorum* se destacaram na estação B4 (sul dos Recifes Esquecidos). Assim, a primeira componente indicou afinidade entre estações com comunidades de topo estruturadas preponderantemente por *M. braziliensis*, *F. grävada*, hidrocorais e zoantídeos (Figura 53). O quadrante direito inferior, associado aos corais *M. decactis* e *M. hispida* e à esponja *M. arbuscula*, abrange a estação B3, enquanto o quadrante direito superior, associado a *P. caribaeorum* e *M. harttii*, abrange a estação B4. Essas duas estações (B3 e B4) correspondem aos Recifes Esquecidos, com recifes com topos mais fundos onde *M. braziliensis*, coral típico da Área A (PARNAM Abrolhos e adjacências), não foi registrado nas parcelas amostradas (uma colônia de *M. braziliensis*, aparentemente recém-morta, foi observada fora das parcelas nos Recifes Esquecidos). Dim 2 foi associado negativamente com *M. hispida* e *Siderastrea* spp., e sintetiza um gradiente latitudinal na estrutura das comunidades recifais, revelando uma transição entre topos de recifes com maior importância de *Siderastrea* spp., *Porites* spp., *Agaricia* spp., *M. braziliensis* e *F. grävada* (Área A) para comunidades com maior abundância relativa de *M. decactis*, *M. arbuscula*, *P. caribaeorum*, *M. harttii*, *M. cavernosa* e *M. hispida* (Área B).

Para as paredes dos recifes, cujas análises não incluíram a estação A1 (Arquipélago dos Abrolhos) em função de sua topografia ímpar (talude raso e mais plano), o correlograma (Figura 54) evidenciou associações significativas entre as variáveis (teste de Bartlett de esfericidade  $p < 2,2 \cdot 10^{-6}$ ).

---

<sup>3</sup> H0: matriz de correlação = matriz identidade

O primeiro eixo da PCA (Dim 1) composta com os dados das paredes (Figura 55) foi positivamente associado aos zoantídeos *Zoanthus* spp. e *P. caribaeorum*, e também a alguns corais, principalmente *M. harttii*. O segundo eixo (Dim 2) parece corresponder a um gradiente de profundidade, de A2 (Sebastião Gomes, a estação mais rasa) a B4 (Esquecidos Sul, a mais funda), e também associado à disponibilidade de luz, tal como revela a posição da estação A4 (Parcel dos Abrolhos), cujos recifes possuem paredes muito sombreadas (Figura 55). Dim 2 foi positivamente associado com *M. cavernosa*, o coral com maior cobertura nas paredes ao longo de toda a região (veja Figura 50) e típico de condições mesofóticas, assim como outros corais afins de áreas menos iluminadas, especialmente *Agaricia* spp. (FRANCINI-FILHO et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2019).

Uma segunda rodada de ordenações com Análises de Componentes Principais (ACP) foi conduzida com incorporação das principais variáveis ambientais coligidas durante o primeiro verão coberto pelo PMBA (Figura 56 e Figura 57), também separadamente para topos e paredes. Além da profundidade de cada estação, foram incorporadas médias mensais (dezembro de 2018) das seguintes variáveis obtidas por sensoriamento remoto: radiação fotossinteticamente ativa (iPAR), coeficiente de atenuação difusa da luz em 490 nm (Kd490, equivalente à turbidez) e temperatura da superfície do mar (SST). A Figura 58 mostra projeções cartográficas, em escala regional, da SST e do Kd490 em dezembro de 2018, refletindo as condições no momento da aquisição dos dados de cobertura recifal que constam do *baseline*.

Figura 52: Correlograma com dados de cobertura dos topos dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *Favia gravida*; MADE = *Madracis decactis*; MOAR = *Monanchora arbuscula*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; PACA = *Palythoa caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; MISP = *Millepora* spp; ZOSP = *Zoanthus* spp.

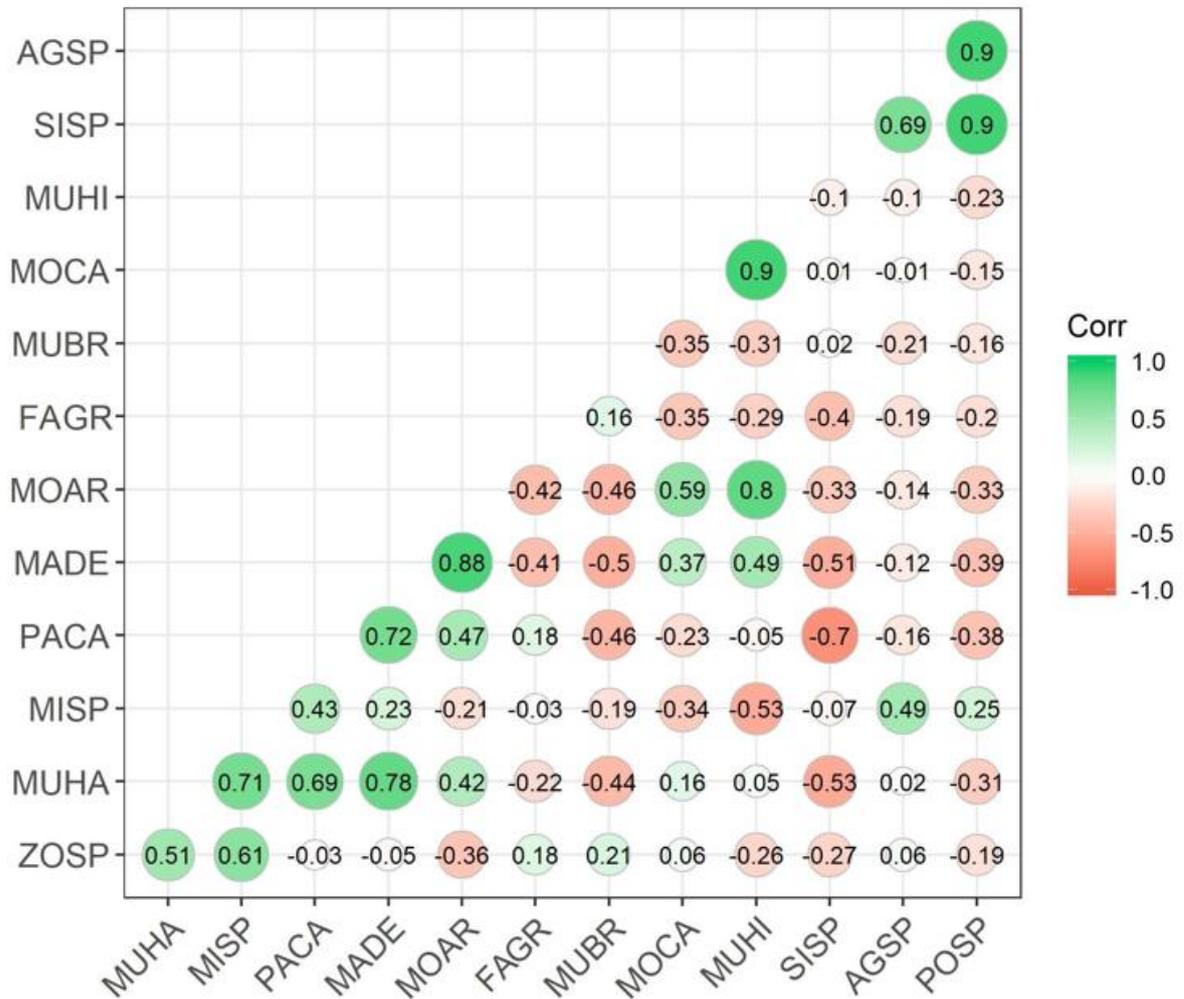


Figura 53: Análise de Componentes Principais (ACP) com dados de cobertura dos topos dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *F. gravida*; MADE = *M. decactis*; MISP = *Millepora* spp.; MOAR = *M. arbuscula*; MOCA = *M. cavernosa*; MUBR = *M. braziliensis*; MUHA = *M. hartii*; MUHI = *M. hispida*; PACA = *P. caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp. No painel superior a importância de cada variável está representada por um gradiente de cor e no painel inferior também estão sobrepostas as posições dos sítios no diagrama de ordenação.

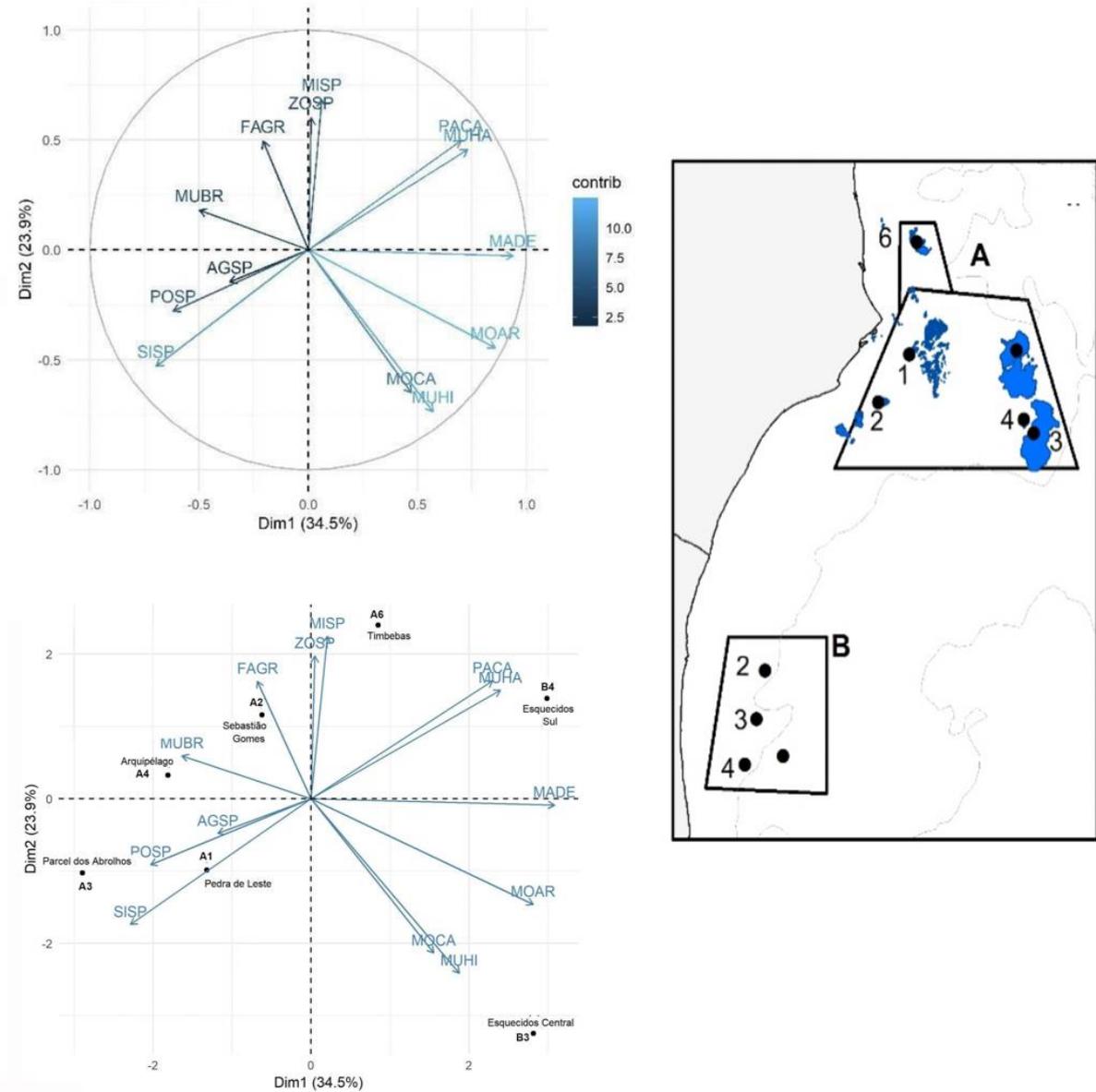


Figura 54: Correlograma com dados de cobertura das paredes dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *Favia gravida*; MADE = *Madracis decactis*; MISP = *Millepora* spp.; MOAR = *Monanchora arbuscula*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUHA = *Mussismilia hartii*; MUHI = *Mussismilia hispida*; PACA = *Palythoa caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp.

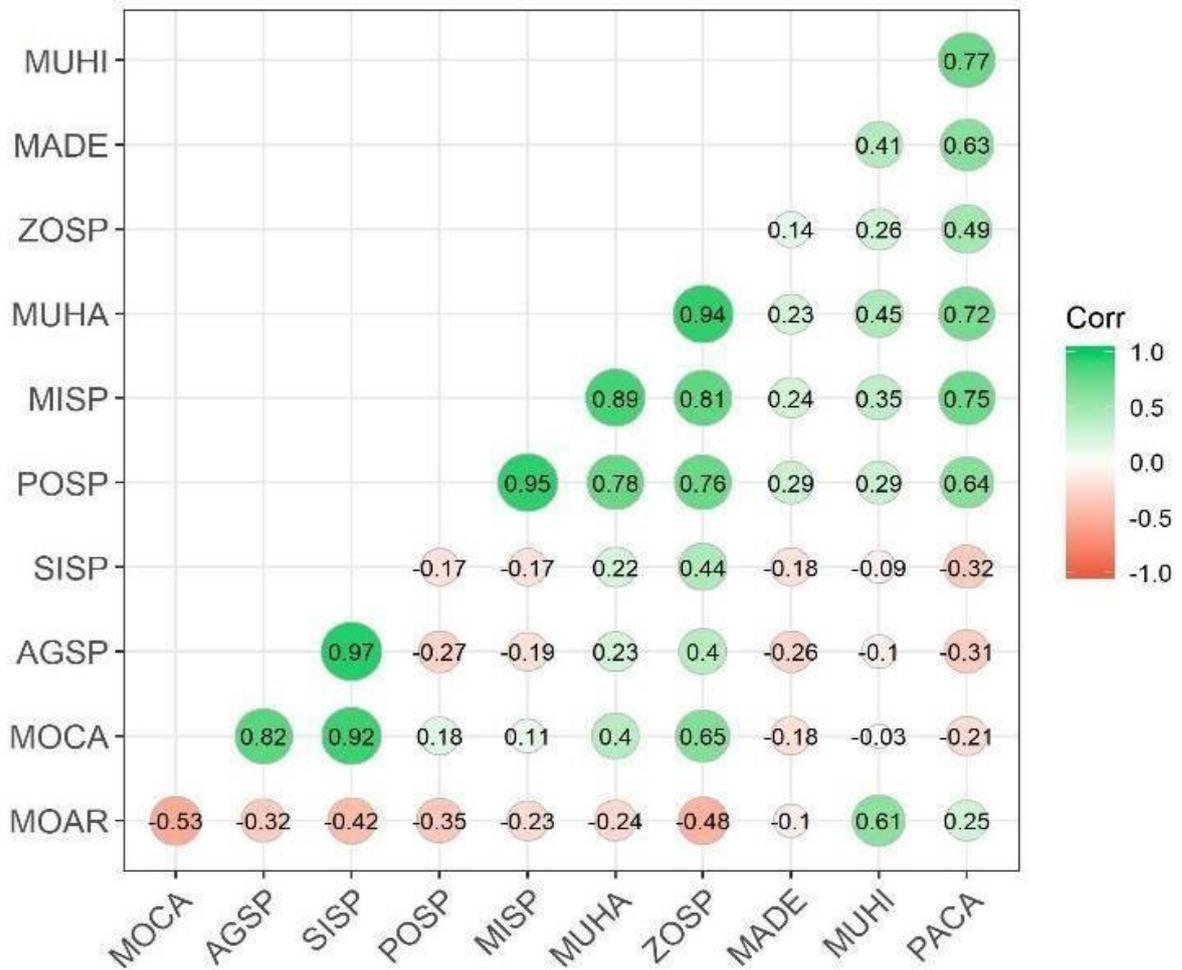


Figura 55: Análise de Componentes Principais com dados de cobertura das paredes dos recifes em novembro de 2018 (início do PMBA). AGSP = *Agaricia* spp.; FAGR = *F. gravida*; MADE = *M. decactis*; MISP = *Millepora* spp.; MOAR = *M. arbuscula*; MOCA = *M. cavernosa*; MUBR = *M. braziliensis*; MUHA = *M. harttii*; MUHI = *M. hispida*; PACA = *P. caribaeorum*; POSP = *Porites* spp.; SISP = *Siderastrea* spp.; ZOSP = *Zoanthus* spp. No painel superior a importância de cada variável está representada por um gradiente de cor e no painel inferior as posições dos sítios estão sobrepostas

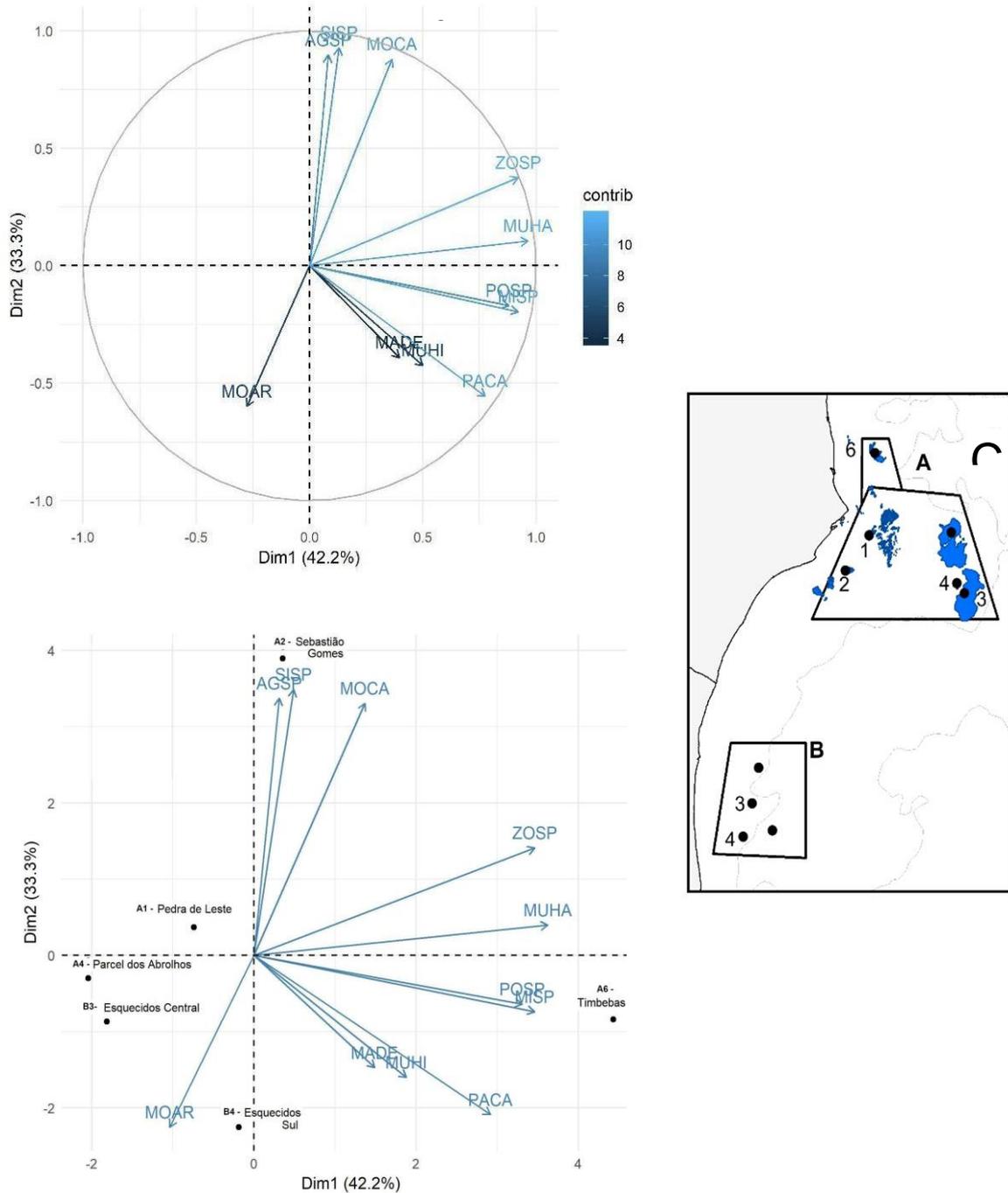


Figura 56: Correlogramas com dados de cobertura dos topos (ESQUERDA) e paredes (DIREITA) dos recifes, e das variáveis ambientais no início do PMBA (novembro e dezembro de 2018). Ciano = Cianobactérias; CCA = Algas coralináceas incrustantes; Coral = Corais escleractíneos; iPAR = Radiação Fotossinteticamente Ativa; Kd490 = coeficiente de atenuação de luz; Profund = Profundidade; SST = Temperatura de Superfície do Mar; Zoant = Zoantídeos.

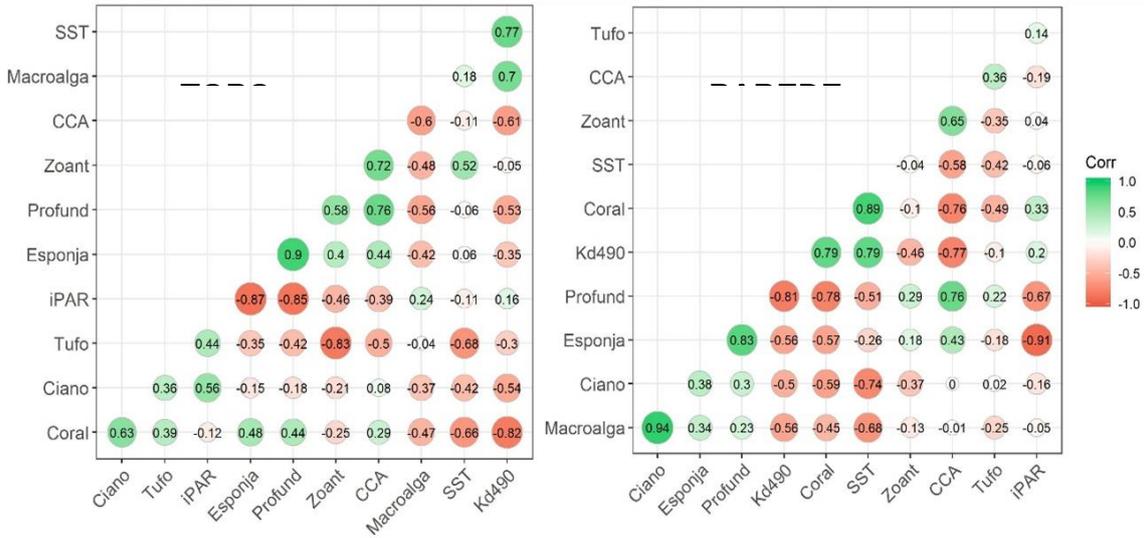


Figura 57: Análise de Componentes Principais com superposição da contribuição dos organismos e variáveis ambientais e da posição relativa das estações. Esquerda: topo. Direita: parede. Ciano=Cianobactérias; CCA=Algas coralináceas incrustantes; iPAR = Radiação Fotossinteticamente Ativa; Kd490 = coeficiente de atenuação; Profund = Profundidade; SST = Temperatura de Superfície do Mar; Zoant = Zoantídeos.

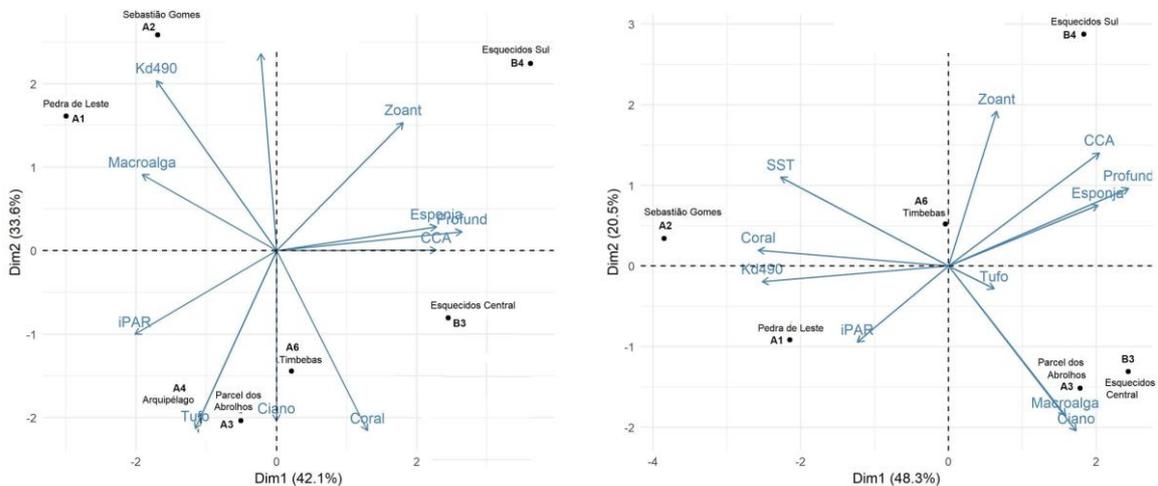
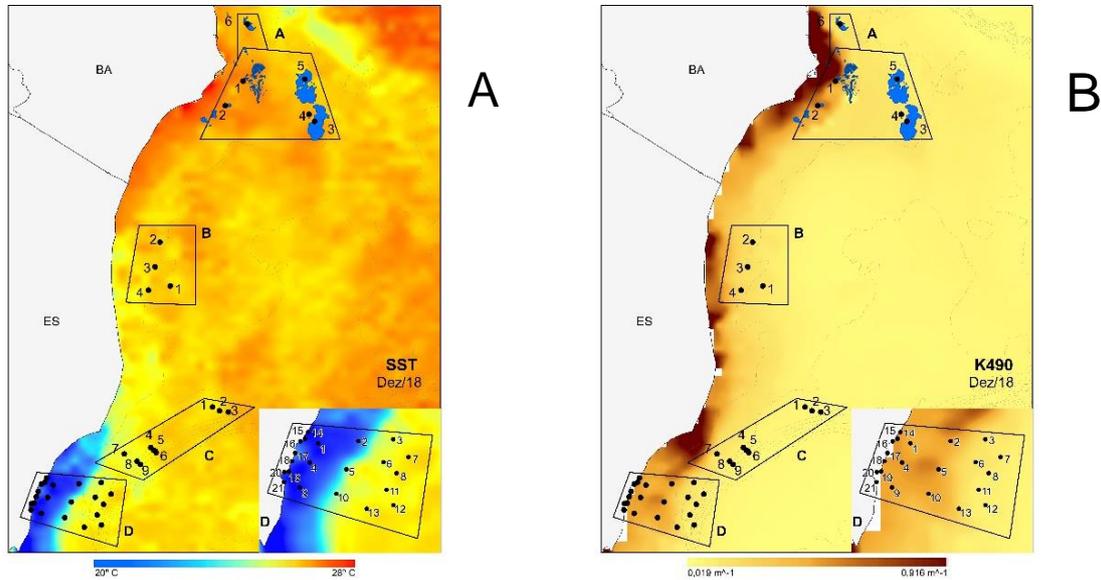


Figura 58: Variáveis ambientais obtidas por sensoriamento remoto e utilizadas nas Análises de Componentes Principais: A: Temperatura da superfície do mar (SST, dados da plataforma PODAAC-Physical Oceanography Active Archive Center), B: Atenuação da luz (Kd490) (iPAR, dados da plataforma ERDDAP- Easier Access to Scientific Data). Dezembro de 2018 (verão), *baseline* do PMBA. Fonte: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>



Os resultados apresentados até aqui representem uma “fotografia” do estado das comunidades recifais no verão de 2018, quando foi iniciado o PMBA. Essa fotografia inclui áreas mais próximas e mais afastadas da foz do rio Doce, supostamente mais e menos afetadas pelos 3 anos de exposição a rejeitos e contaminantes oriundos do Desastre (i.e. “Impacto-Controle”). No entanto, consideramos não ser pertinente traçar conclusões nesse sentido na ausência de uma série temporal robusta, de um panorama toxicológico de organismos recifais em escala regional, e de modelos de circulação e transporte costeiro, entre outros elementos em construção no âmbito do PMBA. Apesar dessas limitações, está claro que a variação espacial nas comunidades recifais é fortemente associada à profundidade e à latitude, e também ao regime de disponibilidade de luz. O regime de luz ao qual as estações amostradas estão submetidas parece contribuir para a estruturação convergente das comunidades em locais geograficamente distintos, nas Áreas A e B. No entanto, ressalta-se que a incidência luminosa no fundo é controlada por mecanismos diversos (e.g. turbidez e morfologia do recife), inclusive forçantes que ainda não foram completamente acessadas (e.g. deposição de sedimentos, temperatura, nutrientes), ou que estão sendo consolidadas nesse momento (término do primeiro ciclo de execução do PMBA), podendo ser mais efetivamente incorporadas em sínteses futuras.

Os gradientes associados à profundidade e latitude são convergentes, uma vez que a profundidade média das estações da Área A (PARNAM e recifes adjacentes) é menor do que aquelas da Área B (Recifes Esquecidos). Além desse padrão na configuração dos recifes, o gradiente latitudinal pode estar

relacionado com os diferentes mecanismos de transporte (e.g. turbidez semelhante entre a Área B - Recifes Esquecidos, e arco externo da Área B - Parcel dos Abrolhos), regimes oceanográficos (e.g. menores SST na Área D), e outras fontes de aportes flúvio-continentais ao longo da costa, incluindo drenagens fluviais menores que estão em melhor (e.g. Piraquê-Açu) e pior (e.g. Reis Magos) estado de conservação, bem como diversas potenciais fontes locais de perturbação e contaminação costeira, as quais também podem ser influentes. Nesse rol, incluem-se os terminais portuários Portocel e Jurong, em Aracruz, ES, e o terminal de barcaças da Fibria, em Caravelas, BA, esse último com intensa dragagem e bota-fora adjacente aos recifes costeiros da Área A (FRANCINI-FILHO et al., 2013, MOURA et al, 2013).

Com esse panorama inicial, que representa o primeiro *baseline* robusto para a área recifal possivelmente afetada pelo Desastre, é necessário considerar dois aspectos fundamentais no que tange aos demais objetivos do projeto. O primeiro diz respeito à influência da turbidez, relacionada a forçantes naturais (e.g. fácies sedimentares, profundidade, geomorfologia, turbulência) e antropogênicas, crônicas (e.g. degradação da zona costeira e bacias hidrográficas) ou agudas (e.g. dragagens, construção e rompimento de barragens), e que podem estar associadas a efeitos insidiosos de contaminantes dissolvidos na água do mar (e.g. metais pesados, agrotóxicos). Apesar dessa complexidade, o *baseline* demonstra, de forma inequívoca, que a pluma oriunda do Desastre pode ter influência direta ou influência indireta em médio-longo prazo (aumento da turbidez, contaminação com efeito seletivo positivo ou negativo sobre determinados grupos). O segundo aspecto a ressaltar diz respeito ao delineamento e estratégia amostral adotados pelo projeto para avaliar a estrutura das comunidades recifais bentônicas, com uso de parcelas fixas, cuja ênfase está em detectar mudanças temporais. Mesmo compreendendo um esforço amostral sem precedentes em estudos sobre comunidades recifais no Brasil (190 parcelas), a detecção de padrões espaciais na variação da estrutura das comunidades com uso de fotoquadrados fixos aleatoriamente distribuídos na superfície do recife (em T0), embora possível e pertinente, sofre em função da heterogeneidade espacial dos ambientes recifais. Trata-se de um *tradeoff* inerente à alta resolução dos dados (sub-centimétrica) no sentido de detectar, acuradamente, mudanças na cobertura do fundo por organismos que crescem em taxas anuais sub-centimétricas, com baixa contaminação pela heterogeneidade espacial. Para o segundo ciclo de execução do PMBA, propomos combinar amostragens em parcelas fixas com outras abordagens que utilizem parcelas de maior tamanho, tais como fotomosaicos (ideal) ou transectos (menos relevantes por gerarem dados com variabilidade achatada)

### **2.5.3. Variação na estrutura das comunidades recifais das Áreas A e B.**

Comunidades recifais se apresentam, invariavelmente, submetidas a indutores de natureza estocástica (e.g., tempestades, epizootias, flutuações meteo-oceanográficas de grande escala) e de natureza sazonal (e.g. temperatura, luz, turbulência, aportes sedimentares). Além disso, são amplamente reconhecidas variações que ocorrem em resposta a estressores (e.g. pesca, qualidade de água), com

ciclos longos de retorno para estados próximos dos estados iniciais (resiliência), ou configuração de estados alternativos com perda de diversidade, funcionalidade e, em última instância, com comprometimento severo de serviços ecossistêmicos. Na região potencialmente afetada pelo Desastre existem informações prévias sobre a influência de forçantes naturais e antropogênicas sobre comunidades recifais (e.g. FRANCINI-FILHO et al., 2013, TEIXEIRA et al. 2019), mas os trabalhos antecedentes possuem cobertura temporal limitada (mas veja RIBEIRO et al., 2018 para séries longas referentes a *M. braziliensis*) e/ou foram baseados em metodologias muito dissimilares (e.g. KIKUCHI et al., 2003), ou limitadas em termos de cobertura/representatividade (e.g. MAZZEI et al. 2017). A maior parte da informação antecedente é limitada à Área A Área A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e ao período anterior ao Desastre (mas veja MAZZEI et al., 2017).

A despeito da relevância desse conjunto de informações prévias, que inclui algumas séries temporais, não há informações sobre a dinâmica sazonal das comunidades recifais da região estudada. Essa lacuna, parcialmente coberta durante o primeiro ciclo de execução do PMBA, dificulta comparações temporais e o entendimento das interações entre indutores antropogênicos, naturais e climáticos, incluindo as anomalias climáticas recentes, sem precedentes no registro histórico (TEIXEIRA et al., 2019).

Os dados apresentados a seguir incorporam dados prévios comparáveis (i.e. adquiridos com mesma metodologia), tratados com a mesma resolução taxonômica, representando as primeiras séries que permitem reconhecer possíveis padrões de variação sazonal, além de completarem o quadro geral acerca da dinâmica de longo prazo das comunidades recifais. Os dados temporais da cobertura bêntica amostrada em sítios das Áreas A e B foram inicialmente ordenados com uso de MDS (Figura 59), utilizando dados transformados (raiz quarta), de maneira a facilitar a visualização das afinidades entre as comunidades das estações amostrais, sempre com o isolamento da variação preponderante atribuível ao hábitat (topo e parede). Ressalta-se que essas duas ordenações com MDS não incorporam as variáveis ambientais. Posteriormente, os dados de cobertura bêntica foram modelados com restrições (DISTLM e dbRDA), com uso de um conjunto de variáveis ambientais relativamente abrangente (Tabela 21, Tabela 22 e Figura 62).

Apesar de ter se apresentado como grupo mais abundante em praticamente todas as estações, os tufo de algas (*turf*) não contribuíram para evidenciar os contrastes espaço-temporais no conjunto das amostras. Com relação à cobertura dos topos (Figura 59), o sítio B4 (Esquecidos Sul), notavelmente dissimilar com relação aos demais sítios da área B, apresentou cobertura expressiva de zoantídeos, os quais são organismos geralmente associados a maiores taxas de sedimentação. Nessa dimensão, observa-se grande similaridade entre esse local (B4) e dois sítios costeiros da Área A, A2 (Sebastião Gomes) e A6 (Recife das Timbebas), o primeiro com baixa cobertura de corais e o segundo com cobertura de corais relativamente mais alta. Os sítios B2 (Esquecidos Norte) e B3 (Esquecidos Centro) foram mais similares aos dois sítios do arco externo da Área A, A3 e A4 (Arquipélago e Parcel dos

Abrolhos, respectivamente), ambos com cobertura expressiva de corais (mas observe a baixa contribuição de hidrocorais em B2 e B3). Os sítios do arco externo da Área A, A3 e A4 (Arquipélago e Parcel dos Abrolhos, respectivamente), foram similares entre si, com participação expressiva de corais, cianobactérias filamentosas e hidrocorais, e apresentaram as menores flutuações temporais.

Com relação à cobertura das paredes (Figura 59), os sítios da Área B (Recifes Esquecidos) foram mais similares entre si, embora a maior contribuição de zoantídeos continue a discriminar B4 (Esquecidos Sul). Na Área A, a contribuição de cianobactérias filamentosas nas paredes é bastante expressiva, uma característica possivelmente associada ao ambiente com menor irradiância mínima para crescimento vegetativo, o qual representa uma condição ótima para esse grupo. Com exceção de A3 (Parcel dos Abrolhos), onde as paredes são extremamente sombreadas, os demais sítios da Área A também apresentaram paredes com alta cobertura coralínea (a maior de toda a malha amostral), dominada por *M. cavernosa*, e heterogeneidades espaciais e temporais associadas à cobertura relativa de zoantídeos (e.g. sítio A6, Timbebas) e cianobactérias filamentosas (e.g. sítios A1 e A3, Pedra de Leste e Parcel dos Abrolhos, respectivamente). O gradiente na cobertura coralínea das paredes, menor na Área B, também pode estar associado ao ambiente de luz (aumento da profundidade óptica da Área A para a Área B, com efeito preponderante da morfologia cogumelar em A3 (Parcel dos Abrolhos)). A variação temporal nas comunidades das paredes será detalhada na exploração das dbRDA (Figura 62).

Com base na interpretação das análises exploratórias (PCA e MDS), modelamos a variação espaço-temporal das comunidades bênticas incorporando alguns dos possíveis indutores de sua dinâmica em Modelos Lineares Baseados em Distâncias (DISTLM) e análises de redundância (dbRDA). Nesses modelos, incluímos o tempo como variável preditora. Especificamente, as campanhas foram adicionadas na matriz de covariáveis e classificadas com código binário. Nesse esforço inicial de síntese destacam-se, por sua importância recorrente nos modelos, a temperatura da superfície do mar (SST) e a turbidez (Kd490). Dessa forma, a Figura 60 e Figura 61, mostram a variação dessas duas variáveis em uma projeção espacial cobrindo toda a região estudada, visando facilitar as interpretações. Vale observar que a heterogeneidade espacial na SST, turbidez e iPAR, relatadas e empregadas nas análises exploratórias do *baseline* (referentes ao início do PMBA), se mantiveram espacialmente consistentes, apesar da variação temporal se mostrar acentuada ao longo dos três trimestres de dados consolidados até o momento. Os modelos também incluíram outras variáveis explanatórias, tais como latitude (frequentemente convergente com a profundidade), distância da foz do rio Doce e clorofila a (colinear com relação à Kd490), sempre após verificação de possíveis assimetrias (*skewness*) e colinearidade. Na medida em que os resultados do PMBA forem consolidados, novas variáveis poderão ser incorporadas aos modelos, que também contarão com replicação temporal, conferindo-lhes maior robustez.

Para os dados de cobertura dos topos, as variáveis turbidez, iPAR e latitude se revelaram significativamente influentes e foram incorporadas na melhor solução global dos DISTLM (menor AIC)

(Tabela 21). Para as paredes, a melhor solução global incluiu turbidez e latitude (Tabela 22). As análises de redundância (dbRDA), baseadas no *output* dos DISTLM, revelaram, para os dados de cobertura dos topos, uma evidente segregação dos sítios da Área B, que se dispuseram em posições opostas aos dois principais vetores ambientais, latitude e turbidez. Dentre os sítios da Área A, Timbebas (A6) se discriminou dos demais, ao passo que os sítios costeiros A1 (Pedra de Leste) e A2 (Sebastião Gomes) se discriminaram do sítio *offshore* (Figura 62), nos dois habitats. Sem propor nexos causais com o Desastre e com outras fontes antropogênicas, observa-se que o sítio B4 (Esquecidos Sul), mais próximo da foz do rio Doce, juntamente com o sítio A2 (Sebastião Gomes), possuem indícios de estarem sob influência preponderante da turbidez.

Temporalmente, os topos e paredes dos sítios *offshore* da Área A foram mais estáveis do que os costeiros. Os sítios da Área B, como um todo, foram menos variáveis do que os sítios costeiros da Área A. Particularmente, os sítios B2 (Esquecidos Norte) e B3 (Esquecidos Centro) foram mais similares aos dois sítios do arco externo da Área A, A3 e A4 (Arquipélago e Parcel dos Abrolhos, respectivamente), ambos com cobertura expressiva de corais (observe a baixa contribuição de hidrocorais em B2 e B3; Figura 59). A maior parte da variação temporal em Esquecidos Central (B2) esteve associada a uma variação positiva na cobertura relativa de cianobactérias em 2018 (um possível *outbreak*, veja RIBEIRO et al., 2018). Ressalva-se, novamente, que as séries temporais para os sítios da Área B são curtas. Dentre os recifes costeiros, entre 2017 e 2019, a cobertura do topo em Timbebas (A6) foi menos variável do que em Pedra de Leste (A1), Sebastião Gomes (A2) e Esquecidos Sul (B4). Essa variabilidade foi relacionada à cobertura por organismos de crescimento muito rápido, tais como macroalgas, preponderantes em A1, e zoantídeos (veja Figura 59), preponderantes em A2 e B4.

Figura 59: Escalonamento Multidimensional (MDS) revelando afinidades espaço-temporais entre as estações amostradas nos topos (acima) e paredes (abaixo) dos recifes (cobertura temporal entre 2016 e 2019, variável para cada sítio). Coberturas relativas de táxons selecionados com base no seu poder discriminatório estão apresentadas em gráficos tipo pizza (fatias de tamanho proporcional à influência do táxon), sobrepostos aos scores das amostras nos dois eixos. Chave: 2019.1 = abril; 2019.2 = julho; 2018 = março, 2018.2 = novembro.

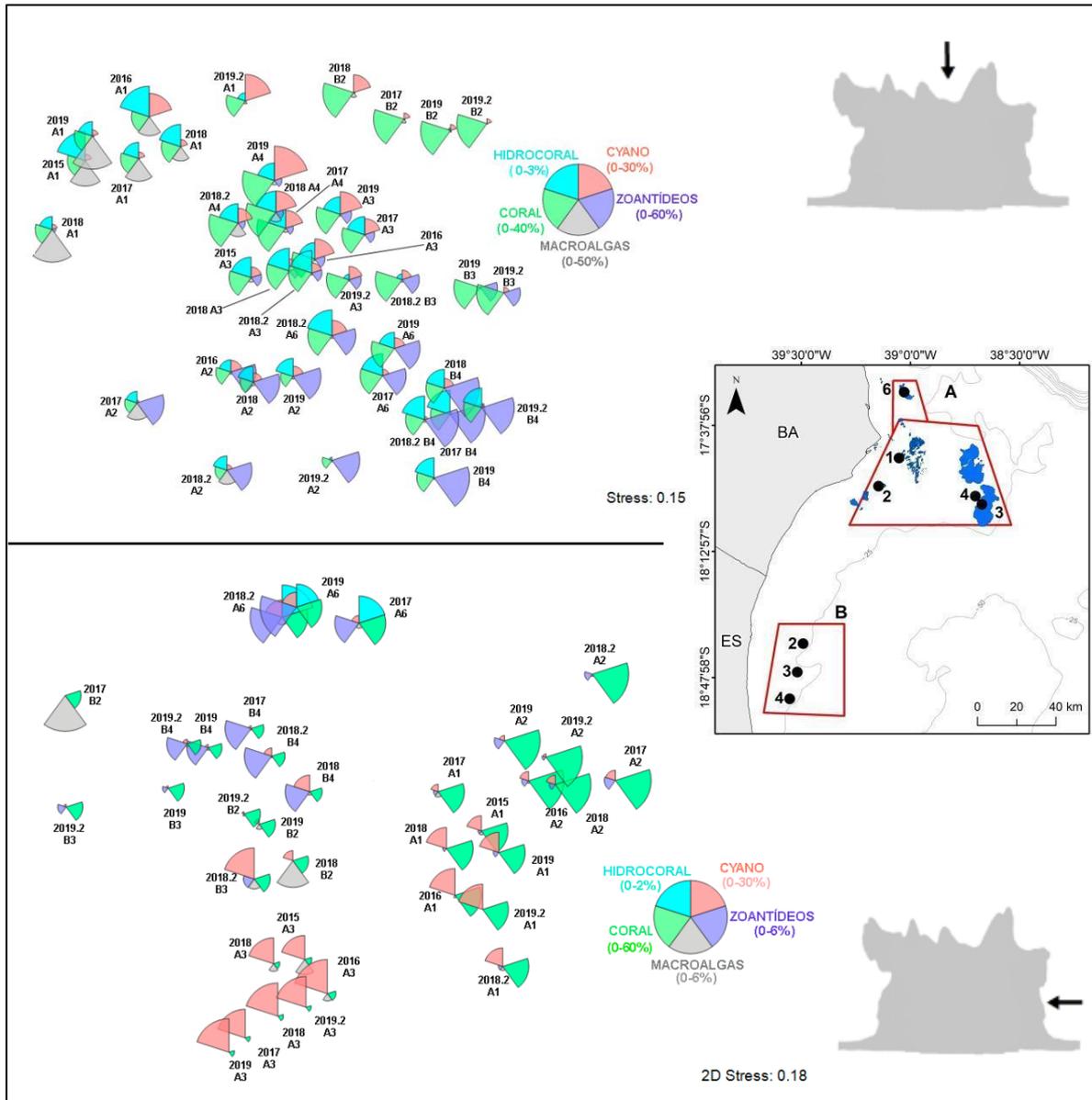


Figura 60: Variação temporal (médias trimestrais) na temperatura da superfície do mar (SST) na região estudada.

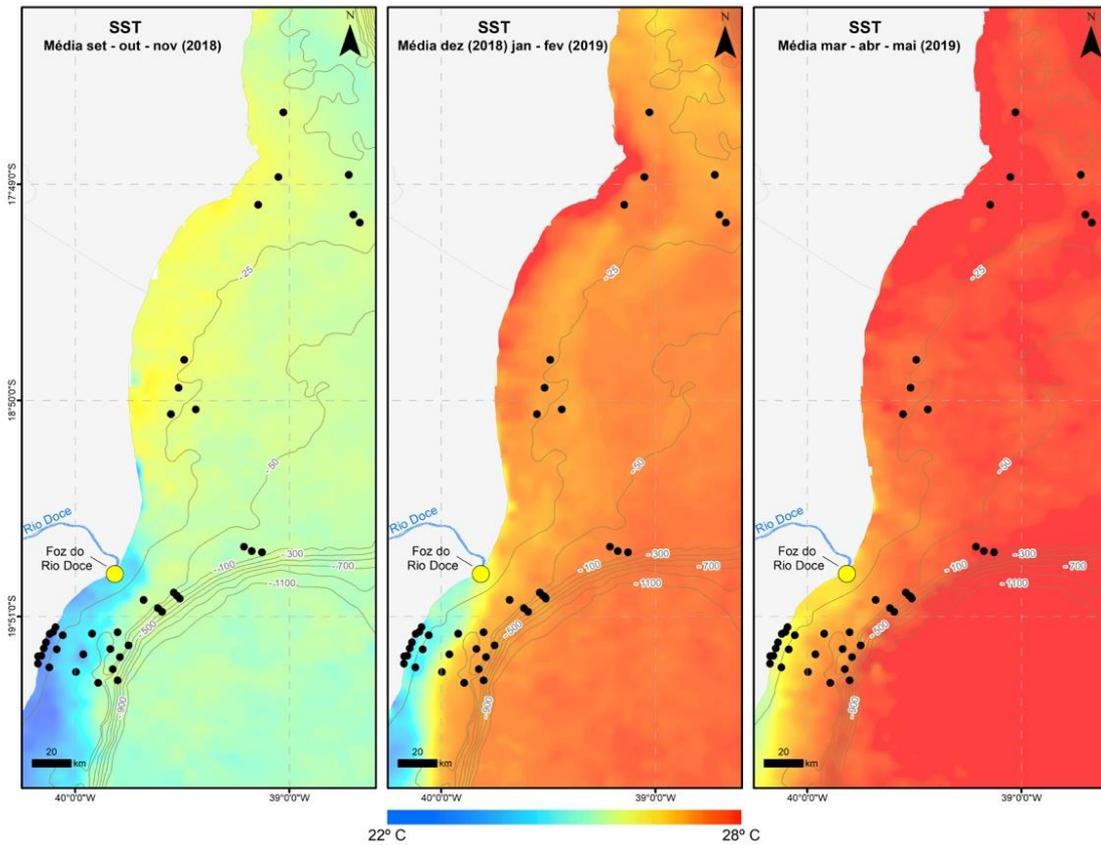


Figura 61: Variação temporal (médias trimestrais) na turbidez (Kd490) na região estudada.

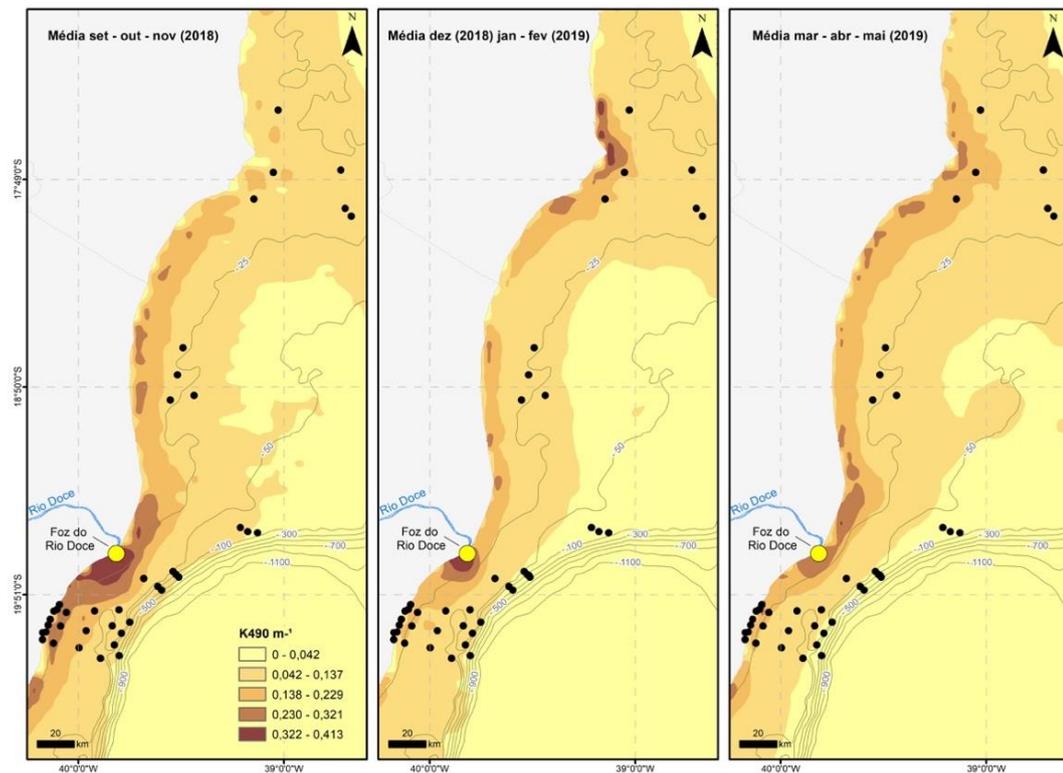


Figura 62: Análise de redundância baseada na distância (dbRDA) com o panorama espaço-temporal (2015-2019) de variação na cobertura dos recifes das Áreas A e B e sua associação com as variáveis selecionadas pelos modelos DISTLM (Kd490-turbidez, iPAR e latitude). As amostras de topos estão no painel superior e as de paredes no inferior.

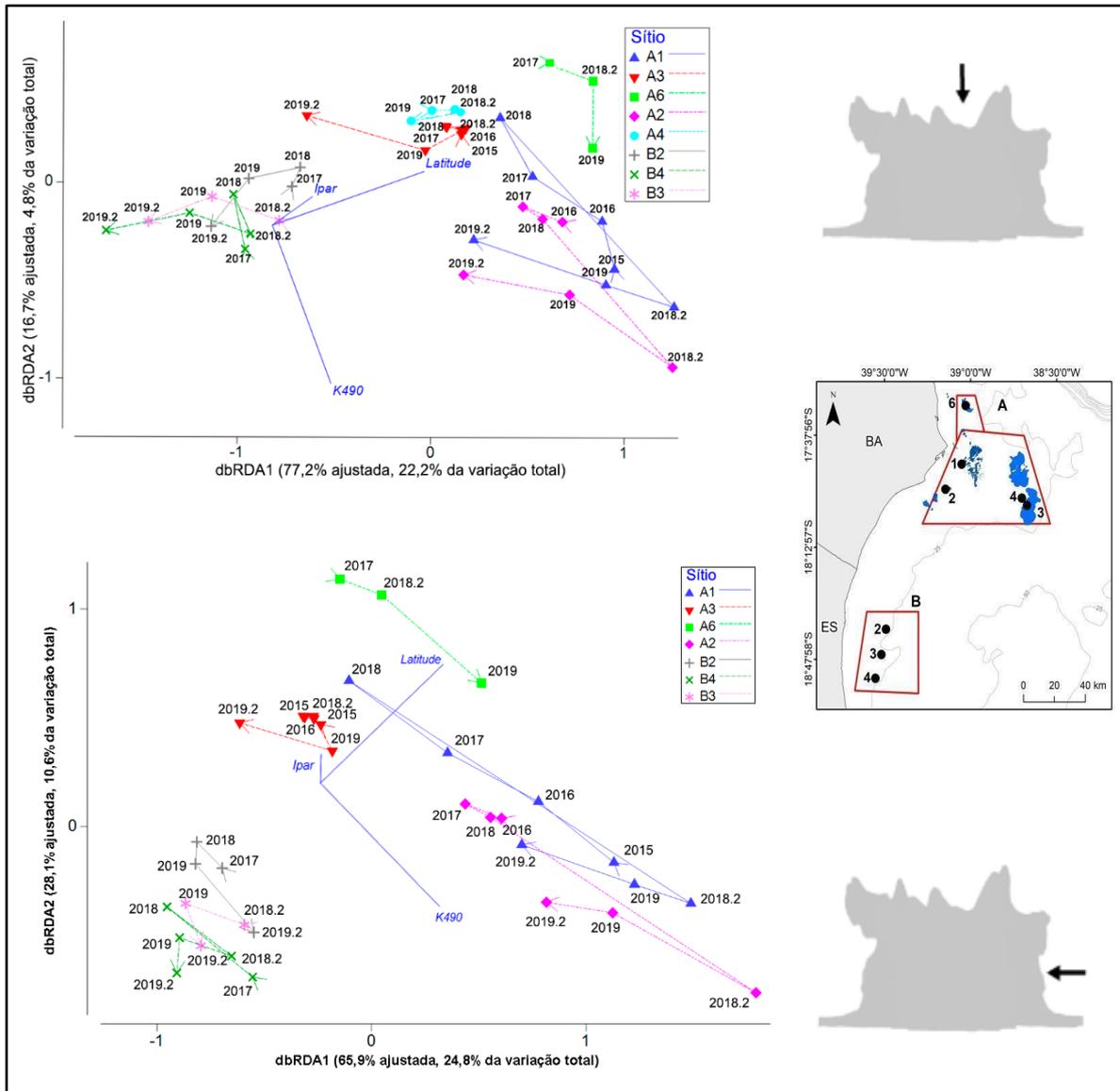


Tabela 21: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distâncias (DISTLM) com os dados de cobertura dos topos e sete variáveis ambientais: (1) Distância da foz do rio Doce; (2) Distância da costa; (3) Kd490 (turbidez); (4) iPAR; (5) SST; (6) Tempo e (7) Latitude.

<b>Testes Marginais</b>				
<b>Variável</b>	<b>SS</b>	<b>Pseudo-F</b>	<b>P</b>	<b>Prop.</b>
Kd490	9.2832	3.466	0.0084	0.081619
iPAR	6.9016	2.5194	0.0315	0.06068
SST	5.7963	2.0942	0.0656	0.050961
T	19.698	1.187	0.245	0.17319
Latitude	21.413	9.0451	0.0002	0.18826

<b>Melhores Soluções Globais</b>				
<b>AIC</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RSS</b>	<b>No.Vars</b>	<b>Seleções</b>
35.909	0.28797	80.985	3	3;4;7
36.407	0.24323	86.074	2	3;7
37.282	0.18826	92.326	1	7
37.427	0.29627	86.074	4	3-5;7
37.644	0.25718	84.488	3	3;5;7

Tabela 22: Sumário do Modelo Linear Baseado em Distâncias (DISTLM) com dados de cobertura das paredes e variáveis ambientais: (1) Distância da foz do rio Doce; (2) Distância da costa; (3) Kd490 (turbidez); (4) iPAR; (5) SST; (6) Tempo e (7) Latitude.

<b>Testes Marginais</b>				
<b>Variável</b>	<b>SS</b>	<b>Pseudo-F</b>	<b>P</b>	<b>Prop.</b>
Kd490	17.288	8.767	0.0001	0.2099
lpar	2.8785	1.1951	0.2993	0.034949
SST	2.953	1.1272	0.281	0.035854
T	10.667	0.6943	0.8935	0.12951
Latitude	14.692	7.1644	0.0001	0.17838

<b>Melhores Soluções Globais</b>				
<b>AIC</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>RSS</b>	<b>No.Vars</b>	<b>Seleções</b>
21.403	0.37678	51.331	3	3;4;7
21.517	0.33798	54.526	2	3;7
22.118	0.57361	35.118	5	3-7
22.87	0.53874	37.991	4	3;5-7
22.929	0.38516	50.64	4	3-5;7

#### 2.5.4. Contrastes Before-After (2015-2019)

Contrastes do tipo *BEFORE-AFTER* (2015-2018), usando dados univariados da cobertura de organismos abundantes (e.g. macroalgas, *turf* e cianobactérias filamentosas) e/ou funcionalmente importantes (e.g. corais), estão sintetizados na Figura 63, Figura 64 e Figura 65. No entanto, dois aspectos demandam cautela na interpretação desses resultados: 1) a série temporal ainda é extremamente limitada para os sítios mais próximos à foz do rio Doce (Área B), não contemplando dados anteriores ao Desastre e nem tampouco séries temporalmente replicadas após o Desastre; 2) A anomalia térmica registrada em escala regional logo após o Desastre (veja RIBEIRO et al., 2018, TEIXEIRA et al., 2019) pode ter interagido com as demais forçantes naturais e antropogênicas, e a magnitude dessa interação é difícil de estimar (embora seja esperado efeito regional, sem contaminação dos contrastes espaciais).

Considerando todos os grandes grupos (Figura 63), observa-se que a variabilidade na cobertura dos recifes esteve concentrada nos grupos de crescimento rápido. A cobertura coralínea, por exemplo, foi notavelmente estável entre 2015 e 2019. Nesse contexto, iremos apresentar, separadamente, os resultados para macroalgas, *turf* e cianobactérias filamentosas (Figura 64) dos resultados concernentes aos corais (Figura 65), ou seja, separaremos os organismos de crescimento mais rápido e dinâmica intensa daqueles de crescimento lento. Os corais compreendem um grupo que recebeu atenção especial durante a execução do projeto, dada sua importância ecológica nos recifes. As análises focadas exclusivamente nos corais (Figura 65) testam a hipótese de que espécies oportunistas de crescimento mais rápido (*weedy corals*) possam estar substituindo espécies longevas e de crescimento lento (e.g. *Mussismilia* spp.), mantendo a cobertura coralínea estável mas com mudanças funcionais importantes no nível da comunidade, tais como perda de complexidade estrutural (LOYA et al., 2001).

As comparações temporais, até o momento, estão restritas a dados obtidos no período de maiores SST (março e abril), entre 2015 e 2019. Essas aquisições pretéritas, feitas consistentemente no “verão”, no âmbito do PELD Abrolhos e outros projetos, tiveram como objetivo controlar possíveis fontes sazonais de variação. Assim, embora mostrados nas figuras, os contrastes e testes estatísticos não incorporaram os dados de novembro de 2018 e julho de 2019. O período 2018-2019 é o único intervalo da série longa (2015-2019) que compreende amostras sazonais (novembro e julho), as quais só podem ser interpretadas com replicação em período compatível em anos subsequentes, ainda indisponível. No entanto, observa-se claramente, nesse último período correspondente ao PMBA, que a variação sazonal pode ser importante (Figura 63, Figura 64 e Figura 65) e merece continuar sendo investigada, inclusive para contribuir com a interpretação de dados, pretéritos ou futuros, adquiridos em diferentes épocas do ano. Identificar os organismos com maior dinâmica sazonal também pode contribuir significativamente para interpretar as tendências de mais longo prazo na cobertura do recife.

A variação na cobertura relativa de macroalgas foi, no geral, inversamente relacionada com aquela de *turf* e cianobactérias (Figura 64). Macroalgas, consideradas importantes antagonistas dos corais em ecossistemas recifais (mas veja RIBEIRO et al., 2018), tendem a responder à contaminação por metais, concentração de nutrientes e pressão de herbivoria, essa última variável geralmente associada a níveis de proteção contra a pesca (FRANCINI-FILHO; MOURA, 2008; FRANCINI-FILHO et al., 2013). Entre março de 2017 e março de 2018 observou-se queda significativa na abundância de macroalgas na parede do sítio B2 (Esquecidos Norte), bem como aumento na cobertura relativa de cianobactérias no topo e parede dos sítios B2 e B4 (Esquecidos Norte e Sul, respectivamente). Na Área A (PARNAM Abrolhos e adjacências), entre março de 2015 e março de 2016, antes e logo após o Desastre, houve queda significativa na abundância de macroalgas no topo do sítio A1 (Pedra de Leste) (Figura 64). Apesar da ausência de dados para A2 (Sebastião Gomes) em 2015, a variação na cobertura de macroalgas nos topos desses dois sítios costeiros da Área A foi congruente ao longo do restante do período amostrado (2016-2019), durante o qual foram registradas flutuações significativas, positivas e negativas, em todos os sítios onde macroalgas são elementos centrais na comunidade bêntica recifal (Figura 64). Nesse contexto, embora possa ter havido relação, não é possível atribuir ao Desastre, de forma inequívoca, a variação observada entre 2015 e 2016.

O sítio A6 (Timbebas), o mais afastado da foz do rio Doce e submetido à menor turbidez, possui cobertura muito baixa de macroalgas, assim como os sítios *offshore* A4 e A3 (A5 é um banco de rodolitos). Na parede do sítio A3 (Parcel dos Abrolhos) foi observada queda na participação de macroalgas a partir de 2015, ao passo que, em A4 (Arquipélago), a cobertura relativa subiu entre 2017 e 2018, e caiu em 2019 (Figura 64). É importante considerar que oscilações na cobertura de macroalgas nos sítios *offshore* da Área A também demandam cautela em interpretações acerca de possíveis respostas ao Desastre, uma vez que sua cobertura é baixa, representando cerca de 1% da superfície do recife.

Figura 63: Tendências temporais (2015 a 2019) da cobertura do recife das Áreas A e B, destacando o momento do Desastre e os períodos subsequentes de anomalias térmicas. ENOS= ENSO = *El Niño Southern Oscillation*.

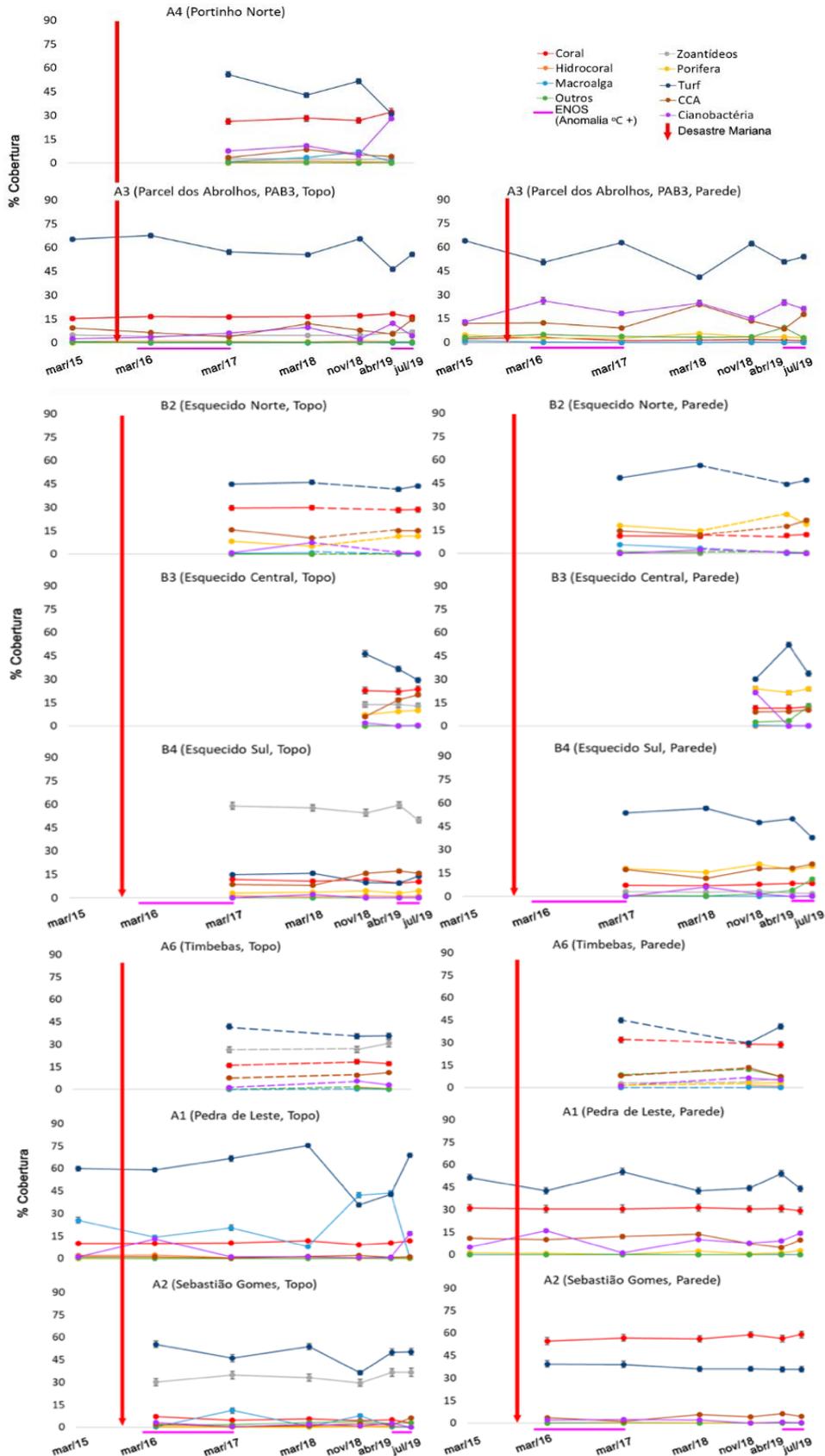
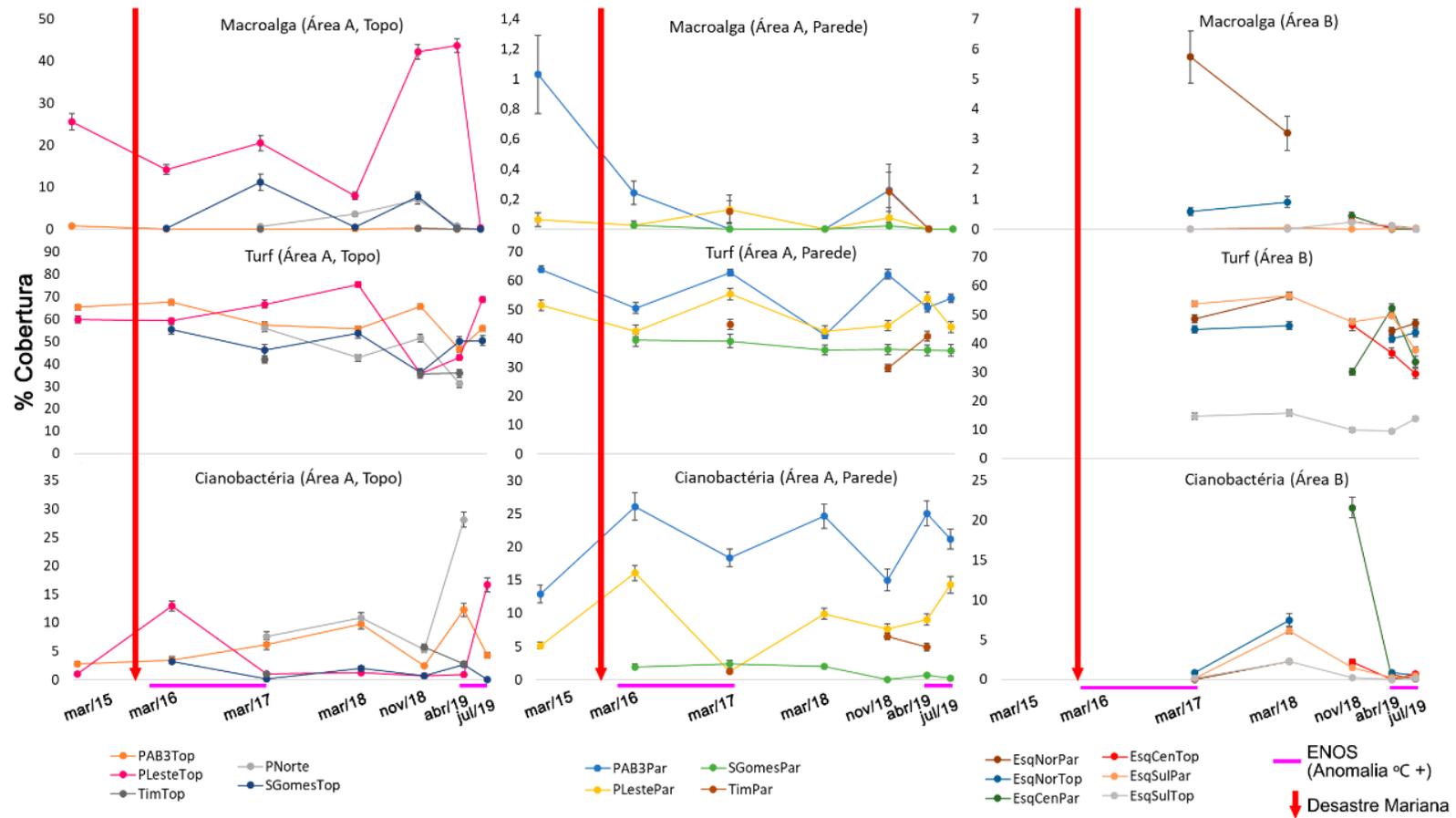


Figura 64: Tendências temporais (2015 a 2019) da cobertura de macroalgas, *turf* e cianobactérias filamentosas nos topos dos recifes das Áreas A e B, destacando o momento do Desastre e os períodos subsequentes de anomalias térmicas. ENOS= ENSO = *El Niño Southern Oscillation*.

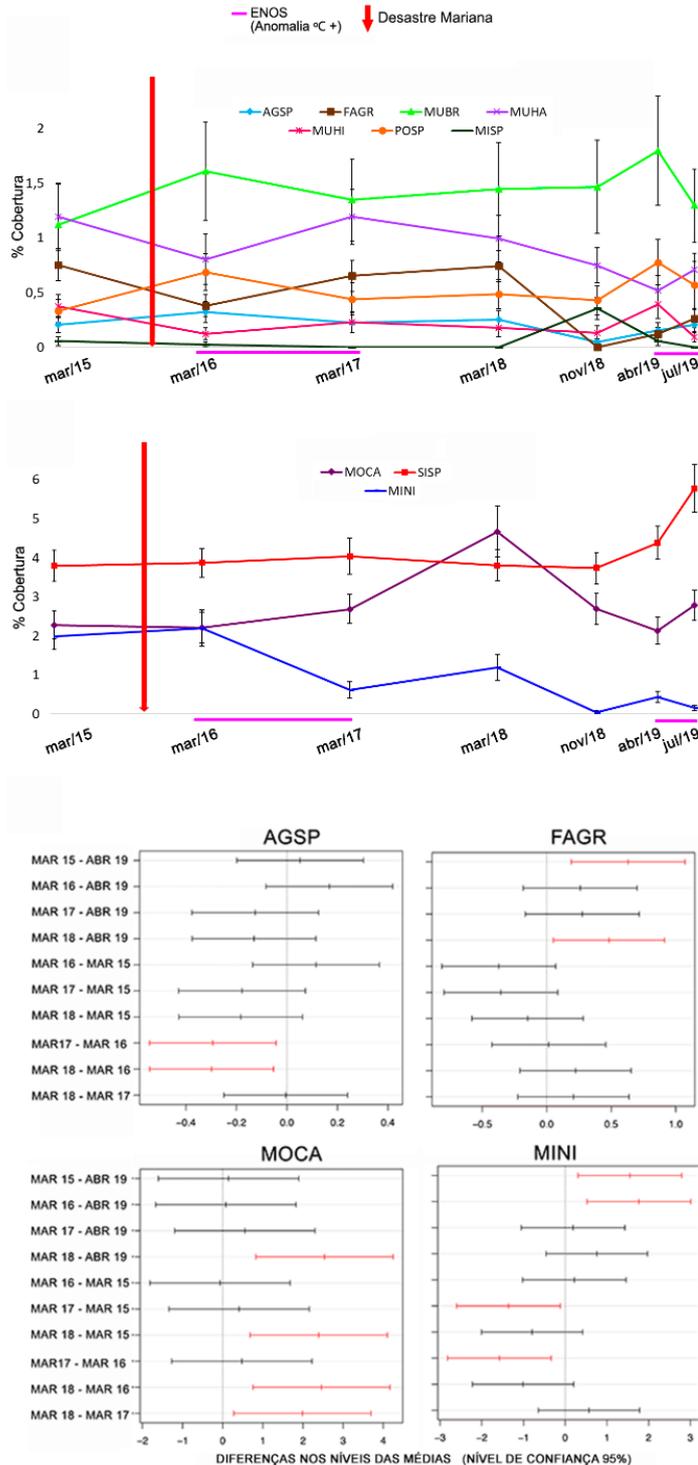


A cobertura de corais, como um todo, foi estável em todos os sítios entre 2015 e 2019 (veja Figura 63). Para testar a hipótese *winners and losers*, que propõe que espécies oportunistas de crescimento rápido podem substituir espécies longevas de crescimento lento (e.g. *Mussismilia* spp.) sem afetar a cobertura coralínea total (LOYA et al., 2001), utilizamos os dados do topo do sítio A1 (Pedra de Leste), sítio que possui as séries mais longas de dados e que possui cobertura expressiva de corais (cerca de 15% da superfície). Dos 10 táxons de corais que ocorreram em A1 (Figura 65), quatro apresentaram variações significativas [ANOVA *one-way* (ano), teste *a posteriori* Tukey HSD] ao longo desses cinco anos: *Agaricia* spp., *F. gravida*, *M. cavernosa* e *M. nitida*.

Entre 2016 e 2019, *Agaricia* spp. apresentou variação positiva, ao passo que *F. gravida* apresentou variação negativa entre 2015 e 2019. Embora as médias de cobertura de *F. gravida* tenham crescido entre 2016 e 2018, essa variação não foi estatisticamente significativa. *Millepora nitida*, uma espécie de coral endêmica do Brasil cuja cobertura nos sítios costeiros da Área A estava dentre as mais expressivas (cerca de 2% em A1), sofreu declínio significativo entre 2015 e 2019. Atualmente, *M. nitida* abrange menos de 0,5% da cobertura do recife em A1 (Pedra de Leste). O declínio de *M. nitida* foi claramente acentuado após a anomalia térmica positiva de 2016-2017, não havendo relação inequívoca com o Desastre (observe cobertura estável entre 2015 e 2016, Figura 65). Por fim, *M. cavernosa* apresentou variação significativa, positiva, em 2018. Ressalta-se, no entanto, que *M. cavernosa* não é espécie abundante nos topos e outros habitats bem iluminados, cobrindo apenas 3% do topo de A1 (sua cobertura relativa nas paredes desse mesmo sítio supera os 30%). Assim, não fomos capazes de interpretar esse aumento pontual na sua cobertura relativa como resposta ao Desastre ou à anomalia térmica, podendo ser parte da variação estocástica típica dos ecossistemas recifais, ainda mal conhecida no Atlântico Sul.

Nesse momento, não somos capazes de demonstrar, inequivocamente, efeitos negativos do Desastre sobre a cobertura de corais. No entanto, aportes crônicos de sedimentos e contaminantes, bem como efeitos de propagação complexa na rede trófica e nas comunidades, podem se configurar apenas em longo prazo, demandando monitoramento contínuo. Nesse sentido, os recifes próximos à foz do rio Doce ainda estão sendo descritos, não havendo séries temporais que permitam testar essa hipótese. As análises aqui apresentadas serão aprimoradas ao longo do desenvolvimento do PMBA, na medida em que dados adicionais forem coletados e outros dados antecedentes venham a ser eventualmente incorporados. As séries temporais longas mostram que inferências feitas sobre séries curtas podem ser enganosas (e.g. queda de 20% na abundância de macroalgas no topo de Pedra de Leste entre 2015 e 2016).

Figura 65: Tendências temporais (2015 a 2019) da cobertura de corais nos topos dos recifes de Pedra de Leste (A1) mostrando o momento do Desastre e anomalias térmicas subsequentes. O painel inferior mostra os resultados do teste *a posteriori* [apenas os referentes as espécies cujas diferenças foram significativas (ANOVA)]. A linha representa o intervalo de confiança para diferença entre duas campanhas (cor vermelha indica diferença significativa). Chave: AGSP: *Agaricia* spp.; FAGR: *Favia gravida*; MOCA: *Montastraea cavernosa*; MUBR: *Mussismilia braziliensis*; MUHA: *Mussismilia hartii*; MUHI: *Mussismilia hispida*; POSP: *Porites* spp.; SISP: *Siderastrea* spp.; MINI: *Millepora nitida*; MISP: *Millepora* spp. ENOS= ENSO = *El Niño Southern Oscillation*.



## 2.6. AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO FISIOLÓGICA DE CORAIS E CARACTERIZAÇÃO DE SIMBIONTES

O estado fisiológico de corais nas áreas A e B (Abrolhos e Recifes Esquecidos) foi avaliado sob a perspectiva dos simbioses fotossintetizantes (zooxantelas) que ocupam espaço intracelular na gastroderme desses e de outros hospedeiros (e.g. zoantídeos). Os parâmetros fotossintéticos foram adquiridos *in situ* com uso da técnica de iluminação por pulso de luz de amplitude modulada (PAM - *Pulse-Amplitude-Modulation*), para avaliação do funcionamento do aparato fotossintético (KLUGHAMMER; SCHREIBER, 2008) (Figura 66). Os dois equipamentos utilizados foram adquiridos antes do PMBA. A fluorimetria com PAM, por meio de curvas rápidas de luz (RLC's - *Rapid Light Curves*), é uma alternativa não destrutiva para acessar a saúde do coral através de indicadores do estado do aparato fotossintético (RALPH; GADEMANN, 2005) que, por sua vez, reflete a condição fisiológica dos simbioses e alterações provocadas por estresses hiposalinos (JONES; KERSWELL, 2003), sedimentação (PHILIPP; FABRICIUS, 2003), anomalias térmicas (FITT et al., 2001), e exposição aguda a metais e herbicidas (JONES, 2004; JONES; KERSWELL, 2003). A amostragem por fluorimetria com PAM foi pareada com a coleta da colônia do coral, para quantificação e caracterização morfo-fisiológica das zooxantelas. Essas microalgas (dinoflagelados) convertem energia eletromagnética em energia química nos cloroplastos, organelas que abrigam um conjunto de fotossistemas (aparato fotossintético) compostos por complexos coletores de luz (i.e. *antennae*) e centros de reação. Trata-se de reações responsáveis pela fixação de compostos inorgânicos (e.g. CO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) em compostos orgânicos. A cobertura amostral das medidas com PAM e parâmetros pareados está apresentada na Figura 66 e abrangeu as três primeiras campanhas do primeiro ciclo de execução do projeto, ressaltando-se que a última campanha está em execução.

### 2.6.1. Relação entre os parâmetros acessados

A taxa de transporte de elétrons (ETR - *Electron Transport Rate*) é uma medida aproximada do fluxo total de energia transferida por meio das cadeias transportadoras de elétrons para as reações de fixação dos compostos orgânicos, sendo utilizada como indicador da atividade fotossintética instantânea (RALPH; GADEMANN, 2005). A taxa relativa máxima de transporte elétrons (rETR<sub>m</sub>) é uma estimativa da capacidade fotossintética máxima do fotossistema, de acordo com a eficiência máxima de uso da luz, definida pela inclinação da RLC (i.e. alfa). O rendimento quântico máximo (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), reflete a energia luminosa convertida em energia fotoquímica (RALPH; GADEMANN, 2005). Como todo sistema de conversão energética, os fotossistemas estão sujeitos a sobrecarga (e.g. excesso de irradiância), resultando primeiramente na fotoinibição e, em situações de exposição crônica, na fotodegradação do Fotossistema II (PSII), interrompendo a fixação dos compostos orgânicos. Da mesma forma, proteínas estruturais e enzimas carreadoras do aparato fotossintético são sensíveis à termodegradação, limitação de nutrientes, e efeitos secundários pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio geradas por estresse oxidativo (FITT et al., 2001; WOODLEY et al., 2016). Ao submeter a

amostra a irradiâncias crescentes durante a RLC, os valores de ETR aumentam desde a região limitada pela luz até um platô, seguido por um declínio que corresponde à saturação da cadeia transportadora de elétrons. Em situações de estresse fisiológico é esperado um comportamento errático da curva, relacionado ao comprometimento dos mecanismos de fotoproteção, envolvendo a dissipação do excesso de energia e degradação estrutural do aparato fotossintético.

## 2.6.2. Parâmetros x regime de luz

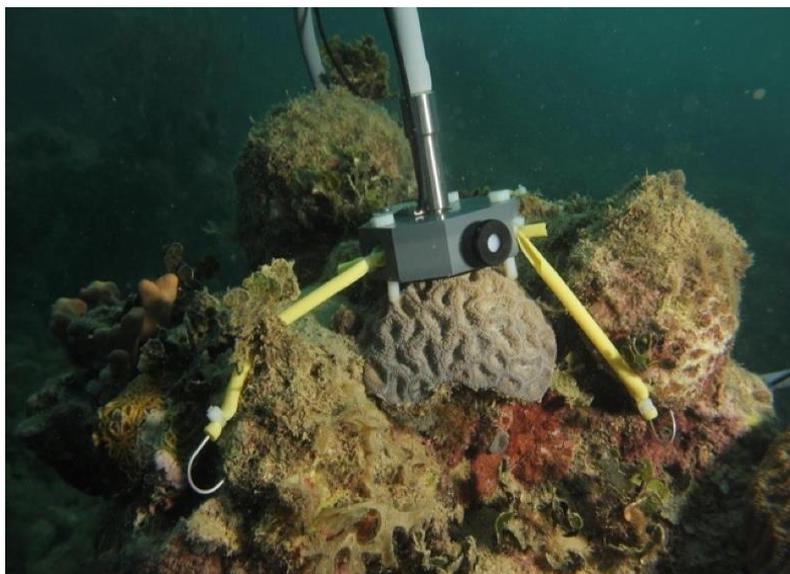
A investigação da fotofisiologia de corais utilizando a técnica da RLC é baseada na relação entre parâmetros fisiológicos e abióticos. O rendimento ( $F_v/F_m$ ) e a taxa fotossintética ( $\alpha$ ) demonstram a adaptabilidade dos fotossistemas através da alteração da eficiência na coleta de energia luminosa. Este ajuste permite atingir a irradiância mínima necessária ao crescimento do coral (i.e.  $E_k$ ) que, aliada à taxa máxima relativa de transporte de elétrons ( $rETR_m$ ), reflete a fotoaclimação do holobionte (HENNIGE et al., 2008). O espectro da luz utilizado na fotossíntese é conhecido como radiação fotossinteticamente ativa (PAR), e sua incidência sobre os aparatos fotossintéticos das zooxantelas é condicionada pela penetração da luz na água. A intensidade de luz disponível é inversamente proporcional à profundidade e ao coeficiente de atenuação vertical, sendo que a profundidade ótica é o produto dessas duas últimas variáveis (Figura 67). Da mesma forma, a taxa de transporte de elétrons e a irradiância mínima saturante variam de acordo com a profundidade ótica, assim como o  $\alpha$  e o  $F_v/F_m$  (HENNIGE et al., 2008).

O coeficiente de atenuação vertical da luz em 490 nm ( $K_d490$ ), obtido por sensoriamento remoto, foi analisado em conjunto com os valores de PAR e profundidade (obtidos *in situ*) no sentido de descrever o ambiente de luz onde foram obtidas as amostras. Nas Áreas A (PARNAM Abrolhos e adjacências) e B (Recifes Esquecidos), os recifes estão sujeitos a regimes distintos de turbidez, gerados por plumas de material dissolvido e partículas oriundas do aporte continental e da ressuspensão do sedimento misto, terrígeno e carbonático (SEGAL et al., 2008; SEGAL; CASTRO, 2011; TEIXEIRA et al., 2019). Além disso, as estruturas recifais variam quanto à profundidade e complexidade topográfica, que influenciam diretamente a incidência luminosa sobre os corais (TEIXEIRA et al., 2019). Os chapeirões, típicos do Parcel dos Abrolhos (veja Figura 46), possuem topos iluminados com amplos platôs e paredes sombreadas caracterizadas por superfícies verticais mais profundas (BASTOS et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2019). Essas características, combinadas, contribuem para a alta diversidade de microambientes de luz na região de estudo, explicando a alta variabilidade nas respostas fisiológicas.

O comportamento das curvas de luz (ETR X PAR) obtidas em novembro de 2018 e abril de 2019 apontam para aparatos fotossintéticos em funcionamento (KLUGHAMMER; SCHREIBER, 2008), evidenciados pela presença dos componentes típicos de subida, estabilização e queda na taxa de ETR (Figura 68). A altura distinta dos platôs, observada entre táxons, foi gerada por capacidades

fotossintéticas distintas relacionadas aos regimes de luz específicos (e.g. escala de  $m^2$ ), possivelmente aliados às características dos aparatos de cada consórcio de zooxantelas (HENNIGE et al., 2008). Em abril de 2019 o ambiente foi caracterizado por menor incidência luminosa sobre os corais, atribuída a coeficientes de atenuação mais elevados e menor irradiância, assim como por ter apresentado maior temperatura (Figura 69). Apesar da queda na altura (i.e. rETRm) dos platôs, foi notório o aumento no ângulo da curva, evidenciando maior eficiência (i.e. alfa) em abril de 2019, como forma de compensar a baixa irradiância. Logo, a diferença de altura das RLC's entre campanhas pode ser atribuída, primariamente, à fotoaclimação (HENNIGE et al., 2008).

Figura 66: Fluorimetria com Diving-PAM aplicada sobre colônia de *Mussismilia braziliensis*, no sítio A1 (Parcel das Paredes).



Quadro 5: Cobertura amostral das medidas com PAM e parâmetros pareados nas Áreas A e B (veja Figura 1 para localização detalhada dos sítios). Chave: C = coletado, P = processado, A=analisado

	novembro, 2018	abril, 2019	junho e julho, 2019	setembro, 2019
A1	C/P/A	C/P/A	Não coletado (branqueamento em massa)	C/P
A2	C/P/A	C/P/A		C/P
A3	C/P/A	C/P/A		C/P
A4	C/P/A	C/P/A		C/P
A6	C/P/A	C/P/A		C/P
B2	N/D	C/P/A		N/D
B4	C/P/A	C/P/A		N/D

Figura 67: Regime de luz descrito pela radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e profundidade ótica nos diferentes sítios em novembro e abril de 2019. As barras representam o desvio padrão.

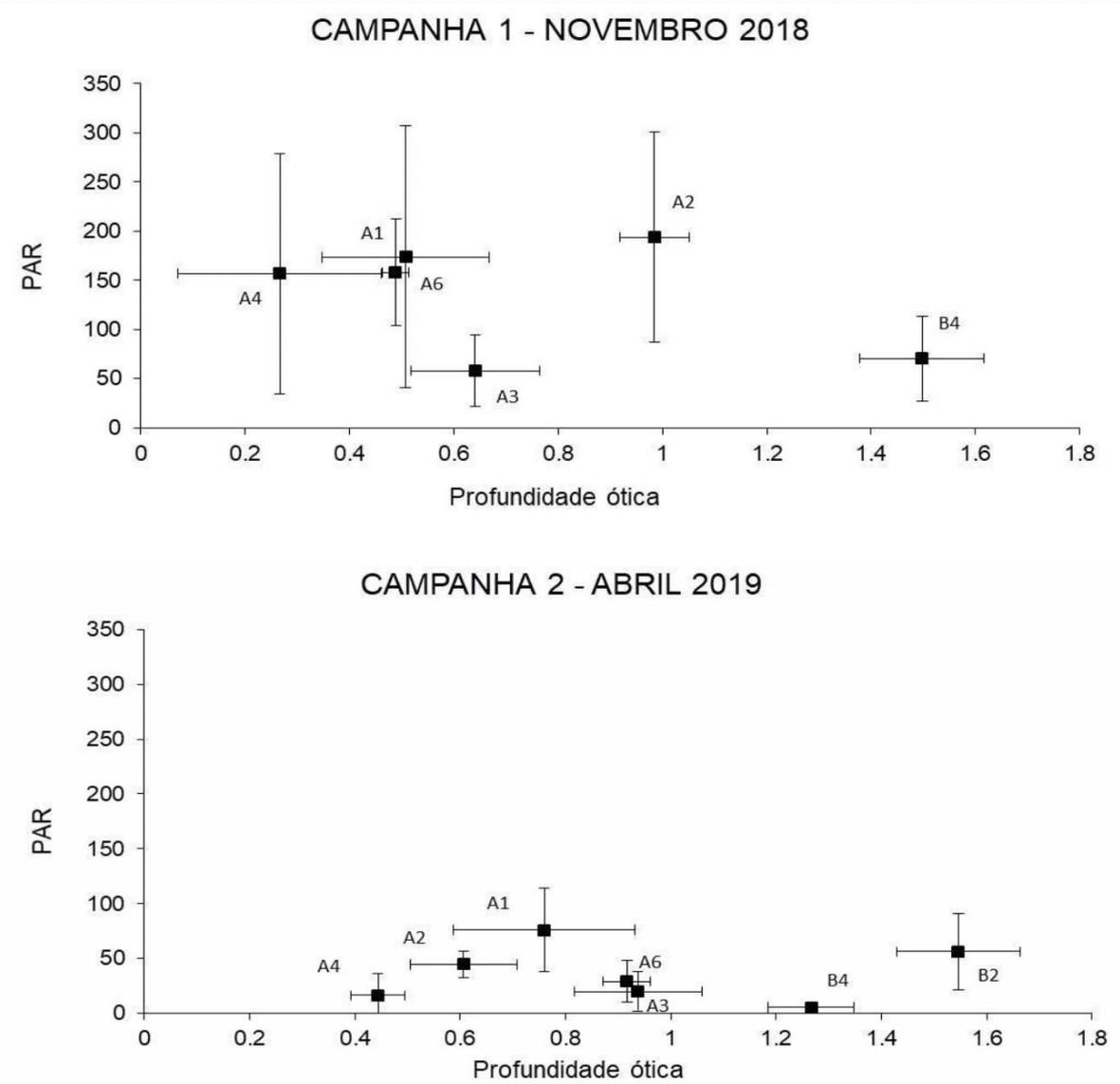
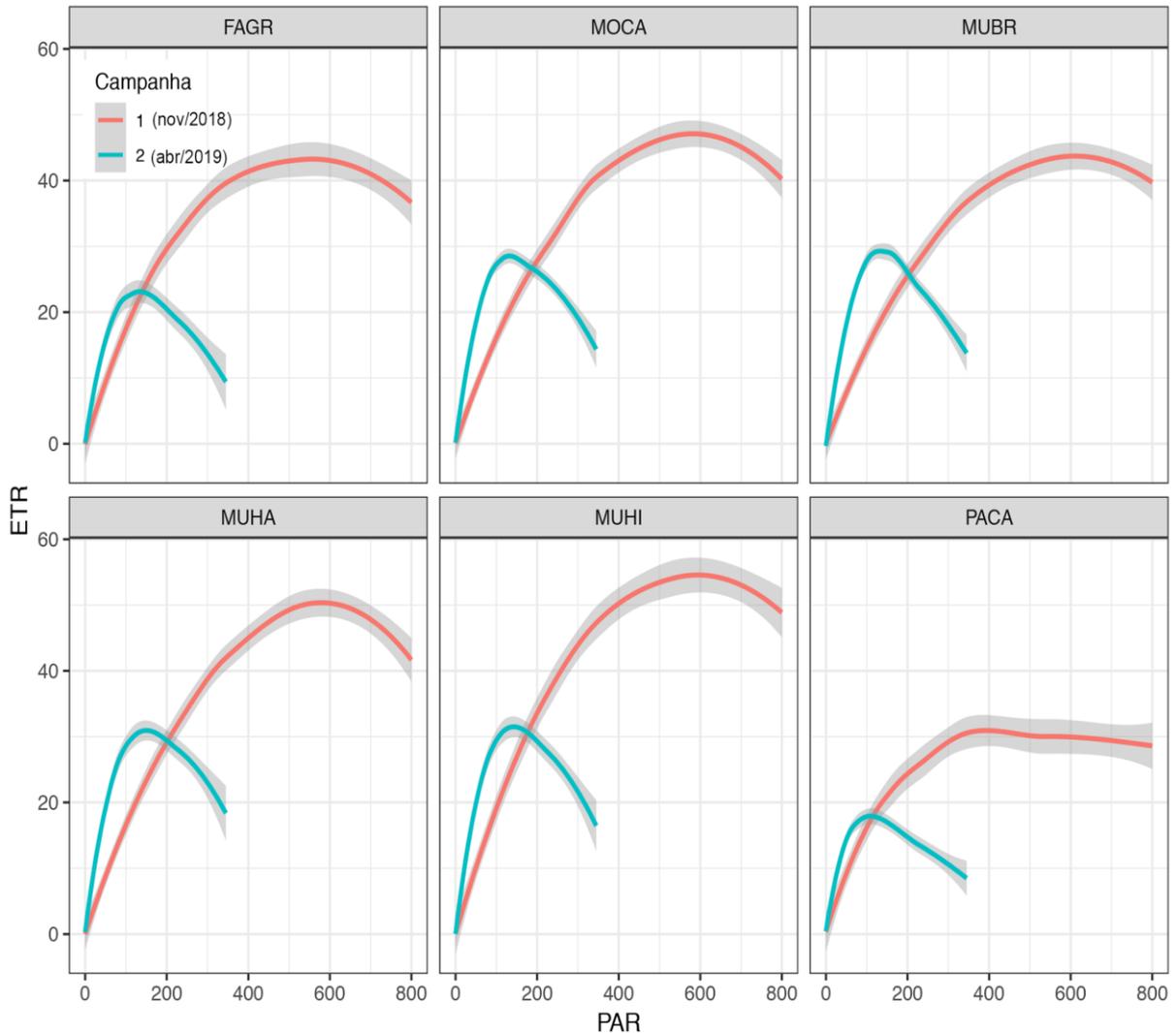


Figura 68: Curvas rápidas de luz (RLC's) derivadas da taxa de transporte de elétrons em função do PAR actínico, por espécie. Chave: Faixa cinza = intervalos de confiança. Vermelho= novembro 2018, Azul = abril 2019. FAGR= *Favia gravida*; MOCA= *Montastraea cavernosa*; MUBR= *Mussismilia braziliensis*; MUHA= *Mussismilia harttii*; MUHI= *Mussismilia hispida*; PACA= *Palythoa caribaeorum*.



O perfil reduzido das RLC's em abril de 2019 também foi influenciado pela anomalia térmica positiva do período. Apesar do comportamento típico das RLC's (Figura 68), a taxa de transporte de elétrons reduzida (rETR<sub>m</sub>) pode estar relacionada a uma queda na função do fotossistema (e reações de fixação de carbono), correlacionada negativamente com SST ( $r < -0.5$ ). Trata-se de um sintoma da termodegradação de parte dos centros de reação do PSII, como estratégia de prevenção de danos irreversíveis ao aparato fotossintético (LESSER, 2011). A redução concomitante na densidade de zooxantelas, igualmente induzida pela alta SST, foi acompanhada por uma baixa na concentração de clorofila. O menor teor de pigmentos fotossintetizantes em abril de 2019 não caracteriza uma termodegradação da clorofila, mas sim a perda de células de simbiontes, haja vista os valores médios

constantes de clorofila por célula entre as duas campanhas. Vale ressaltar que a anomalia térmica perdurou por mais algumas semanas após o período de coletas, o que pode ter levado a danos mais severos nos organismos (estimativas de mortalidade serão feitas com os dados da última campanha do primeiro ciclo, em andamento). A correlação entre rETR<sub>m</sub> e densidade não foi observada para todos os táxons, e somente *M. braziliensis* e *M. cavernosa* tiveram correlações positivas, com  $r > 0.5$ , entre essas variáveis. Para *M. braziliensis*, *P. caribaeorum* e *M. hispida*, a densidade de zooxantelas foi pouco variável entre campanhas. Em recifes localizados em ambientes oligotróficos, é descrito que, a partir de 27-28 graus, ocorre um aumento metabólico inicial, seguido por maiores taxas de divisão celular e troca de células, com expulsão de simbiontes somente a partir de 29-30 graus (LESSER, 2011). No entanto, esses limiares são contexto-dependentes e variam entre hospedeiros, consórcios de endossimbiontes e locais (SUGGET et al., 2015). O rendimento fotossintético (i.e. F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) foi negativamente correlacionado com a incidência luminosa, e positivamente com a profundidade ótica (Figura 67 e Figura 70). Esse padrão, variável entre táxons, pode ser atribuído a incrementos na profundidade ótica de cada sítio, o que também reflete a capacidade de fotoaclimação à menor irradiância, através de uma coleta de luz mais eficaz por meio da reorganização do PSII e/ou alterações dos pigmentos fotossintetizantes (HENNIGE et al., 2008).

Em novembro de 2018, *P. caribaeorum* exibiu o maior biovolume celular, ao passo que, em abril de 2019, houve redução acentuada deste parâmetro em *P. caribaeorum* e *M. harttii*, e somente nessas espécies foi demonstrada correlação negativa com temperatura (Figura 71). Entretanto, em situações de estresse (e.g. anomalias térmicas), espera-se que o mesmo grupo de zooxantelas apresente aumento no biovolume em decorrência da estagnação no último estágio da divisão celular (i.e. *cell cycle arrest*), devido à duplicação do material genético e organelas celulares (MCLENON; DITULLIO, 2012). Esse aumento também é atribuído ao surgimento de vacúolos pré-apoptóticos, desencadeados pelo acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS - *reactive oxygen species*) (MCLENON; DITULLIO, 2012). Além disso, é amplamente reportada a troca de dominância no consórcio de zooxantelas por táxons termo-tolerantes e/ou oportunistas (TOLLER et al., 2001; BAKER, 2003; JONES et al., 2008; KEMP et al., 2014; LAJENEUSSE et al., 2018). A variação do biovolume entre essas duas espécies durante a anomalia térmica de abril de 2019 não condiz com o comportamento observado em experimentos *in vitro* (MCLENON; DITULLIO, 2012), apontando para uma possível alternância na dominância da comunidade de zooxantelas. Para as demais espécies o biovolume celular de zooxantelas não variou de forma contrastante entre campanhas e sítios.

Figura 69: Regressão linear entre rETR<sub>m</sub> e densidade de zooxantelas. As retas das regressões lineares estão representadas por linhas azuis e as faixas cinza representam o intervalo de confiança. As cores dos pontos são relativas à temperatura da superfície do mar (SST). Chave: FAGR= *Favia gravida*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia hartii*; PACA = *Palythoa caribaeorum*.

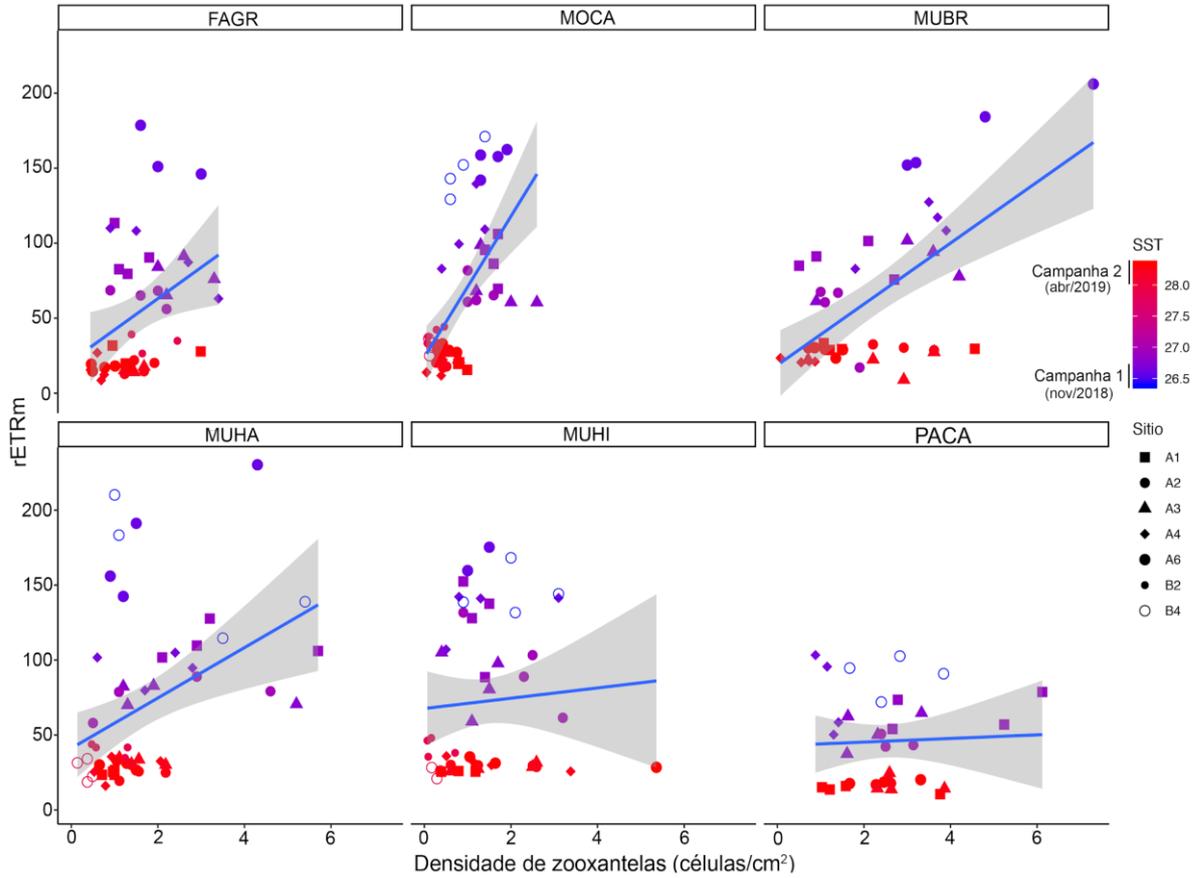


Figura 70: Regressão linear entre Fv/Fm, PAR e profundidade ótica. As retas de regressões lineares estão representadas por linhas azuis e as faixas cinza representam o intervalo de confiança. As cores dos pontos são relativas à temperatura da superfície do mar (SST). Chave: FAGR= *Favia gravida*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia hartii*; PACA = *Palythoa caribaeorum*.

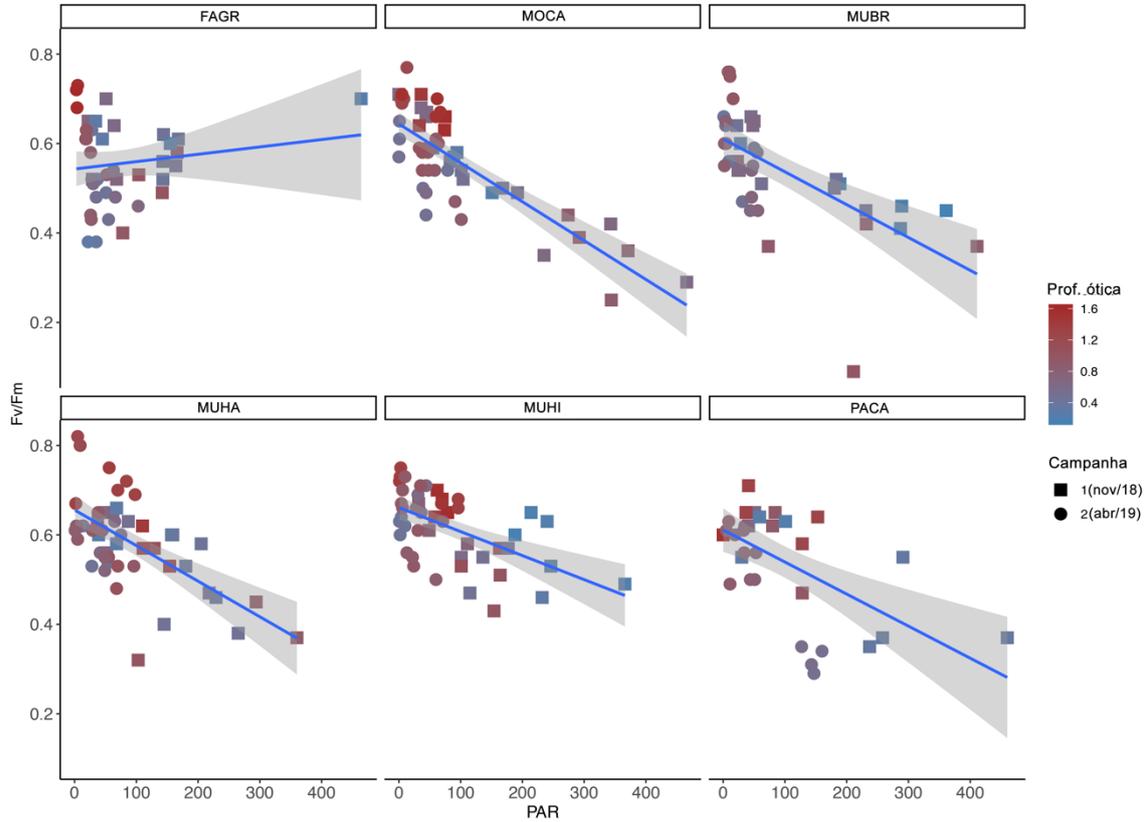
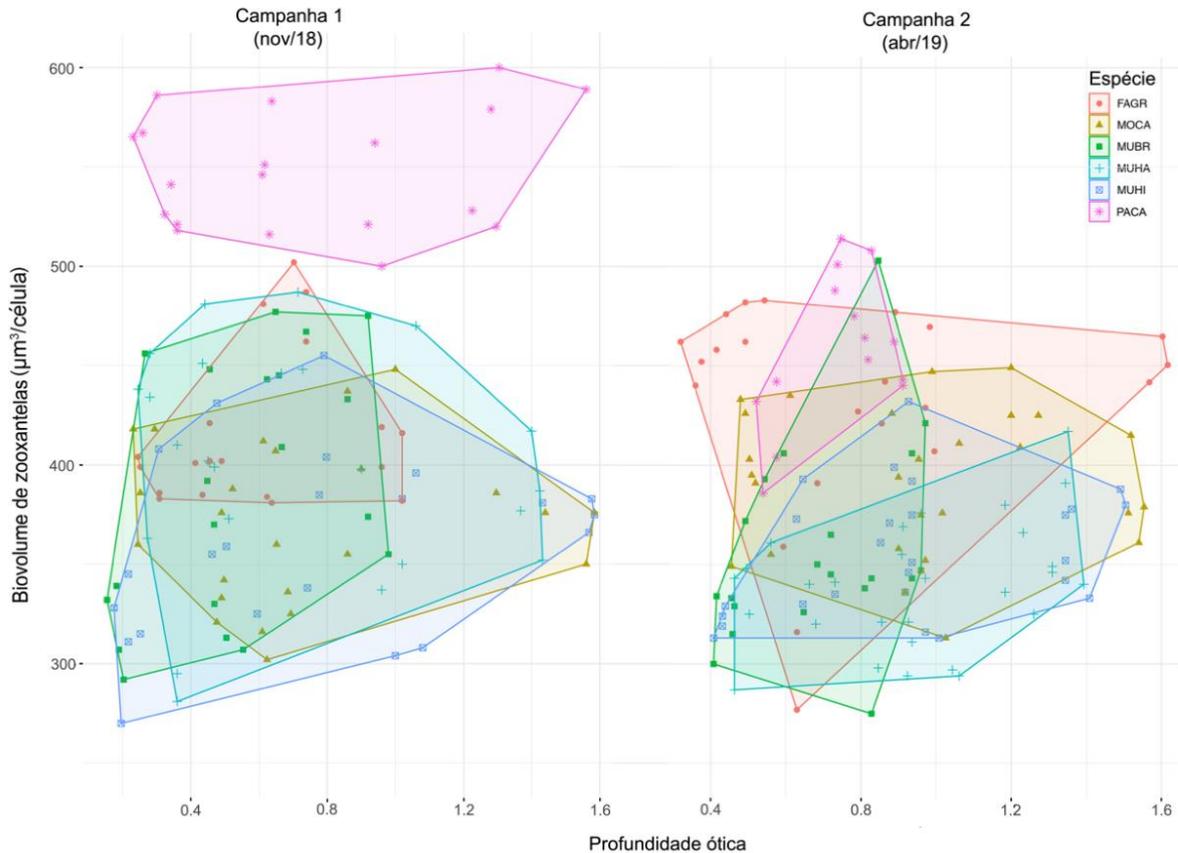


Figura 71: Biovolume celular de zooxantelas em novembro 2018 (campanha 1, esq.), e em abril 2019 (campanha 2, dir.), em função da profundidade ótica. Cores e polígonos são relativos às espécies de coral: Chave: FAGR= *Favia gravida*; MOCA = *Montastraea cavernosa*; MUBR = *Mussismilia braziliensis*; MUHA = *Mussismilia harttii*; PACA = *Palythoa caribaeorum*.



### 2.6.3. Fotossíntese dos corais e anomalia térmica

Ressaltamos que a anomalia térmica perdurou por 150 dias (Figura 72), configurando a maior onda de calor já registrada para a região (síntese em TEIXEIRA et al., 2019). Esse efeito é potencializado de maneira periódica pelo fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), quando são detectadas anomalias térmicas positivas na temperatura de superfície do mar. Durante períodos anômalos intensos e longos ocorre degradação dos fotossistemas por estresse oxidativo, e posterior ruptura da simbiose entre a zooxantela e o coral. O principal sintoma desse processo é a perda de pigmentação do coral devido à diminuição da densidade de zooxantelas e degradação dos pigmentos fotossintetizantes, caracterizando o branqueamento. Em geral, quando a temperatura atinge 29-30°C por algumas semanas, ocorrem mudanças nas membranas, queda na função do fotossistema II, e consequente redução de translocação de metabolitos altamente energéticos para o hospedeiro. Nessa faixa de temperatura ocorre maior produção e acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) e de nitrogênio (NOS), levando a excitose acentuada de zooxantelas. Entre 30-32 °C, a produção de ROS/RNS se intensifica, sendo seguida pela degradação dos fotossistemas, aumento dos ciclos celulares, de expressão de genes pré-apoptóticos, morte de zooxantelas e do próprio coral (LESSER, 2011). A campanha de abril de 2019 coincide com o início de um evento de branqueamento em massa (Figura

72), sustentado até julho de 2019, o que inviabilizou o uso da fluorimetria por PAM na terceira campanha devido à reduzida densidade de zooxantelas (Figura 73). Nessa situação os sinais de fluorescência estão abaixo do nível de detecção pelo fluorímetro PAM e aumenta a probabilidade de se obter leituras de organismos oportunistas (e.g. epífitas) não relacionados com a saúde do coral. Os padrões de mortalidade e recuperação devem ser focos centrais das próximas campanhas de monitoramento, uma vez que o impacto pode ser abrangente e duradouro, comprometendo iniciativas de mitigação e restauração dos recifes.

Os parâmetros fotossintéticos dos endossimbiontes variaram de novembro de 2018 a abril de 2019, entre hospedeiros, sítios e áreas. Os principais fatores associados a essa variação foram: 1) turbidez, com forte heterogeneidade temporal e espacial, induzindo a fotoaclimação a irradiâncias mais baixas e possíveis efeitos na translocação de fotossintatos para o hospedeiro e no saldo de fixação de carbono do coral; 2) anomalias térmicas positivas que induziram a redução na densidade de zooxantelas e, quando em sinergia com a turbidez, podem contribuir para redução da atividade fotossintética. Logo, impactos antropogênicos que contribuam para o incremento da turbidez, tais como ressuspensão crônica de sedimentos, oriundos ou não do Desastre, serão potencializados por anomalias térmicas positivas que tendem a se intensificar.

Figura 72: Série temporal da temperatura de superfície do mar (SST) e índice de semanas de aquecimento (DHW – *degree heating weeks*) em Abrolhos. As cores representam o nível de estresse fisiológico relativo ao branqueamento. Chave: Linha azul sólida = temperatura limiar do branqueamento; Linha tracejada = média máxima mensal de temperatura; + = climatologia mensal média; faixa cinza = amplitude de SST por 5 km, tracejado laranja = DHW 4 (inferior), 8 (superior). Extraído de NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://coralreefwatch.noaa.gov>, acessado em agosto de 2019).

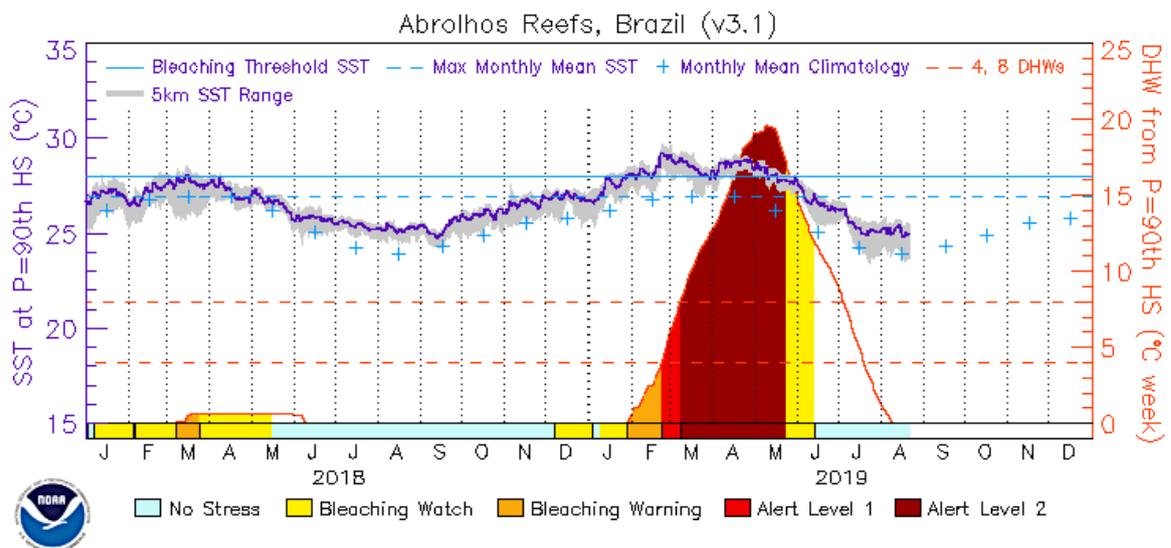
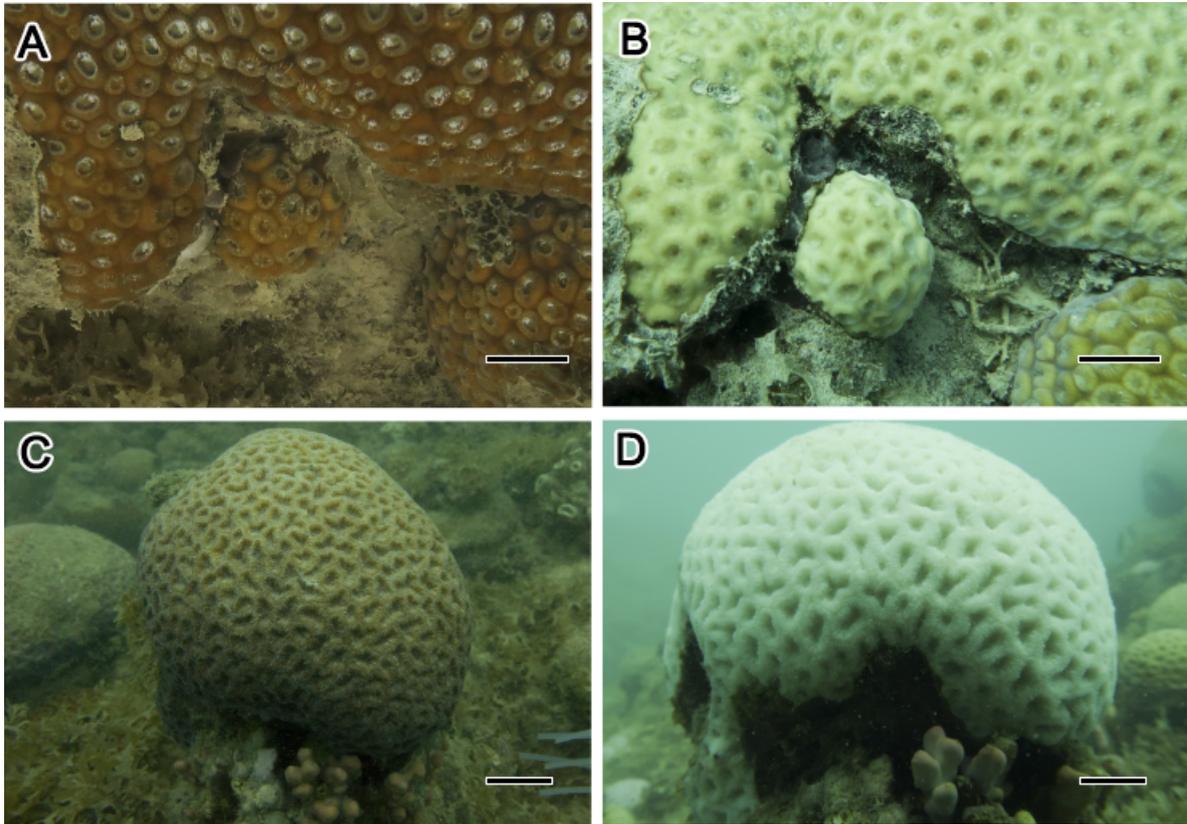


Figura 73: Espécimes de *Montastraea cavernosa* (A,B) e *Mussismilia braziliensis* (C,D) antes da anomalia térmica em novembro de 2018 (A,C) e no início da anomalia em abril de 2019 (B,D). Barra de escala = 2cm.



#### 2.6.4. Caracterização de zooxantelas por sequenciamento gênico

A caracterização genética das zooxantelas está sendo feita através do sequenciamento do marcador ITS-2. Até o momento foram feitas extrações de DNA de 157 espécimes de seis táxons de corais (Quadro 6) e testes com os iniciadores que serão utilizados na amplificação por PCR. A caracterização gênica será feita em amostras selecionadas desta coleção, com base nos resultados integrados das análises morfológicas e de densidade de zooxantelas. A base de dados detalhada acerca da diversidade de endossimbiontes e da fotofisiologia dos corais, ainda que pareça desconectada da temática central do projeto, pode levar à seleção de linhagens mais resistentes que possam ser utilizadas em projetos de restauração, por exemplo, bem como identificar locais e habitats que possam estar operando como refúgios e/ou fontes de propágulos para áreas mais degradadas.

Quadro 6: Material biológico coletado e andamento do processamento das amostras para caracterização gênica de zooxantelas. A tabela indica o número de amostras com DNA de qualidade aceitável para o prosseguimento das análises ( $A_{260}/A_{280} > 1,6$ ).

Táxon	Número de espécimes coletados	Espécimes com DNA extraído	Espécimes com DNA quantificado	$A_{260}/A_{280} > 1,6$	Amostras purificadas para PCR	Amostras com amplicons de ITS-2
<i>Favia gravida</i>	25	20	20	15	15	9
<i>Mussismilia braziliensis</i>	25	25	25	25	15	12
<i>Mussismilia harttii</i>	30	25	20	15	15	18
<i>Mussismilia hispida</i>	25	24	20	19	5	-
<i>Montastraea cavernosa</i>	34	34	34	16	25	19
<i>Palythoa</i> sp.	29	29	27	27	-	-
TOTAL	168	157	146	117	75	58

Testes de amplificação do gene escolhido (ITS-2) foram realizados e, devido ao baixo sucesso de amplificação inicial por PCR dessas regiões, os protocolos foram revistos e modificados. Os novos protocolos resultaram em maior eficiência na extração de DNA e amplificação do gene ITS. Obtivemos DNA de qualidade de 117 espécimes e amplificamos com sucesso o ITS-1 de 58 espécimes (Quadro 6). As amostras já amplificadas estão sendo encaminhadas para o sequenciamento na plataforma Illumina.

## 2.7. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA

O conhecimento das características físico-químicas da água sobrejacente aos recifes e bancos de rodolitos auxilia no entendimento das condições de estratificação ou mistura da coluna d'água e sua interação com esses ambientes, além de contribuir com o diagnóstico das massas d'água que atuam na região. Juntamente com estes parâmetros, medições de atenuação da intensidade de radiação luminosa ao longo da coluna d'água são fundamentais para interpretar a estrutura e a dinâmica de comunidades de organismos fotossintetizantes, tanto na água quanto nos recifes e bancos de rodolitos.

Em cada um dos sítios amostrados na primeira campanha, a coluna d'água foi perfilada verticalmente com um CTD RBR, modelo Concerto 3, adquirido previamente ao PMBA e que conta com sensores de temperatura, salinidade e radiação solar na faixa de comprimento de onda da radiação

fotosinteticamente ativa (PAR). Este rol de parâmetros foi ampliado na segunda e terceira campanhas, quando o equipamento previsto no PMBA (sonda multiparâmetro *SeaGuard Aanderaa*) foi colocado em operação, em março de 2019, adicionando medidas de pH, oxigênio, CO<sub>2</sub> e turbidez, em perfis verticais e em fundeios, estes últimos em séries *diel* na Área A. Concomitantemente, foram obtidos dados de concentração de clorofila (proxy da biomassa fitoplanctônica) através de medições da fluorescência *in vivo*, cujos resultados estão apresentados em conjunto com os parâmetros físico-químicos. A malha amostral das características físico-químicas da água, com os dois equipamentos, é apresentada no (Quadro 7).

Quadro 7: Execução do plano de amostragem dos parâmetros físico-químicos da coluna d'água. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista.

Sítio	Campanha 1	Campanha 2***	Campanha 3	Campanha 4
	2018	2019	2019	2019
A1*	AP	AP	NC	AP
A2*	AP	NC	NC	AP
A3*	AP	AP	NC	AP
A4*	AP	NC	NC	AP
A5*	AP	AP	NC	AP
A6*	AP	AP	NC	AP
B1	AP	AP	AP	PR
B2	NC	AP	AP	PR
B3	AP	AP	AP	PR
B4	NC	AP	AP	PR
C1**	NC	NC	AP	PR
C2**	NC	AP	AP	PR
C3**	NC	NC	AP	PR
C4	AP	AP	AP	PR
C5	AP	NC	AP	PR
C6	AP	AP	AP	PR
C7	AP	NC	AP	PR
C8	AP	AP	AP	PR
C9	AP	AP	AP	PR
D1	AP	AP	AP	PR
D2	AP	AP	AP	PR
D3	AP	AP	AP	PR
D4	AP	NC	AP	PR
D5	AP	AP	AP	PR
D6	AP	AP	AP	PR
D7	AP	NC	AP	PR
D8	AP	AP	AP	PR
D9	AP	NC	AP	PR
D10	AP	AP	AP	PR
D11	AP	AP	AP	PR
D12	AP	AP	AP	PR
D13	AP	NC	AP	PR

\*Na Campanha 3 problemas logísticos com embarcação, associado à más condições meteorológicas, impediram a amostragem na Área A. \*\*Na Campanha 1 as más condições meteorológicas não permitiram a coleta da amostra nestas estações. \*\*\*A campanha 2 estreou o uso da sonda multiparâmetro *SeaGuard Aanderaa*, entregue em março de 2019. Foi uma

campanha para testes e aprendizado do uso deste complexo equipamento. Por isso, não foi feita amostragem em alguns sítios, ou a qualidade dos dados ficou abaixo do esperado, não sendo, portanto, apresentados neste relatório.

Com base nas características de temperatura e salinidade, a maioria dos sítios amostrados apresentou-se dominado por Água Tropical (AT), caracterizada por temperatura e salinidade superiores a 20°C e 36,4, respectivamente (MIRANDA, 1982). Nos sítios mais costeiros da Área D foi observado decréscimo da salinidade próximo a 10 m de profundidade, indicando mistura com águas costeiras (Figura 74). A mistura com águas de origem continental ficou evidente nos diagramas TS da Área D referentes à campanha de junho de 2019. As estações da área C, localizadas na porção externa da plataforma continental em frente à foz do rio Doce, apresentaram influência de mistura com a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), definida por temperatura e salinidade inferiores a 20°C e 36,4, respectivamente (MIRANDA, 1982).

A atenuação da luz ao longo da coluna d'água está representada nos perfis verticais da Figura 75. Na Área A os sítios do arco interno (A1 e A2), mais próximos a costa, apresentaram maior atenuação que os sítios do arco externo (A3, A4 e A5) e Timbebas, ao norte (A6). Os sítios da Área B (Recifes Esquecidos) apresentaram perfis semelhantes, com ca. 20% da luz incidente na superfície atingindo 20 m de profundidade. Na Área C a atenuação foi mais intensa nos sítios mais costeiros, mas na Área D a atenuação foi menos relacionada com a distância da costa. Na Área D, os sítios com maior penetração de luz foram os da porção norte, especialmente na campanha de novembro de 2018, ao passo que, nos demais, mesmo nos mais afastados da costa, a atenuação foi mais intensa.

Figura 74: Diagramas TS baseados nos perfis verticais de temperatura (°C) e salinidade (PSU) obtidos nas quatro áreas (A, B, C e D). A profundidade (m) de medição de cada ponto está representada na escala de cores à direita de cada diagrama.

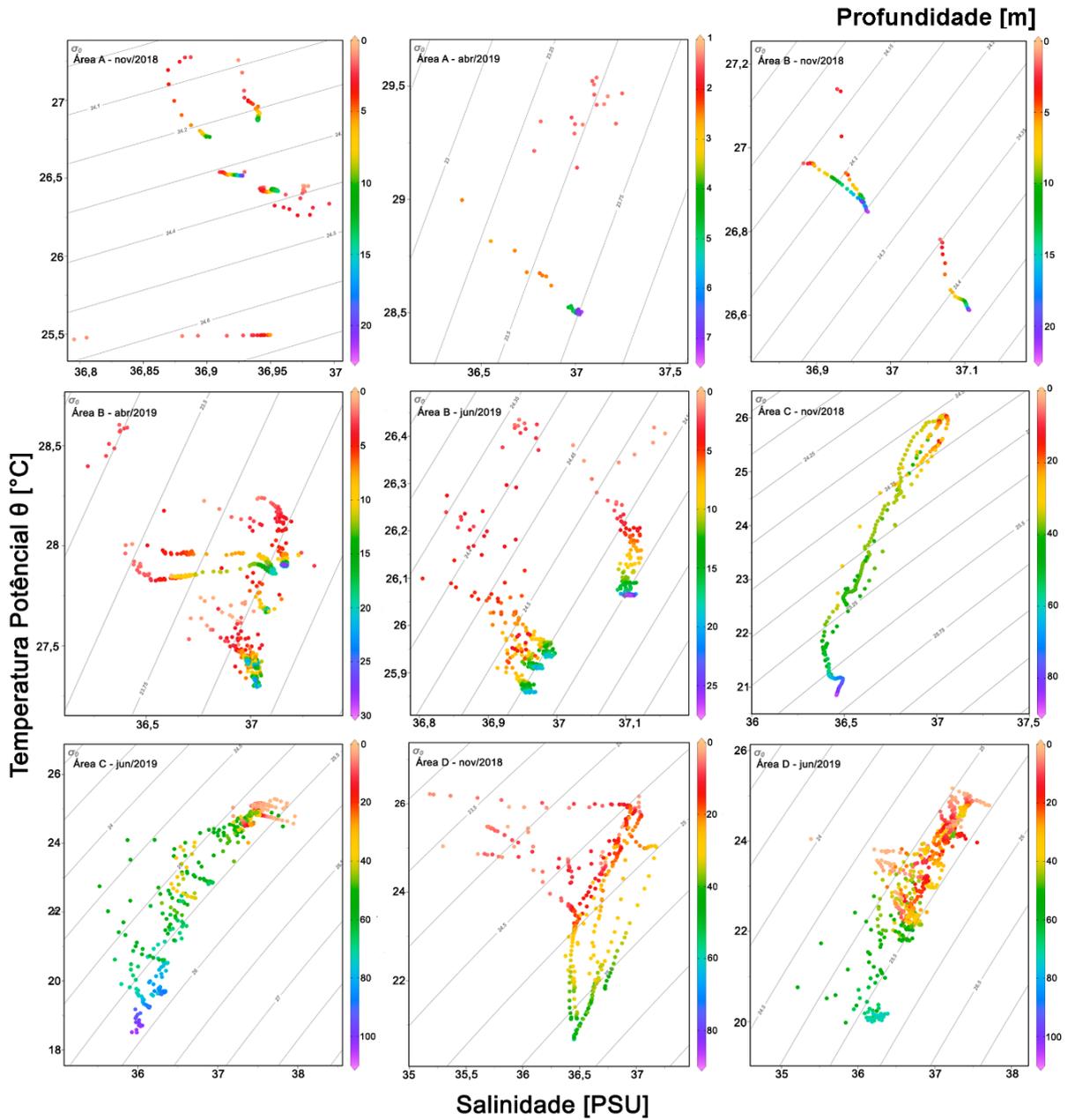


Figura 75: Perfis verticais de intensidade de radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) nas quatro áreas (A, B, C e D).

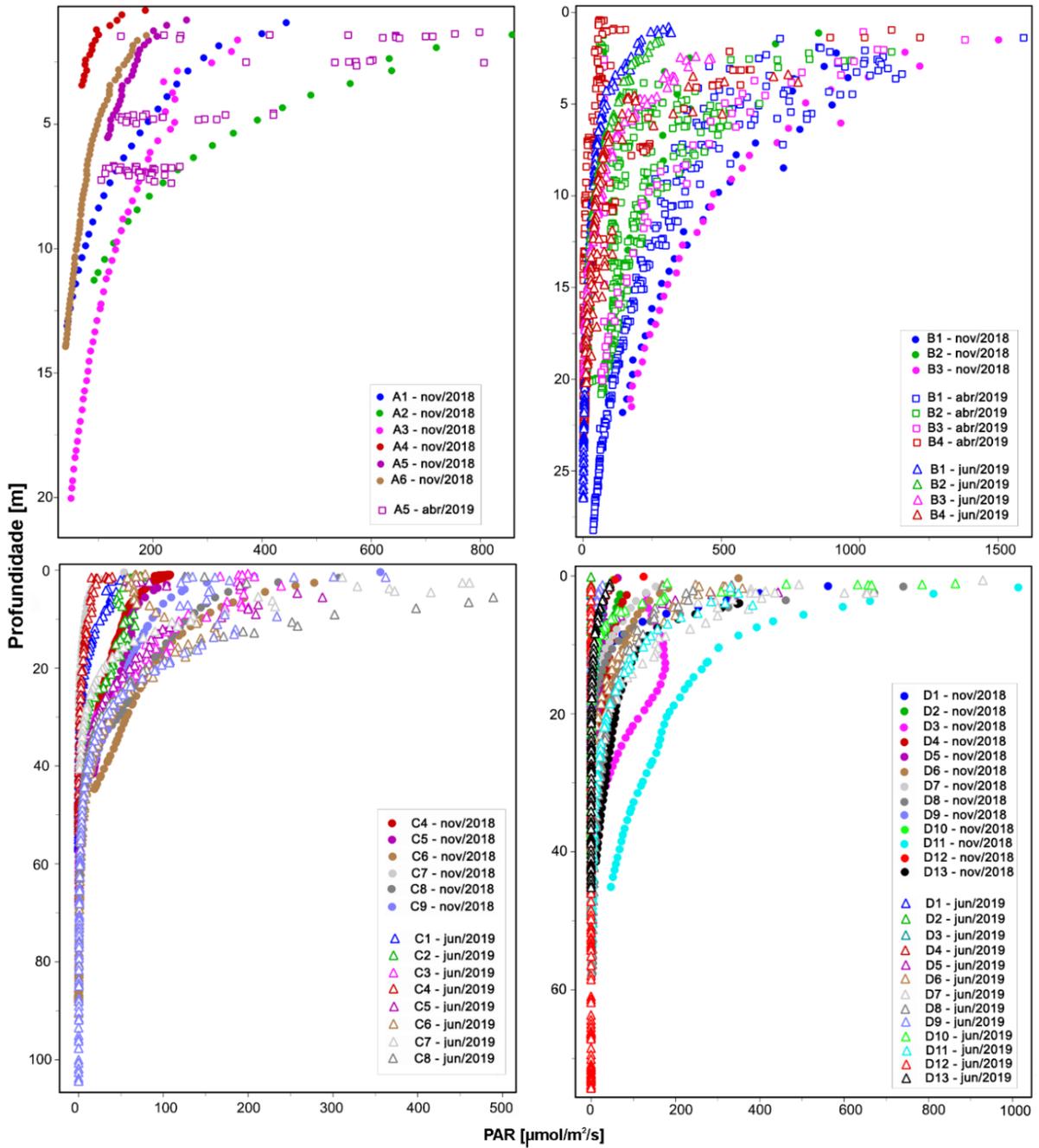
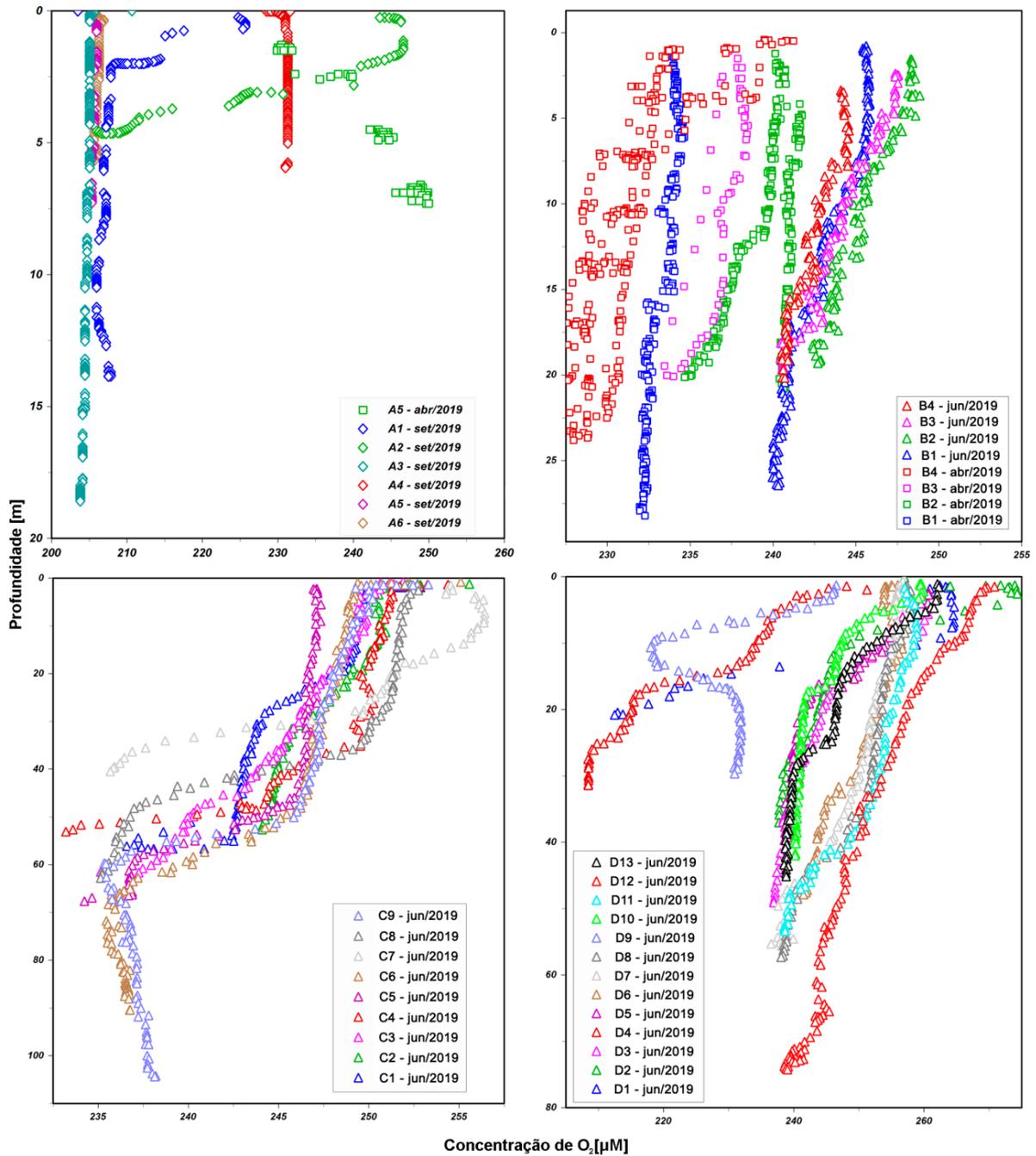


Figura 76: Perfis verticais de concentração de oxigênio dissolvido nas quatro áreas (A, B, C e D).



As concentrações de oxigênio dissolvido variaram entre 230 e 270  $\mu\text{M}$ , com diminuição da superfície para o fundo exceto em um dos perfis (Área A, sítio A5 em abril de 2019) (Figura 76). As maiores concentrações próximas a superfície refletem a fotossíntese pelo fitoplâncton. O sítio A5 é o único da área A localizado sobre banco de rodolitos, o que pode explicar o perfil anômalo em função da produção de oxigênio pelas algas calcáreas componentes destas estruturas. Como obtivemos apenas uma medição neste local (iniciamos os testes de utilização da sonda multiparâmetro em abril de 2019 e, por conta de mau tempo não foi possível realizar a medição na campanha de junho de 2019), esta feição é apenas especulativa e será melhor avaliada na continuidade do PMBA. Nos sítios amostrais de maior profundidade da Área C observa-se uma marcada oxiclina entre ca. 40 e 60m. No sítio D9 foi observado um aumento de oxigênio entre 20 e 30m (Figura 76), provavelmente decorrente de atividade fotossintética do fitoplâncton, pois coincide com uma região de máximo de clorofila *a*, em torno de  $4\mu\text{g L}^{-1}$  (Figura 79).

A turbidez da água variou mais de uma ordem de magnitude entre áreas e entre sítios dentro da mesma área, revelando fortes gradientes latitudinais (e de distância da foz do rio Doce) e *cross-shelf* (Figura 77). Os maiores valores foram observados nos sítios mais costeiros das áreas D, B e C, nesta ordem. O único sítio amostrado para turbidez na área A (razões explicadas acima neste texto), sobre banco de rodolitos, também apresentou baixa turbidez mesmo quando comparado com sítios mais offshore das áreas C e D, corroborando o gradiente latitudinal de turbidez. Na área B (Recifes Esquecidos), o sítio B4 mostrou-se mais turvo que os demais na campanha de abril de 2019, com abruptas oscilações ao longo do perfil de profundidade, possivelmente resultante da presença de detritos orgânicos ressuspensos do fundo, visto que os níveis de oxigênio deste perfil foram baixos (Figura 76). Gradientes *cross-shelf* foram evidentes entre os sítios costeiros e *offshore*, principalmente na área C e para a maioria dos sítios da área D. Mesmo com um gradiente *cross-shelf* marcado, todos os 9 sítios da Área C apresentaram valores altos de turbidez ( $>7$ ) ao longo de toda a coluna d'água, indicando uma região com influência da pluma do Rio Doce. Alguns sítios mais costeiros da Área D, com profundidade  $< 40\text{m}$  (D1, D4, D9), apresentaram aumento de turbidez próximo ao fundo, ao passo que os sítios D13 e D10, mesmo sendo mais afastados da costa, apresentaram-se altamente turvos ao longo de toda a coluna d'água. Estes valores de maior turbidez (em profundidade e em sítios afastados) não podem ser explicados somente por um aumento da biomassa fitoplanctônica (ver perfis de clorofila na Figura 79), sendo, portanto, interpretados como resultado de ressuspensão de sedimentos e detritos do fundo por processos turbulentos.

O pH medido nos perfis verticais variou entre 8,1 e 8,35 (Figura 78) dentro da normalidade para águas marinhas costeiras (DICKSON, 1993). Observa-se um padrão geral de diminuição (acidificação) com o aumento da profundidade, mais acentuadamente no estrato entre a superfície e 10m, refletindo a maior assimilação, via fotossíntese, de carbono inorgânico pelo fitoplâncton nas camadas superiores (com maior irradiância solar) e maior contribuição para aumento do carbono inorgânico pela mineralização de matéria orgânica nas regiões mais próximas do fundo. Novamente, observa-se um perfil inverso

para o sítio A5, sobre o banco de rodolitos na Área A, indicando também atividade fotossintética pelas algas associadas ao fundo e corroborando os dados de aumento na concentração de oxigênio, explicados anteriormente. O comportamento do oxigênio dissolvido ao longo de um ciclo *diel* neste sítio também aponta na mesma direção (Figura 82). Algas calcárias incrustantes são os organismos construtores dos rodolitos através da acreção contínua de carbonato biogênico à estrutura do holobionte, processo este acoplado à fotossíntese (LEE, 2008). Portanto além de serem fábricas naturais de carbonato de cálcio, um eficiente mecanismo de sequestro de carbono inorgânico (AMADO-FILHO et al. 2012), os bancos de rodolitos também contribuem para a oxigenação da água do mar. A magnitude e importância ecológica da produção de oxigênio pelos bancos de rodolitos na costa brasileira ainda é desconhecida.

Figura 77: Perfis verticais de turbidez (Unidade Turbidimétrica de Formazina, FTU) nas quatro áreas (A, B, C e D).

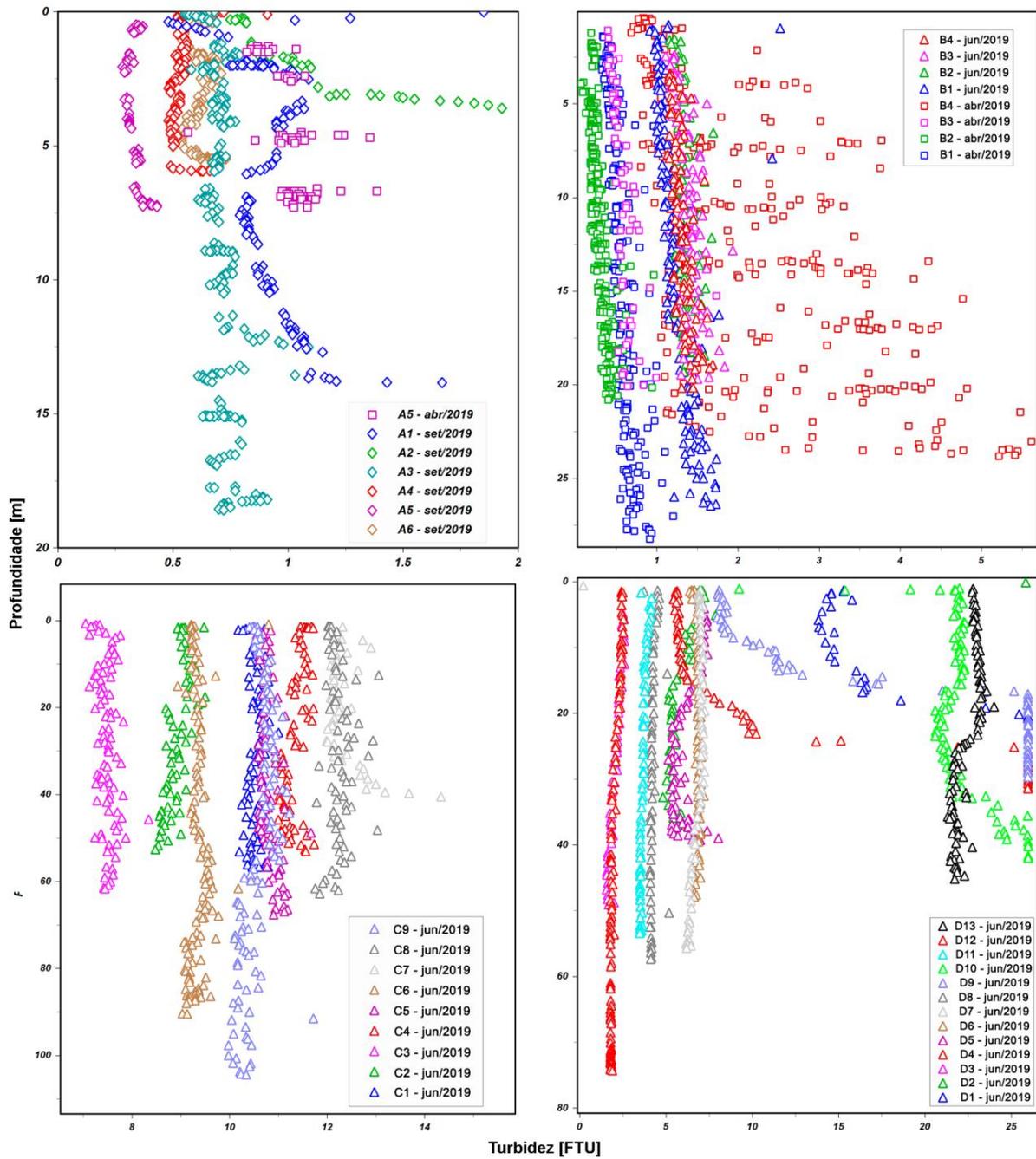
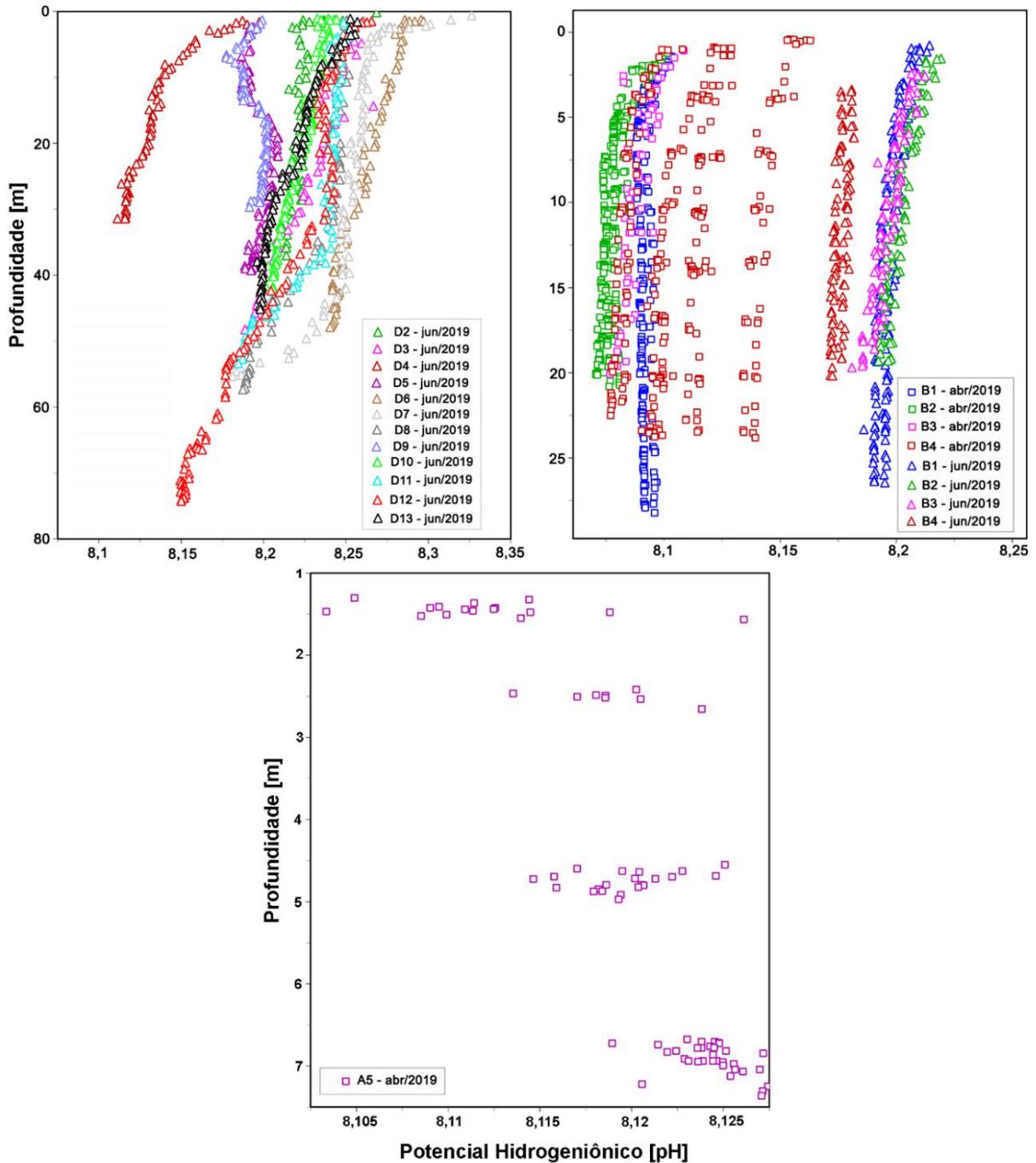


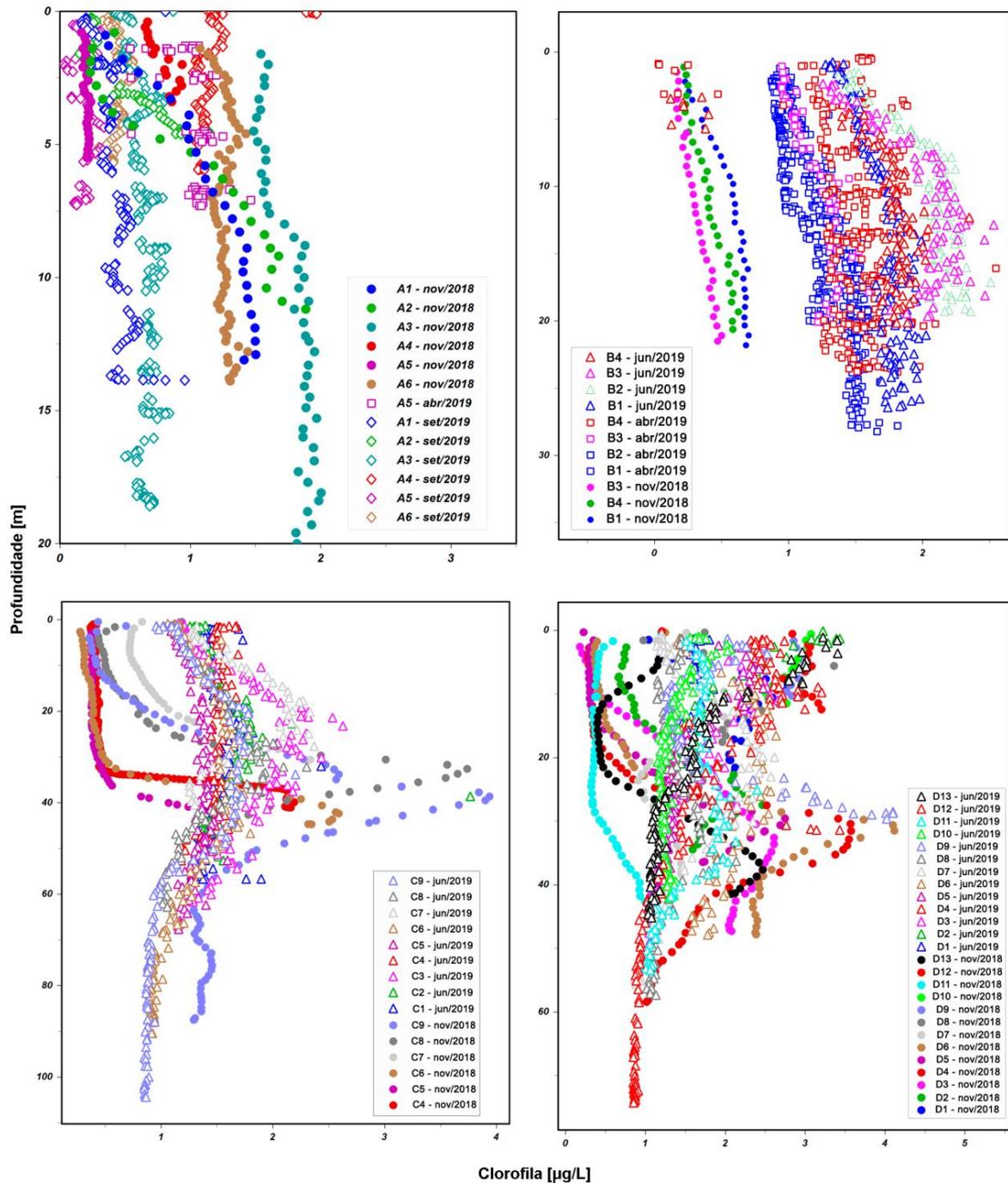
Figura 78: Perfis verticais de potencial hidrogeniônico (pH) nos sítios das (B, C e D).



Os perfis de concentração de clorofila em profundidade variaram entre e dentro das áreas (Figura 79). De forma geral, considerando-se todas as profundidades, os sítios das Áreas A e B apresentaram menores concentrações ( $0,2$  a  $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$ ) quando comparados com os sítios C e D ( $0,2$  a  $4 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Além das maiores concentrações, sítios em C e D apresentaram picos em subsuperfície, entre 30 e 60 m, principalmente aqueles de maior profundidade e mais afastados da costa. Os picos em subsuperfície foram mais pronunciados em novembro de 2018, final da primavera, comparado com os de outono e

inverno (abril e junho), períodos de maior energia (ventos, ondas) e, portanto, menos favoráveis ao acúmulo de biomassa. Estes máximos de clorofila em profundidade representam regiões com as melhores combinações de luz e nutrientes para o crescimento do fitoplâncton (REYNOLDS, 2006). Migrações verticais de certos grupos de organismos do fitoplâncton (tipicamente dinoflagelados) ao longo do dia também podem formar camadas de alta densidade populacional em profundidades com condições favoráveis para mixotrofia (STOECKER et al., 2017). Foi observada sazonalidade na concentração de clorofila, com maiores valores em superfície em abril e junho de 2019, comparado com novembro de 2018. Este padrão foi mais visível nos sítios da Área B, amostrados nas três campanhas, com valores diferentes entre campanhas ao longo de todo o perfil vertical.

Figura 79: Perfis verticais de concentração de clorofila ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) nas quatro áreas (A, B, C e D).



Além da perfilagem da coluna d'água, foram feitos fundeios de 24h com a sonda multiparâmetro SeaGuard em quatro sítios da Área A em abril de 2019, dois a 15m de profundidade (sítios A1 e A5) e dois a 9m de profundidade (A3 e A6) (Figura 80, Figura 81, Figura 82 e Figura 83) e quatro em setembro de 2019, a 15m (A1), 7m (A2) 19m (A3) e 9m (A6) de profundidade (Figura 84, Figura 85, Figura 86 e Figura 87). Estes dados são de grande relevância pois agregam um componente temporal de curta duração bastante refinado que permite inferências sobre o metabolismo do ecossistema e o

acoplamento bento-pelagial. Nestes fundeios observou-se temperaturas relativamente altas ( $>28,4^{\circ}\text{C}$ ) em 3 dos quatro sítios (A1, A3 e A6), caracterizando a anomalia térmica positiva em curso durante a campanha em abril de 2019. Em setembro de 2019, na quarta campanha, as temperaturas já estavam abaixo de  $26,1^{\circ}\text{C}$ , indicando o retorno à normalidade para temperatura nos quatro sítios amostrados. As variações de salinidade e temperatura ao longo do ciclo *diel* foram pequenas, refletindo processo de advecção da água costeira sem caracterizar misturas significativas ou passagem de outras massas d'água.

Oxigênio dissolvido e pH variaram em sincronia. Nos sítios de recifes coralíneos (A1, A2, A3 e A6) observou-se aumentos a partir do meio dia, maiores valores durante a noite, e mínimos após o amanhecer. No sítio A5, sobre o banco de rodolitos na campanha de abril de 2019, os teores de oxigênio foram os mais elevados, corroborando a hipótese de que fotossíntese por algas calcárias constituintes destes nódulos biogênicos sejam altamente ativas e importantes para a oxigenação da água. A concentração de  $\text{CO}_2$  na água foi medida no fundeio dos sítios A1 e A6 na campanha de abril de 2019 (nos demais não foi possível devido a uma falha no sensor) e mostrou variação *diel* oposta ao oxigênio, coerente com o balanço entre fotossíntese e respiração durante o ciclo de luz:escuro.

A concentração de clorofila *a* também apresentou oscilação durante o ciclo *diel*, com os maiores valores entre 20h e meia-noite em torno de  $2\mu\text{gL}^{-1}$  e os mínimos próximo ao meio-dia, especialmente na campanha de abril de 2019. Este padrão é interpretado, em parte, como processos de migração de organismos clorofilados (fitoplâncton/fitobentos) entre a coluna d'água e o substrato. Diversos grupos de organismos fotossintetizantes com capacidade natatória e.g. dinoflagelados (HALL; PAERL, 2011) ou de controlar sua flutuabilidade e.g. cianobactérias (CAREY et al., 2008) e diatomáceas (CONSALVEY et al., 2004) podem estar envolvidos nesta migração vertical.

Figura 80: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 15m no sítio A1 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR), concentração de CO<sub>2</sub>.

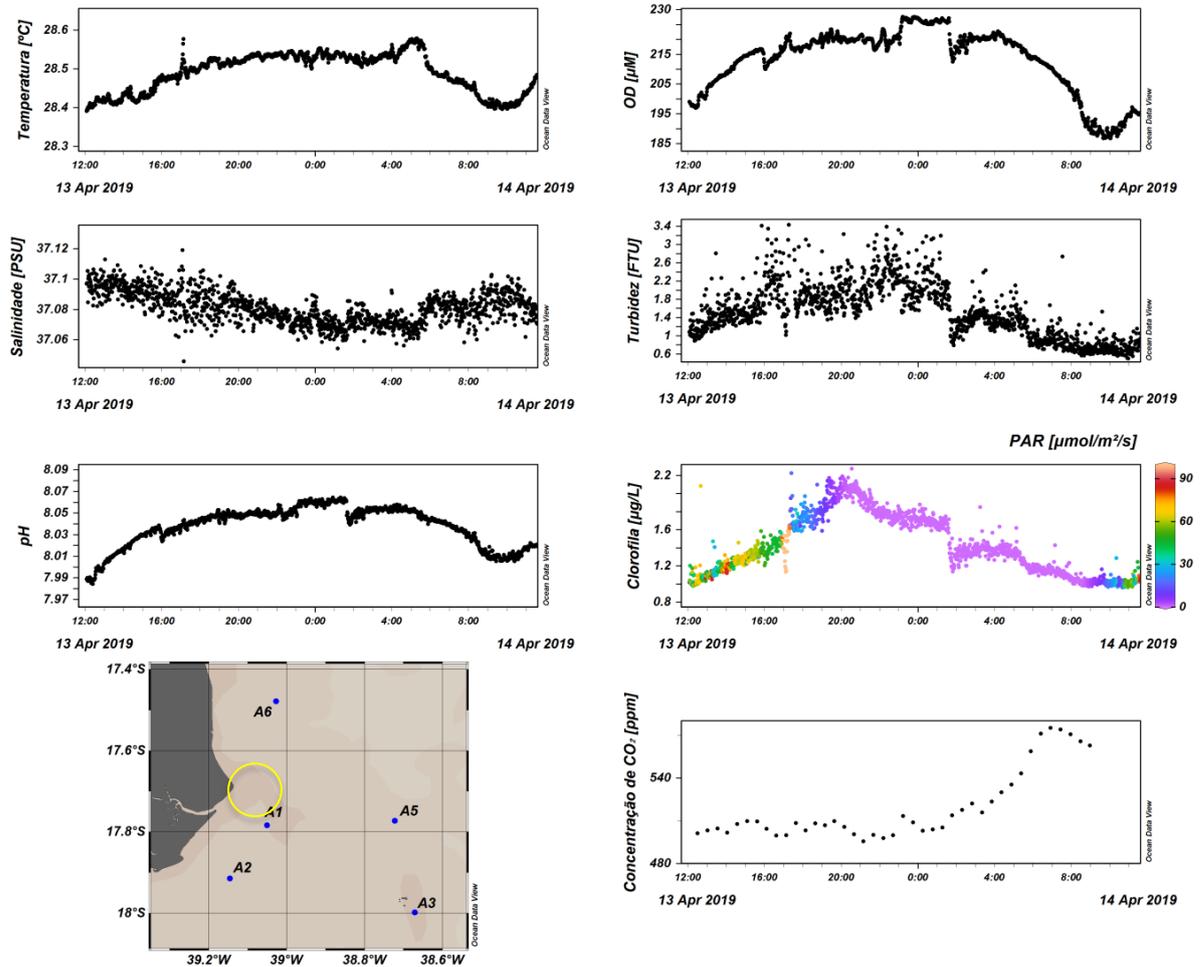


Figura 81: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 9m no sítio A3 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiação (PAR).

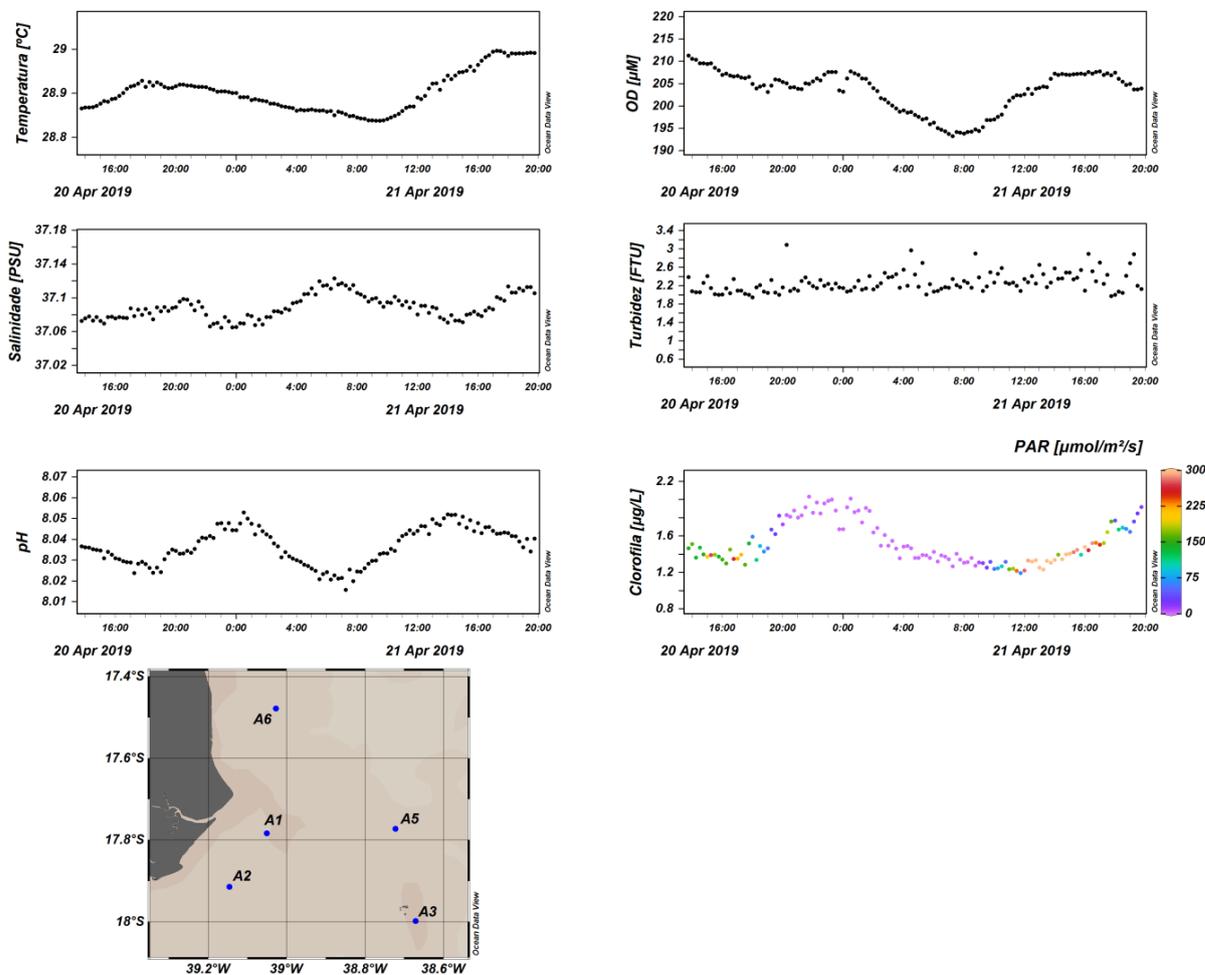


Figura 82: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 15m no sítio A5 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradância (PAR).

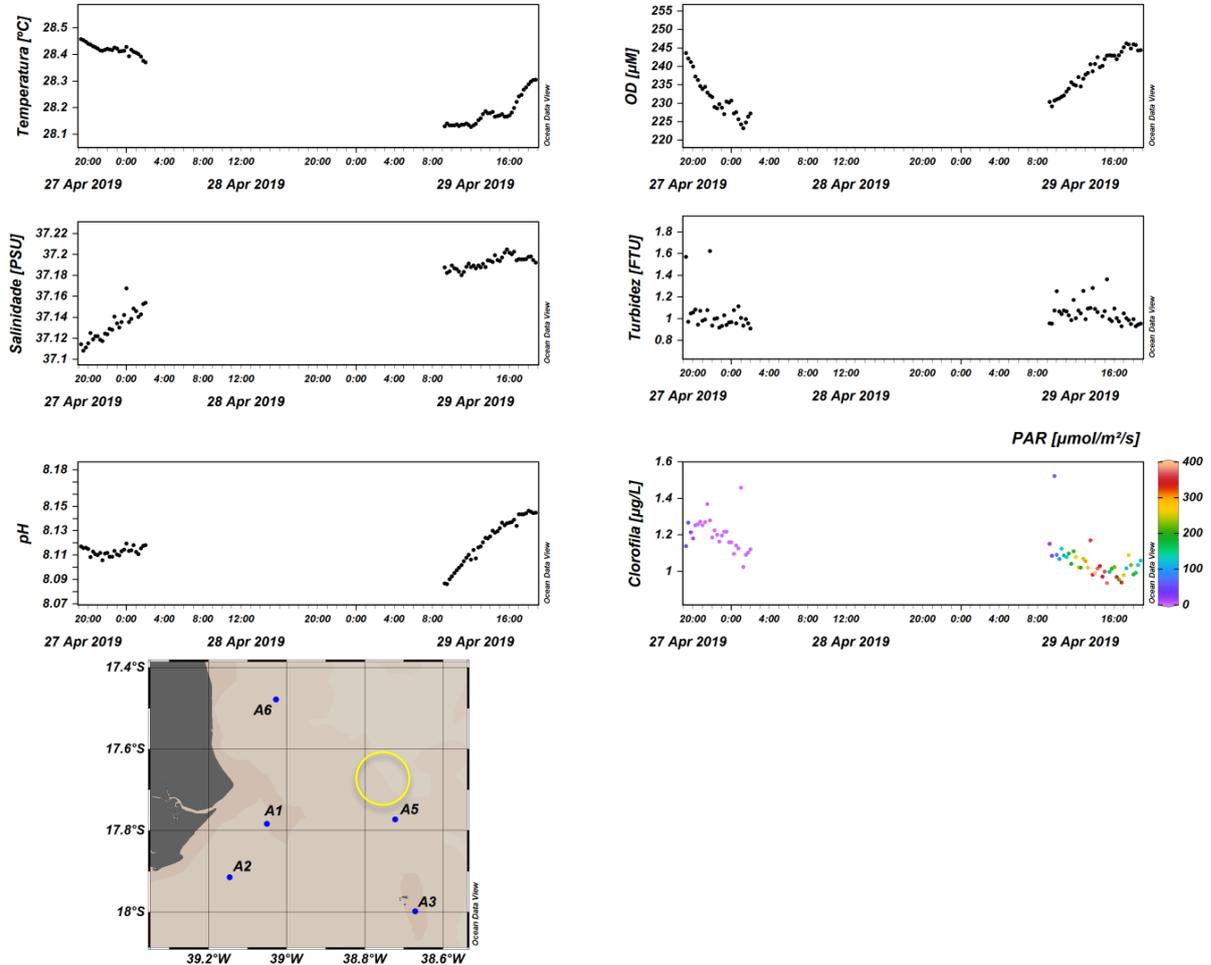


Figura 83: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 9m no sítio A6 em abril de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR), concentração de CO<sub>2</sub>.

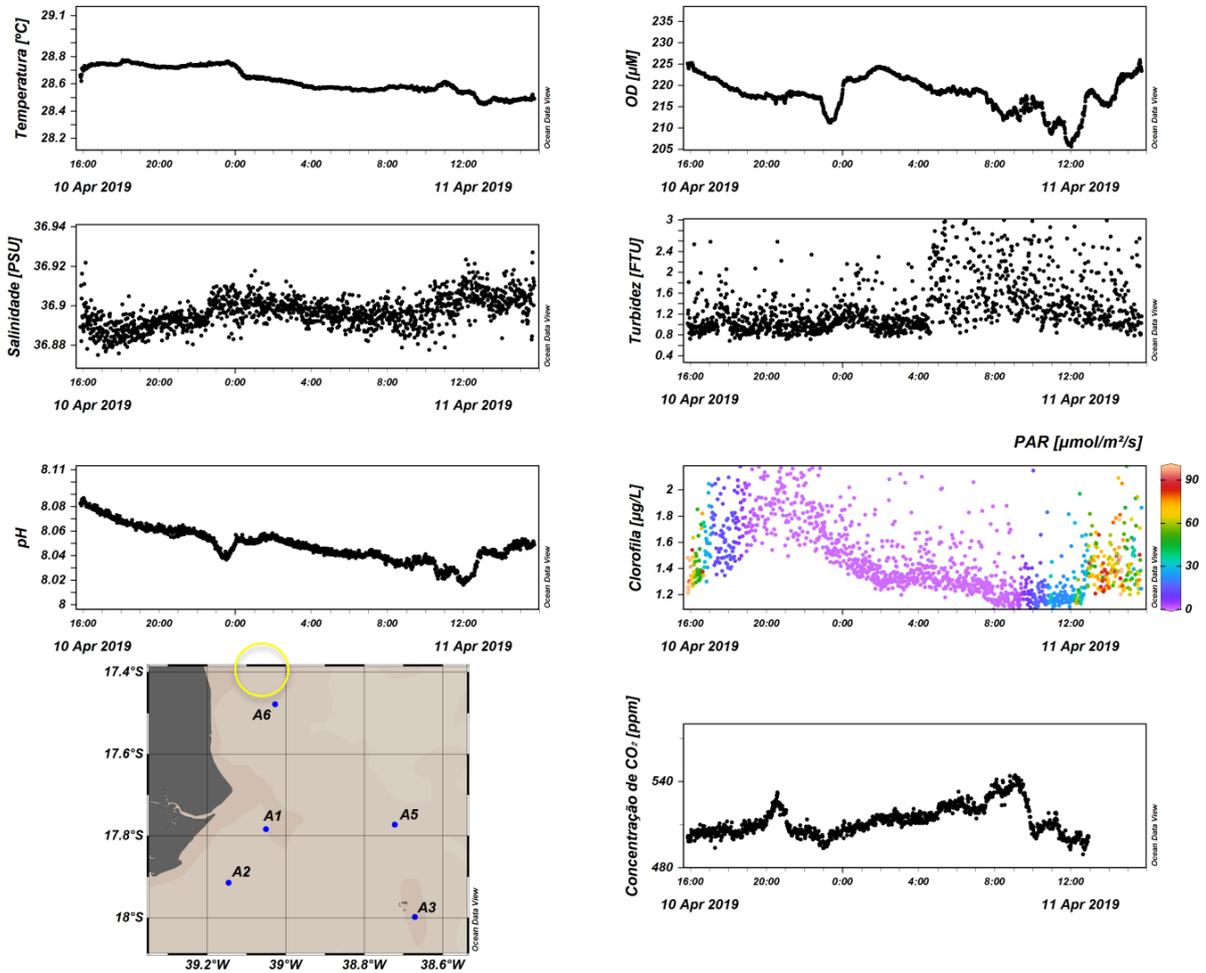


Figura 84: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 15m no sítio A1 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR).

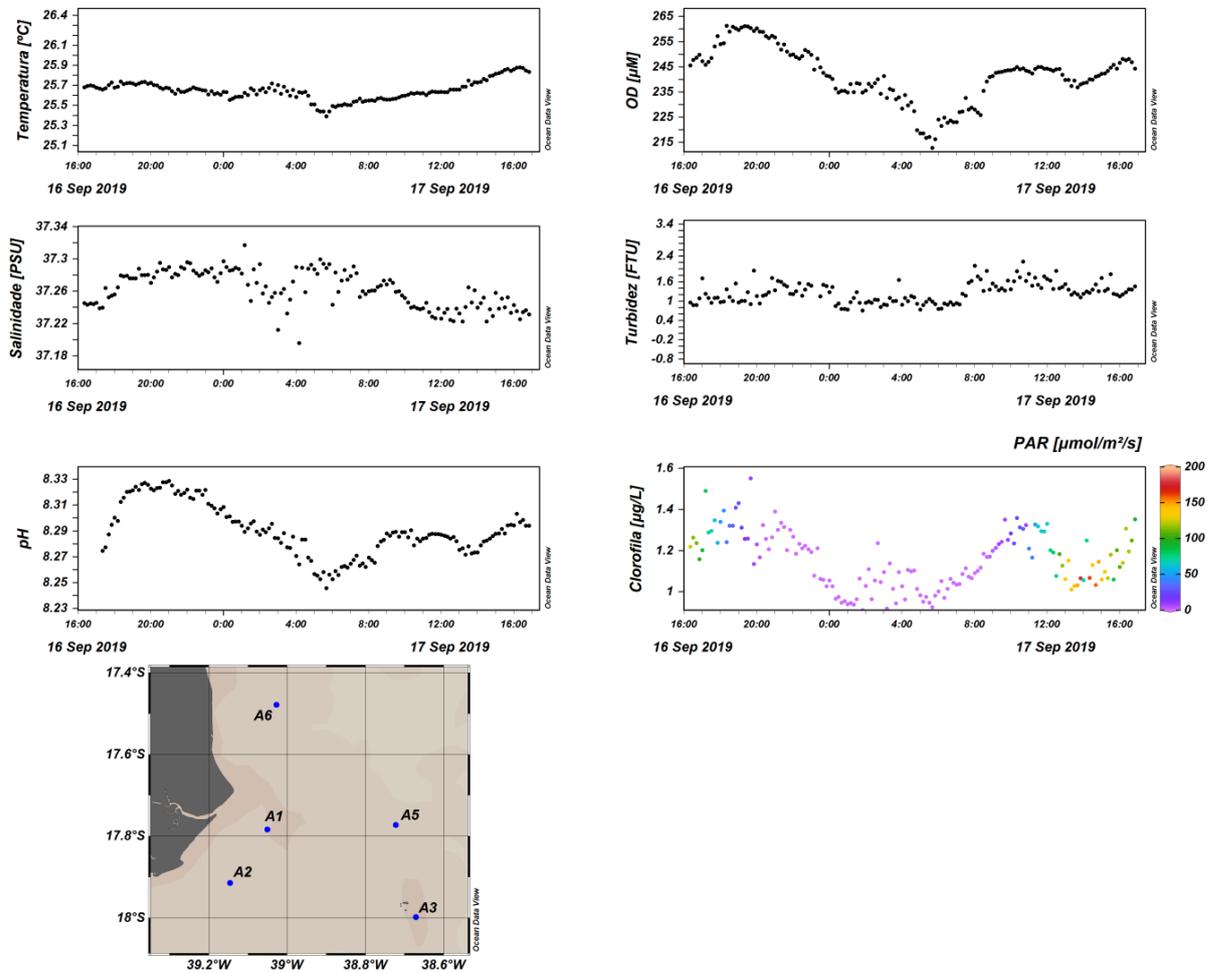


Figura 85: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 7m no sítio A2 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR).

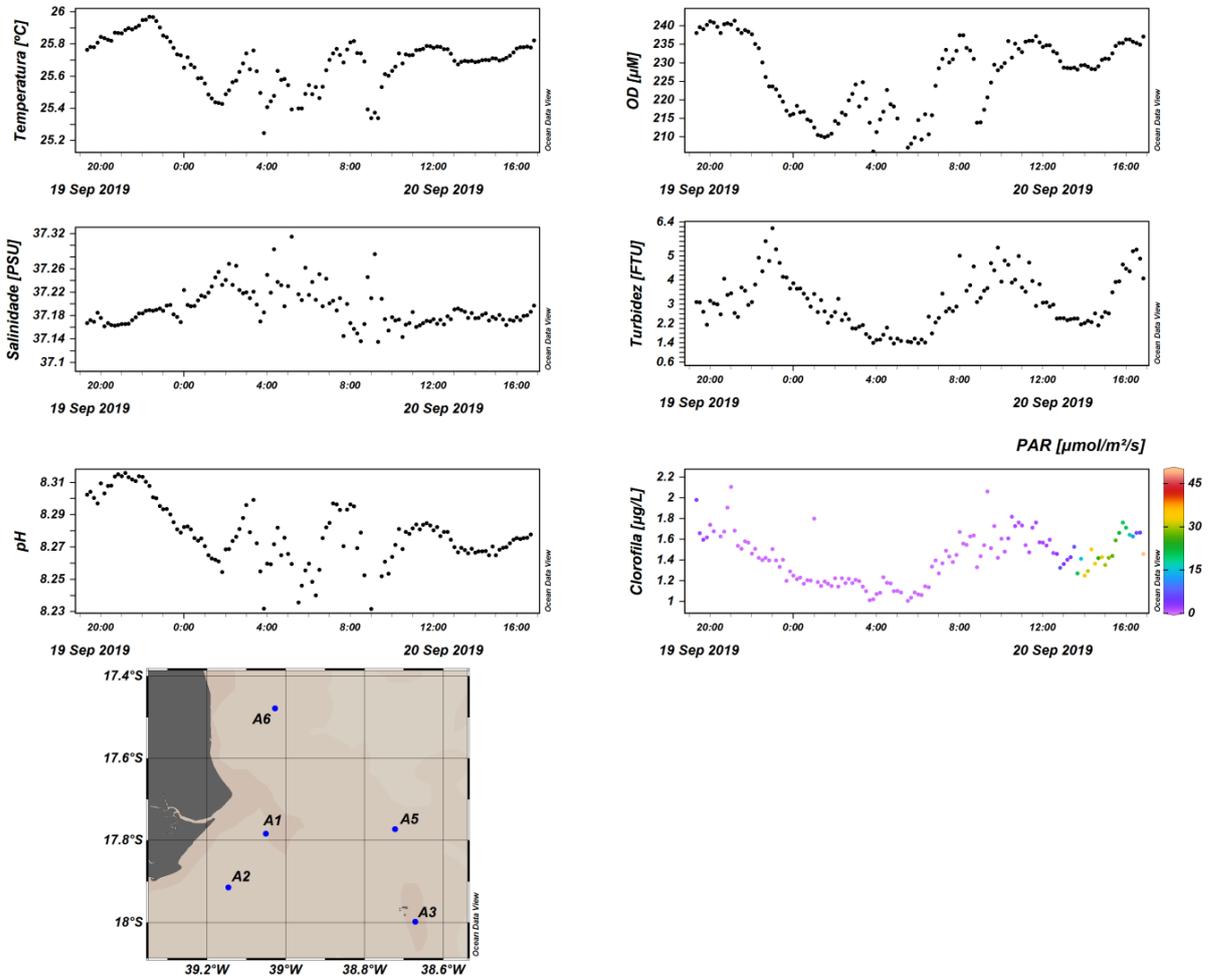


Figura 86: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 19m no sítio A3 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR).

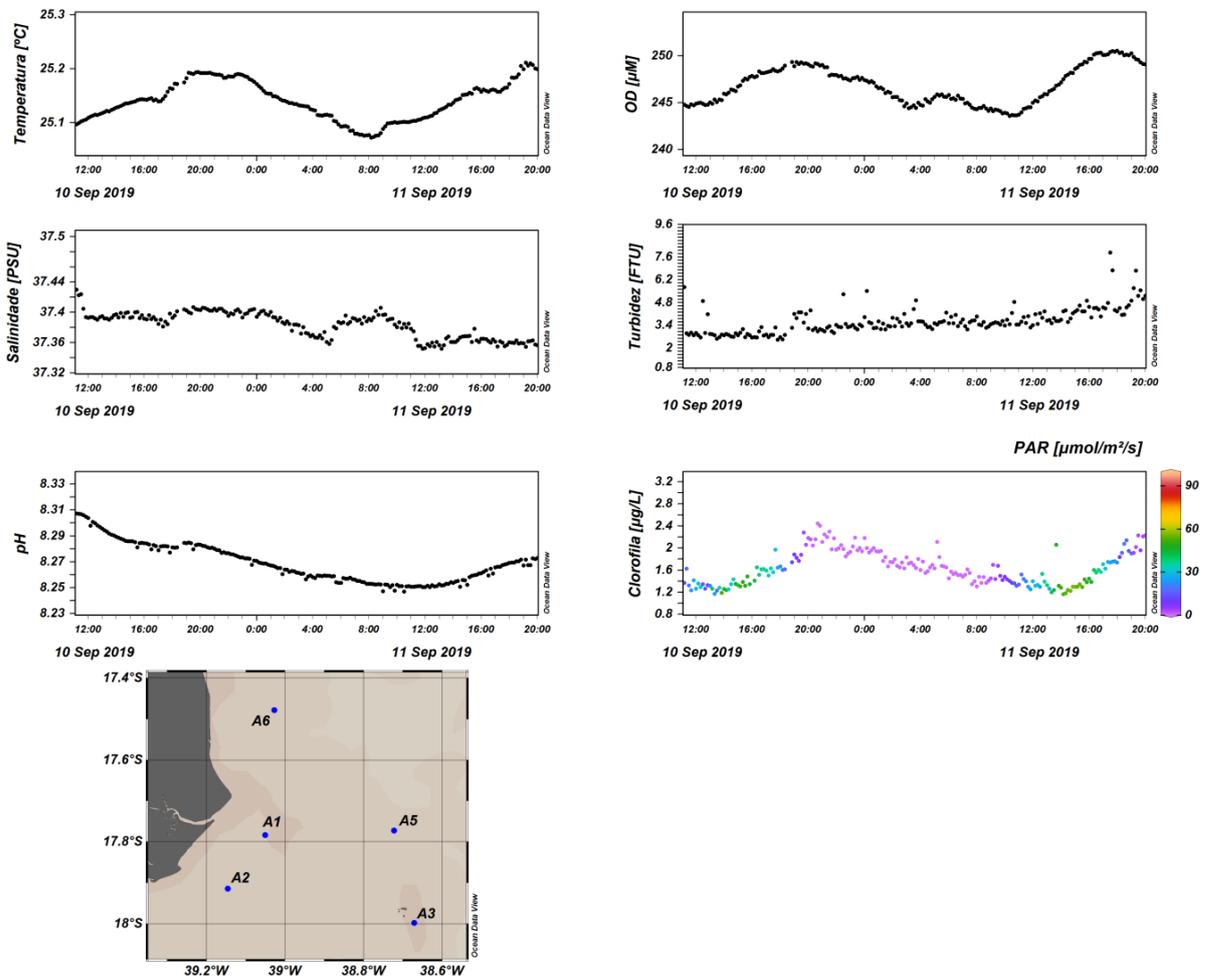
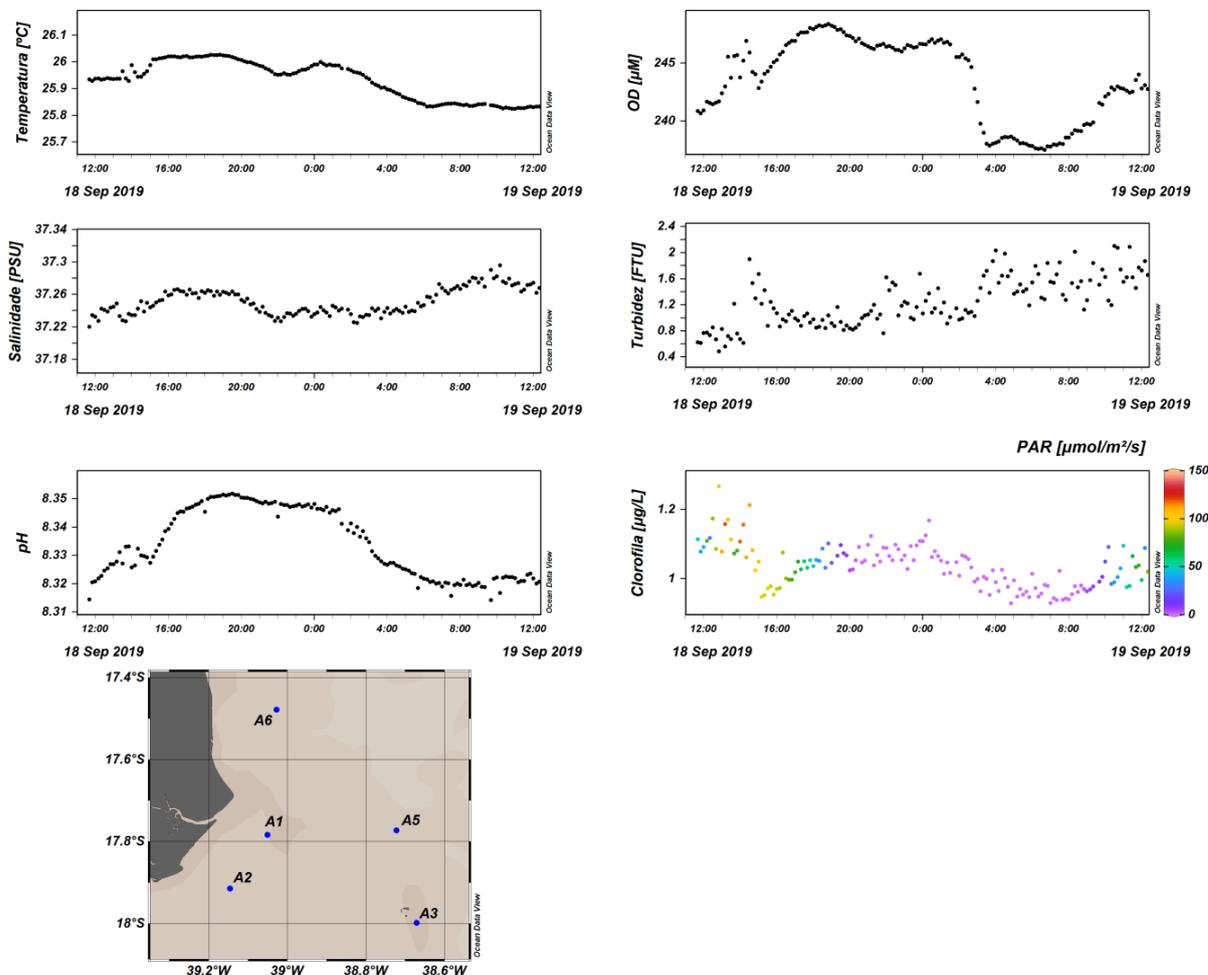


Figura 87: Variação temporal (diel) de propriedades físico-químicas da água na profundidade de 9m no sítio A6 em setembro de 2019. Temperatura, salinidade, pH, oxigênio dissolvido, turbidez, concentração de clorofila e irradiância (PAR).



## 2.8. CARACTERIZAÇÃO DAS COMUNIDADES PLANCTÔNICAS ASSOCIADAS AOS FUNDOS RECIFAIS

Organismos nas faixas dimensionais desde o picoplâncton (<2 µm, composto por procariontes, i.e. cianobactérias, e protistas auto e heterotróficos) até o micropicoplâncton (20 – 200 µm) foram quantificados e caracterizados através de uma combinação de técnicas com diferentes resoluções de abundância, tamanhos e taxonomia, a saber: (i) citometria de fluxo multiparamétrica, (ii) imageamento automatizado em fluxo e (iii) microscopia invertida de campo claro. Esta abordagem integrada forneceu um panorama abrangente e acurado dos grupos de microorganismos planctônicos mais abundantes e relevantes para a produção primária e ciclagem de carbono, compondo um *baseline* ímpar para a compreensão do acoplamento entre a coluna d'água e os fundos recifais e bancos de rodólitos da região afetada pelo Desastre.

Objetivando auxiliar o leitor na interpretação dos gráficos e diagramas que ilustram os resultados das diversas análises, faz-se a seguir a apresentação, na forma de tabelas, da situação de execução do plano de coleta, processamento e análise das amostras. (Quadro 8,

Quadro 9, Quadro 10, Quadro 11, Quadro 12).

Quadro 8: Execução do plano de amostragem para o plâncton no estrato superficial para processamento por de citometria de fluxo multiparamétrica. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; PR: coleta prevista; NA: não se aplica.

Sítios	Campanha 1 nov-dez 2018	Campanha 2 fev-abr 2019	Campanha 3 jun-jul 2019	Campanha 4 set-nov 2019
A1*, A2*, A3*, A4*, A5, A6**	AP	AP	NC	AP
B1, B3, B4	AP	AP	AP	PR
C1**, C2**, C3**	NC	AP	AP	PR
C4 a C9	AP	AP	AP	PR
D1 a D13	AP	AP	AP	PR

\*Na Campanha 3 problemas logísticos com embarcação associado à más condições meteorológicas impediram a coleta na Área A (PARNAM). \*\*Na Campanha 1 \*Na Campanha 1 as más condições meteorológicas não permitiram a coleta da amostra nestas estações.

Quadro 9: Execução do plano de amostragem do plâncton no estrato de fundo para processamento através de citometria de fluxo multiparamétrica. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista.

Sítios	Campanha 1 nov-dez 2018	Campanha 2 fev-abr 2019	Campanha 3 jun-jul 2019	Campanha 4 set-nov 2019
A1 a A6	AP	AP	NC	AP
B1 a B4	AP	AP	AP	PR
C2*, C8	AP	AP	AP	PR
D4, D8	AP	AP	AP	PR

\*Na Campanha 1 as más condições meteorológicas não permitiram a coleta da amostra na estação C2, sendo a coleta feita na estação C5.

Quadro 10: Execução do plano de amostragem do plâncton nos estratos de superfície e fundo para processamento através de microscopia invertida. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista.

Sítios	Campanha 1 nov-dez 2018	Campanha 2 fev-abr 2019	Campanha 3 jun-jul 2019	Campanha 4 set-nov 2019
A2, A3, A6	AP	AP	NC	EA
B1, B4	AP	AP	AP	PR
C2*, C8	AP	AP	AP	PR
D4, D8	AP	AP	AP**	PR

\*Na Campanha 1 as más condições meteorológicas não permitiram a coleta da amostra na estação C2, sendo a coleta feita na estação C5. \*\*3 amostras em processamento.

Quadro 11: Execução do plano de amostragem do plâncton nos estratos de superfície e fundo para processamento através de sistema de imageamento dinâmico em fluxo. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista.

Sítios	Campanha 1 nov-dez 2018	Campanha 2 fev-abr 2019	Campanha 3 jun-jul 2019	Campanha 4 set-nov 2019
A2, A3, A6	AP	AP	NC	AP
B1, B4	AP	AP	AP	PR
C2*, C8	AP	AP	AP	PR
D4, D8	AP	AP	AP	PR

\*Na Campanha 1 as más condições meteorológicas não permitiram a coleta da amostra na estação C2, sendo a coleta feita na estação C5.

Quadro 12: Execução do plano de amostragem do plâncton nos estratos de superfície e fundo para quantificação de pigmentos clorofilianos através de espectrofluorimetria. AP: amostrado e processado; EA: em análise; NC: não coletados; NA: não se aplica; PR: coleta prevista.

Sítios	Campanha 1 nov-dez 2018	Campanha 2 fev-abr 2019	Campanha 3 jun-jul 2019	Campanha 4 set 2019
A1 a A6	AP	AP	NC	AP**
B1, B3, B4	AP	AP	AP	PR
C2*, C8	AP	AP	AP	PR
D4, D8	AP	AP	AP	PR

\*Na Campanha 1 as más condições meteorológicas não permitiram a coleta da amostra na estação C2, sendo a coleta feita na estação C5. \*\*Amostra de A5 em processamento.

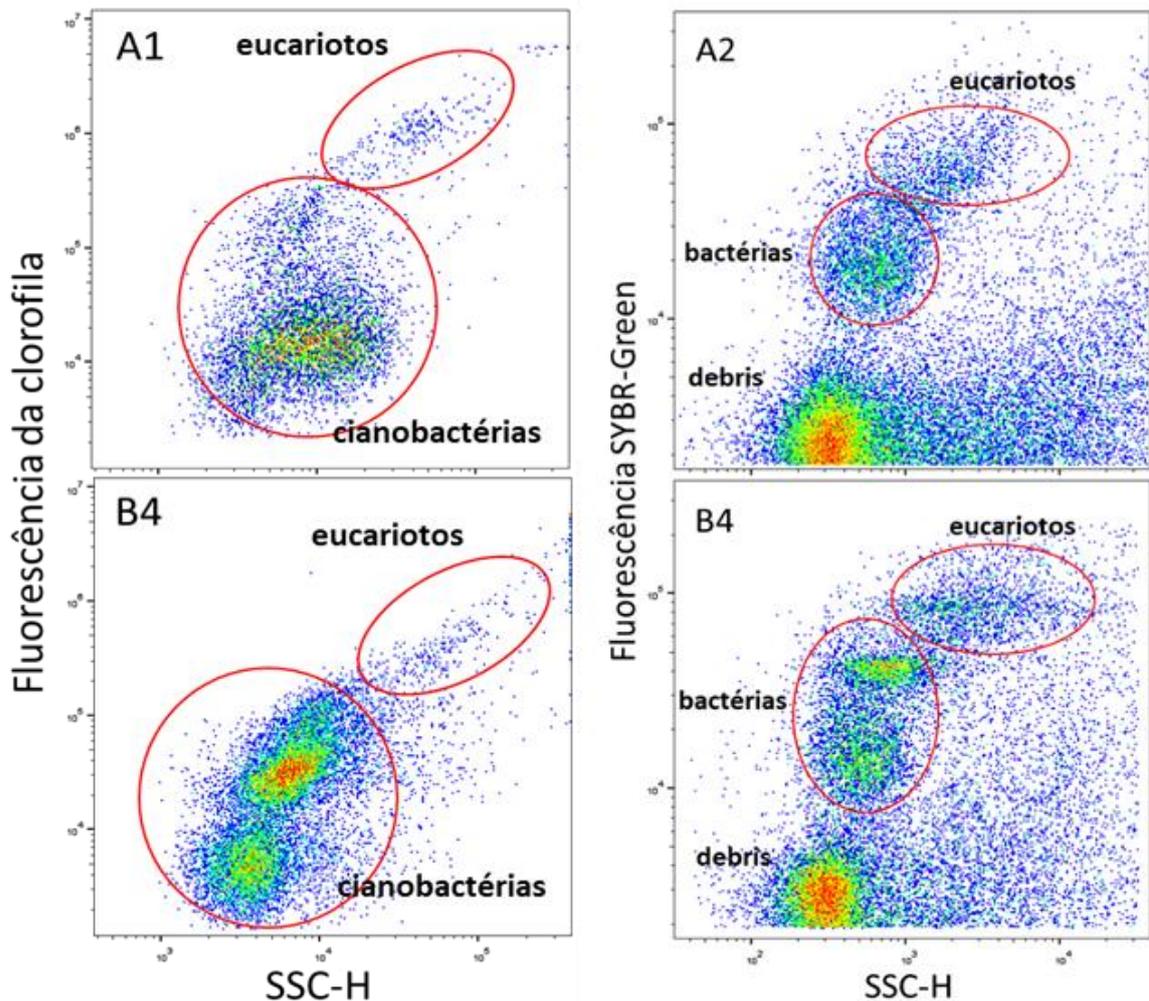
Inicialmente será apresentada uma descrição de abundâncias (também diversidade para os dados citométricos) dos diferentes grupos do plâncton. Em seguida serão apresentados os resultados das análises multivariadas (PCAs) no sentido de produzir um panorama integrado do comportamento do plâncton nos diferentes sítios e períodos de coleta.

### **2.8.1. Análise qualitativa e quantitativa do plâncton por citometria de fluxo multiparamétrica**

Organismos autotróficos e heterotróficos nas faixas dimensionais do pico e nanoplâncton foram quantificados e caracterizados através de citometria de fluxo em amostras de superfície de todos os sítios amostrados, e também em amostras obtidas próximas ao fundo em sítios selecionados nas quatro áreas (A, B, C, D) durante as três campanhas (novembro de 2018, abril e junho de 2019).

A citometria de fluxo é uma técnica de detecção automatizada, baseada no espalhamento e fluorescência de luz, utilizada para quantificação de organismos planctônicos, tipicamente nas frações < 10µm e com potencial para detecção de células < 1µm, incluindo as menores cianobactérias que dominam o plâncton oceânico (SOSIK et al., 2010). A fração autotrófica do plâncton é detectada pelo espalhamento de luz, diretamente proporcional ao tamanho das células, e pela fluorescência da clorofila. A fluorescência dos pigmentos acessórios ficoeritrina e ficocianina também é detectada e utilizada na discriminação de diferentes grupos (PROPPS et al., 2016). Esta técnica permite discriminar com precisão populações de picocianobactérias, especialmente *Prochlorococcus* spp. e *Synechococcus* spp., importantes componentes do fitoplâncton marinho (PARTENSKY et al., 1999), e também eucariotos clorofilados na faixa dimensional do nanoplâncton. A fração heterotrófica é discriminada após a coloração das células com um fluorocromo para ácidos nucleicos, evidenciando populações de bactérias e pequenos eucariotos (Figura 88) pelos níveis de ácidos nucleicos e tamanho.

Figura 88: Detecção de organismos planctônicos autotróficos (painéis da esquerda) e heterotróficos (painéis da direita) por citometria de fluxo. O painel da esquerda consta de citogramas biparamétricos de tamanho celular (Forward-scatter) vs. fluorescência da clorofila em amostras de superfície (estações A1 e B4) em novembro de 2018. As áreas em vermelho denotam maior densidade de células. O painel da direita consta de citogramas biparamétricos de tamanho relativo (SSC-H) vs. fluorescência do fluorocromo SYBR-Green I, em amostras coletadas na superfície (estações A2 e B4) em novembro de 2018. A fluorescência do fluorocromo indica o teor relativo de ácidos nucleicos, principalmente DNA. Os autótrofos, detectados pela fluorescência vermelha da clorofila, foram removidos da análise de heterótrofos com uso de portas lógicas aplicadas ao citograma.



Entre os microorganismos autotróficos, as picocianobactérias *Prochlorococcus* spp. e *Synechococcus* spp. foram as mais abundantes, atingindo até  $250 \cdot 10^6$  e  $210 \cdot 10^6$  células  $L^{-1}$ , respectivamente (Figura 89). Os gêneros *Prochlorococcus* e *Synechococcus* são os principais componentes do fitoplâncton em águas oceânicas, sendo *Prochlorococcus* spp. dominante em águas mais oligotróficas. Estas cianobactérias também ocorrem na região nerítica, porém perdem gradativamente importância para eucariotos autotróficos em direção à costa, com o aumento na disponibilidade de nutrientes oriundos do continente ou de processos de mistura (FLOMBAUM et al., 2013). Observou-se um grande contraste na abundância destes componentes entre áreas e sazonalmente. Os sítios da Área A apresentaram as menores concentrações de *Prochlorococcus* spp., enquanto que os das áreas B, C e D apresentaram as maiores concentrações destas cianobactérias, principalmente as duas últimas. De forma geral, observou-se relação inversa entre as abundâncias de *Prochlorococcus* e *Synechococcus*. Picocianobactérias contendo o pigmento acessório ficocianina foram detectadas em diversos sítios, porém representando menos de 1% do total de picocianobactérias. Eucariotos autotróficos na faixa dimensional do nanoplâncton foram detectados em concentrações entre 3 e  $20 \cdot 10^6$  células  $L^{-1}$ , com maiores abundâncias na campanha de junho.

Bactérias heterotróficas de vida livre (bacterioplâncton) e pequenos eucariotos heterotróficos (faixa dimensional do pico e nanoplâncton) também foram quantificados por citometria de fluxo (Figura 90). Assim como a fração autotrófica, a concentração de bactérias heterotróficas apresentou grande variação, tanto entre sítios quanto sazonalmente. As maiores concentrações, com valores  $>1000 \cdot 10^6$  e chegando a  $3000 \cdot 10^6$  células  $L^{-1}$ , foram observadas na campanha de abril de 2019 em toda a área de estudo, representando um aumento médio de 3,4 vezes. A campanha de abril ocorreu durante um período turbulento (tempestade) que pode ter favorecido o crescimento do bacterioplâncton pela mistura da coluna d'água e ressuspensão de nutrientes do fundo. As concentrações de pequenos eucariotos heterotróficos detectáveis por citometria de fluxo (tipicamente grupos em concentrações  $>0,1 \cdot 10^6$  células  $L^{-1}$ ) foram em torno de uma ordem de grandeza menores que as de bactérias heterotróficas. Amostras de superfície em sítios da porção sul da Área D (D7 a D13) apresentaram as maiores concentrações deste grupo de protistas em novembro de 2018, em torno de  $25 \cdot 10^6$  células  $L^{-1}$  (Figura 85). A variação na abundância de bactérias e pequenos eucariotos heterotróficos entre sítios é, provavelmente, resultado de interações (e.g. predação, infecção viral) com outros componentes da teia trófica microbiana pelágica marinha (AZAM et al., 1983). A gama de concentrações encontradas é compatível com níveis esperados em águas marinhas costeiras (KIRCHMAN, 2008).

Figura 89: Abundância de cianobactérias e eucariotos autotróficos na coluna d'água (em dois estratos: superfície e próximo ao fundo) determinada por citometria de fluxo multiparamétrica. Cianobactérias estão discriminadas em *Prochlorococcus* spp. e *Synechococcus* spp. Estações sem valores representam locais ou profundidades cuja amostragem não estava prevista ou que não foram amostrados devido a condições adversas. As campanhas estão representadas pela cor das barras: 1, azul (novembro de 2018); 2, verde (abril de 2019), 3, vermelho (junho de 2019), 4, magenta (setembro de 2019). Na campanha 4 somente a área A foi amostrada até o momento.

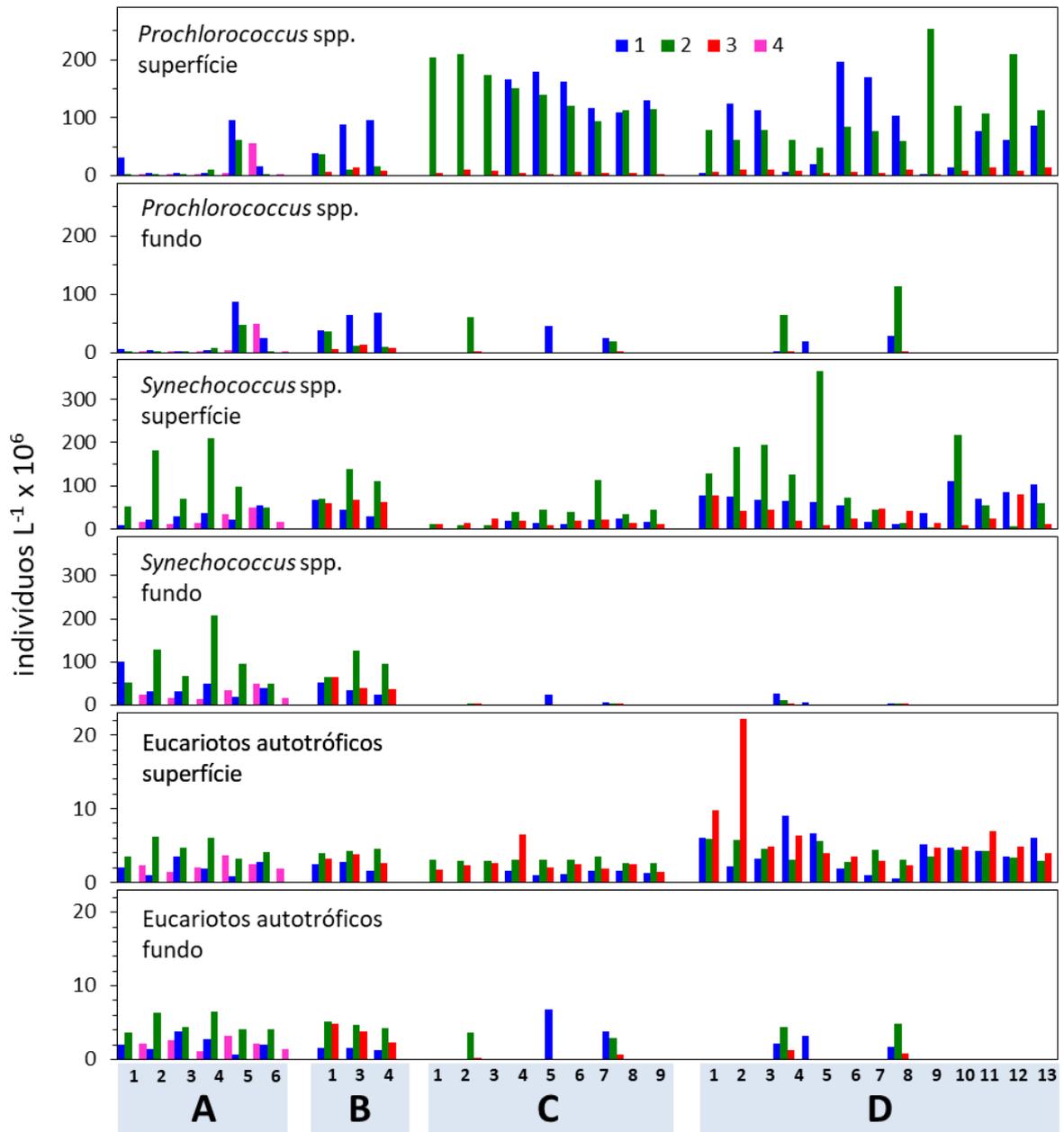
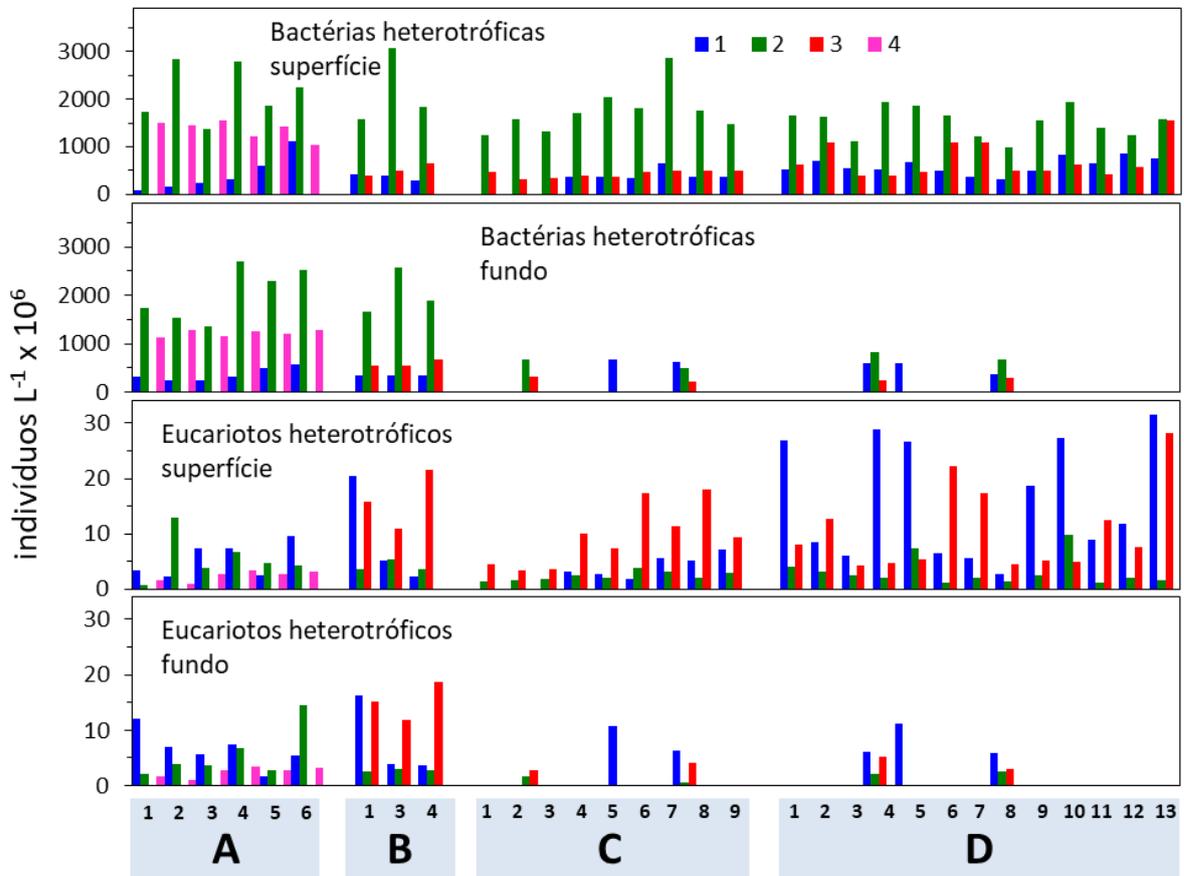


Figura 90: Abundância de bactérias e nanoeucariotos heterotróficos na coluna d'água (em dois estratos: superfície e próximo ao fundo) determinada por citometria de fluxo multiparamétrica. Estações sem valores representam locais ou profundidades cuja amostragem não estava prevista no plano de trabalho ou não amostrados devido a condições adversas. As campanhas são representadas pela cor das barras: azul (novembro de 2018); verde (abril de 2019); vermelho (junho de 2019). Na campanha 4 somente a área A foi amostrada até o momento.

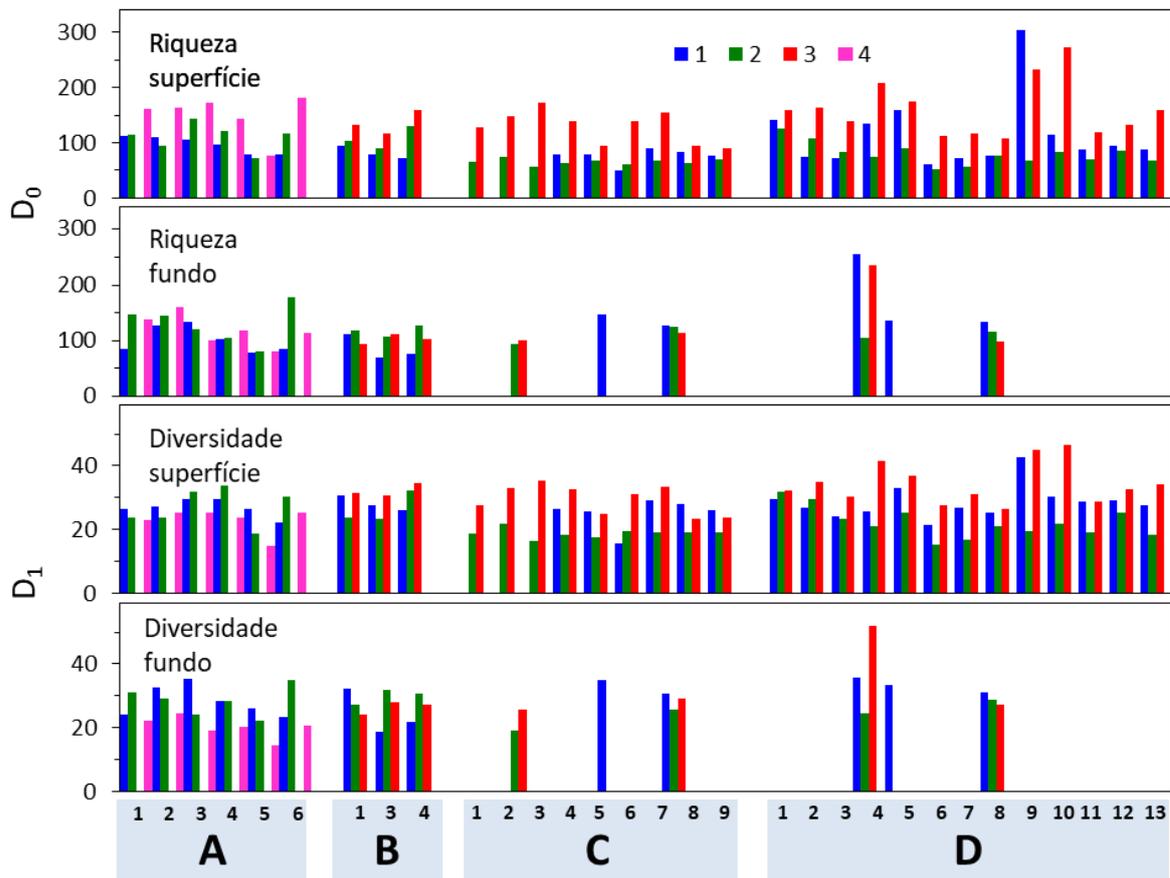


### 2.8.2. Diversidade citométrica do pico e nanoplâncton autotrófico

A citometria de fluxo multiparamétrica fornece, em curto prazo, uma grande quantidade de informação sobre as células individuais em comunidades planctônicas complexas. Estas informações servem para caracterizar comunidades do pico e nanoplâncton com os mesmos princípios das análises de riqueza e diversidade taxonômicas tradicionais. Com os dados citométricos, indivíduos com características similares de tamanho e fluorescência são agrupados em categorias comuns, representando um grupo singular equivalente a um táxon (LI, 1997). Esta abordagem vem sendo cada vez mais utilizada na caracterização de comunidades microbianas auto e heterotróficas marinhas, envolvendo o uso de algoritmos automatizados de agrupamento (PROPPS et al., 2016). Apesar das grandes variações na biomassa dos componentes do pico e nanoplâncton autotrófico, descritas acima, a riqueza e diversidade citométrica deste grupo foram menos variáveis, espacial e temporalmente (Figura 91). Mesmo assim, a riqueza e diversidade na campanha de junho de 2019 foram em média 47% maiores que nas demais. A riqueza de grupos citométricos para autótrofos ficou entre 50 e 150 na maioria das

estações, tanto nas amostras de superfície quanto nas de fundo, excetuando-se algumas amostras da Área D (D4 no estrato próximo ao fundo e D9, D10 e D11 em superfície), que tiveram riqueza próximo de 250. A diversidade citométrica acompanhou a variação da riqueza, com valores tipicamente entre 20 e 40 nats.indivíduo<sup>-1</sup>.

Figura 91: Índices de riqueza e diversidade citométrica de comunidades do fitoplâncton (picocianobactérias e eucariotos unicelulares) em amostras de superfície e próximas ao fundo. Riqueza de grupos citométricos refere-se ao índice D<sub>0</sub> da série de Hill. Diversidade citométrica refere-se ao índice D<sub>1</sub> da série de Hill (HILL, 1973), equivalente ao índice de Shannon-Weaver. Estações sem valores representam locais ou profundidades cuja amostragem não estava prevista no plano de trabalho ou que não puderam ser amostrados devido a condições adversas. Na campanha 4 somente a área A foi amostrada até o momento.



### 2.8.3. Análises quali- quantitativas por microscopia

Comunidades planctônicas na faixa dimensional acima de 5µm até ca. 100 µm foram analisadas por duas técnicas de microscopia: um sistema automatizado de imageamento em fluxo (FlowCam<sup>®</sup>) e por microscopia invertida de campo claro convencional, após concentração em câmaras de sedimentação. Essas duas abordagens são complementares. Mesmo com alguma sobreposição, o sistema de imageamento em fluxo abarca populações de organismos menores e mais abundantes do que o que é normalmente analisado na microscopia invertida. Além disso, o imageamento em fluxo permite a quantificação de partículas detriticas presentes na água, o que é operacionalmente inviável na

microscopia invertida convencional. Por outro lado, a microscopia invertida é adequada a quantificação de organismos menos abundantes e melhor resolução taxonômica. A seguir são descritos os resultados da abundância dos diferentes grupos funcionais e taxonômicos analisados com estas técnicas.

#### **2.8.4. Análise quali-quantitativa de comunidades planctônicas por imageamento dinâmico em fluxo**

As análises na *FlowCam* revelaram o domínio de diatomáceas penadas e formas arredondadas de menor tamanho, similares a dinoflagelados, entre o fitoplâncton. Além de grande quantidade de pequenos protistas (eucariotos unicelulares) auto e heterotróficos, a análise revelou a presença de muitas partículas detríticas amorfas na água, que foram também classificadas e quantificadas nas amostras (Figura 92).

Observou-se o domínio de protistas (eucariotos unicelulares) na faixa dimensional de 5 a 15 $\mu\text{m}$ , atingindo até 2960.10<sup>3</sup> indivíduos.L<sup>-1</sup> sendo, em média, ca. 20 vezes mais abundantes que a classe >15 $\mu\text{m}$  (Figura 93). Este grupo de protistas contém formas autotróficas e heterotróficas e inclui o grupo dos chamados nanoflagelados heterotróficos, importante elo na alça microbiana pelágica marinha (AZAM et al., 1983). Os sítios da Área A localizados no arco recifal costeiro (A2, Sebastião Gomes) e o sítio costeiro mais ao norte (A6, Timbebas) apresentaram as maiores concentrações deste grupo de pequenos protistas.

O grupo de indivíduos do plâncton indubitavelmente classificados como eucariotos clorofilados e cianobactérias filamentosas, i.e. membros do fitoplâncton, na faixa dimensional >15 $\mu\text{m}$  até o limite operacional do equipamento (ca. 100 $\mu\text{m}$ ), foi dominado por diatomáceas e dinoflagelados, com concentrações entre 1,7 e 250.10<sup>3</sup> indivíduos.L<sup>-1</sup>. Entre as estações, a concentração relativa de indivíduos deste grupo variou de forma similar aos pequenos protistas do grupo anteriormente descrito, mas com menor amplitude, inclusive entre o estrato superficial e as amostras próximas ao fundo. Organismos do protozooplâncton na faixa dimensional >15 $\mu\text{m}$  foram esporádicos entre as imagens capturadas no nível de detecção quantitativo da técnica. Membros deste grupo foram quantificados por microscopia invertida.

A abundância de partículas detríticas com aparência de flocos amorfos (Figura 92) foi, em média, 2 vezes maior do que a abundância de células eucarióticas, considerando toda a faixa dimensional analisada (de 5  $\mu\text{m}$  até ca. 100 $\mu\text{m}$ ), chegando a 5875.10<sup>3</sup> partículas.L<sup>-1</sup> na superfície da estação A6, Timbebas, na campanha de novembro de 2018. Um caso excepcional foi a amostragem de junho de 2019 (campanha 3) no estrato de fundo do sítio D4, onde foram observadas >40000 partículas.L<sup>-1</sup>. (Figura 93). Esta amostra foi coletada sob condições de vento forte e o alto valor certamente reflete ressuspensão de material particulado do fundo. A alta razão feofitina:clorofila nesta amostra (1,21) (ver

Figura 92) é indicativo da presença de material vegetal detritico na coluna d'água adjacente ao fundo. A composição química detalhada destas partículas detriticas é incerta, mas este tipo de material representa biomassa ainda aproveitável por consumidores, sendo normalmente colonizado por grande quantidade de bactérias heterotróficas, além de pequenos protistas (ALLDREDGE e GOTSCHALK, 1990).

Figura 92: Indivíduos do fitoplâncton (painel da esquerda) e partículas detriticas (painel da direita) detectados nas amostras do plâncton através de imageamento dinâmico em fluxo (FlowCam) usando uma objetiva de 10X. A escala aplica-se a todas as células e partículas de ambos os painéis.

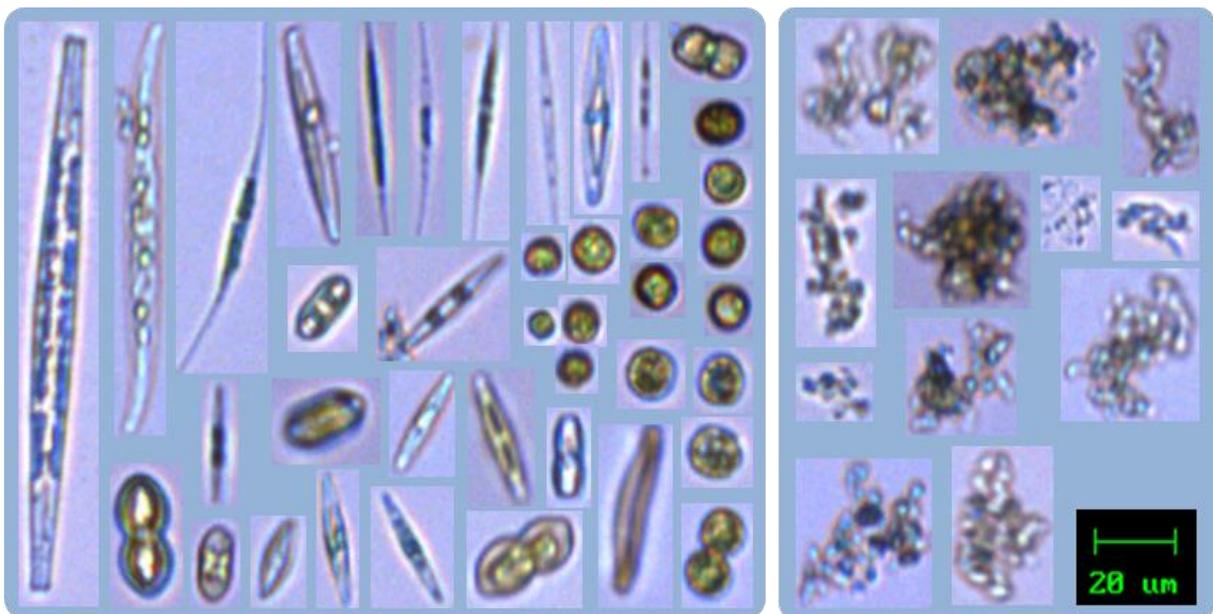
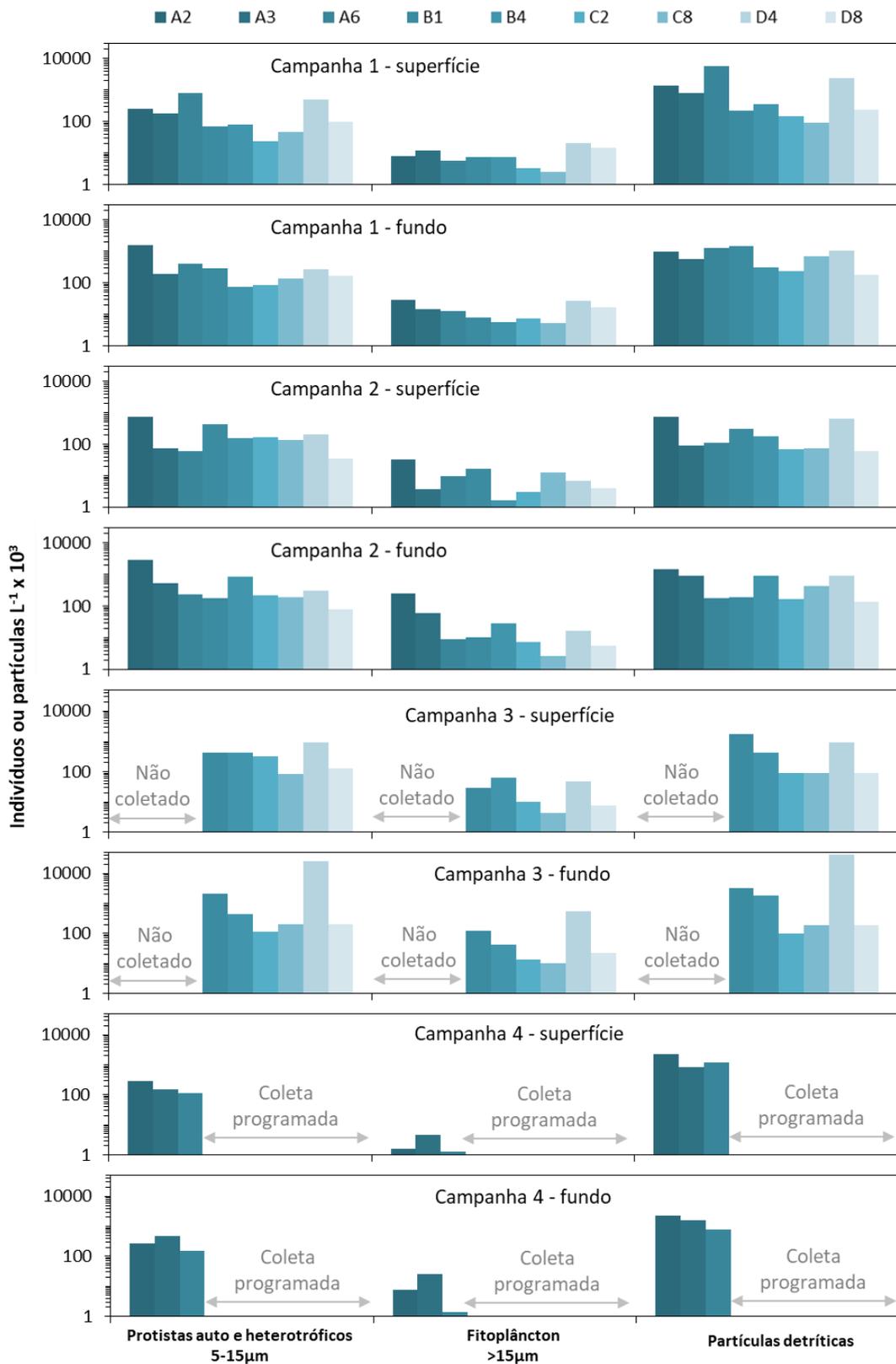


Figura 93: Concentração de protistas auto e heterotróficos na faixa dimensional 5-15µm; fitoplâncton >15µm e partículas detriticas detectados nas amostras do plâncton através do sistema de imageamento dinâmico em fluxo (FlowCam). Na primeira campanha a estação C2 não pode ser coletada por motivos climáticos (tempestade) e foi substituída pela estação C5.



### 2.8.5. Análise quali-quantitativa de comunidades planctônicas por microscopia invertida

Nas análises das amostras pelo método clássico de sedimentação e observação em microscópio invertido, indivíduos pertencentes a pelo menos treze grupos taxonômicos, nos níveis de filo, superclasse e classe, foram identificados na fração >15µm, abrangendo os componentes do fito- e protozooplâncton (Figura 94, Figura 95 e Figura 96). Concordando com os resultados quantitativos da análise por imageamento em fluxo, as contagens por microscopia invertida mostraram domínio de diatomáceas (Filo Bacillariophyta) na maioria das amostras, tanto em superfície quanto próximo ao fundo, especialmente nas áreas A e B, onde o grupo foi dominante em todas as amostras. Outros grupos abundantes do fitoplâncton foram: dinoflagelados (Superclasse Dinoflagellata), pequenos flagelados da Classe Coccolithophyceae, cianobactérias filamentosas (Classe Cyanophyceae). Ciliados (Filo Ciliophora) e foraminíferos dominaram o protozooplâncton nesta fração de tamanho (Figura 95 e Figura 96).

Figura 94: Imagens de indivíduos do fitoplâncton nas amostras analisadas por microscopia. A: células do dinoflagelado *Ceratium tripos*; B e E: células de diatomáceas do gênero *Diploneis*; C: tricomas da cianobactéria filamentosa *Trichodesmium erythraeum*; D: diatomácea não identificada; F: célula do dinoflagelado *C. pentagonum*. Escala: A) 20 µm, B-F) 10 µm.

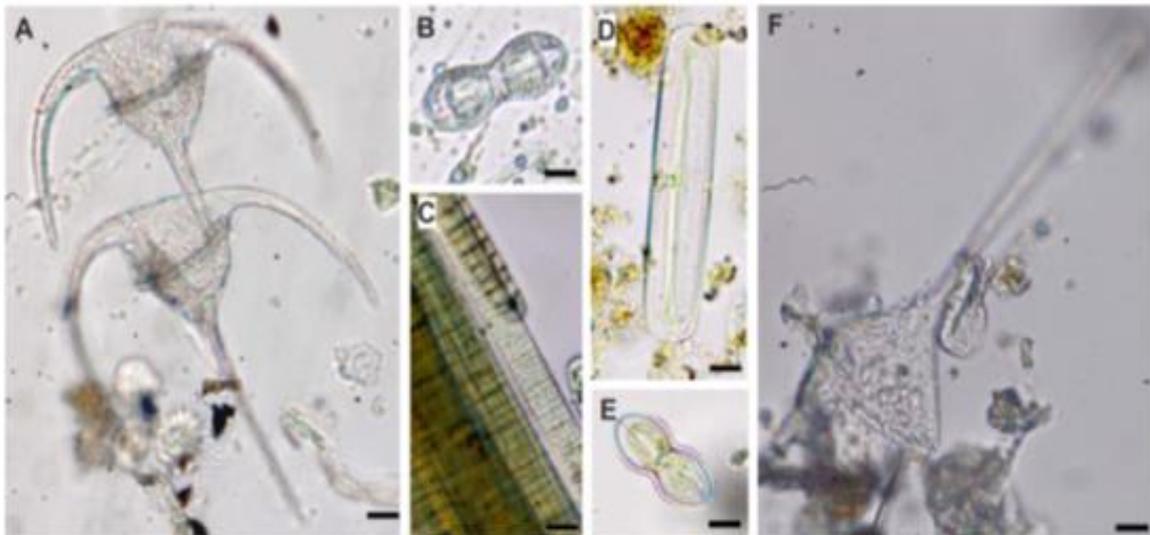


Figura 95: Abundância dos principais grupos de organismos do fitoplâncton e protozooplâncton na faixa dimensional >15µm em amostras de superfície e próximas ao fundo. Na primeira campanha a estação C2 não pode ser coletada por motivos climáticos (tempestade) e foi substituída pela estação C5. Por motivo de más condições climáticas, não foram feitas coletas na área A na campanha 3. Três amostras da campanha 3 (D4 superfície e fundo e D8 fundo) e as amostras da área A (A2, A3 e A6) da campanha 4 estão em análise.

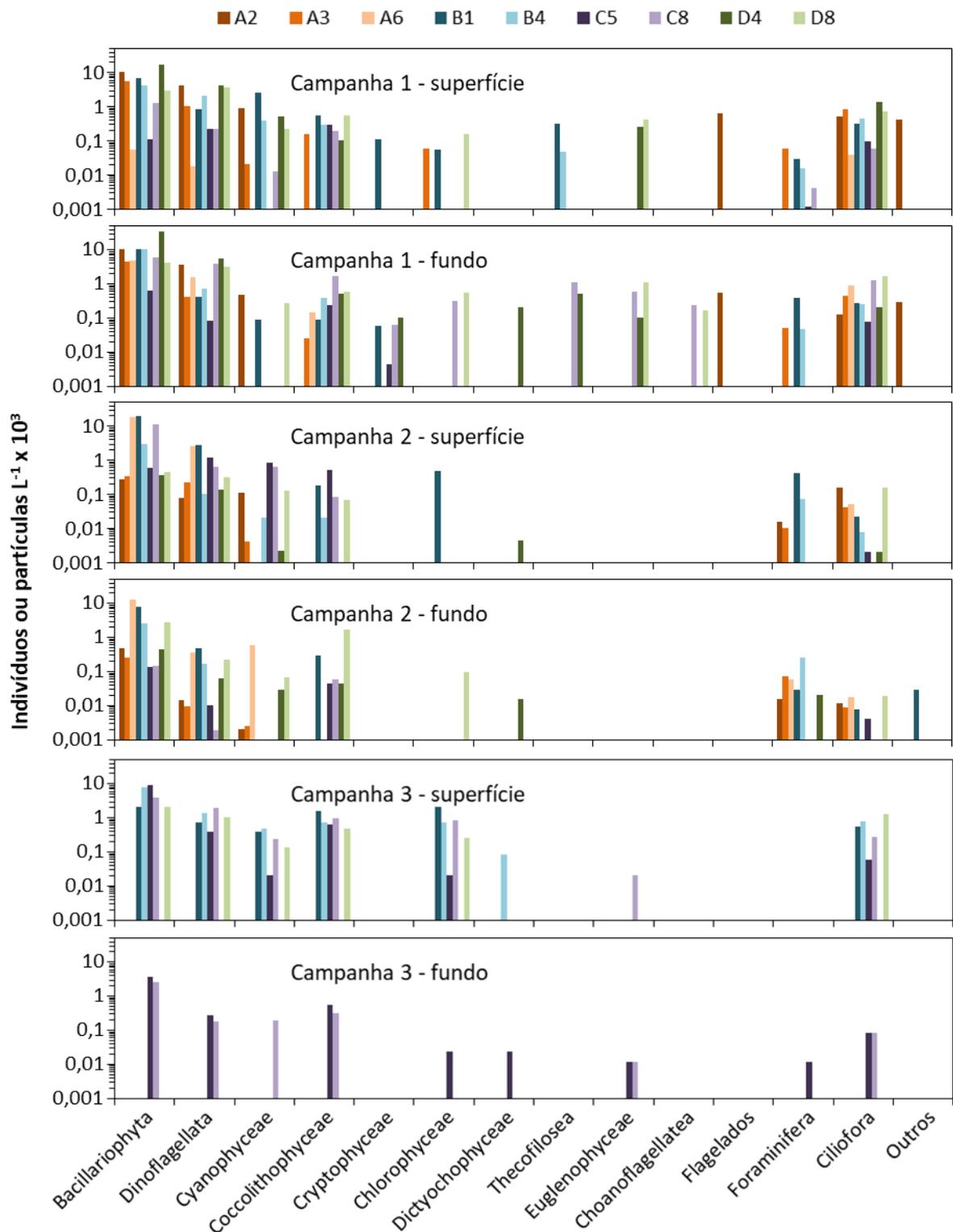
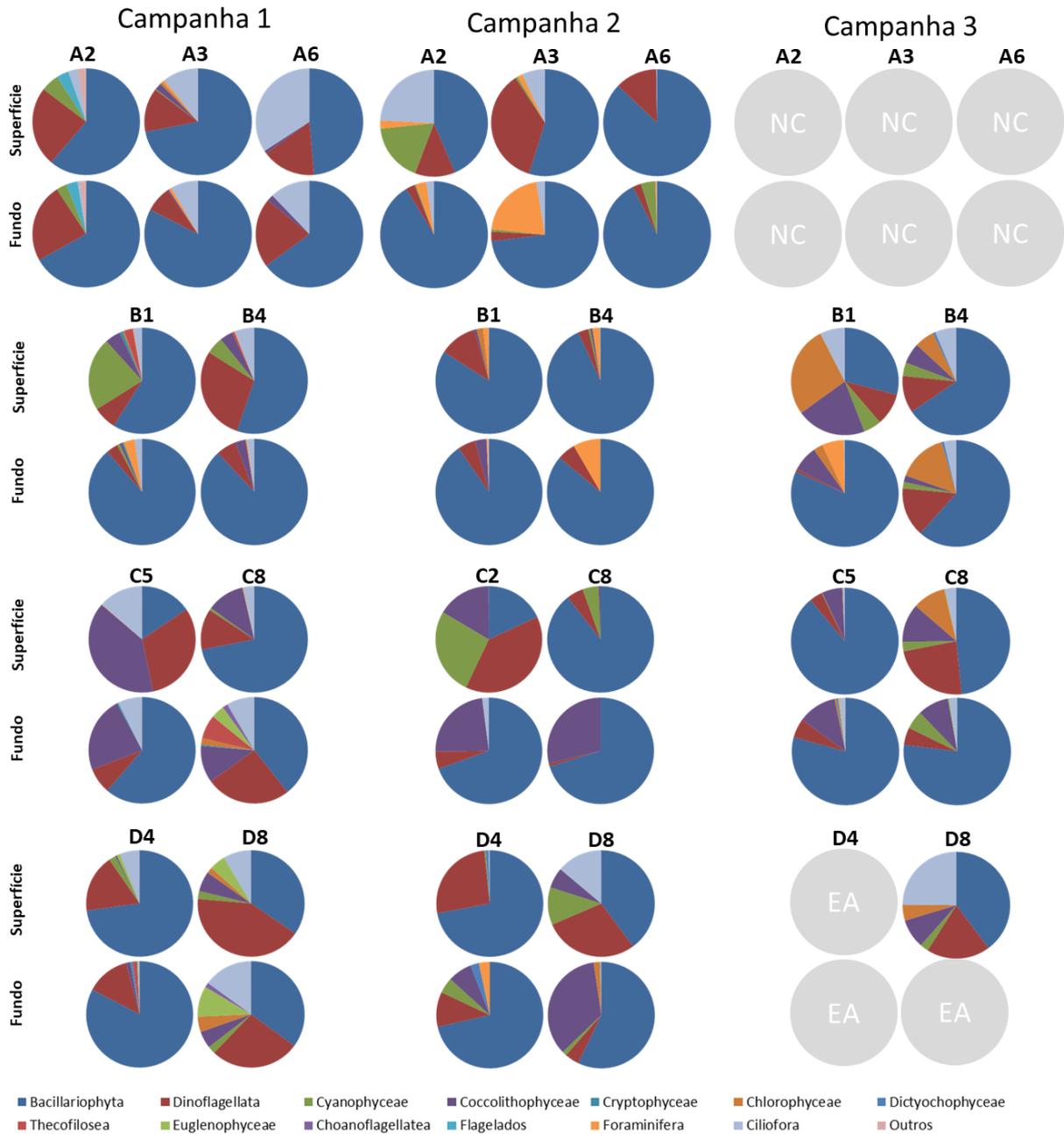


Figura 96: Proporção relativa dos principais grupos do fito e protozooplâncton >15µm em amostras de superfície e próximas ao fundo nas Áreas A, B, C e D nas campanhas 1, 2 e 3. NC: não coletada. EA: em análise.

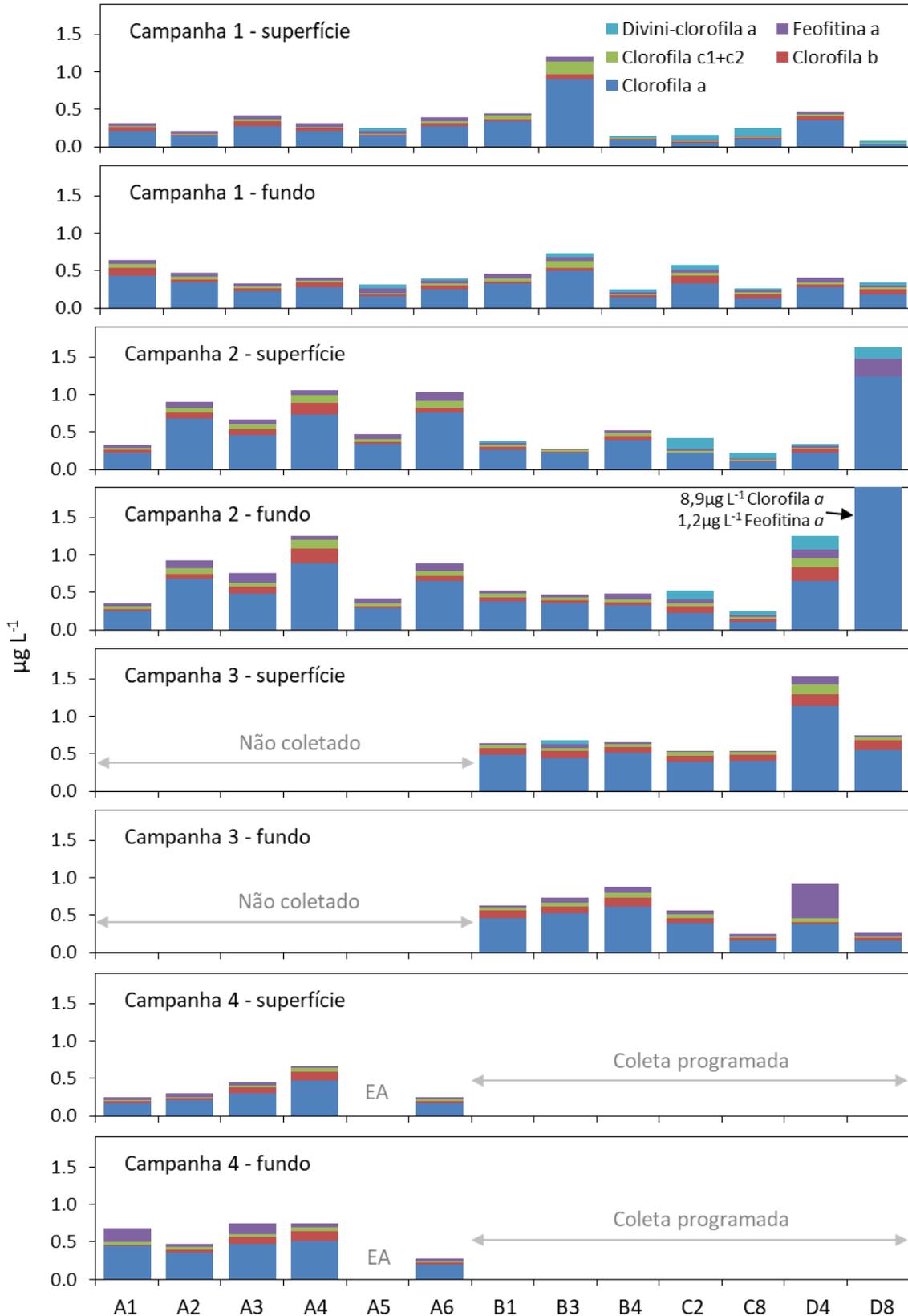


#### 2.8.6. Quantificação de pigmentos por espectrofluorimetria

Pigmentos fotossintetizantes (clorofilas *a*, *b*, *c1+c2*, divinil-clorofila *a*) foram quantificados em amostras coletadas na superfície e próximas ao fundo (Figura 97) em estações coincidentes com aquelas onde foram coletadas as amostras analisadas por microscopia, mais uma estação extra na Área B (B3). As concentrações de clorofila *a* (proxy para a biomassa fitoplanctônica) variaram entre 0,04 e 1,5  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , com exceção de um amostra (estrato extrato de fundo na estação D8 da campanha de abril de 2019) cuja concentração chegou a 8,8  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Na área C as concentrações foram em geral menores, tanto em superfície quanto no fundo. O predomínio de clorofila *a* sobre divinil-clorofila *a*, na maioria dos sítios, evidencia a maior contribuição de eucariotos em relação à picocianobactérias para a biomassa dos produtores primários pelágicos, um padrão característico de regiões costeiras (NOT et al., 2012). Somente em amostras de superfície, especialmente nos sítios analisados da Área C, observou-se maior representatividade na contribuição de divinil-clorofila *a*, indicando alta abundância de picocianobactérias do gênero *Prochlorococcus*, caracterizando maior influência de águas oligotróficas, possivelmente com influência da Corrente do Brasil.

Os resultados da composição pigmentar (Figura 97) corroboram as análises por citometria de fluxo e microscopia. A presença das clorofilas *c1+c2* na maioria das amostras suporta a contribuição significativa de diatomáceas e dinoflagelados, enquanto a clorofila *b* pode estar relacionada às presenças de linhagens de algas verdes e cianobactérias, inclusive proclorófitas, na biomassa dos produtores primários planctônicos (RAVEN et al., 2011; JEFFREY et al., 2011).

Figura 97: Concentração de pigmentos fotossintetizantes em amostras de água de superfície e fundo coletadas nas Áreas A, B, C e D. EA: em análise.



Em conjunto, os resultados das análises qualitativas e quantitativas dos organismos planctônicos e da concentração de pigmentos na água indicam uma comunidade diversa de produtores primários, com domínio de picocianobactérias nos sítios mais afastados da costa e influenciados por águas oceânicas, e do fitoplâncton eucarioto, majoritariamente diatomáceas, dinoflagelados e pequenos flagelados, nos sítios mais costeiros.

A análise integrada, através de técnicas de estatística multivariada (PCA), dos dados de abundância dos diferentes componentes do plâncton, juntamente com variáveis físico-químicas ambientais, revelou feições e correlações indetectáveis apenas pela simples observação dos dados.

Foram feitas duas PCA, usando conjuntos de variáveis distintos em função da quantidade de informação em cada um. A primeira análise (com mais de 31% da variabilidade explicada) buscou contemplar o maior número possível de variáveis do plâncton (obtidas por citometria de fluxo, imageamento em fluxo e microscopia) e dos dois estratos da coluna d'água (superfície e fundo) (Figura 98), em detrimento do número de amostras. A segunda análise (explicando mais de 60% da variabilidade total) contemplou um conjunto de dados de maior abrangência espacial e temporal, com mais amostras, limitando o conjunto de dados às quantificações e classificações do pico e nanoplâncton auto e heterotrófico no estrato de superfície, obtidas por citometria de fluxo (Figura 99).

As análises evidenciam diversas associações que ajudam a entender as respostas na composição e abundância das comunidades do plâncton por influência das características do meio físico.

A turbidez da água, medida pelo coeficiente de atenuação difusa da luz em 490nm,  $K_d490$ , mostra consistente relação inversa com a abundância *Prochlorococcus* spp., picocianobactérias típicas de águas oligotróficas, e com a concentração do pigmento divinil-clorofila *a*, exclusivo e diagnóstico deste grupo de procariontes (CHISHOLM et al., 1992). Este é um padrão esperado em gradientes *cross-shelf* onde a disponibilidade de nutrientes diminui em direção ao oceano aberto. Corroborando esta feição, diatomáceas foram positivamente relacionadas com  $K_d490$  e a concentração de partículas detríticas na água, características de águas costeiras com aporte de material particulado do continente e por processos de mistura. A diversidade citométrica do componente autotrófico do pico e nanoplâncton relacionou-se positivamente com as maiores abundâncias de diatomáceas e pequenos protistas auto e heterotróficos, e em oposição às maiores concentrações de *Prochlorococcus* spp. Também foi evidente a relação inversa entre *Prochlorococcus* spp. e *Synechococcus* spp. Estes últimos também são picocianobactérias mas, diferentemente de *Prochlorococcus* spp., possuem o pigmento acessório ficoeritrina. Estes dois grupos coexistem em águas oligotróficas com certa partição de nicho (FLOMBAUM et al., 2013), refletindo sua relação inversa. Apesar de ter menor contribuição na explicação da componente principal, a distância da costa acompanha inversamente o comportamento

da variável turbidez. As feições evidenciadas na análise multivariada indicam claramente a influência de águas costeiras e oceânicas modulando a composição do plâncton unicelular na área de estudo.

A temperatura da superfície do oceano não mostrou forte relação com *Synechococcus*, nanoeucariotos autotróficos, concentração de clorofila c1+c2 e distância da foz do rio Doce. Por outro lado, dinoflagelados e criptofíceas mostram um comportamento oposto ao da temperatura. A relação entre dinoflagelados e criptofíceas pode ser resultado de uma interação interespecífica de cleptoplastia (captura e utilização de cloroplastos de outro organismo), associada a predação (mixotrofia), fenômenos comuns em dinoflagelados marinhos (MINNHAGEN et al., 2008).

Gradientes espaciais e sazonalidade também foram evidenciados nas análises multivariadas. Por exemplo, *Prochlorococcus* spp. foi mais abundante nas estações da Área C (Figura 89), a mais profunda e sob maior influência de águas oceânicas oligotróficas. Por outro lado, estações na área A (PARNAM e adjacências) e uma na área D estão associadas a maior turbidez, concentração de detritos, com maior contribuição de diatomáceas na comunidade fitoplanctônica (Figura 98). A baixa concentração relativa de *Prochlorococcus* e mesmo de *Synechococcus* em Abrolhos difere do padrão observado em outros sistemas recifais, onde estas picocianobactérias são abundantes e constituem uma importante fonte de alimento para os corais (CHARPY, 2005). Esta parece ser mais uma particularidade do sistema recifal de Abrolhos, reconhecidamente mais turvo que os recifes clássicos do Indo-Pacífico (RIBEIRO et al., 2018).

A coerência das associações bióticas e os padrões de distribuição dos diferentes grupos taxonômicos e funcionais frente às variáveis físicas do meio observadas nesta análise exploratória refletem a qualidade dos dados brutos gerados, além de ser um indicativo de normalidade da estrutura e aspectos funcionais do plâncton procarioto e protista, nas faixas dimensionais analisadas (pico, nano e micro) e nas escalas espacial e temporal contempladas no estudo até o momento.

Dada a vastidão da área de estudo e a complexidade logística para acomodar um grande número de medições e amostragens dentro das metas do subprojeto, as coletas nas diferentes Áreas em cada campanha ocorreram em períodos distintos, restringindo uma análise mais refinada da sazonalidade. Mesmo assim, algumas mudanças sazonais na composição da comunidade e características físicas do ambiente foram evidentes. Muitas amostras obtidas em fevereiro de 2019 (Campanha 2) apresentaram maior temperatura e alta concentração de *Prochlorococcus* spp., enquanto que a amostragem de novembro e dezembro de 2018 foi agrupada separadamente da de abril de 2019, com maior contribuição de *Synechococcus* spp., nanoeucariotos e bactérias heterotróficas.

Figura 98: Análise de componentes principais utilizando as variáveis de abundância de componentes do pico, nano e microplâncton, pigmentos fotossintetizantes e variáveis abióticas. Painel superior: distribuição das amostras nas duas primeiras componentes principais; as cores indicam estações amostrais; os códigos são mês e ano da coleta de acordo com a legenda do painel inferior. Painel inferior: discriminação das amostras de acordo com o período da amostragem; os círculos maiores indicam a posição média para cada período; a espessura das setas é proporcional à contribuição de cada variável que explica a distribuição das amostras. Kd490: coeficiente de atenuação difusa da luz 490nm. SST: temperatura da superfície do oceano.

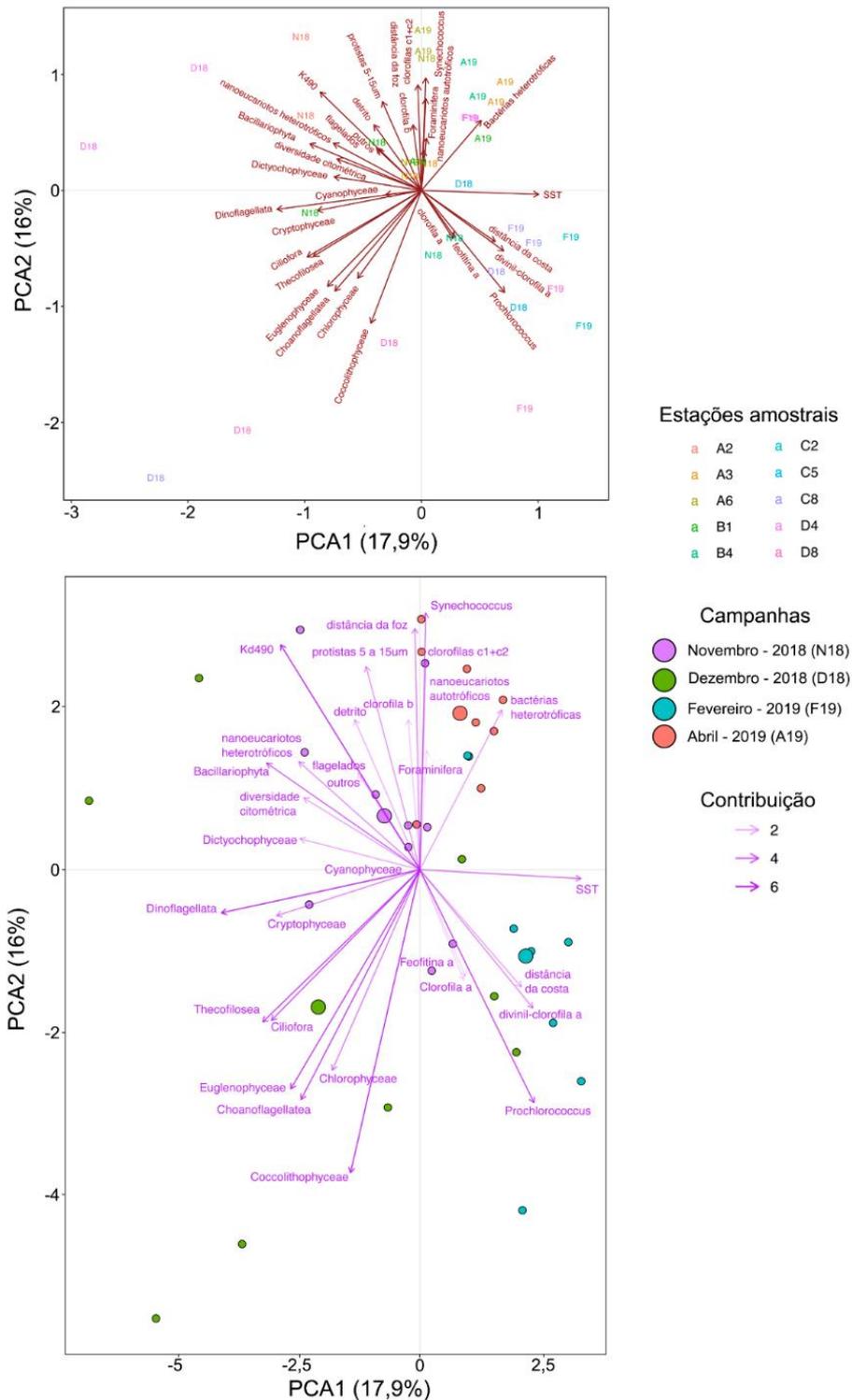
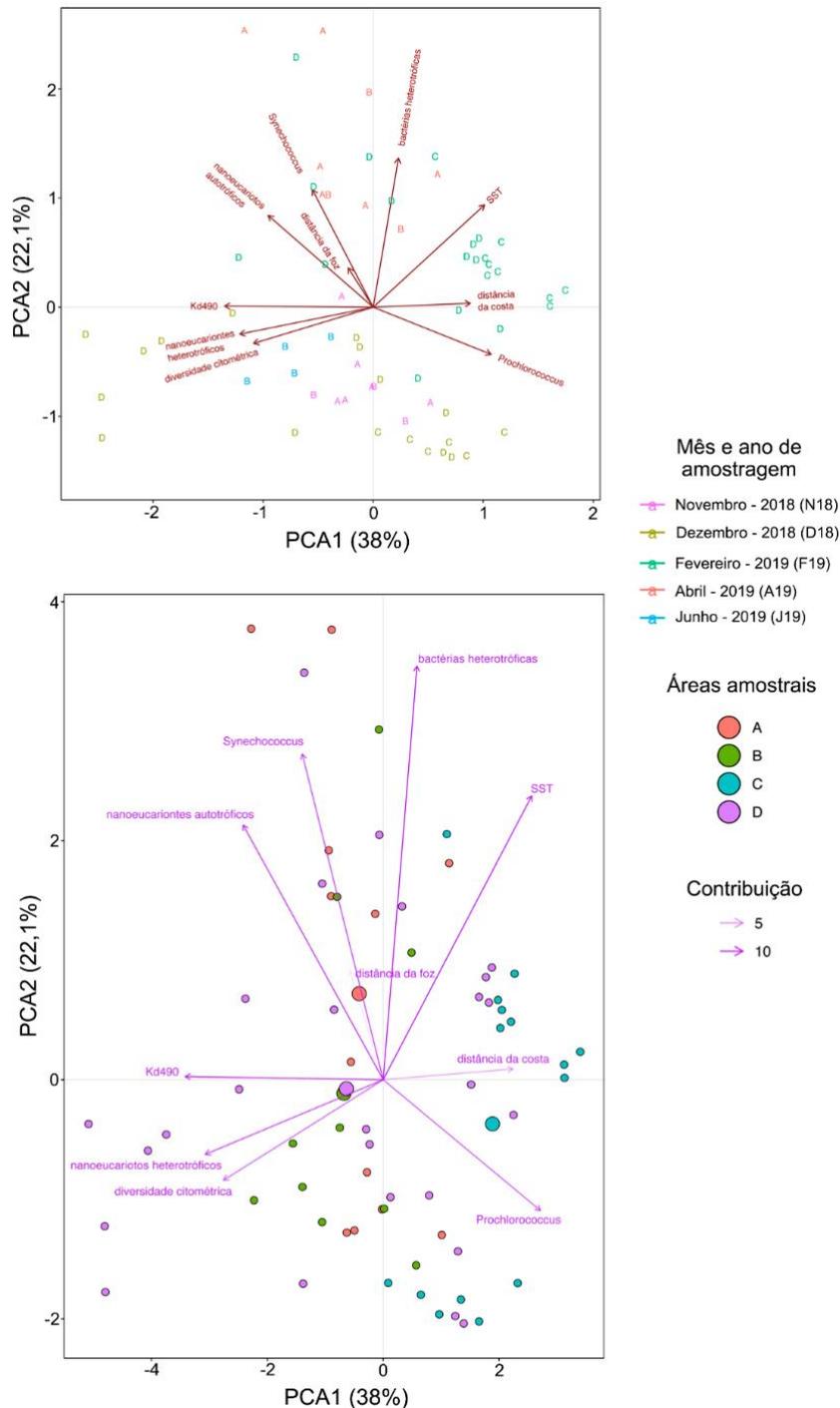


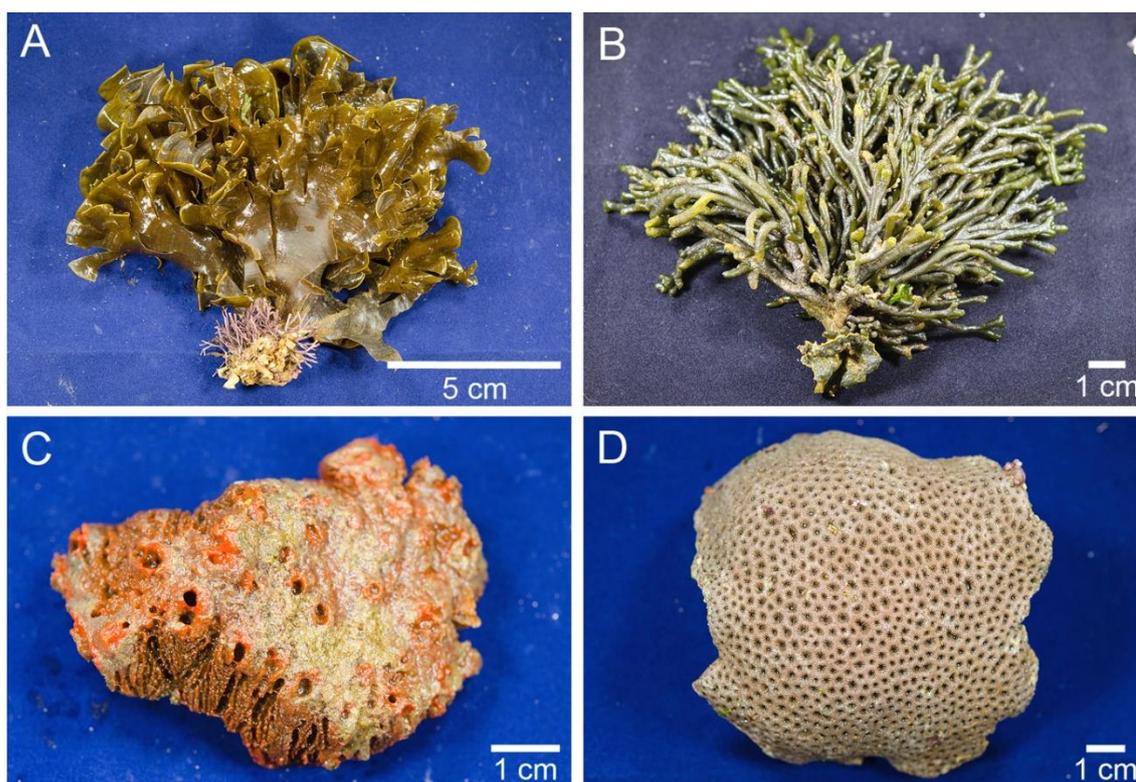
Figura 99: Análise de componentes principais (PCA) com dados de abundância e diversidade de componentes do pico, nanoplâncton na em amostras de superfície quantificados por citometria de fluxo multiparamétrica e variáveis abióticas. Painel superior: distribuição das amostras nas duas primeiras Componentes Principais; indicam mês e ano da amostragem e códigos representam as Áreas amostrais. Painel inferior: discriminação das amostras de acordo com a área de amostragem; os círculos maiores indicam a posição média para cada período; a espessura das setas é proporcional à contribuição de cada variável que explica a distribuição das amostras. Kd490: coeficiente de atenuação difusa da luz em 490nm. SST: temperatura da superfície do oceano.



## 2.9. COLETA E PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS PARA TOXICOLOGIA

Foram coletadas amostras para estudos toxicológicos no âmbito do Anexo 1 nas Áreas C e D, nas Campanhas 1, 2 e 3 (Figura 100), incluindo o coral *Siderastrea* sp., as macroalgas *Padina gymnospora* e *Codium* sp., e a esponja marinha *Tedania ignis*, sendo que esses dois últimos taxa são conhecidos pela capacidade de acumular metais (CAPON et al., 1993; SALGADO et al., 2005; LAIB; LEGOUCHI, 2011; BATISTA et al., 2014).

Figura 100: Espécies coletadas para análises toxicológicas. A: *Padina gymnospora*. B: *Codium* sp.. C: *Tedania ignis*. D: *Siderastrea* sp. Fotos: F. Moraes



## 3. DISCUSSÃO INTEGRADA DO AMBIENTE RECIFAL

O objetivo dessa seção é integrar, sinteticamente, os resultados do primeiro ciclo de execução do PMBA, com foco nos ambientes recifais. Aqui são apresentados de forma integrada os resultados referentes ao ambiente recifal, incluindo não só os estudos recifais e de macroalga, mas também o mapeamento desses habitats e os peixes recifais (Anexo 7).

Além de facilitar a compreensão dos resultados a partir de uma integração por ambiente, compondo uma unidade de análise natural, coesa e coerente, ressalta-se que o esforço amostral e analítico

desenvolvido por diferentes “subprojetos” e “anexos” que atuaram em ambientes recifais foi bastante congruente. As abordagens amostrais e analíticas tiveram natureza hierárquica, com temas que se complementam, indo desde o embasamento geomorfológico (aonde estão os recifes? quais suas dimensões e características?) até a estrutura e dinâmica das comunidades biológicas (como ocorrem e o que induz as variações no espaço e no tempo?). Na medida em que o PMBA progride, essa abordagem permite a identificação dos efeitos do rompimento da barragem da barragem e a proposição de medidas adequadas de gestão (Figura 101). As malhas amostrais tiveram elevada sobreposição espacial (Figura 102), batimétrica (Figura 103) e de representatividade dentro das Unidades de Conservação (Figura 4). Esse esforço de síntese embasa a construção de um quadro holístico acerca dos ambientes recifais e dos impactos do rompimento da barragem da barragem sobre as comunidades biológicas a eles associadas. Esse quadro deve ser complementado, nos próximos ciclos de execução do PMBA, por outros eixos de investigação e níveis de análises contemplados pelo Programa e também afetos aos ambientes recifais, tais como toxicologia, circulação e transporte oceânico.

A área de estudo corresponde a uma das regiões mais complexas e biodiversas do Atlântico Sul, historicamente submetida a estressores antropogênicos e climáticos (e.g. MOURA et al., 2013), a qual foi atingida, em 2015, por um conjunto de estressores com características e magnitudes sem precedentes (e.g. HATJE et al., 2017). Diante desse contexto, ressaltamos que a construção de um quadro holístico acerca dos efeitos do rompimento da barragem, bem como recomendações para mitigação, restauração e compensação, não é tarefa trivial que se enfrentará em curto prazo, nem tampouco com protocolos prontos e ferramentas ordinárias.

Figura 101: Esquema conceitual simplificado da hierarquia e concatenação dos diferentes eixos de investigação do PMBA em ambientes recifais.

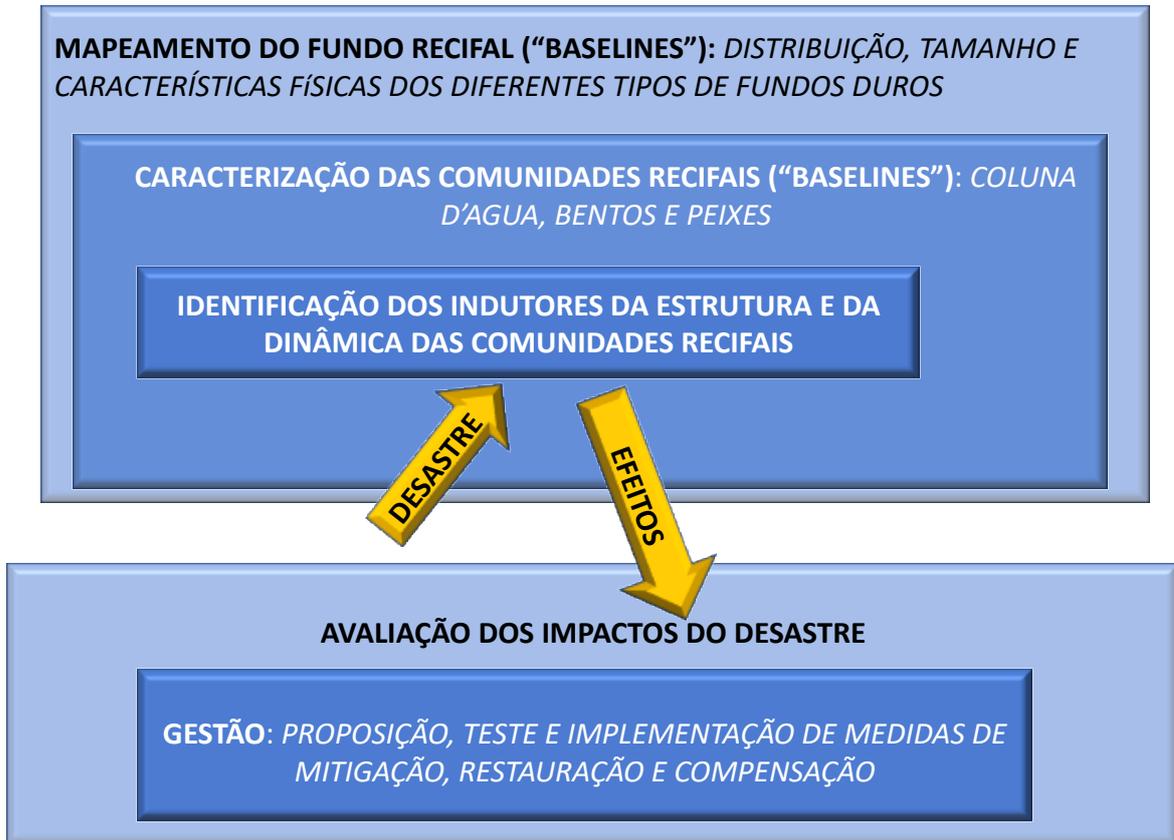
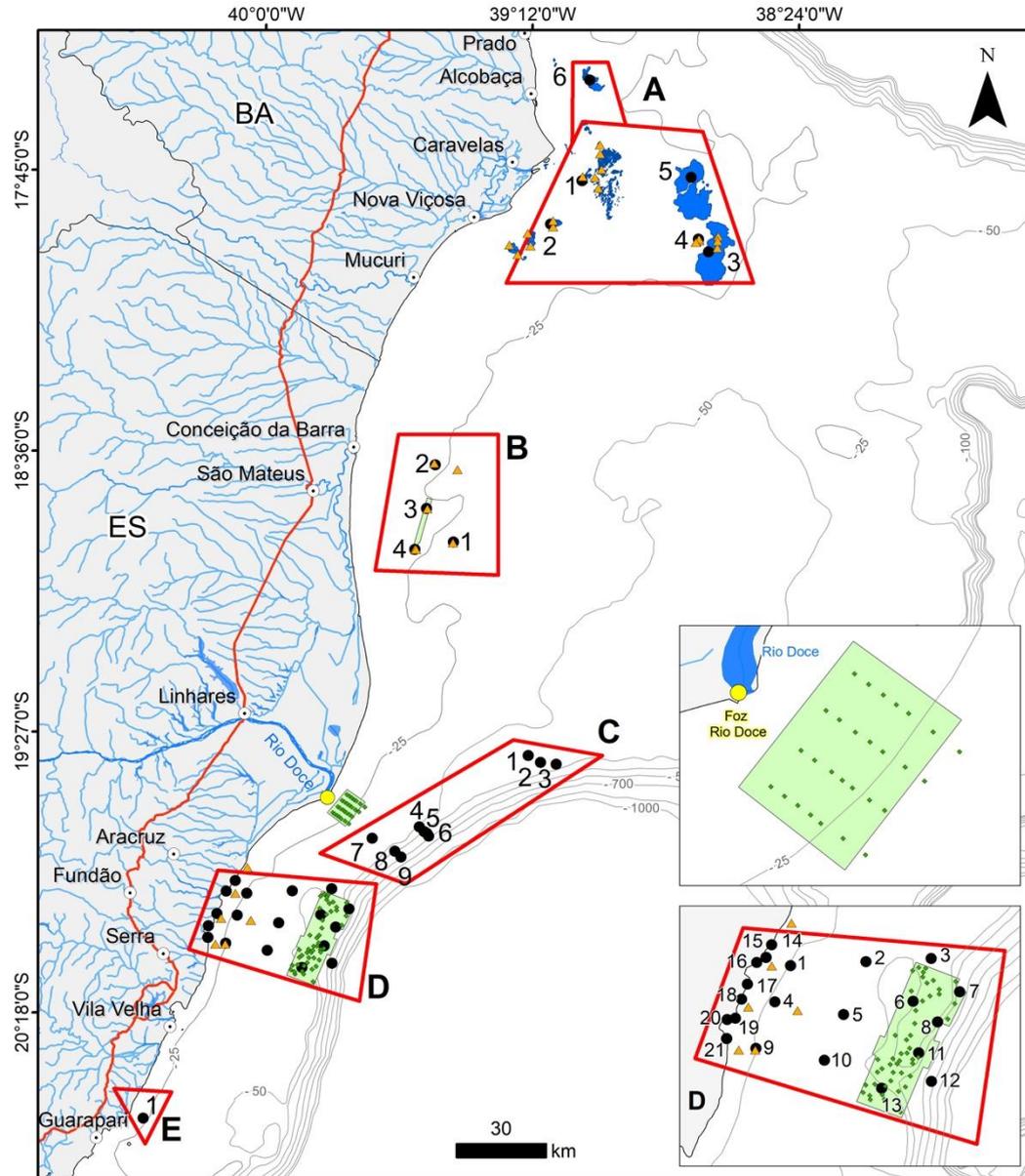


Figura 102: Região estudada, destacando-se as cinco Áreas (A-E) e a malha amostral integrada, sobreposta à distribuição conhecida de recifes emergentes. A malha da ictiofauna se refere apenas às amostragens de peixes recifais.



- |                                  |                              |                   |                        |
|----------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------|
| Anexo 3 - Fundos Recifais        | Anexo 7 - Ictiofauna Marinha | ○ Sede Municipal  | A - Abrolhos           |
| ● Malha Amostral                 | ▲ Malha Amostral             | — BR 101          | B - Recifes Esquecidos |
| Anexo 3 - Mapeamento de Habitats | ● Foz Rio Doce               | — Hidrografia     | C - Foz Rio Doce       |
| ● Verdade de Campo               | ■ Áreas de Estudo            | — Profundidade    | D - Costa das Algas    |
| ■ Levantamento Hidrográfico      | ■ Recifes Emergentes         | — Limite Estadual | E - Setiba             |

Figura 103: Batimetria (esquerda) e megahabitats bênticos (direita) da região estudada, com sobreposição da malha amostral integrada. A malha da ictiofauna se refere apenas às amostragens de peixes recifais.

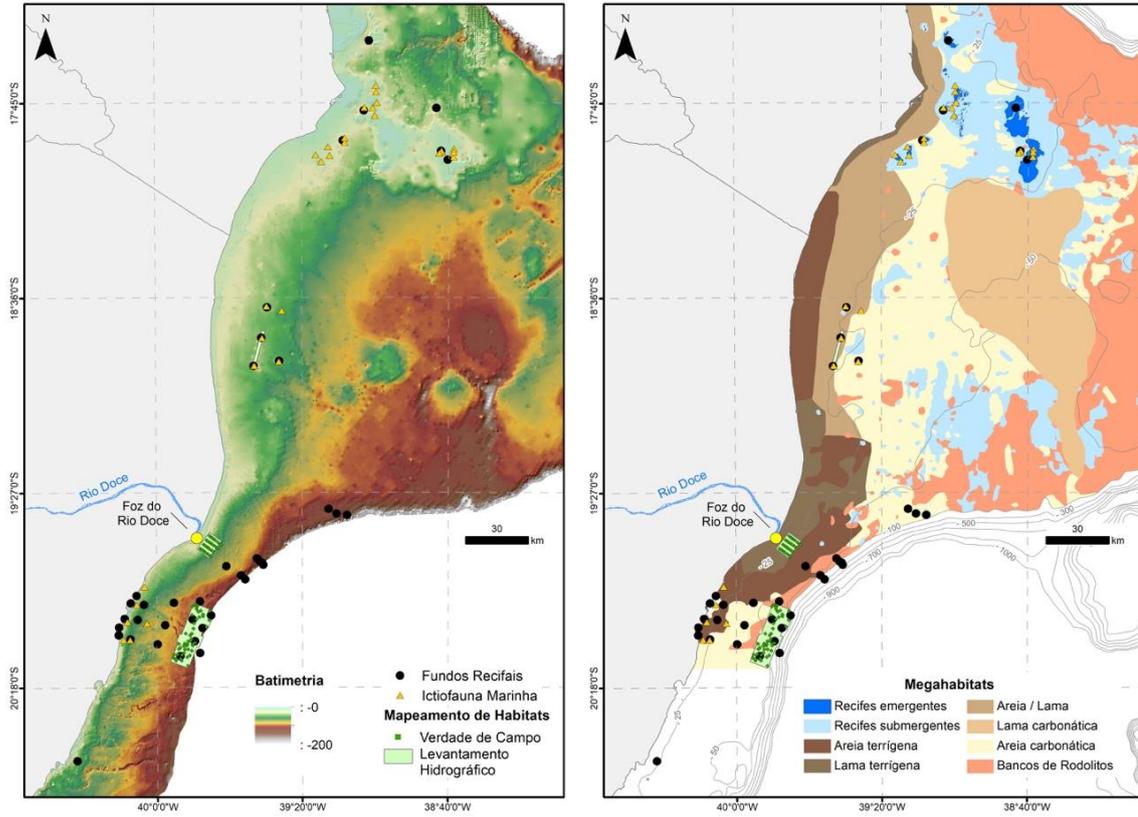
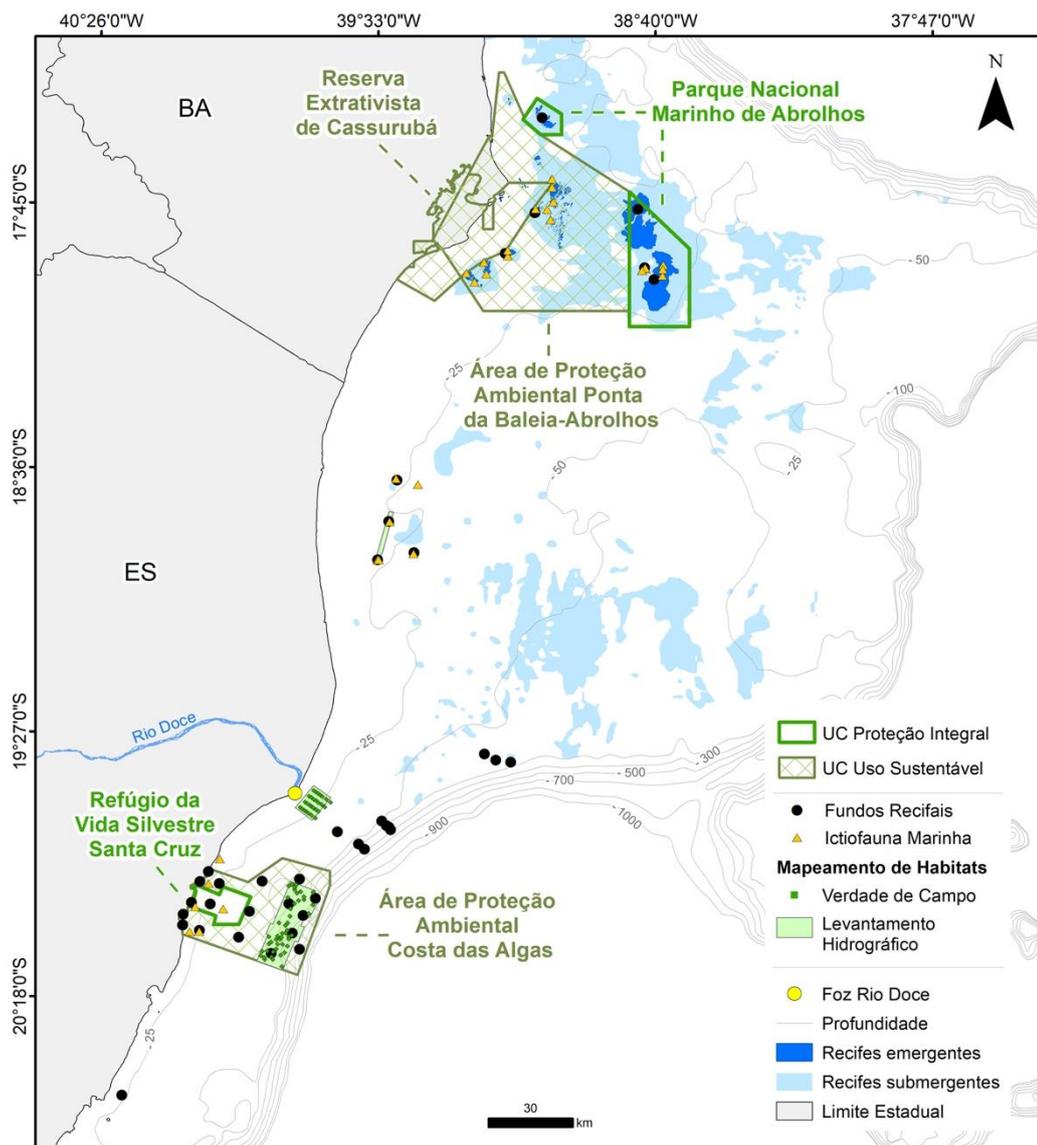


Figura 104: Unidades de Conservação na região estudada, com sobreposição da malha amostral integrada e dos recifes emergentes ou quase emergentes. A malha da ictiofauna se refere apenas às amostragens de peixes recifais.



### 3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL SOBRE OS AMBIENTES RECIFAIS DA REGIÃO ESTUDADA

Os ambientes recifais da região estudada são reconhecidos pelo Ministério do Meio Ambiente como áreas de Extrema Importância (MMA, 2004), apresentando-se como *hotspots* da biodiversidade marinha brasileira (AMADO-FILHO et al., 2012; MOURA et al., 2013) e provedores de serviços ecossistêmicos essenciais para dezenas de milhares de pessoas (COSTANZA et al., 2014; SPALDING et al., 2017). Os recifes do Banco Abrolhos - imensa área rasa que se estende da foz do Rio Doce (ES) até a foz do Jequitinhonha (BA), são amplamente reconhecidos na literatura científica como uma área chave para a biodiversidade marinha do Atlântico (MOURA 2002; PINHEIRO et al., 2018). Recifes e

bancos de rodolitos são formações coalescidas conhecidas como "fundos duros" (*hard bottom*), caracterizadas por sua heterogeneidade estrutural em relação a áreas sedimentares adjacentes (Figura 105). Na região de estudo, esses fundos podem ter origem biológica (e.g. pináculos, rodolitos) ou mista (e.g. recifes de arenito e lateritas adjacentes ao litoral), e são recobertos majoritariamente por organismos de crescimento rápido que não estão diretamente envolvidos na construção das estruturas (e.g. macroalgas, cianobactérias). Os biomineralizadores de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), cujo crescimento é lento (e.g. algas calcárias, corais, briozoários), são as "espécies engenheiras" (AMADO-FILHO et al., 2012), responsáveis pela construção da estrutura física do ecossistema. As taxas de crescimento de organismos não construtores tendem a ser rápidas, alcançando a ordem de alguns  $\text{mm.dia}^{-1}$ , enquanto que as de corais e hidrocorais variam entre 3 e  $180 \text{ mm.ano}^{-1}$ , e as de algas coralíneas variam de submilimétricas até  $80 \text{ mm.ano}^{-1}$ . O balanço entre a abundância de organismos construtores e não-construtores é um aspecto crucial da dinâmica dos recifes que, quando estudada em escalas espaciais e temporais relevantes, compõe um importante *proxy* da saúde do ecossistema (GOLDBERG, 2013).

A estrutura física do habitat e a natureza complexa das interações biológicas são as principais características indutoras da biodiversidade dos ambientes recifais - a maior dentre os ecossistemas marinhos. Trata-se de um sistema ideal para monitorar impactos antropogênicos no Oceano, uma vez que, além de abrigarem grande biodiversidade e fornecerem diversos serviços ecossistêmicos (e.g., proteção da costa, pesca, lazer e recreação), os recifes são sensíveis a alterações na qualidade da água e aporte de sedimentos terrígenos (BIRKELAND, 1997; GOLDBERG, 2013). Adicionalmente, os recifes são protegidos por diversos mecanismos legais específicos que dispõem sobre sua conservação, inclusive em âmbito internacional. O mapeamento morfológico e faciológico do fundo marinho da região de estudo (relatado em detalhe pelo Subprojeto Mapeamento) é um componente essencial para identificar os diferentes tipos e subtipos de fundos duros e suas respectivas comunidades bentônicas. Mapear o fundo marinho deveria ser o ponto de partida para qualquer programa de manejo, planejamento espacial, licenciamento (e.g. caracterização de áreas de influência de empreendimentos potencialmente poluidores) e avaliação de impactos ambientais. No contexto do PMBA, o mapeamento de recifes e bancos de rodolitos compreende uma etapa fundamental, uma vez que o conjunto de informações antecedentes (*baselines*) é incipiente e fragmentado (e.g. AMADO-FILHO et al., 2012; MOURA et al., 2013; BASTOS et al., 2015, 2018; MAZZEI et al., 2017), ou seja, inexistem informações detalhadas sobre a localização, extensão e características dos recifes e bancos de rodolitos da região de estudo.

Nos recifes brasileiros, e particularmente na região de Abrolhos e adjacências, a participação de algas coralíneas e outros organismos biomineralizadores (e.g. briozoários) na construção das estruturas recifais é mais significativa do que a de corais (BASTOS et al., 2018; DECHNICK et al., 2019), justificando a ênfase nesses grupos como alvos dos estudos no âmbito do PMBA. Além disso, corais desempenham funções chave no ecossistema recifal, e a fauna de corais da região afetada pelo rompimento da barragem é a mais diversificada do Atlântico Sul, incluindo espécies endêmicas e

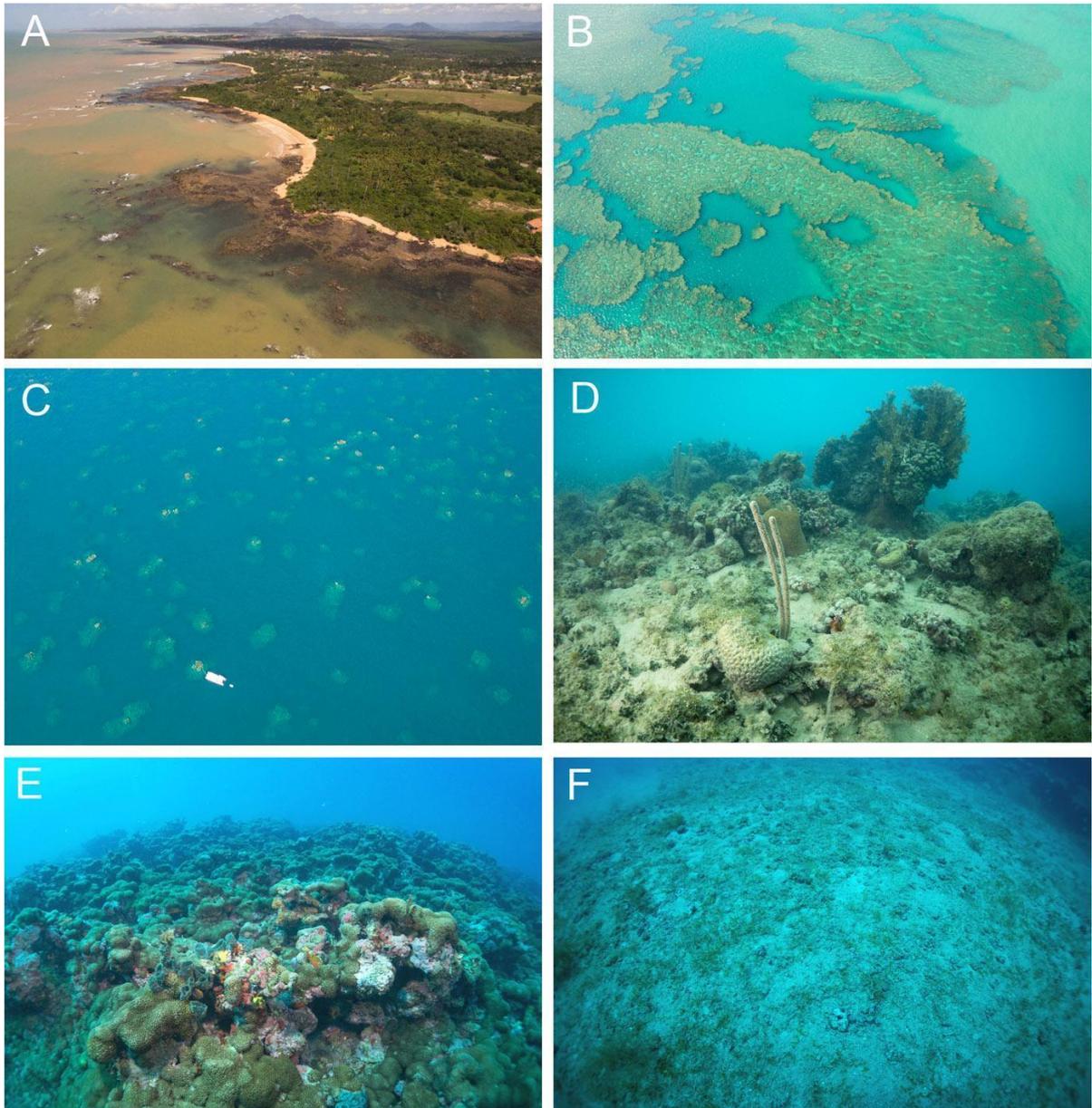
ameaçadas de extinção (MOURA et al., 2013). A escolha dos corais como bioindicadores também se justifica pelo fato desses organismos representarem consórcios (holobiontes) nos quais a homeostase depende de associações entre o “macróbio” (cnidário) e diversos microrganismos. Destacam-se, na comunidade microbiana simbiote dos corais, os dinoflagelados mixotróficos (i.e. auto e heterotróficos) coletivamente chamados de zooxantelas, os quais transferem até 95% do carbono por eles fixado para o hospedeiro. Esse consórcio é sensível a flutuações ambientais (e.g. temperatura, turbidez, nutrientes dissolvidos), a ponto de os corais serem considerados os “canários da mina” do Oceano, funcionando como indicadores avançados de sua condição frente à crescente degradação em escala global. Nesse contexto, a avaliação do estado de saúde de corais em áreas sob distintas forças, através de estimativas da densidade, diversidade e do metabolismo fotossintético das zooxantelas, compõe outro importante eixo de investigação do projeto. Essa abordagem complementa os estudos enfocados na dinâmica de comunidades bentônicas, na coluna d’água sobrejacente e na dinâmica de deposição de sedimentos sobre os recifes, e nos estudos sobre biomineralização, esses últimos baseados em experimentos com estruturas artificiais de colonização.

Os bancos de rodolitos compõem um tipo recifal peculiar constituído por nódulos carbonáticos soltos, os quais podem cobrir o fundo por milhares de quilômetros quadrados (AMADO-FILHO et al., 2012). Apesar de dominar boa parte da plataforma continental brasileira, esse sistema permanece mal conhecido com relação a aspectos básicos, tais como sua extensão, biodiversidade, estrutura e funcionamento (AMADO-FILHO et al., 2012). Por constituírem o tipo recifal predominante na área marinha afetada pelo rompimento da barragem (MOURA et al., 2013), os bancos de rodolitos compõem um dos alvos do projeto, especialmente no que diz respeito a gerar linhas de base (*baselines*) que possam servir como referência para avaliar os efeitos do rompimento da barragem em médio e longo prazo.

Por fim, ressalta-se que os peixes recifais, grupo focado pelo "Anexo 7" e que compõe um dos elementos da análise integrada aqui apresentada, representam um compartimento chave no funcionamento desse ecossistema (GOLDBERG, 2013). Nos recifes, além de representarem a maior biomassa de predadores de topo, os peixes desempenham uma série de outros controles descendentes (*top-down*), com destaque para a herbivoria que, por sua vez, afeta os processos competitivos entre corais e organismos fotossintetizantes de crescimento rápido (algas e cianobactérias) (LELLYS et al., 2019) e a própria qualidade da água (BRUCE et al., 2012; SILVEIRA et al., 2015). Larvas de peixes são componentes maiores do meroplâncton e representam um dos principais atores nos processos de acoplamento bento-pelágico nos recifes (GOLDBERG, 2012). A ictiofauna (=fauna de peixes), juntamente com a carcinofauna (=crustáceos), representa uma fração maior dos recursos pesqueiros extraídos na região de estudo (TEIXEIRA et al. 2017), merecendo destaque a importância dos peixes recifais na produção pesqueira artesanal do norte do Espírito Santo e sul da Bahia (e.g. FREITAS et al. 2011, 2019). Trata-se de um conjunto de dezenas de espécies das famílias Serranidae (badejos e afins), Lutjanidae (vermelhos, guaiubas, ciobas e afins), Labridae (budiões e afins) e Haemulidae (cocorocas, biquaras e afins), entre outras, boa parte delas com espécies relativamente longevas, com

crescimento lento e maturação reprodutiva tardia, o que aumenta sua vulnerabilidade à sobrepesca e demais impactos ambientais. Apesar dessa importância, o manejo da pesca recifal é incipiente na região de estudo, tanto em função de lacunas no conhecimento sobre aspectos importantes da biologia das espécies quanto pela ausência de implementação de medidas já propostas com embasamento robusto do conhecimento local e científico (FREITAS et al., 2019).

Figura 105: Recifes e bancos de rodolitos da região de estudo. A: Recifes adjacentes ao litoral na APA Costa das Algas; B: Chapeirões coalescidos formando bancos recifais no Parcel das Paredes, arco interno; C: Chapeirões do Parcel dos Abrolhos, arco externo; D: Topo de estrutura com alta diversidade e cobertura coralínea; E: Parede de estrutura com baixa diversidade; F: Banco de rodolitos. Fotos: Rede Abrolhos.



### 3.2. REFERENCIAL CONCEITUAL DO DELINEAMENTO AMOSTRAL E DAS ANÁLISES

O rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão em 5 de novembro de 2015, configurou-se como a maior tragédia ambiental ocorrida no Brasil<sup>4</sup>, e um dos maiores rompimento da barragens de rejeito ocorridos no mundo (OLIVEIRA-NEVES et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; CIONEK et al., 2019; FREITAS et al., 2019). Em 22 de novembro a lama de rejeitos chegou ao mar e a contaminação se alastrou ao norte e ao sul da foz do rio Doce, atingindo pesqueiros e recifes, bem como diversas unidades de conservação existentes e planejadas (MARTA-ALMEIDA et al., 2016; RUDORFF et al., 2018). A extensão das consequências ainda é pouco compreendida (SEGURA et al., 2016; HATJE et al., 2017; MAGRIS et al., 2019), sendo imperativo que os ecossistemas da área afetada sejam adequadamente caracterizados e monitorados no sentido de subsidiar medidas de restauração, mitigação e recuperação.

A síntese aqui apresentada reflete um ano de monitoramento. Por outro lado, já é possível construir um panorama ímpar acerca da ocorrência de recifes e bancos de rodolitos e comunidades biológicas associadas nas áreas sobre as quais o rompimento da barragem incidiu. Nesse sentido, os resultados do PMBA sobre ambientes recifais revelam, de maneira transversal e integrada, processos que operam em escalas espaciais e temporais bastante dissimilares, cujo entendimento é necessário para compreender os efeitos do rompimento da barragem e para delinear estratégias de mitigação e restauração. Por exemplo, processos físico-químicos e geo-hidrológicos que geralmente operam em macro e mesoescalas espaciais e temporais (e.g. distribuição de recifes e fácies sedimentares), também podem se apresentar de forma bastante dinâmica (e.g. distribuição e deslocamento de massas d'água), condicionando alterações bruscas e heterogêneas em escalas locais. Padrões e processos observáveis ao nível dos organismos podem ser quase instantâneos (e.g. contaminação por metais, resposta do aparato fotossintético à turbidez), mas também podem se configurar ao longo de meses ou anos (e.g. comprometimento da saúde, fecundidade, mortalidade), na forma de efeitos crônicos. Além disso, processos que operam ao nível de comunidades e populações tendem a se configurar em escalas temporais que variam entre meses e décadas (e.g. cobertura dos recifes), e podem se propagar de maneira altamente fragmentada e com hiatos temporais, em função da dinâmica metapopulacional característica dos sistemas recifais (HANSKY et al. 2004; KRITZER; SALE, 2006). Considerando a natureza multi-escalar e multidimensional dos problemas enfocados pelo projeto, ao mesmo tempo em que respondemos questões básicas (e.g. extensão e características dos ecossistemas recifais), buscamos apresentar informações ao nível de organismos (e.g. corais e simbioses) e comunidades

---

<sup>4</sup> Pelo menos até o rompimento da barragem da Barragem 1 do Córrego do Feijão, em 25 de janeiro de 2019, cuja extensão de danos à Baía do São Francisco permanece desconhecida (Tragédia de Brumadinho), e pelo derramamento de petróleo no litoral Norte e Nordeste, iniciado no final de agosto de 2019.

(e.g. cobertura bêntica, peixes recifais), sempre inseridas no contexto mais abrangente dos indutores físico-químicos e geo-hidrológicos, associados ou não ao rompimento da barragem.

Uma vez que o registro de indicadores em um dado local, na presença e ausência de um conjunto de estressores, é impossível, a detecção de impactos depende de estimativas dos efeitos sobre o ecossistema (SCHMITT; OSEMBERG, 1986). Considerando outras impossibilidades, ou dificuldades extremas, também envolvidas na avaliação de impactos ambientais de magnitude regional, tais como executar experimentos manipulativos adequadamente replicados e reconstruir *baselines* acuradamente, a avaliação do impacto depende de monitoramentos (*field assessments*) que permitam estimar: i) o estado do sistema na ausência e na presença do estressor, e ii) as incertezas associadas às diferenças entre essas estimativas (STEWART-OATEN, 1996). Além disso, é fundamental considerar que a avaliação dos efeitos do rompimento da barragem da barragem deve transcender os sítios sob a pluma detectada após o rompimento da barragem da barragem (e.g. MAZZEI et al., 2017), cuja dinâmica e recorrência, ligada a ciclos climáticos/hidrológicos, ainda está sendo revelada no âmbito do PMBA. Por exemplo, há evidências de contaminação da água e de corais no PARNAM Abrolhos, por metais dissolvidos na água do mar (BIANCHINI, 2016; EVANGELISTA, 2018), cuja detecção por sensoriamento remoto é impossível. O transporte e destino dos contaminantes após o rompimento da barragem da barragem são aspectos fundamentais que permanecem pouco conhecidos, demandando esforços de amostragem e modelagem oceanográfica acoplados aos monitoramentos bio-ecológicos em escalas mais abrangentes do que aquelas usualmente empregadas em estudos ambientais – ou seja, em escalas compatíveis com a magnitude do rompimento da barragem da barragem.

Separar a variabilidade natural dos efeitos do rompimento da barragem envolve a combinação de diferentes abordagens. Delineamentos do tipo Controle-Impacto (*Control-Impact* – CI), nos quais são feitas comparações entre sítios afastados da fonte de impacto, a ponto de serem considerados livres de efeito (controle), e sítios próximos à fonte (sob impacto), podem violar a premissa de que áreas controle e impactadas seriam idênticas e teriam se comportado da mesma forma na ausência do impacto. Por outro lado, a despeito dessa limitação, o monitoramento de sítios ao longo de um gradiente de atenuação (a partir da foz do Rio Doce) se apresenta como alternativa pertinente para detectar alterações associadas ao rompimento da barragem da barragem. Delineamentos do tipo Antes-Depois (*Before-After* - BA) possuem limitações inerentes às linhas de base, as quais, no caso dos recifes e rodolitos, são concentradas em áreas relativamente afastadas da foz do Rio Doce (veja Figura 110). No entanto, considerando as evidências de extensão da contaminação até a Área A (BIANCHINI, 2016; EVANGELISTA, 2018), a abordagem BA se encontra no rol daquelas a serem adotadas ao longo da execução dos projetos. Delineamentos do tipo Antes-Depois-Controle-Impacto (*Before-After-Control-Impact* – BACI) combinam as duas abordagens anteriores, buscando separar os efeitos do estressor de outras fontes de variabilidade (GREEN; GREEN, 1979), a partir da identificação de interações entre tempo e local (usando a variabilidade entre amostras tomadas em dado local/tempo para compor o termo de erro). Embora robustos, até mesmo delineamentos BACI podem confundir efeitos dos

estressores com flutuações locais (interações tempo\*local). Trata-se de um problema menos agudo no contexto em tela, até porque os principais estressores naturais que afetam os recifes - anomalias térmicas - se configuram na escala regional-global (TEIXEIRA et al., 2019). O uso de séries temporais (*Before-After-Control-Impact Paired Series* - BACIPS), inclusive com o uso de sítios controle como covariáveis (preditores do estado “impactado”), adiciona robustez aos delineamentos BACI (STEWART-OATEN et al., 1986, 1992), ressaltando-se, novamente, as limitações espaciais das séries temporais de dados antecedentes ao rompimento da barragem. Por fim, a abordagem além-BACI (*beyond-BACI* - bBACI), que emprega controles múltiplos (UNDERWOOD, 1991, 1992), deverá ser incorporada nas avaliações de longo prazo, com séries temporalmente replicadas (ou seja, com dois anos, no mínimo). O detalhamento e a implementação dessas e de outras abordagens, conceituais e metodológicas, está além do escopo dessa síntese, bem como de um programa de monitoramento que ainda se encontra em fase inicial de implementação e que deve sofrer ajustes para otimizar sua execução em mais longo prazo. Os resultados aqui apresentados contemplam contrastes entre sítios mais ou menos impactados, contrastes Antes-Depois do rompimento da barragem da barragem (em áreas possivelmente menos impactadas, dadas as limitações dos *baselines*), e análises de séries temporais (a maioria ainda curtas).

Além de linhas de base mais robustas, muitas delas já bastante consolidadas nesse relatório, outros aspectos ainda não plenamente esclarecidos, tais como a extensão, magnitude e periodicidade de aportes crônicos de sedimentos e contaminantes, devem implicar em ajustes futuros nas abordagens empregadas para avaliação dos impactos do rompimento da barragem da barragem sobre recifes e bancos de rodolitos, na forma de aprimoramentos na estratégia de monitoramento. Por fim, ressaltamos que, mais do que aceitar ou rejeitar a hipótese nula de que não houve impacto sobre os recifes e rodolitos (a chamada “cultura do p-valor”), nossa perspectiva é estimar a extensão e magnitude dos impactos e apresentar subsídios científicos para a tomada de decisões que possam levar a um entendimento acerca da estrutura e da dinâmica das comunidades recifais.

### 3.3. ANÁLISE INTEGRADA DOS AMBIENTES RECIFAIS

#### 3.3.1. APA Costa das Algas

Nos ~220 km<sup>2</sup> de fundo mapeados na área da APA Costa das Algas (APACA), destaca-se a detecção de um mosaico de diferentes tipos de fundos recifais, concentrados na plataforma média e externa, onde os aportes terrígenos e ressuspensão turbulenta do fundo são menos intensos. Além dessas expressivas formações carbonáticas, os levantamentos sísmicos na APA evidenciaram a ocorrência de fundos recifais mais contínuos e em maior proximidade à costa (sob maior turbidez, na plataforma interna), os quais parecem corresponder a terraços marinhos de lateritas, análogos aos recifes adjacentes ao litoral, ou afloramentos rochosos colonizados por organismos incrustantes (BASTOS et al., 2015). Trata-se de um subsistema que demanda por mais esforços de mapeamento e

caracterização. Os ambientes recifais carbonáticos da plataforma média e externa na área da APACA, mapeados em maior detalhe do que as linhas recifais submersas mais costeiras, correspondem a superfícies batimétricas multiformes, boa parte representando feições nunca antes descritas nessa área. Nesse trecho, cujo fundo é dominado por bancos de rodolitos e outros tipos de nódulos (e.g. briolitos) e areias carbonáticas, também ocorrem: 1) vales incisos e outros antigos cursos fluviais de menor expressão, 2) outras feições recifais de relevo negativo (e.g. buracas), e 3) feições recifais de relevo positivo (e.g. paleolinhas de costa). Os cinco vales incisos mais proeminentes possuem profundidades entre 60 e 88 m e larguras entre 70 a 500 m, apresentando maior aprofundamento e alargamento em direção à quebra da plataforma, correspondendo à rede de drenagem fluvial durante períodos de nível do mar mais baixo (DECHNICK et al., 2019). As paredes dos vales são íngremes e associadas a bioconstruções carbonáticas, as quais também ocorrem de forma dispersa no meio dos canais (MOURA et al., 2013). A partir da descrição dessas feições, expressivas e em relativa proximidade à foz do rio Doce, fica clara a necessidade de levantamentos biológicos do tipo *baseline* nesses recifes, bem como o estabelecimento de pontos de monitoramento que os representem e permitam acompanhar possíveis efeitos do rompimento da barragem da barragem. Dada a complexidade estrutural dos paleocanais, essas feições tendem a concentrar diversidade biológica e biomassa, inclusive de recursos pesqueiros, sendo submetidas a intenso fluxo de água e sedimentos entre os diferentes setores da plataforma continental (ROVIRA et al., 2019). Assim, os paleocanais devem receber maior atenção do PMBA nos próximos ciclos de monitoramento, por serem feições propícias à acumulação e transporte de rejeito. Além dos paleocanais, destacam-se diversas depressões no fundo marinho (conhecidas popularmente como "buracas"), presentes em distribuição heterogênea ao longo da região levantada, com larguras e profundidades médias de 10 e 2 m, respectivamente. Contrastando com as "buracas" descritas para a região central do Banco Abrolhos (BASTOS et al., 2013; 2016), estas feições conhecidas por agregar biomassa e diversidade (CAVALCANTI et al., 2013), se apresentam mais largas do que profundas na área da APACA. Trata-se de outro alvo potencial para caracterização e monitoramento de comunidades biológicas. Por fim, completando o quadro da ocorrência de recifes submersos na APACA, também foram reconhecidas e mapeadas feições recifais de relevo positivo na plataforma média e externa, cujo alinhamento indica que correspondem a paleolinhas de costa, e feições de relevo positivo na plataforma interna, cuja caracterização ainda é incipiente.

Os levantamentos do PMBA enfocados em comunidades bênticas e de peixes recifais na área submersa da APACA também compreendem uma linha de base a partir da qual será possível avaliar alterações ao longo do tempo. Não há dados antecedentes sobre esses sistemas, o que dificulta a identificação inequívoca de efeitos do rompimento da barragem da barragem. As informações coligidas sobre comunidades bentônicas recifais se concentraram nos bancos de rodolitos, habitat recifal mais extenso, ao passo que os estudos sobre peixes se concentraram nas estruturas da plataforma interna e média. Bancos de rodolitos com predominância de nódulos vivos e concreções calcárias esparsas foram detectados em praticamente todas as estações na plataforma média e externa, com maior

incidência de nódulos mortos naquelas localizadas na transição com a plataforma interna, onde dominam fundos sedimentares, e também nas estações mais ao norte da APACA, mais próximas à foz do rio Doce. Esse padrão revela a interação entre dois eixos principais de variação, um deles *cross-shelf*, ou seja, ao longo da transição costa-oceano, e outro latitudinal, ambos correspondentes à maior vitalidade dos sistemas recifais na medida em que se aumenta a distância da costa e da foz do rio Doce. Algas e invertebrados foram as categorias dominantes na cobertura dos bancos de rodolitos, nessa ordem (inventários de espécies e estimativas de abundância relativa em maior resolução taxonômica constam do relatório do subprojeto "Fundos Recifais..."). Estações dominadas por algas coralíneas estiveram associadas às maiores coberturas por macroalgas e outros organismos macrobênticos, uma vez que propiciam substrato adequado de fixação. Bryozoa foi o grupo de invertebrados predominante na maioria dos sítios, tendo formado nódulos carbonáticos (briolitos) na transição *cross-shelf* entre o estrato dominado por rodolitos e as fácies sedimentares mais costeiras. A interação entre a variação *cross-shelf* e a distância da foz também foi evidenciada nas análises dos sedimentos superficiais, com minerais de origem continental mais associados a sítios costeiros (e.g. quartzo, hematita e greigita) e carbonatos predominando *offshore* (e.g. aragonita, calcita magnesiana). Minerais ferrosos (e.g. hematita, gormonita), ubíquos nos recifes costeiros adjacentes ao litoral (veja adiante), foram registrados em sítios *offshore* da APA (e.g. D7, D10 e D13), indicando transporte longitudinal de material flúvio-terrágeno. O relatório do subprojeto "Fundos Recifais ..." apresentou diversos modelos que evidenciam a preponderância dessas duas forçantes (distância da costa e da foz) como indutoras da estrutura dos bancos de rodolitos e das comunidades bênticas a eles associadas. Embora esse conjunto de informações basais contenha indícios de impacto, não é possível afirmar se as variações observadas ao longo do gradiente de distância da foz são antecedentes ou decorrentes do rompimento da barragem da barragem, hipóteses que poderão ser mais bem avaliadas a partir do monitoramento em longo prazo. O detalhamento das fácies sedimentares em frente à foz do rio Doce, bem como os modelos hidrológicos e de transporte deverão permitir a construção de um quadro mais holístico acerca da dinâmica dos bancos de rodolitos dessa área, inclusive processos de soterramento e exposição, associados ou não ao rompimento da barragem da barragem.

As concentrações de clorofila na APACA foram, em geral, as maiores da região de estudo, chegando a  $3,5 \mu\text{gL}^{-1}$  nos sítios costeiros. Nos sítios mais externos, máximos de até  $4 \mu\text{gL}^{-1}$  foram frequentes entre 30 e 40 m de profundidade. Essa região mais "offshore" apresentou maiores concentrações de fitoplâncton, com contribuição significativa de picocianobactérias (*Prochlorococcus* spp. e *Synechococcus* spp.) e nanoeucariotos clorofilados (frações do pico e nanofitoplâncton), e domínio de diatomáceas e dinoflagelados (microfitoplâncton).

Os resultados do PMBA evidenciaram sazonalidade marcada na cobertura bêntica dos recifes emergentes e adjacentes ao litoral, a qual deve ser levada em conta na interpretação de dados antecedentes e de monitoramentos subsequentes. Apesar da falta de replicação temporal robusta, o contraste entre os resultados do PMBA (verão 2019, subprojeto "Fundos Recifais...") com os apresentados em GOLDER (2016a, b), referentes ao verão de 2012, revelou aumento expressivo na

cobertura de *Sargassum* spp., tolerantes a sedimentos finos, e redução na cobertura de algas calcárias articuladas e *Caulerpa* spp. Além disso, alguns sítios (e.g. D17, considerado “afetado” pelo rejeito nos estudos prévios) apresentaram redução de ~20% na cobertura total de macroalgas. A estrutura das comunidades bênticas desses recifes, dispostos ao longo de um gradiente latitudinal e de distância da foz do rio Doce, revela forte influência das drenagens locais (especialmente do rio Reis Magos), da fração de areia depositada nos recifes (indicando proximidade da fonte e hidrodinamismo) e da distância da foz do Rio Doce. Os rios Laranjeiras (menor) e Piraquê-Açu (mais bem conservado), se mostraram menos influentes do que o Reis Magos (mais antropizado). A distância da foz do Rio Doce, apesar de ter sido uma variável menos importante do que a distância da foz do Reis Magos e da fração de areia sobre os recifes, teve influência significativa na estruturação das comunidades bênticas, apontando para a influência regional da dinâmica do Rio Doce sobre comunidades recifais adjacentes ao litoral. Os sedimentos superficiais dos recifes adjacentes ao litoral apresentaram variação latitudinal (maior participação de sedimentos biogênicos nas estações mais ao norte) e sazonal. Assim, medidas de mitigação dos efeitos do rompimento da barragem da barragem não devem incidir somente sobre o rio Doce, mas devem também contemplar drenagens locais antropizadas (e.g. Reis Magos, Laranjeiras). A hematita se destacou como possível assinatura da descarga sedimentar proveniente da foz do Rio Doce, tendo apresentado atenuação linear com relação à distância da foz do Rio Doce e aumento de concentração no período de maior vazão. Apesar de não representar evidência direta da presença do rejeito do rompimento da barragem da barragem, esses dados compreendem evidências indiretas. Vale ressaltar que outros sedimentos terrígenos não apresentam atenuação em relação à distância da foz do Rio Doce. O mosaico sedimentar detectado nos recifes costeiros complementa as evidências de múltiplas fontes e processos de deposição e transporte. Particulados de minérios de ferro podem aumentar as concentrações intra-talo de metais em algas e outros organismos, uma vez que partículas aderidas ao muco superficial podem ser biodisponibilizadas. Propágulos podem se aglutinar a partículas de minério e decantar rapidamente, interferindo na dispersão, recrutamento, e taxas fotossintéticas.

As assembleias de peixes recifais amostradas na APA (“Área I”, Anexo 7), em comparação com os Recifes Esquecidos e com os recifes de Abrolhos, apresentaram menor abundância, biomassa, riqueza e diversidade. Ressalta-se que, na área da APA, os censos de peixes se concentraram em estruturas recifais na plataforma interna e média, as quais ainda não foram detalhadamente mapeadas. Tais estruturas, além de estarem sujeitas a um regime de maior variabilidade na turbidez e outros parâmetros ambientais, parecem ser mais fragmentadas e isoladas do que aquelas das outras áreas, o que pode explicar uma parte da heterogeneidade observada nas assembleias de peixes recifais. Por outro lado, as diferenças podem indicar um princípio de desestruturação local, reforçando a necessidade de monitoramento em longo prazo.

Figura 106: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais na área da APA Costa das Algas (APAC), Primeiro Ciclo do PMBA.

		ESTRUTURA GEOMORFOLÓGICA	SEDIMENTOS	COMUNIDADES BIOLÓGICAS			EFEITOS DO DESASTRE	RECOMENDAÇÕES
				plâncton	bentos	peixes		
CARBONÁTICOS	buracas e paleocanais	detecção e baseline detalhado	---	---			---	construir baseline biológico e estabelecer pontos de monitoramento
	paleolinhas de costa (plataforma externa e média)		---					
	bancos de rodolitos (plataforma externa e média)	ampliação do mapeamento	caracterização mineralógica de sedimentos superficiais	baseline detalhado		---	indícios a serem verificados (estrutura dissimilar de comunidades bênticas)	ampliar mapeamento, manter o monitoramento e ampliar o rol de variáveis
MISTOS	linhas de lateritas ou afloramentos rochosos submersos (plataforma interna)	detecção preliminar (sísmica)	---	---		baseline detalhado	indícios a serem verificados (estrutura dissimilar das comunidades de peixes)	ampliar mapeamento, estabelecer baseline bêntica, manter o monitoramento de peixes (série temporal)
	recifes emergentes (adjacentes ao litoral)	---	caracterização mineralógica de sedimentos superficiais	---	baseline detalhado	---	indícios a serem verificados (estrutura dissimilar das comunidades bênticas) e evidências (presença de minerais associados ao rejeito, gradientes de atenuação de minerais ferrosos)	manter o monitoramento (série temporal) e ampliar o rol de variáveis

### 3.3.2. Foz do rio Doce

O mapeamento do fundo marinho ao largo da foz do rio Doce foi predominantemente costeiro, ou seja, não contemplou a plataforma externa onde ocorrem bancos de rodolitos mais extensos - ainda carentes de mapeamento e consolidação de dados pretéritos (mas veja Figura 103, BASTOS et al., 2015, QUARESMA et al., 2015). Na região costeira foram detectadas apenas estruturas recifais menores, esparsas e isoladas, inseridas em um contexto de intenso aporte fluvial e sedimentar (q.v. relatório do Subprojeto "Mapeamento...", Anexo 3). Por outro lado, bancos de rodolitos com cobertura majoritariamente viva foram registrados na plataforma externa ao largo da foz, muito embora com um nítido afunilamento na sua extensão "cross-shelf", especialmente nas estações mais ao sul da área estudada nesse setor. Esse contexto indica influência forte e recorrente, possivelmente histórica, do rio Doce. Sedimentos superficiais terrígenos, inclusive ferrosos, foram detectados em pulsos aparentemente sazonais<sup>5</sup>, atestando a incidência atual de aportes flúvio-terrígenos relevantes sobre esses bancos de rodolitos. Além disso, foi detectada uma fração de rodolitos mortos que representa até 15% dos nódulos. Macroalgas e invertebrados (especialmente Bryozoa) dominaram a cobertura dos bancos de rodolitos ao largo da foz. Assim como nos bancos de rodolitos da área da APACA, a estrutura das comunidades bênticas também reflete interação entre os eixos de variação "cross-shelf" e de distância da foz, com comunidades recifais mais complexas nas estações mais afastadas da costa e da foz. Nesses sítios mais externos houve forte estratificação da coluna d'água e influência de águas intermediárias (ACAS) no fundo, a qual pode atenuar processos deposicionais. Apesar da relativa proximidade com a foz do rio Doce, o fitoplâncton foi dominado por picocianobactérias (especialmente *Prochlorococcus* spp.) associadas à influência de águas oceânicas oligotróficas.

<sup>5</sup> O PMBA possui apenas 1 ciclo anual, o que impede avaliações robustas sobre sazonalidade.

Juntamente com a detecção de movimentações importantes de lamas fluidas na região costeira após o rompimento da barragem da barragem (q.v. relatório do Subprojeto "Mapeamento...", Anexo 3), o conjunto de informações basais sobre os bancos de rodolitos ao largo da foz contém indícios de impactos nessa área. No entanto, não é possível afirmar inequivocamente se o contexto observado no primeiro ciclo de execução do PMBA é decorrente do rompimento da barragem da barragem. Essa hipótese poderá ser mais bem avaliada a partir do monitoramento em longo prazo, especialmente nas áreas ao sul (APACA) e ao norte da foz (Recifes Esquecidos), visto que as condições de acesso/trabalho na estreita faixa de rodolitos ao largo da foz são limitantes.

Figura 107: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais na área da foz do rio Doce, Primeiro Ciclo do PMBA.

	ESTRUTURA GEOMORFOLÓGICA	SEDIMENTOS	COMUNIDADES BIOLÓGICAS		EFEITOS DO DESASTRE	RECOMENDAÇÕES
			plâncton	bentos		
CARBONÁTICOS	estruturas isoladas	detecção e baseline detalhado	---	---	---	---
	bancos de rodolitos (plataforma externa)	---	caracterização mineralógica de sedimentos superficiais	baseline detalhado	indícios a serem verificados (estrutura dissimilar de comunidades bênticas), aporte continental nos bancos de rodolitos da plataforma externa.	ampliar mapeamento, manter o monitoramento e ampliar o rol de variáveis

### 3.3.3. Recifes Esquecidos

Trata-se de uma área recifal chave no contexto da avaliação dos efeitos do rompimento da barragem da barragem, dada sua dimensão, complexidade e proximidade com relação à foz do rio Doce. Anteriormente ao PMBA, o conhecimento acerca da estrutura física dos Recifes Esquecidos era baseado em informações muito preliminares que não caracterizam de forma robusta a região (e.g. MAZZEI et al., 2016; FRANCINI-FILHO et al., 2019). O mapeamento detalhado de boa parte dos Recifes Esquecidos, cobrindo ~26 km<sup>2</sup>, revelou um quadro de grande heterogeneidade espacial, o que adiciona complexidade à avaliação dos impactos e dos estudos antecedentes (MAZZEI et al., 2016; FRANCINI-FILHO 2019). O mapeamento revelou que os Recifes Esquecidos são compreendidos por centenas de estruturas recifais pinaculares, isoladas ou coalescidas, concentradas em três áreas (norte, centro e sul). No entorno dessas três áreas as estruturas tendem a ser menores, mais espaçadas e isoladas (detalhes no relatório do subprojeto "Mapeamento..."). O tamanho dos pináculos é variado, deste pequenas manchas até estruturas com 12 m de altura. Aparentemente, as estruturas da área de concentração mais ao sul possuem topos mais rasos (12 m de profundidade). Nas ocorrências isoladas, os pináculos aparecem com formato mais arredondado, enquanto que nas áreas de maior concentração, as estruturas são mais alongadas e parecem ser resultado de coalescimento. Além disso, nas áreas de maior concentração as estruturas parecem alinhadas no sentido SE – NO. A presença de "furrows", formas de fundo dispostas paralelamente à ação de correntes (DAVIS; DARLYMPLE, 2012), indica o sentido preponderante do hidrodinamismo da região. Trata-se de estruturas erosivas conspícuas, especialmente na área levantada mais ao norte, com largura entre 3 e 24 m e comprimento que pode ultrapassar 1 km. Apesar das condições oceanográficas apresentarem algumas similaridades com as de Abrolhos (e.g. concentração de clorofila máximas de ~2µg.L<sup>-1</sup> e a

baixa estratificação da coluna d'água), a maior abundância de *Prochlorococcus* em Esquecidos indica influência de águas oceânicas, contrastando com Abrolhos e adjacências, onde se observa maior presença de diatomáceas na classe do microfítolâncton.

As análises granulométricas dos sedimentos aprisionados nos três conjuntos de armadilhas evidenciaram a predominância de sedimentos médios e finos. Os conjuntos mais próximos da costa, instalados sobre estruturas recifais, apresentaram maiores taxas de sedimentação (25 e 63 g.mês<sup>-1</sup>), contrastando com o mais afastado, sobre banco de rodolitos, que apresentou as menores taxas (13 g.mês<sup>-1</sup>). Os sedimentos foram mistos, dominados por carbonatos (~70%) e com fração relevante de siliciclásticos (~28%). Sedimentos ferrosos foram raros (<1%) e corresponderam a greigita, uma fase não associada ao rejeito e possivelmente derivada da atividade de bactérias sulfato-redutoras. A chegada de sedimentos terrígenos finos ocorreu em toda a região e o monitoramento com armadilhas contribuirá para detectar possíveis mudanças qualitativas ligadas a processos de remobilização de rejeito.

As taxas de produção de CaCO<sub>3</sub> nos Recifes Esquecidos (167 g.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>) foram menores do que as registradas em Abrolhos e adjacências (307 g.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>). O sítio B4, na área sul de concentração de pináculos, foi uma exceção (249 g.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>), tendo apresentado maior colonização por CCA, Peyssonneliales e Bryozoa. Não houve recrutamento de corais nas CAUs instaladas nos Esquecidos, contrastando com as estruturas localizadas nos recifes de Abrolhos e adjacências. As assembleias bênticas associadas aos pináculos da área sul de Esquecidos se destacou pela alta abundância de zoantídeos, organismos de crescimento rápido e geralmente associados a sedimentação elevada. De fato, as maiores taxas de sedimentação em toda a região de estudo foram registradas nesse sítio, seguida pelo recife Sebastião Gomes, onde a abundância de zoantídeos também é elevada. No entanto, a estrutura da comunidade bêntica do sítio mais ao sul dos Esquecidos deve ser interpretada com cautela, uma vez que pode estar mais relacionada com a menor profundidade dos pináculos nessa área. A dominância dos corais *M. cavernosa*, *M. hartii* e *M. hispida* nos topos dos pináculos das áreas centro e sul de Esquecidos, entre outras variáveis da cobertura de topos e paredes, contrastam com o observado nas assembleias de Abrolhos e adjacências. O banco de rodolitos amostrado a leste dos Esquecidos (sítio B1) também apresentou diferenças com relação aos demais bancos amostrados na região de estudo. O monitoramento permitirá estimar se esses contrastes, tanto nos dados de colonização quanto nos dados de cobertura de recifes e rodolitos, se manterão ao longo do tempo, refletindo simplesmente um conjunto diferente de forçantes nessa área ("baseline"), ou se sofrerão influência da contaminação oriunda do rompimento da barragem, já detectada nessa área (FRANCINI-FILHO et al., 2019). Os dados acerca da saúde dos corais evidenciaram adaptações locais às condições de luz (maior profundidade e turbidez) e uma assinatura preponderante dos efeitos deletérios do estresse térmico registrado em escala regional (abril de 2019), o qual pode agravar possíveis efeitos do rompimento da barragem.

O PMBA produziu um "baseline" robusto para identificar possíveis alterações nas assembleias de peixes recifais nos Recifes Esquecidos, uma vez que os dados antecedentes são muito incipientes (MAZZEI et al., 2016). As assembleias de peixes recifais dos Esquecidos foram similares às de Abrolhos, com menor biomassa de alguns grupos alvos da pesca, mas com algumas espécies apresentando maiores abundâncias em Esquecidos do que nos recifes costeiros de Abrolhos. Além disso, as comunidades de peixes de Esquecidos foram bastante dissimilares com relação às da APACA, onde a estrutura dos recifes é mais fragmentada e isolada, o que pode explicar parte dessa heterogeneidade. A detecção inequívoca de impactos decorrentes do rompimento da barragem depende de monitoramento em longo prazo.

Os dados adquiridos pelo PMBA complementam o panorama geral antecedente (MOURA et al., 2013, BASTOS et al., 2015, BOURGUIGNON et al., 2018) e convidam a ajustes no plano amostral do PMBA de forma a ampliar sua representatividade. Ressalta-se que todos os dados sobre comunidades bênticas disponíveis para essa área dos Recifes Esquecidos (MAZZEI et al., 2016; FRANCINI-FILHO et al., 2019), inclusive os do subprojeto "Fundos Recifais..." do PMBA, foram adquiridos em proximidade (dezenas de metros), uma vez que não haviam mapas da área.

Figura 108: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais na área dos Recifes Esquecidos, Primeiro Ciclo do PMBA.

	ESTRUTURA GEOMORFOLÓGICA	SEDIMENTOS	COMUNIDADES BIOLÓGICAS			COLONIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CARBONATOS	SAÚDE DE CORAIS	EFEITOS DO DESASTRE	RECOMENDAÇÕES
			plâncton	bentos	peixes				
ESTRUTURAS RECIFAIS	mapeamento detalhado	caracterização deposicional e mineralógica de sedimentos em armadilhas	baseline detalhado			baseline detalhado	baseline detalhado, estudo do impacto das anomalias térmicas	indícios a serem verificados (estrutura dissimilar de comunidades biológicas)	ampliar o mapeamento, manter o monitoramento (séries temporais) e ajustar o plano amostral, incluindo novo(s) sítio(s) e ampliando o rol de variáveis.
BANCO DE RODOLITOS	---	caracterização deposicional e mineralógica de sedimentos em armadilhas	baseline detalhado	baseline detalhado	---	baseline detalhado	---	indícios a serem verificados (estrutura dissimilar das comunidades bênticas)	mapear a ocorrência dos bancos de rodolitos, manter o monitoramento (séries temporais), ampliar o rol de variáveis

### 3.3.4. Abrolhos e adjacências

Trata-se de uma área recifal chave no contexto da avaliação dos efeitos do rompimento da barragem da barragem, dada sua dimensão, complexidade, estado de conservação e maior distância com relação à foz do rio Doce, qualificando essa área como um extremo do gradiente de atenuação na região estudada. Destaca-se a existência de uma vasta literatura e base de dados antecedentes sobre esse complexo recifal icônico e globalmente reconhecido por sua importância ecológica, permitindo contrastes temporais para diversos sítios. Apesar da maior distância com relação à foz, há indícios de contaminação em decorrência do rompimento da barragem da barragem (EVANGELISTA, 2018; BIANCHINI, 2016). A configuração dos recifes em dois arcos, um costeiro e outro "offshore", desprotegido e protegido contra a pesca, respectivamente, fornece um ambiente experimental que permite contrastes envolvendo gradientes ambientais e antropogênicos.

As concentrações de clorofila em Abrolhos foram as menores dentre a região estudada, não ultrapassando  $2 \mu\text{g.L}^{-1}$  e com pouca estratificação vertical. Os cinco sítios com estruturas recifais

apresentaram concentrações de picocianobactérias do gênero *Prochlorococcus* cerca de 10 vezes menores do que nas demais áreas. Somente o sítio A5, um banco de rodolitos mais "offshore", apresentou concentrações similares às das demais áreas. As baixas concentrações de *Prochlorococcus*, componente abundante no plâncton de sistemas coralíneos oligotróficos, refletem os maiores níveis de eutrofização característicos do sistema recifal de Abrolhos.

Os sedimentos oriundos dos cinco conjuntos de armadilhas foram predominantemente médios e finos. Um dos três conjuntos instalados em recifes mais próximos da costa (Sebastião Gomes, A2) apresentou taxas de sedimentação de até 48 g.mês<sup>-1</sup>, contrastando com os demais [11(A3), 15(A1), 16(A6) e 23(A4) g.mês<sup>-1</sup>]. Sedimentos siliciclásticos de origem continental foram mais abundantes nos sítios mais próximos à costa (~40%) e no Arquipélago dos Abrolhos (20%), tendo estado ausentes no recife "offshore" (A3, Parcel dos Abrolhos). Os sedimentos ferrosos (<1%), ausentes em A3, correspondem à greigita, associada à atividade de bactérias sulfato-redutoras.

As taxas de produção de CaCO<sub>3</sub>, estimadas em placas instaladas em 3 sítios, foram as maiores da região (média de ~310 g.m<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>). O recrutamento de corais ocorreu nas estruturas instaladas nos sítios A1 (Pedra de Leste) e A3 (Parcel dos Abrolhos). Não houve recrutamento de corais nas estruturas instaladas em banco de rodolitos (A5), onde a produção de CaCO<sub>3</sub> foi dominada por briozoários e CCA e a produção de massa orgânica foi máxima, em função da maior cobertura de macroalgas. As taxas de produção de CaCO<sub>3</sub> no primeiro ciclo do PMBA foram semelhantes às dos anos anteriores ao rompimento da barragem da barragem (REIS et al., 2016).

As assembleias bênticas dos recifes de Abrolhos foram, em geral, dominadas por *turf* (>50%) e apresentaram variação "*cross shelf*" marcada, fortemente associada à turbidez, com maior abundância relativa de macroalgas no arco interno, e de cianobactérias no arco externo. O sítio A2 (Sebastião Gomes), sob a sedimentação mais intensa, se destacou pela maior abundância de zoantídeos no topo (~30%), e de corais (*M. cavernosa*) na parede (60%). Além da maior cobertura relativa, os organismos de crescimento rápido apresentaram maior variação temporal. O PMBA, ao detectar variação na abundância de organismos de crescimento rápido ao longo do monitoramento trimestral em 2019, agregou um aspecto inovador que contribuirá com a interpretação de dados de longo prazo, uma vez que a variação sazonal na abundância de macroalgas tendeu a se sobrepor à variação interanual. Macroalgas tendem a responder a contaminação por metais, concentração de nutrientes e pressão de herbivoria (relacionada com o esforço de pesca), mas os indutores dos padrões observados não estão claros. A cobertura relativa de macroalgas foi, no geral, inversamente relacionada com a de *turf* e cianobactérias, sendo que esses últimos são organismos antagonistas dos corais. Apesar da grande variabilidade na cobertura de organismos de crescimento rápido, a cobertura de corais foi estável entre 2015 e 2019. Dentre os corais, no entanto, a abundância de algumas espécies variou significativamente, pelo menos no sítio monitorado continuamente (A1, Pedra de Leste, com cobertura coralínea de 15%), com aumentos na abundância de *Montastrea cavernosa* e diminuição na de outros táxons (e.g. *Agaricia* spp., *Favia gravida*, *Millepora nitida*). A análise do conjunto dos dados,

anteriores e subsequentes ao rompimento da barragem da barragem, não permite atribuir a variação observada na estrutura de comunidades recifais de Abrolhos e adjacências ao evento.

Os dados acerca da saúde dos corais nos recifes de Abrolhos evidenciaram adaptações locais às condições de luz dos arcos internos e externo, bem como uma assinatura preponderante, "instantânea" (abril de 2019), dos efeitos negativos do estresse térmico registrado em escala regional. Possíveis danos permanentes aos holobiontes, em função do comprometimento do aparato fotossintético das zooxantelas, bem como os padrões espaciais e taxonômicos de prevalência de efeitos letais e sub-letais, só poderão ser avaliados na medida em que o monitoramento progredir. O branqueamento em massa decorrente do estresse térmico, observado nos Esquecidos e nos recifes de Abrolhos, embora não relacionado com o rompimento da barragem da barragem, representa uma dimensão importante do monitoramento em longo prazo, uma vez que compromete a saúde dos corais e pode ser agravado pelos efeitos do rompimento da barragem da barragem. A escolha de locais e espécies mais críticos para conservação *in situ*, ou para iniciativas de restauração (e.g. implante de propágulos), depende de um entendimento abrangente acerca das variáveis associadas à resistência e à resiliência dos corais (TEIXEIRA et al., 2019).

A estrutura das assembleias de peixes recifais de Abrolhos, amostrada nos arcos interno e externo, esteve associada principalmente à distância da costa, uma variável que se confunde com a proteção contra a pesca, uma vez que os recifes do arco externo estão inseridos na área do Parque Nacional. A abundância e riqueza de pós-larvas de peixes foi máxima nas áreas protegidas (Arquipélago de Abrolhos ~52%, 50 taxa; Parcel dos Abrolhos ~29%, 47 taxa), e mínima nas desprotegidas (Sebastião Gomes ~10%, 25 taxa; Parcel das Paredes ~8%, 29 taxa). O monitoramento em mais longo prazo e sua integração com dados anteriores permitirá avaliar possíveis efeitos do rompimento da barragem da barragem sobre as assembleias de peixes recifais de Abrolhos e adjacências.

Figura 109: Síntese do conhecimento gerado sobre ambientes recifais em Abrolhos e adjacências, Primeiro Ciclo do PMBA.

	SEDIMENTOS	COMUNIDADES BIOLÓGICAS			COLONIZAÇÃO E PRODUÇÃO DE CARBONATOS	SAUDE DE CORAIS	EFEITOS DO DESASTRE	RECOMENDAÇÕES
		plâncton	bentos	peixes				
ESTRUTURAS RECIFAIS	caracterização deposicional e mineralógica de sedimentos em armadilhas	baseline detalhado		baseline detalhado, abundância e diversidade de pós-larvas, telemetria	baseline detalhado	baseline detalhado, estudo do impacto das anomalias térmicas	indícios em outros subprojetos, a serem verificados quanto à incidência no nível de comunidades	manter o monitoramento (séries temporais), ampliar o rol de variáveis
BANCO DE RODOLITOS	caracterização deposicional e mineralógica de sedimentos em armadilhas	baseline detalhado	baseline detalhado	---	baseline detalhado	---	indícios em outros subprojetos, a serem verificados quanto à incidência no nível de comunidades	manter o monitoramento (séries temporais), ampliar o rol de variáveis

### 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Os problemas endereçados pelos três projetos que originaram essa síntese sobre ambientes recifais abrangeram desde respostas fisiológicas mais instantâneas, ao nível de indivíduos (e.g. fotobiologia e simbiontes), até respostas mais lentas ao nível populacional e de comunidades (e.g. demografia de peixes e corais). Ressaltamos que, sob níveis sub-letais de contaminação, alterações na riqueza e cobertura de organismos longevos e de crescimento lento se configuram ao longo de anos a décadas. Além disso, a propagação dos efeitos pode ser especialmente complexa, dependendo da natureza e da magnitude dos estressores, dos padrões de circulação e da dinâmica metapopulacional peculiar a cada espécie (e.g. tempo de duração larval, competência de larvas e recrutas), entre outros (SPELLERBERG, 2005; GITZEN et al., 2012). Colônias de corais podem viver centenas de anos, e muitos peixes recifais de grande porte vivem décadas, mas cada coorte passa por um gargalo (*bottleneck*) de mortalidade na fase larval (semanas) e nas primeiras etapas após o recrutamento (anos). Assim, falhas no recrutamento ou desvantagens competitivas induzidas por alterações no ambiente são detectáveis apenas em médio e longo prazo, mas podem implicar em reestruturação do ecossistema em função de efeitos indiretos. Preliminarmente, os experimentos de colonização nos Recifes Esquecidos, área recifal com maior interação com os aportes do Rio Doce, já revelaram limitações severas no recrutamento de corais, o que pode estar associado tanto à degradação crônica dessa Área quanto ao rompimento da barragem da barragem.

Em ambientes prístinos, a contaminação por metais dissolvidos diminui significativamente as taxas de fecundidade, fertilidade, sobrevivência larval e o recrutamento de diversas espécies de corais. Outros organismos apresentam sintomas mais rapidamente. Macroalgas, por exemplo, apresentam queda abrupta de clorofila "a" sob concentrações aumentadas de metais (MCCORMICK & CAIRNS, 1994). No âmbito do subprojeto, detectamos alterações nas comunidades de algas das áreas afetadas, as quais podem ter ocorrido como consequência do rompimento da barragem da barragem, ou simplesmente estão refletindo a baixa qualidade dos levantamentos anteriores. Comunidades bênticas em ambientes cronicamente afetados por contaminantes tendem a ser mais resilientes, mas também tendem a ter menos diversidade, uma vez que espécies sensíveis são substituídas por espécies oportunistas resistentes e de crescimento mais rápido (JOHNSTON; ROBERTS, 2009). A substituição de espécies tem consequências que podem se propagar para outros níveis tróficos e afetar toda a comunidade, uma vez que implica em alterações nas taxas de recrutamento e sobrevivência (SOMERFIELD et al., 1994). As respostas de comunidades biológicas são difíceis de prever, principalmente em sistemas complexos como recifes e bancos de rodolitos, mas a perda de espécies é amplamente documentada em situações de estresse ambiental (JOHNSTON; ROBERTS, 2009). O hidrocoral *Millepora* spp., conhecido como coral-de-fogo, é eficaz na deposição de calcário, por isso exibe taxa de crescimento elevada e participa significativamente do balanço carbonático dos recifes de Abrolhos (BASTOS et al., 2018). Sua morfologia arborescente fornece micro-habitats para diversos organismos recifais, sendo importante na fase juvenil de alguns peixes. Entretanto, sua abundância vem sendo reduzida de maneira notável, o que aponta para uma possível extinção local de uma

espécie-chave na estruturação dos recifes. Um entendimento abrangente dos padrões e processos em configuração na enorme área recifal afetada pelo rompimento da barragem da barragem permitirá indicar espécies, áreas e medidas prioritárias para restauração e conservação. O término do primeiro ciclo do PMBA deve servir como motivador para reforçar os esforços de síntese e integração dos subprojetos, por parte da Rede Rio Doce Mar, o que certamente irá agregar maior poder analítico sobre a vasta base de dados coligida pelo Programa.

O desenvolvimento dos estudos do PMBA em ambientes recifais está sendo baseado no emprego simultâneo de diferentes abordagens amostrais e analíticas. Uma vez que os dados antecedentes são espacialmente restritos (Figura 110), o monitoramento em longo prazo, abrangendo uma malha amostral representativa, espacialmente relevante, gradientes de atenuação e “áreas controle”<sup>6</sup>, é a chave para o entendimento dos impactos do rompimento da barragem da barragem. Com exceção da área do PARNAM Abrolhos e adjacências, que conta com *baselines*, os resultados sobre os Recifes Esquecidos, foz do Rio Doce e APACA, alcançados no primeiro ciclo do PMBA, compreendem a principal base robusta para comparações espaciais e temporais de comunidades recifais e bancos de rodolitos da área afetada (Figura 110). A ausência ou deficiências das *baselines*, além de dificultar as avaliações, revelou a fragilidade do licenciamento ambiental e a necessidade de aprimoramentos na gestão de áreas marinhas sujeitas a impactos crônicos e agudos de atividades minerárias. No caso da APACA, foz do Rio Doce e Recifes Esquecidos, as lacunas de conhecimento eram profundas, uma vez que não existiam sequer mapas básicos acerca da estrutura e da dimensão das formações recifais (veja resultados do Subprojeto “Mapeamento”).

Além dos *baselines*, reportamos também indícios e evidências de impactos (Figura 111), de Primeiro (dados físico-químicos e geológicos) e Terceiro (dados em nível de comunidade) Grau, conforme nomenclatura convencionada pela Rede Rio Doce Mar.

---

<sup>6</sup> Áreas mais afastadas da fonte primária de contaminantes (foz do Rio Doce)

Figura 110: Região estudada e coberturas temporais dos sítios e áreas amostrais em ambientes recifais, evidenciando que apenas sítios mais distantes da foz do rio Doce possuíam dados antecedentes ao rompimento da barragem da barragem. As legendas dos megahabitats bênticos são iguais às da Figura 103.

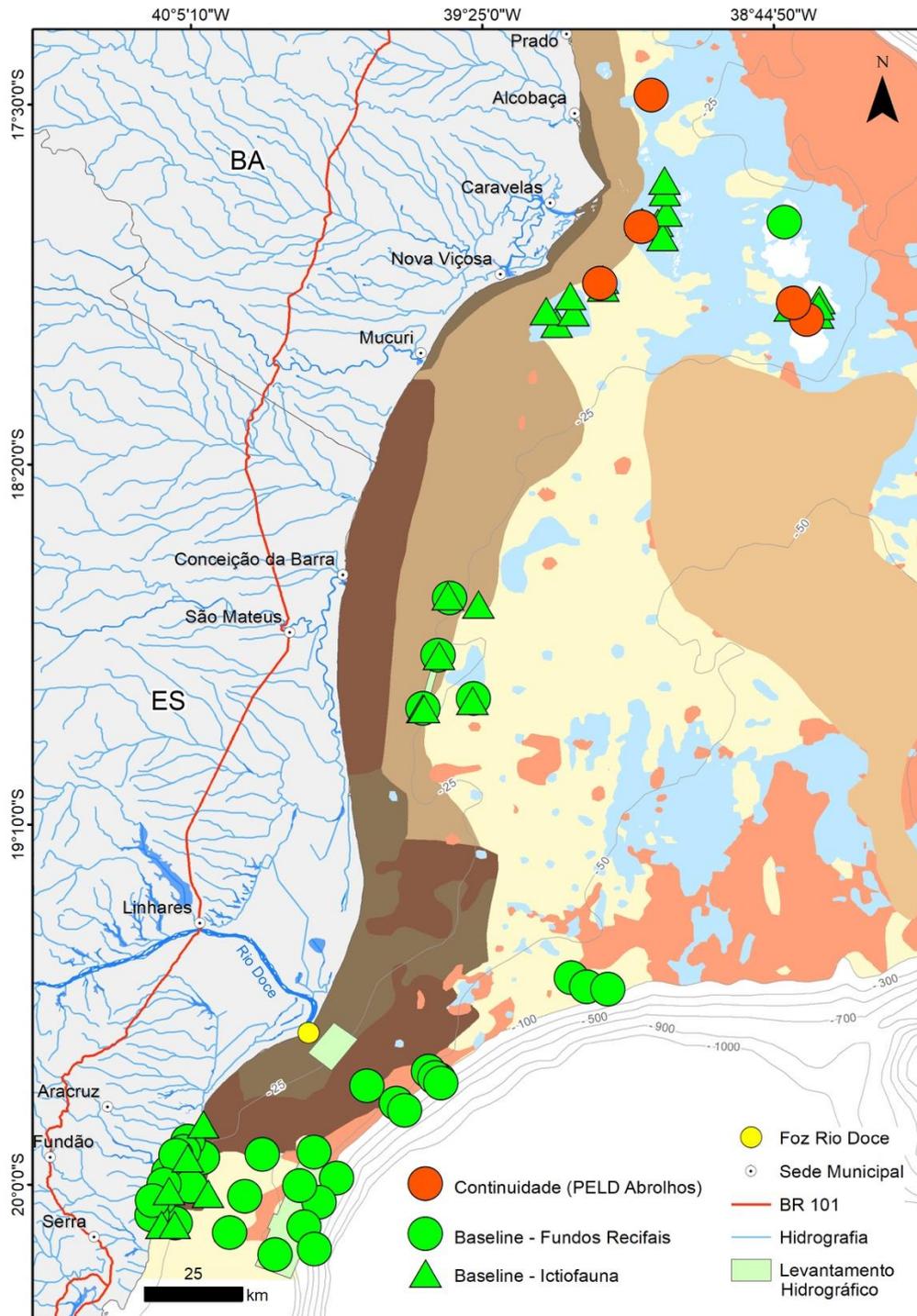
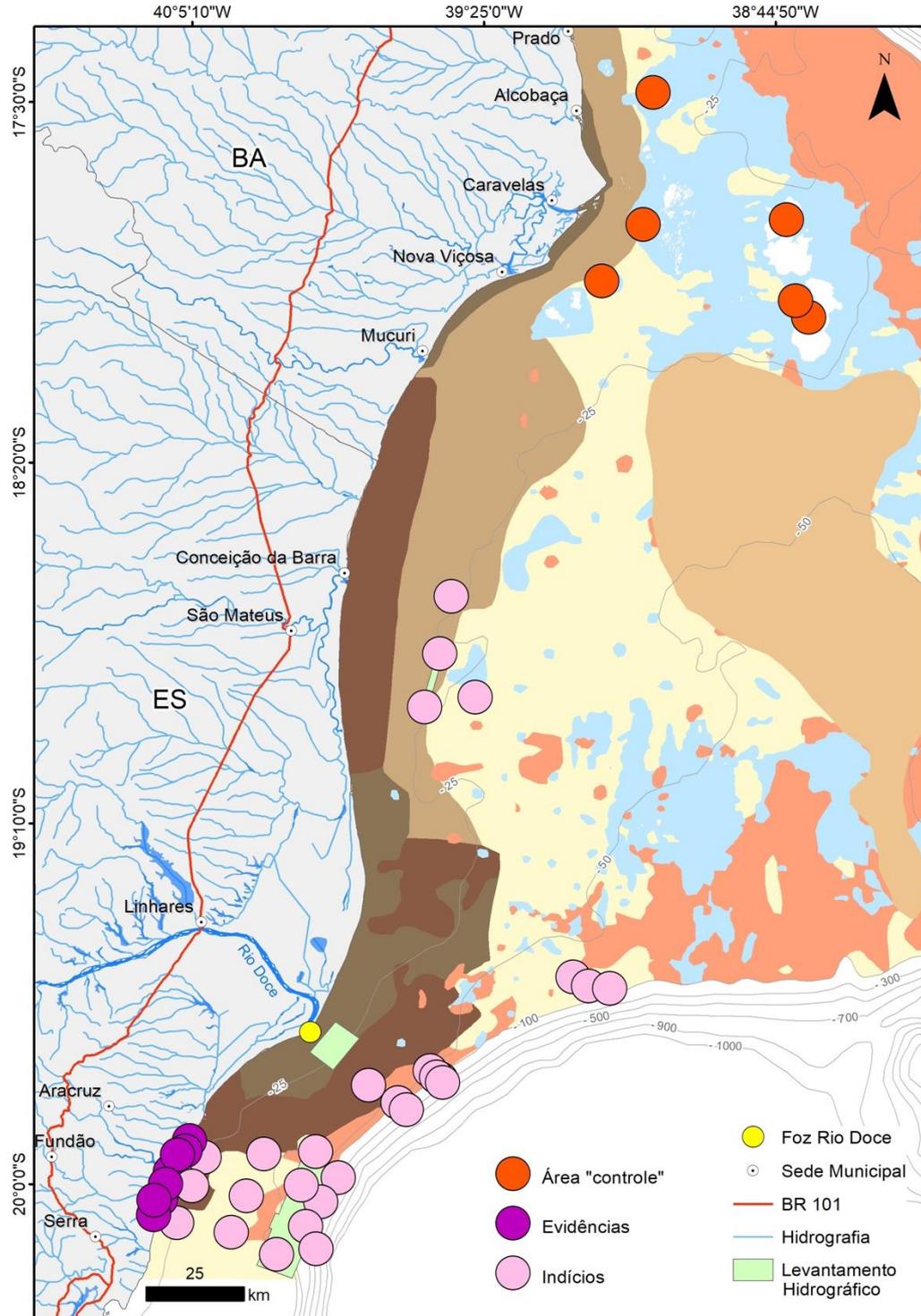
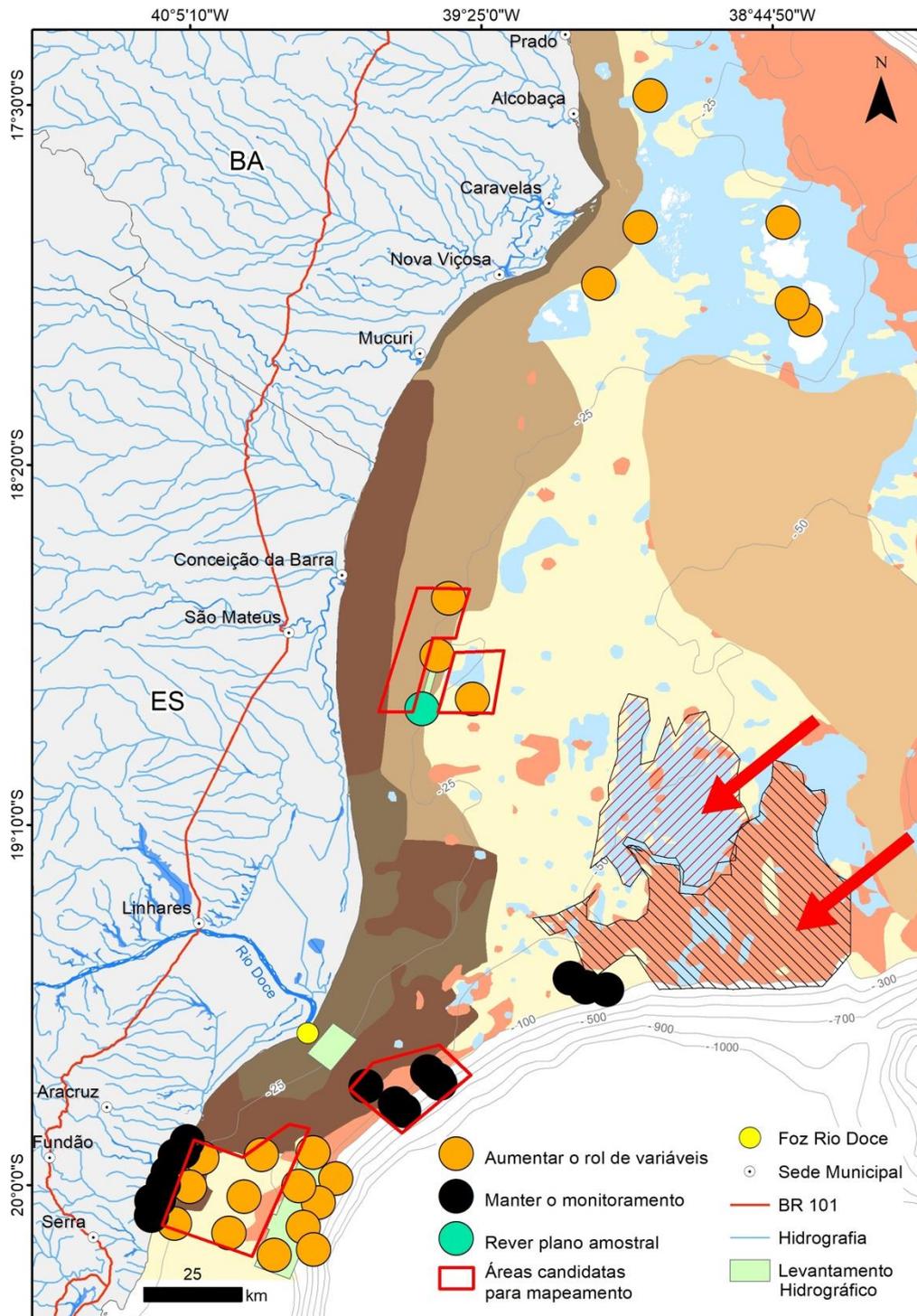


Figura 111: Mapa dos sítios amostrais em ambientes recifais e seus respectivos impactos. As legendas dos megahabitats bênticos são iguais às da Figura 103.



As lições aprendidas no primeiro ciclo de execução apontam não somente para a premência da aquisição contínua de dados, mas também para ajustes no monitoramento recifal conduzido no âmbito do PMBA (Figura 112), visando adequação e otimização dos esforços (SPELLERBERG, 2005; McDONALD-MADDEN et al., 2010; MAGURRAN et al., 2010; EDWARDS et al., 2010; GITZEN et al., 2012; LINDENMAYER; LIKENS, 2018). Por exemplo, a malha amostral focada em acessar a estrutura das comunidades bênticas poderia sofrer diminuição na densidade de estações em algumas áreas (e.g. APACA), e aumento em outras (Recifes Esquecidos). Amostragens trimestrais em toda a malha acabam por não representar ganho significativo na resolução, podendo ser circunscritas a estudos mais pontuais no nível de organismos-alvo, em localidades selecionadas. Tais medidas, ao mesmo tempo em que assegurariam a manutenção da robustez da base de dados, reduziriam os custos do PMBA de maneira significativa. Ainda na dimensão amostral, o uso de imageamento hiperespectral (e.g. CHENNU et al., 2017), fotomosaicos em 3D (BURNS et al., 2015), e detecção de recrutas de corais com luz UV poderiam ampliar ainda mais a eficiência das amostragens não destrutivas baseadas em imageamento do fundo. O desenvolvimento de *landers* e *dropcams* instrumentadas também se apresenta como alternativa para reduzir custos e a necessidade de mergulhadores, especialmente nas áreas abaixo dos 20 m de profundidade. Por fim, ressalta-se que há diversas áreas recifais importantes, a diferentes distâncias da foz do rio Doce, que carecem de complementação nos esforços de mapeamento, ou mesmo mapeamento do tipo *baseline* (Figura 112).

Figura 112: Mapa da região estudada com indicações de aprimoramentos e adaptações para as amostragens em ambientes recifais no âmbito do PMBA. As legendas dos megahabitats bênticos é igual à da Figura 103. As setas indicam áreas prioritárias para mapeamento e aquisição de *baselines* biológicos (hachuradas).



Na dimensão analítica, o projeto vem adotando medidas para automatização do workflow de análises de imagens do bentos, com customização de protocolos semi-automatizados de reconhecimento de padrões em imagens, com uso de algoritmos de inteligência artificial (e.g. BEIJBOM et al., 2012). Essa medida, que reduz significativamente o custo homem-hora dessa atividade, também poderia ser expandida para o imageamento em fluxo. Essas análises também se mostraram eficientes para quantificar o pico e nanoplâncton, o que não se observa em análises microscópicas tradicionais, especialmente em escalas espaciais muito amplas. Futuros ciclos de monitoramento deveriam ampliar a cobertura espacial de amostragens para análises automatizadas por citometria e imageamento em fluxo. Alterações no plâncton são indicadoras de alterações na estrutura trófica da coluna d'água e no acoplamento bento-pelágico (fluxos entre a coluna d'água e o fundo). Além disso, como a quantidade de flocos e partículas detríticas foi alta em diversas estações, indicamos que o entendimento desse processo seja aprofundado, incluindo a elucidação da natureza do particulado. O acoplamento bento-pelágico nos recifes e bancos de rodolitos é um tema mal coberto na literatura e ainda pouco explorado pelo projeto. Os estudos sobre biomineralizadores, engenheiros do ecossistema, devem ser ampliados de forma a incluir a variação nas taxas de crescimento de algas e corais (escalas decadais) e incorporação de elementos (e.g. MCCOY & KAMENOS, 2015) com base em análises dos esqueletos e suas bandas de crescimento. A composição biológica, química e mineral de rodolitos e em testemunhos nos recifes também deveria receber atenção, visto que pode indicar aprisionamento de rejeito e contaminantes, e permitiria elucidar como a influência terrígena e antropogênica variou ao longo do histórico de ocupação e degradação da bacia do rio Doce, que culminou com o rompimento da barragem da barragem (WILLIS et al., 2010). Por fim, na medida em que os inventários com métodos tradicionais se consolidarem, ao fim desse primeiro ciclo, o caminho natural seria complementá-los com abordagens genéticas de *metabarcoding* que permitam detecção rápida e de alta resolução da biodiversidade marinha (WANGENSTEEN; TURON, 2017).

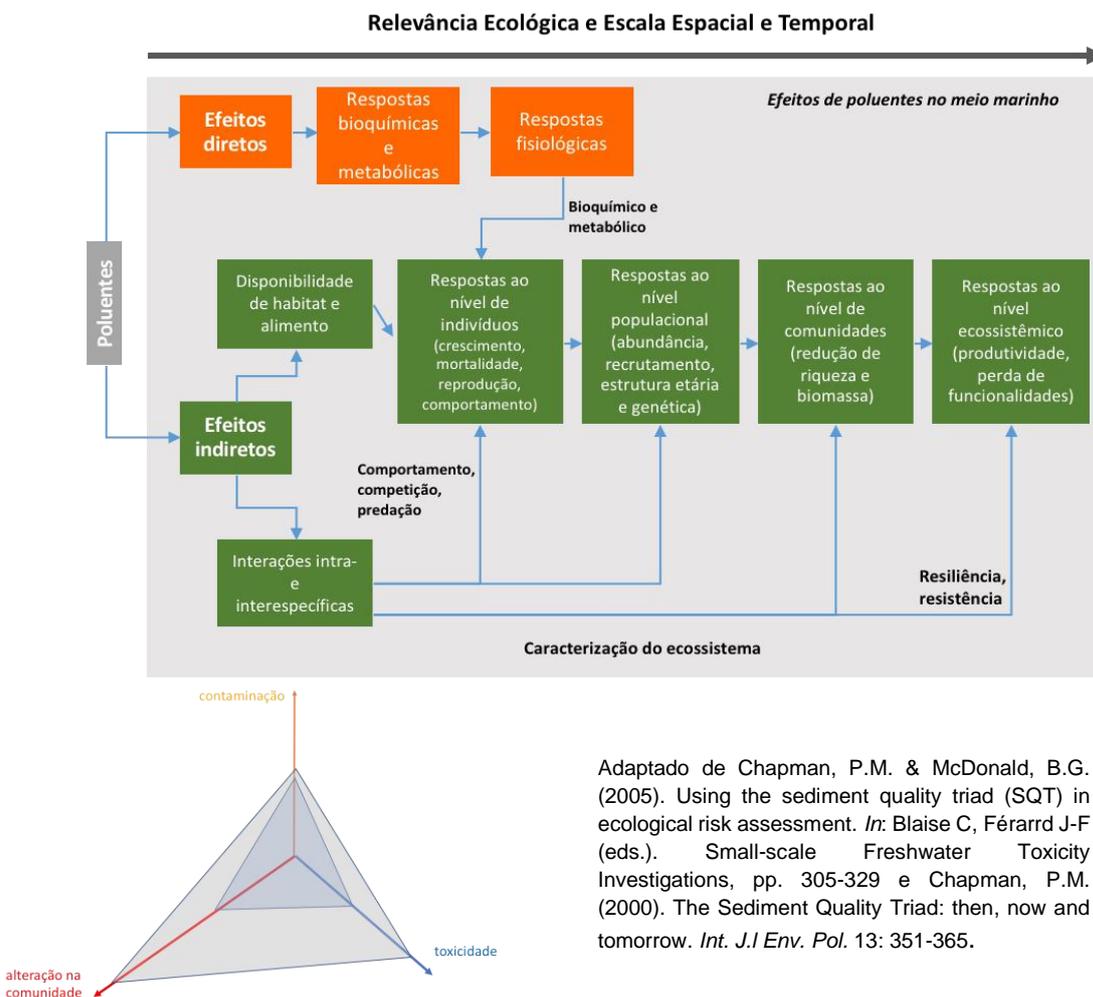
Quantificar os impactos do rompimento da barragem da barragem sobre os ecossistemas recifais, através de *baselines* e monitoramento, fornece o embasamento essencial para delinear estratégias de gestão para medidas de mitigação e restauração (SPELLERBERG, 2005, MAGRIS et al., 2019). Mas, qual o leque de opções de resposta, ao nível do manejo, para um contexto tão complexo e de dimensões jamais enfrentadas? Evidentemente, a recuperação da bacia hidrográfica (e.g. vegetação ripária, saneamento) e a contenção do fluxo de material a jusante de Fundão são pré-essenciais, inclusive para o sucesso de iniciativas de restauração dos recifes (BRODIE et al., 2012; GOMEZ et al., 2014). Em paralelo, o mapeamento completo da ocorrência de recifes e bancos de rodolitos, juntamente com a identificação das áreas recifais mais e menos afetadas, dentro e fora de Unidades de Conservação, irá indicar onde enfatizar ações de proteção (e.g. áreas bem conservadas que podem servir como fontes de propágulos) ou restauração (e.g. áreas afetadas apenas nos momentos mais agudos, ou mesmo cronicamente). A restauração de recifes degradados envolve um conjunto de técnicas em desenvolvimento (e.g. ANTHONY et al., 2017; LADD et al., 2019), mas com diversos casos de sucesso (e.g. RINKEVICH, 2005; GOMEZ et al., 2014; KU'ULEI et al., 2017; WILLIAMS et al. 2019;

TORTOLERO-LANGARICA et al., 2019). Tais intervenções devem compor um eixo importante na atuação das mineradoras, junto à comunidade científica e a sociedade (HEIN et al., 2019), no sentido de mitigar os danos causados em função de sua atuação e dos rompimento da barragens recentes.

*Effective long-term environmental monitoring is difficult and challenging; it requires good design, careful review, long-term commitment, and often gets overlooked when resources are handed out by our political leaders. Given this, why bother? We bother because **long-term monitoring is the cornerstone of effective environmental policy and management.** In a 'post-truth' age witnessing a crisis in biodiversity decline, long-term monitoring is something we can't afford not to do.*

David Lindenmayer (2018)  
*Decision Point*

Figura 113: Diagrama esquemático dos efeitos diretos e indiretos da poluição nos diferentes níveis organizacionais da biota e dos ecossistemas marinhos. Assim como a complexidade do sistema, a relevância ecológica dos efeitos aumenta na direção das maiores escalas espaciais e temporais.



#### 4. REFERÊNCIAS

ALANAGREH, L.; PEGG, C.; HARIKUMAR, A.; BUCHHEIM, M. Assessing intragenomic variation of the internal transcribed spacer two: Adapting the Illumina metagenomics protocol. **PLOS ONE**, v. 12, n. 7, e0181491, 2017.

ALLDREDGE, A. L.; GOTSCHALK, C. C. The relative contribution of marine snow of different origins to biological processes in coastal waters. **Cont. Shelf Res.**, v. 10, n. 1, p. 41-58, 1990.

AMADO-FILHO, G. M. et al. Rhodolith beds are major CaCO<sub>3</sub> bio-factories in the tropical South West Atlantic. **Plos One**, v.7, n. 4, 2012.

AMADO-FILHO, G. M. et al. Seaweed diversity associated with a Brazilian tropical rhodolith bed. **Cienc. Mar.**, v. 36, n. 4, p. 371-391, 2010.

AMADO-FILHO, G. M. et al. **South Atlantic rhodolith beds: latitudinal distribution, species composition, structure and ecosystem functions, threats and conservation status.** In: RIOSMENA-RODRIGUEZ, R. NELSON, W. AGUIRRE, J. (org.) Rhodolith/maërl beds: a global perspective. Coastal Research Library, v. 15. New York: Springer, p 229–318, 2017.

AMADO-FILHO, G. M. et al. Structure of rhodolith beds from 4 to 55 meters deep along the southern coast of Espírito Santo State, Brazil. **Cienc. Mar.**, v. 33, n. 4, p. 399-410, 2007.

ANTHONY, J. W. et al. **Handbook of Mineralogy: Silica, silicates.** Tucson: Mineral Data Publishing, 1995.

ANTHONY, K. et al. New interventions are needed to save coral reefs. **Nature Ecol. Evol.**, v. 1, n. 10, p.1420-1422, 2017.

ARAKAWA, H. et al. Influence of volcanic ash sediments on spore adhesion of the red alga *Gelidium elegans* from the coastal seabed around Miyakejima Island, Japan. **Fish. Sci.**, v. 78, p.1083–1090, 2012.

ARIF, C. et al. Assessing *Symbiodinium* diversity in scleractinian corals via next-generation sequencing-based genotyping of the ITS2 rDNA region. **Mol. Ecol.** v. 23, p. 4418-4433, 2014.

ATAMANCHUK, D. et al. Continuous long-term observations of the carbonate system dynamics in the water column of a temperate fjord. **Journal of Marine Systems.**, v. 148, p. 272–284, 2015.

AZAM, F. et al. The ecological role of water-column microbes. **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, v. 10, p. 257-263, 1983.

AZEVEDO, F. B. B.; CARLONI, G. G.; CARVALHEIRA, L. V. Colonization of benthic organisms on different artificial substratum in Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, p. 263–275, 2006.

BAHIA, R. G. **Algas coralináceas formadoras de rodolitos da plataforma continental tropical e ilhas oceânicas do Brasil: levantamento florístico e taxonomia**. 221p. 2014. Tese (Doutorado) – Escola Nacional de Botânica Tropical, Rio de Janeiro.

BAHIA, R.G. et al. Rhodolith bed structure along a depth gradient on the northern coast of Bahia State, Brazil, **Braz. J. Oceanogr.** v. 58, p. 323–37, 2010.

BAKER, A. C. Flexibility and specificity in coral-algal symbiosis: diversity, ecology, and biogeography of *Symbiodinium*. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 34, n. 1, p. 661-689, 2003.

BASELGA, A. et al. Partitioning beta diversity into turnover and nestedness components. Package betapart, Version, p. 1-4, 2017.

BASSO, D. Deep rhodolith distribution in the Pontian Islands, Italy: a model for the paleoecology of a temperate sea. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.** v. 137, p. 173–187, 1998.

BASTOS A. C. et al. Bryozoans are major modern builders of South Atlantic oddly shaped reefs. **Scientific Reports**, v. 8, n. 9638, p. 1-11, 2018.

BASTOS, A. C. et al. (2013). Buracas: novel and unusual sinkhole-like features in the Abrolhos Bank. **Continental Shelf Research**, 70, 118-125.

BASTOS, A. C. et al. Origin and sedimentary evolution of sinkholes (buracas) in the Abrolhos continental shelf, Brazil. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 462, 101-111, 2016.

BASTOS, A. C. et al. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. **J. South Am. Earth Sci.**, v. 63, p. 125-136, 2015.

BEIJBOM, O. Automated annotation of coral reef survey images. In: IEEE CONF. COMP. VISION AND PATTERN RECOGNITION, p. 1170-1177, 2012.

BEIJBOM, O. et al. 2015. Towards automated annotation of benthic survey images: Variability of human experts and operational modes of automation. **PLoS ONE**,. v. 10, n. 7, 2015.

BEIJBON, O. et al. Automated annotation of coral reef survey images. In: IEEE CONF. COMP. VISION AND PATTERN RECOGNITION, p. 1170-1177, 2012.

BIANCHINI, A. **Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação - 1ª Expedição do Navio de**

**Pesquisa Soloncy Moura do CEPsul/ICMBio.** Universidade Federal do Rio Grande – FURG & Instituto de Ciências Biológicas. Brasília, 2016.

BIANCHINI, A. Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação - 1ª Expedição do Navio de Pesquisa Soloncy Moura do CEPsul/ICMBio. Universidade Federal do Rio Grande – FURG & Instituto de Ciências Biológicas. Brasília, 2016.

BIRKELAND, C. **Life and death of coral reefs.** Springer, 1997.

BÖHM, L.; FÜTTERER, D.; KAMINSKI, E. Algal calcification in some Codiaceae (Chlorophyta): ultrastructure and location of skeletal deposits. **J. Phycol.**, v. 14, p. 486–493, 1978.

BOROWITSKA, M. A. Intertidal algae diversity and the effect of pollution. **Aust. J. Mar. Freshwater Res.** v. 23, p. 73-84. 1972

BOSENCE, D. W. J. **Description and classification of rhodoliths (rhodoids, rhodolites).** In: PERYT, T. (org.), COATED GRAINS. Springer Verlag, p. 217–224, 1983a.

BOSENCE, D. W. J. **The occurrence and ecology of recent rhodoliths – a review.** In: PERYT, T. (org.), Coated Grains. Springer Verlag, p. 217–224, 1983b.

BOSENCE, D. W. J.; PEDLEY, H. M. Sedimentology and palaeoecology of Miocene coralline algal biostrome from the Maltese Islands. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.**, v. 38, p. 9-43, 1982.

BOURGUIGNON et al. Seabed morphology and sedimentary regimes defining fishing grounds along the Eastern Brazilian shelf. **Geosciences**, 8, 91, 2018.

BRASILEIRO, P. S. et al. Burial rate determines Holocene rhodolith development on the Brazilian Shelf. **Palaios**, v. 33, p. 464-477, 2018.

BRASILEIRO, P. S. et al. Macroalgal composition and community structure of the largest rhodolith beds in the world. **Mar. Biodivers.**, v. 46, n. 2, p.407–420, 2016.

BRODIE, J. A. et al. Terrestrial pollutant runoff to the Great Barrier Reef: An update of issues, priorities and management responses. **Mar. Pol. Bull.**, v. 65, p. 81–100, 2012.

BROOM, J.E.S. et al. Utility of psbA and nSSU for phylogenetic reconstruction in the Corallinales based on New Zealand taxa. **Mol. Phyl. Evol.**, v. 46, p. 958–973, 2008.

BURNS, J. H. et al. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. **PeerJ**, v.3, p. 1077, 2015.

- BURNS, J. H. et al. Integrating structure-from-motion photogrammetry with geospatial software as a novel technique for quantifying 3D ecological characteristics of coral reefs. **PeerJ**, v.3, p. 1077, 2015.
- CAREY, C. C.; WEATHERS, K. C.; COTTINGHAM, K. L. *Gloeotrichia echinulata* blooms in an oligotrophic lake: helpful insights from eutrophic lakes. **J. Plankton Res.**, v. 30, p. 893-904, 2008.
- CAVALCANTI, G. S. et al. Physiologic and metagenomic attributes of the rhodoliths forming the largest CaCO<sub>3</sub> bed in the South Atlantic Ocean. **The ISME Journal (Print)**, v. 8, p. 52-62, 2013.
- CAVALCANTI, G. S. et al. Sinkhole-like structures as bioproductivity hotspots in the Abrolhos Bank. **Continental Shelf Research**, 70, 126-134, 2013.
- CHAPMAN, A. S.; FLETCHER, R. L. Differential effects of sediments on survival and growth of *Fucus serratus* Embryos (Fucales, Phaeophyceae). **J. Phycol.**, v. 38, p. 894–903, 2002.
- CHAPMAN, P. M.; MCDONALD, B. G. **Using the sediment quality triad (SQT) in ecological risk assessment**. In: Small scale freshwater toxicity investigations. Springer, Dordrecht, p. 305-329, 2005.
- CHARPY, L. Importance of photosynthetic picoplankton in coral reef ecosystems. **Vie et Milieu**, v. 55, n. 3-4, p. 217-223, 2005.
- CHENNU, A. et al. A diver-operated hyperspectral imaging and topographic surveying system for automated mapping of benthic habitats. **Sci. Rep.**, v. 7, n. 1, p. 712, 2017.
- CHISHOLM, S. W., et al. *Prochlorococcus marinus* nov. gen. nov. sp.: an oxyphototrophic marine prokaryote containing divinyl chlorophyll a and b. **Archives of Microbiology**, v. 157, n. 3, p. 297–300, 1992.
- CHRÉTIENNOT-DINET, M. J. **Atlas du phytoplancton marin. Volume III: Chlorarachnophycées, Chlorophycées, Chrysophycées, Cryptophycées, Euglénophycées, Eustigmatophycées, Prasinophycées, Prymnesiophycées, Rhodophycées et Tribophycées**, Paris: Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique 15, Paris, p. 1-261, 1990.
- CIONEK, V. M. et al. Brazil in the mud again: lessons not learned from Mariana dam collapse. **Biodiversity and Conservation**, v. 28, n. 7, p. 1935-1938, 2019.
- CLARKE, K. R.; GORLEY, R. N. **PRIMER v7: User Manual/Tutorial PRIMER-E**: Plymouth, 2015.
- CLARKE, K.R.; WARWICK, R.M. Similarity-based testing for community pattern: the 2-way layout with no replication. **Marine Biology**, v.118, p. 167-176, 1994a.

CLARKE, R. K.; WARWICK, R. M. Change in marine communities. 2 ed. PRIMER-E Ltd. Plymouth, 2001.

COELHO, A. L. N. **Alterações hidrogeomorfológicas no médio-baixo Rio Doce/ES**. 227p. 2007. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niteroi.

CONSALVEY, M.; PATERSON, D. M.; UNDERWOOD, G. J. C. The ups and downs of life in a benthic biofilm: migration of benthic diatoms. **Diatom Research**, v. 19, n. 2, p. 181-202, 2004.

CORREA, J. A. et al. **Copper, copper mine tailings and their effect on marine algae in northern Chile**. In: Sixteenth International Seaweed Symposium. Springer, Dordrecht, p. 571-581, 1999.

COSTA, I. O. et al. Macroalgas bentônicas associadas a bancos de *Hypnea musciformis* (Wulfen) J.V. Lamour. (Rhodophyta – Gigartinales) em duas praias do litoral baiano. **Acta Bot. Bras.**, v. 26, n. 2, p. 493-507, 2012.

COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Env. Change**, v. 26, p.152-158, 2014.

DAVIS, R. A. Jr; DARLYMPLE, R.W., 2012. **Principles of Tidal Sedimentology**. Springer Science, Business Media, DOI 10.1007/978-94-007-0123-6\_13.

DECHNIK, B. et al. Holocene reef growth in the tropical southwestern Atlantic: Evidence for sea level and climate instability. **Quaternary Science Reviews**, v. 218, p. 365-377, 2019.

DICKSON, A. G. The measurement of sea water pH. **Marine Chemistry**, v. 44, n.2–4, p.131-142, 1993.

DUBELAAR, G.B.J.; JONKER, R.R. Flow cytometry as a tool for the study of phytoplankton. *Sci. Mar.* v. 64, p. 135-156, 2000.

EDWARDS, M. Multi-decadal oceanic ecological datasets and their application in marine policy and management. **Trends Ecol. Evol.**, v. 25, n. 10, p. 602-10, 2010.

ESCOBAR, H. 2019. Mystery oil spill threatens marine sanctuary in Brazil. **Science** 366(6466): 642.

EVANGELISTA, H. **Sobre a incorporação anômala de metais em corais do Parque Nacional dos Abrolhos decorrente da chegada da pluma de rejeitos da Samarco na foz do Rio Doce – ES**. Relatório encaminhado ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018.

FERNANDES, G. W. et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p.35-45, 2016.

FIGUEIREDO, M. A. O. et al. Benthic marine algae of the coral reefs of Brazil: a literature review. **Oecologia Brasiliensis** v. 12, n. 2, p. 258-269, 2008.

FITT, W. K. et al. Coral bleaching: interpretation of thermal tolerance limits and thermal thresholds in tropical corals. **Coral Reefs**, v. 20, p. 51-65, 2001.

FLOMBAUM, P. et al. Present and future global distributions of the marine cyanobacteria *Prochlorococcus* and *Synechococcus*. **Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.**, v. 110, p. 9824–9829, 2013.

FLÜGEL, E. Microfacies of carbonate rocks. **Elsevier**, 2009

FLÜGEL, E. **Microfacies of Carbonate Rocks**. Springer, Berlin-Heidelberg, New York (2004), p. 976, 2004.

FOSTER, M. S. Rhodoliths: between rocks and soft places. **J. Phycol.**, v. 37, p. 659–667, 2001.

FRANCINI-FILHO, R. B. et al. Dynamics of coral reef benthic assemblages of the Abrolhos Bank, eastern Brazil: Inferences on natural and anthropogenic drivers. **Plos One**, v. 8, n. 1, p. e54260, 2013.

FRANCINI-FILHO, R. B.; MOURA, R. L. Dynamics of fish assemblages on coral reefs subjected to different management regimes in the Abrolhos Bank, eastern Brazil. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 18, n. 7, p. 1166-1179, 2008.

FRANCINI-FILHO, R. B. et al. Remote sensing, isotopic composition and metagenomics analyses revealed Doce River ore plume reached the southern Abrolhos Bank Reefs. **Science of the Total Environment**, 697(13), 134038, 2019.

FRANTZ, B. R.; FOSTER, M. S.; RIOSMENA-RODRIGUEZ, R. *Clathromorphum nereostratum* (Corallines, Rhodophyta): the oldest alga? **J Phycol.**, v. 41, p. 770–773, 2005.

FREITAS, C. M. et al. From Samarco in Mariana to Vale in Brumadinho: mining dam disasters and Public Health. **Cadernos De Saúde Publica**, v. 35, n. 5, 2019.

FREITAS, M. O.; MOURA, R. L.; FRANCINI-FILHO, R. B.; MINTE-VERA, C. V. Spawning patterns of commercially important reef fish (Lutjanidae and Serranidae) in the tropical western South Atlantic. **Scientia Marina**, v. 75, n. 1, p. 135-146, 2011.

FREITAS, M. O.; PREVIERO, M.; LEITE, J.R.; FRANCINI-FILHO, R.B.; MINTE-VERA, C.V.; MOURA, R.L. Age, growth, reproduction and management of Southwestern Atlantic's largest and endangered herbivorous reef fish, *Scarus trispinosus* Valenciennes, 1840. **PeerJ**, v. 7, e7459, 2019.

FUKAMI, H. et al. Geographic differences in species boundaries among members of the *Montastraea annularis* complex based on molecular and morphological markers. **Evolution**, v. 58, n. 2, p. 324-337, 2004.

GITZEN R. A. et al. Design and analysis of long-term ecological monitoring studies. **Cambridge Univ. Press**, 2012.

GOLDBERG, W. M. The biology of reefs and reef organisms. **University of Chicago Press**, 2013.

GOLDER ASSOCIATES LTDA. (GOLDER) 2016a. **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.

GOLDER ASSOCIATES LTDA. (GOLDER) 2016b. **Fundão Talings Dam Breach – Tailings and Sediments Geochemical Characterization Program - Phase I Results**. Submetido à Samarco Mineração S/A, 2016.

GOMES, C. A. et al. Feofíceas do litoral norte do Estado do Espírito Santo. **Ínsula** v. 19 (suplemento) p. 143-168, 1989.

GOMEZ, E. D. et al. Can coral cover be restored in the absence of natural recruitment and reef recovery? **Restoration Ecology**, v. 22, n. 2, p. 142-150, 2014.

GRAHAM, D. J.; MIDGLEY, N. G. Graphical representation of particle shape using triangular diagrams: an Excel spreadsheet method. **Earth Surface Processes Landforms.**, v. 25, p. 1473-1477, 2000.

GREEN, R. H., GREEN, R. M. Sampling design and statistical methods for environmental biologists. **John Wiley & Sons**, 1979.

GUIMARÃES, S. M. B. P.; AMADO-FILHO, G. M. A. Community of gelatinous rhodophytes in the sublittoral of southern Espírito Santo State, Brazil. **Bot. Mar.**, v. 51, p. 378-387, 2008.

GUIMARÃES, S. M. P. B. A revised checklist of benthic marine Rhodophyta from the state of Espírito Santo, Brazil. **Boletim do Instituto de Botânica**, v. 17, p. 145-194, 2006.

GUIMARÃES, S. M. P. B. Uma análise da diversidade da flora marinha bentônica do Estado do Espírito Santo, Brasil. **Hoehnea.**, v. 30, p. 11-19, 2003.

GUIRY M. D.; GUIRY, G. M. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 09 November 2019.

Guiry, M.D. & Guiry, G.M. *AlgaeBase*. **World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway**. 2019. Disponível em: <https://www.algaebase.org>

- HALL, N. S.; PAERL, H. W. Vertical migration patterns of phytoflagellates in relation to light and nutrient availability in a shallow microtidal estuary. **Marine Ecology Progress Series**, v. 425, p 1–19, 2011.
- HANSKI, I. A.; GAGGIOTTI, O. E.; GAGGIOTTI, O. F. Ecology, genetics and evolution of metapopulations. **Academic Press.**, p. 696, 2004.
- HARRINGTON, L. et al. Recognition and settlement substrata determine post-settlement survival in corals. **Ecology**, v. 85, p. 3428-3437, 2004.
- HARVEY, A.S.; WOELKERLING, W.J. A guide to nongeniculate coralline red algal (Corallinales, Rhodophyta) rhodolith identification. **Ciencias Marinas.**, v.33, p. 411-442, 2007.
- HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10706, 2017.
- HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 10706, 2017.
- HEIN, M. Y. et al. Coral restoration: Socio-ecological perspectives of benefits and limitations. **Biol. Cons.**, v. 229, p. 14-25, 2019.
- HENNIGE, S. J. et al. Photoacclimation, growth and distribution of massive coral species in clear and turbid waters. **Mar Ecol Prog Ser.**, v. 369, p. 77-88, 2008.
- HERNANDEZ-KANTUN, J. J. et al. Reassessment of branched *Lithophyllum* spp. (Corallinales, Rhodophyta) in the Caribbean Sea with global implications. **Phycologia**, v. 55, p. 619-639, 2016.
- HILL, M. O. Diversity and evenness: a unifying notation and its consequences. **Ecology**, v. 54, p. 427–473, 1973.
- HORTA, P. A. et al. Considerações sobre a distribuição e origem da flora de macroalgas marinhas brasileiras. **Hoehnea**, v. 28, p. 243-265, 2001.
- HUDSPITH, M.; REICHELDT-BRUSHETT, A.; HARRISON, P. L. Factors affecting the toxicity of trace metals to fertilization success in broadcast spawning marine invertebrates: A review. **Aquatic Toxicol.**, v. 184, p. 1-13, 2017.
- HUGHES, T. P. et al. Rising to the challenge of sustaining coral reef resilience: Review. **Trends Ecol. Evol.**, v. 25, p. 633-642, 2010.

IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) Plano de manejo: Parque Nacional Marinho dos Abrolhos/IBAMA FUNATURA. - Brasília; Aracruz Celulose S.A., p. 96; Ilust., 1991.

JEFFREY, S. M.; WRIGHT, S. W.; ZAPATA, M. Microalgal classes and their signature pigments. In: ROY, S.; LLEWELLYN, C. A.; EGELAND, E. S.; JOHNSEN, G. (org). **Phytoplankton Pigments: Characterization, Chemotaxonomy and Applications in Oceanography**, Cambridge University Press, p. 3-77, 2011.

JOHNSTON, E. L.; ROBERTS, D. A. Contaminants reduce the richness and evenness of marine communities: a review and meta-analysis. *Env. Pol.*, v. 157, n. 6, p. 1745-1752, 2009. KRITZER, J. P.; SALE, P. F. The future of metapopulation science in marine ecology. In: MARINE METAPOPOPULATIONS. ACADEMIC PRESS, p. 517-529, 2006.

JOHNSTON, E. L.; ROBERTS, D. A. Contaminants reduce the richness and evenness of marine communities: a review and meta-analysis. **Env. Pol.**, v. 157, n. 6, p. 1745-1752, 2009.

JONES, A. M. et al. A community change in the algal endosymbionts of a scleractinian coral following a natural bleaching event: field evidence of acclimatization. **Proc. Royal Soc. B: Biological Sciences**, v. 275, n. 1641, p. 1359-1365, 2008.

JONES, R. J. Testing the 'photoinhibition' model of coral bleaching using chemical inhibitors. **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, v. 284, p. 133-145, 2004.

JONES, R. J.; KERSWELL, A.P. Phytotoxicity of Photosystem II (PSII) herbicides to coral. **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, v. 261, p. 149 - 159, 2003.

KAWAMATA, S., et al. Importance of sedimentation for survival of canopy-forming furoid algae in urchin barrens. **J. Sea. Res.**, v. 66, p. 76-86, 2011.

KAWAMATA, S., et al. Sediment tolerance of *Sargassum* algae inhabiting sediment-covered rocky reefs. **Mar. Biol.**, v. 159, p. 723-733, 2012.

KEMP, D. W., et al. Community dynamics and physiology of *Symbiodinium* spp. before, during, and after a coral bleaching event. **Limnol. Oceanogr.**, v. 59, n. 3, p. 788-797, 2014.

KIKUCHI, R. K. P., et al. Rapid assessment of the Abrolhos reefs, eastern Brazil (Part 1: Stony corals and algae). **Atoll Research Bulletin**, v. 496, p. 172-187, 2003.

KIRCHMAN, D. L. **Microbial Ecology of the Oceans**. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 593p. 2008.

KLUGHAMMER, C. SCHREIBER, U. Complementary PS II quantum yields calculated from simple fluorescence parameters measured by PAM fluorometry and the Saturation Pulse method. **PAM Application Notes**, v. 1, p. 27 -35, 2008

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 and Geosciences.**, v. 32, n. 9, p. 1259–1269, 2006.

KRITZER, J. P.; SALE, P. F. **The future of metapopulation science in marine ecology.** In: MARINE METAPOPOPULATIONS. ACADEMIC PRESS, p. 517-529, 2006.

KU'ULEI, S. R. et al. Effectiveness of coral relocation as a mitigation strategy in Kāne 'ohe Bay, Hawai'i. **PeerJ**, v. 5, p. e3346, 2017.

LADD, M. C, BURKEPILE, D. E., SHANTZ, A. A. Near-term impacts of coral restoration on target species, coral reef community structure, and ecological processes. **Rest. Ecol.**, 2019.

LAJEUNESSE, T. C. et al. Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. **Current Biology**, v. 28, n. 16, p. 2570-2580, 2018.

LAJEUNESSE, T. C.; PINZÓN, J. H. Screening intragenomic rDNA for dominant variants can provide a consistent retrieval of evolutionarily persistent ITS (rDNA) sequences. **Mol. Phylogenet. Evol.**, v. 45, n. 1, p. 417-422, 2007.

LEBRATO, M. et al. Benthic calcifiers coexist with seawater-carbonate undersaturation at a global scale. **Global Biogeochemical Cycles.** v. 30, p. 1038-1053, 2016.

LEE, R. E. Phycology. Cambridge University Press, 4 ed., p. 560, 2008.

LEGENDRE, P.; ANDERSON, M. J. Distance-based redundancy analysis: testing multispecies responses in multifactorial ecological experiments. *Ecological Monograph*, 1999.

LELLYS, N. T.; MOURA, R. L.; BONALDO, R. M.; FRANCINI-FILHO, R. B.; GIBRAN, F. Z. Parrotfish functional morphology and bioerosion on SW Atlantic reefs. **Mar Ecol Prog Ser**, v. 629, p. 149–163, 2019.

LESSER, M. P. Coral bleaching: causes and mechanisms. In: *Coral reefs: an ecosystem in transition.* Springer, Dordrecht, 2011, p. 405 - 419.

LI, W. K. W. Cytometric diversity in marine ultraphytoplankton. **Limnology and Oceanography**, v. 42, n. 5, p. 874-880, 1997.

LINDENMAYER, D. B.; LIKENS, G. E. *Effective ecological monitoring.* CSIRO Publ., Melbourne, 2018.

- LINDENMAYER, D. Five things about long-term monitoring. **Decision Point**, v. 101, p. 12-15, 2017.
- LITTLER, D.S.; LITTLER, M.M. Caribbean reef plants: An identification guide to the reef plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico. **Washington: Offshore Graphics**, 2000.
- LIU, L. C. et al. Species diversity and molecular phylogeny of non-geniculate coralline algae (Corallinophycidae, Rhodophyta) from Taoyuan algal reefs in northern Taiwan, including *Crustaphytum* gen. nov. and three new species. **Journal of Applied Phycology**, v. 30, p. 3455-3469, 2018.
- LOYA, Y. et al. Coral bleaching: the winners and the losers. **Ecology letters**, v. 4, n. 2, p. 122-131, 2001.
- LUND, J.W.G.; KIPLING, C.; LE CREN, E.D. The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiologia*, v. 11, p. 143-170. 1958.
- LÜNING, K. **Seaweeds: their environment, biogeography, and ecophysiology**. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, p. 527, 1990.
- MAGRIS R. A. et al. A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil). **Science of the Total Environment**. v. 659, p. 828-40, 2019.
- MAGURRAN, A. E. et al. Long-term datasets in biodiversity research and monitoring: assessing change in ecological communities through time. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 25, n. 10, p. 574-582, 2010.
- MANEVELDT, G.W.; VAN DER MERWE, E. *Heydrichia cerasina* sp. nov. (Sporolithales, Corallinophycidae, Rhodophyta) from the southernmost tip of Africa. **Phycologia**., v. 51, p. 11–21, 2012.
- MANLY, B.; ALBERTO, F. J.; NAVARRO, J. A. **Multivariate statistical methods: a primer**. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- MARIE, D. Enumeration and cell cycle analysis of natural populations of marine picoplankton by flow cytometry using the nucleic acid stain SYBR Green I. **Appl. Environ. Microbiol.** v. 63, p. 186–193, 1997.
- MARIE, D.; RIGAUT-JALABERT, F.; VAULOT, D. An improved protocol for flow cytometry analysis of phytoplankton cultures and natural samples. **Cytometry**, v. 85, p. 962–968, 2014.

MARINS, B. V. et al. Seasonal changes in population structure of the tropical deep-water kelp *Laminaria abyssalis*. **Phycology Research**, v. 62, p. 55– 62, 2014.

MARINS, B. V. et al. Subtidal benthic marine algae of the Todos os Santos Bay, Bahia State, **Brazil**. **Oecol. Bras.**, v. 12, n. 2, p. 229-242, 2008.

MARINS, B. V. et al. Taxonomy of the southwestern Atlantic endemic kelp: *Laminaria abyssalis* and *Laminaria brasiliensis* (Phaeophyceae, Laminariales) are not different species. **Phycol. Res.** v. 60, p. 51-60, 2012.

MARTA-ALMEIDA, M. et al. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine Pollution Bulletin*, v. 112 n. 1-2, p. 359-364, 2016.

MAZZEI, E. F. et al. Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Mar. Poll. Bull.*, v. 114, n. 1, p. 123-33, 2017.

MCCORMICK, P. V.; CAIRNS, J. Algae as indicators of environmental change. *J. Appl. Phycol.*, v. 6, n. 5-6, p.509-526, 1994.

MCCOY S. J.; KAMENOS N. A. Coralline algae (Rhodophyta) in a changing world: integrating ecological, physiological, and geochemical responses to global change. **J. Phycol.**, v. 51, p. 6-24, 2015.

MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized Linear Models**, Second Edition. Chapman and Hall/CRC. 1989.

MCDONALD-MADDEN, E. et al. Monitoring does not always count. **Trends Ecol. Evol.**, v. 25, n. 10, p. 547-50, 2010.

MCCLENNON, A. L.; DITULLIO, G. R. Effects of increased temperature on dimethylsulfoniopropionate (DMSP) concentration and methionine synthase activity in *Symbiodinium microadriaticum*. **Biogeochemistry**, v. 110, n. 1-3, p. 17-29, 2012.

MINNHAGEN S., et al. Chloroplast DNA content in Dinophysis (Dinophyceae) from different cell cycle stages is consistent with kleptoplasty. **Environ Microbiol.**, v. 10, n. 9, p. 2411-7, 2008.

MIOT DA SILVA, G. **Efeito do estado de equilíbrio em planta na sedimentologia de praias desenvolvidas entre promontórios**. 134p. 2002. Dissertação (Mestrado em Geociências) -Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MIRANDA, L. B. Análise de massa de água de plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastiao (SP). São Paulo. Tese (Livre Docência) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 194 pp. 1982.

MORSE D. E.; MORSE A. N. C. Enzymatic characterisation of the morphogen recognized by *Agaricia humilis* (scleratinian coral) larvae. **The Biological Bulletin**, v. 181, p. 104–122, 1991.

MOURA R. L. Brazilian reefs as priority areas for biodiversity conservation in the Atlantic Ocean." Proceeding of the 9th International Coral Reef Symposium, Bali, Indonesia. Vol. 2, 2002.

MOURA R. L., et al. Spatial patterns of benthic megahabitats and conservation planning in the Abrolhos Bank. **Cont. Shelf Res.**, v. 70, p. 109-17, 2013.

MOURA, R. et al. An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science Advances**. 2. e1501252. 10.1126/sciadv.1501252, 2016.

NASSAR C. A. G., et al. The effect of iron-ore particles on the metal content of the brown alga *Padina gymnospora* (Espírito Santo Bay, Brazil). **Env. Pol.**, v. 123, p. 301–305, 2003.

NASSAR C. A. G.; LAVRADO H. P.; YONESHIGUE-VALENTIN, Y. Effects of iron-ore particles on propagule release, growth and photosynthetic performance of *Sargassum vulgare* C. Agardh (Phaeophyta, Fucales). **Rev. Bras. Bot.**, v. 25, p. 459-468, 2002.

NELSON W. A. et al. Rhodolith beds in Northern New Zealand: Characterisation of associated biodiversity and vulnerability to environmental stressors. **New Zealand Aquatic Environment and Biodiversity Report**, v. 99, p. 106, 2012.

NEVEUX, J.; LANTOINE, F. Spectrofluorometric assay of chlorophylls and phaeopigments using the least squares approximation technique. *Deep-Sea Res. I*, v. 40, p. 1747-1765, 1993.

NOT, Fabrice et al. Diversity and ecology of eukaryotic marine phytoplankton. In: *Advances in Botanical Research*. Academic Press, 2012. p. 1-53.

NUNES, J. M. C.; ANDRADE, N. A. Bancos de Rodolito do Litoral Norte da Bahia, Brasil: Aspectos Taxonômicos e Ecológicos. **Novas Edições Acadêmicas**, p. 135, 2017.

OLIVEIRA-FILHO, E. C. Deep water marine algae from Espírito Santo State (Brazil). **Bol. Bot. Univ. São Paulo**, v. 4, p. 73–80, 1976.

OLIVEIRA-FILHO, E. C.; QUÊGE, N. O gênero *Laminaria* no Brasil. Ocorrência e potencialidades. **Publicações do Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo**, v. 1107, p. 1-18, 1978.

OLIVEIRA-NEVES, A. C. et al. Neglect of ecosystems services by mining, and the worst environmental disaster in Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 1, n. 14, p. 24-27, 2016.

PARK C. S.; HWANG E. K. An investigation of the relationship between sediment particles size and development of green algal mats (*Ulva prolifera*) on the intertidal flats of Muan. Korea. **J. Appl. Phys.**, v. 23, p. 515–522, 2010.

PARTENSKY, F.; HESS, W. R.; VAULOT, D. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic prokaryote of global significance. **Microbiol. Mol Biol. Rev.**, v.63(1), p. 106-27, 1999.

PEREIRA-FILHO, G. H. et al. Sponges and fish facilitate succession from rhodolith beds to reefs. **Bulletin of Marine Science**, v. 91, n.1, p. 45-46, 2015.

PERRY, C. T. Morphology and occurrence of rhodoliths in siliciclastic, intertidal environments from a high latitude reef setting, southern Mozambique. **Marine Geology.**, v. 214, p. 143-161, 2005.

PHILIPP, E.; FABRICIUS, K. Photophysiological stress in scleractinian corals in response to short-term sedimentation. **JEMBE**, v. 287, p. 57-78, 2003.

PINHEIRO, H. T. et al. South-western Atlantic reef fishes: Zoogeographical patterns and ecological drivers reveal a secondary biodiversity centre in the Atlantic Ocean. **Diversity and Distributions**, 24(7), 951-965, 2018.

PIOVÁR, J. et al. Influence of long-term exposure to copper on the lichen photobiont *Trebouxia erici* and the free-living algae *Scenedesmus quadricauda*. **Plant Growth Regulation**, v. 63, n. 1, p. 81-88, 2011

POCHON X. et al. High genetic diversity and relative specificity among *Symbiodinium*-like endosymbiotic dinoflagellates in soritid foraminiferans. **Mar. Biol.** v. 139, p. 1069-1078, 2001.

PRICE, N. N. et al. Diel Variability in Seawater pH Relates to Calcification and Benthic Community Structure on Coral Reefs. **Plos One.** v. 7, n 8: e43843, 2012.

PROPS R. et al. Measuring the biodiversity of microbial communities by flow cytometry. **Methods Ecol. Evol.** v. 7, p. 1376-1385, 2016.

QIANG, X. et al. Greigite formed in early Pleistocene lacustrine sediments from the Heqing Basin, southwest China, and its paleoenvironmental implications. **Journal of Asian Earth Sciences**, v.156, p. 256-264, 2018.

QUARESMA, V. S. et al. Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. **Braz. J. Geo.**, v. 45, p. 635-644, 2015.

QUIGLEY, K.M.; WILLIS, B.L.; BAY, L.K. Maternal effects and *Symbiodinium* community composition drive differential patterns in juvenile survival in the coral *Acropora tenuis*. **Royal Society Open Science**, v. 3, p. e160471, 2016.

R Development Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, 2018.

RALPH, P. J.; GADEMANN, R. Rapid light curves: a powerful tool to assess photosynthetic activity. **Aquat Bot.**, v. 82, p. 222–237, 2005.

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

RASSER, M. Facies and palaeoecology of rhodoliths and acervulinid macroids in the Eocene of the Krappfeld (Austria). **Beitr. Paläont.**, v. 19, p. 191-217, 1994.

RASSER, M., PILLER, W. Depth distribution of calcareous encrusting associations in the Northern Red Sea (Safaga, Egypt) and their geological implications. **Proceedings of the 8th ICRS-Meeting 1**, 1997.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biology of Plants**. New York, W. H. FREEMAN and Co, 2005.

REIS, V. M. et al. Carbonate production by benthic communities on shallow coralgall reefs of Abrolhos Bank, Brazil. **PLoS One**, v. 11, n. 4, p. e 0154417, 2016.

REYNOLDS, C. S. The Ecology of Phytoplankton (Ecology, Biodiversity and Conservation) 1a ed. **Cambridge University Press**, p. 552, 2006.

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

RINKEVICH, B. Conservation of coral reefs through active restoration measures: recent approaches and last decade progress. **Env. Sci. Technol.**, v. 39, n.12, p. 4333-4342, 2005.

RIOSMENA-RODRIGUEZ, R., WOELKERLING, W., FOSTER, M.. Taxonomic reassessment of rhodolith-forming species of *Lithophyllum* (Corallinales, Rhodophyta) in the Gulf of California, Mexico. **Phycologia**. v. 38, p. 401-417, 1999.

ROBERTS, R. A review of settlement cues for larval abalone (*Haliotis* spp.). **Journal of Shellfish Research**, v. 20, p. 571–586, 2001.

RONQUIST, F.; HUELSENBECK, J. P. MrBayes 3: Bayesian phylogenetic inference under mixed models. **Bioinformatics**, v. 19, p. 1572-1574, 2003.

ROVIRA, D. P. T., GOMES, M. P., LONGO, G. O. Underwater valley at the continental shelf structures benthic and fish assemblages of biogenic reefs. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 224 (2019): 245-252, 2019.

RUDORFF, N. et al. Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the Doce River plume off the eastern Brazilian coast. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 145, p. 349-361, 2018.

SANDERS, J. G. Arsenic geochemistry in Chesapeake Bay: dependence upon anthropogenic inputs and phytoplankton species composition. **Mar. Chem.**, v. 17, n. 4, p. 329-340, 1985.

SAUNDERS, G. W. Applying DNA barcoding to red macroalgae: a preliminary appraisal holds promise for future applications. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences.**, v. 360, n. 1462, p. 1879–88, 2005.

SCHERNER, F. et al. Coastal urbanization leads to remarkable seaweed species loss and community shifts along the SW Atlantic. **Mar. Poll. Bull.**, v. 76, p. 106–115, 2013.

SCHLOSS, P. D. et al. Open-Source, Platform-Independent, Community-Supported Software for Describing and Comparing Microbial Communities. **Appl. Environ. Microb.**, v. 75, n. 23, p. 7537-7541, 2009.

SCHMITT, R. J., OSENBURG, C. W. **Detecting ecological impacts: concepts and applications in coastal habitats**. Elsevier, 1996.

SCIBERRAS M. et al. Habitat structure and biological characteristics of a maerl bed off the northeastern coast of the Maltese Islands (central Mediterranean). **Marine Biodiversity**, v. 39, p. 251-264, 2009.

SEGAL, B. et al. Potential impacts of polar fronts on sedimentation processes at Abrolhos coral reef (South-West Atlantic Ocean/Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 28, n. 4-5, p. 533-544, 2008.

SEGAL, B.; CASTRO, C. B. Coral Community structure and sedimentation at different distances from the coast of the Abrolhos Bank, Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 59, n. 2, p. 119-129, 2011.

SEGURA, F. R. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, 2016.

SFRISO, A.; MARCOMINI, A. Decline of *Ulva* growth in the lagoon of Venice. **Bioresource Technology**, v. 58, n. 3, p. 299-307, 1996.

SIERACKI, C.K.; SIERACKI, M.E.; YENTSCH, C.S. An Imaging-in-flow system for automated analysis of marine microplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* v. 168, p. 285-296, 1998.

SILVEIRA C. B.; SILVA-LIMA, A. W.; FRANCINI-FILHO, R. B.; MARQUES, J. S. M.; ALMEIDA, M. G.; THOMPSON, C. C.; REZENDE, C. E.; PARANHOS, R.; MOURA, R. L.; SALOMON, P. S.; THOMPSON, F. L. Microbial and sponge loops modify fish production in phase-shifting coral reefs. **Environmental Microbiology**, v. 17, n. 10, p. 3832-3846, 2015.

SISSINI, M. N. et al. *Mesophyllum erubescens* (Corallinales, Rhodophyta): so many species in one epithet. **Phytotaxa**, v. 190, p. 299-319, 2014.

SMITH, A. M. Paleoenvironmental interpretation using bryozoans: a review. **Marine Paleoenvironmental Analysis from Fossils, Geological Society Special Publication**, v. 83, p. 231-243, 1995.

SOMERFIELD, P. J. et al. Soft sediment meiofaunal community structure in relation to a long-term heavy metal gradient in the Fal estuary system. **Mar. Ecol. Prog. Ser.**, v. 105, p. 79-88, 1994.

SOSIK, Heidi M.; OLSON, Robert J.; ARMBRUST, E. Virginia. Flow cytometry in phytoplankton research. In: **Chlorophyll a fluorescence in aquatic sciences: Methods and applications**. Springer, Dordrecht, 2010. p. 171-185.

SOULE, D. F. et al. Taxonomic atlas of the benthic fauna of the Santa Maria Basin and western Santa Barbara Channel. In: **Volume 3 – The Bryozoa**. Santa Barbara: Santa Barbara Museum of Natural History, p. 1-344, 1995.

SOULE, D. F.; SOULE, J. D. Species groups in Watersiporidae. Bryozoan 1974. **Documents des Laboratoires de Géologie de la Faculté des Science de Lyon**, v. 3, n. 2, p. 299–309, 1975.

SOURNIA, A. Atlas du phytoplancton marin. Volume I: Introduction, Cyanophycées, Dictyochophycées, Dinophycées et Raphidiophycées. Éditions du Centre National de La Recherche Scientifique, Paris. 1986.

SPALDING, M. et al. Mapping the global value and distribution of coral reef tourism. **Mar. Policy**, v. 82, p. 104-113, 2017.

SPELLERBERG, I. F. **Monitoring ecological change**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005.

STAT M. et al. Variation in *Symbiodinium* ITS2 sequence assemblages among coral colonies. *PLoS One* v. 6, n. 1, p. e15854, 2011.

STELLER, D. L. et al. Rhodolith bed diversity in the Gulf of California: the importance of rhodolith structure and consequences of disturbance. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 13, p. S5-S20, 2003.

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

STEWART-OATEN, A. et al. Assessing effects of unreplicated perturbations: no simple solutions. **Ecology**, v. 73, n. 4, p. 1396-1404, 1992.

STEWART-OATEN, A. et al. Environmental impact assessment: "Pseudoreplication" in time?. **Ecology**, v. 67, n. 4, p. 929-940, 1986.

STEWART-OATEN, A. Goals in environmental monitoring. In: SCHMITT R. J., OSENBURG C. W. (eds). **Detecting ecological impacts: concepts and applications in coastal habitats**. Elsevier, 1996.

STOECKER, D. K. et al. Mixotrophy in the Marine Plankton. **Annual Review of Marine Science**, v. 9, n. 1, p. 311-335, 2017.

SUGGETT, D. J. et al. Functional diversity of photobiological traits within the genus *Symbiodinium* appears to be governed by the interaction of cell size with cladal designation. **New Phytologist**, v. 208, p. 370-381, 2015.

TÂMEGA, F. T. S. et al. Deep-water rhodolith bed from central Brazilian continental shelf, Campos Basin: Coralline algal and faunal taxonomic composition. **J. Coral Reef Stud.**, v. 16, p. 21-31, 2014.

TAYLOR, P. Bryozoans and palaeoenvironmental interpretation. **Journal of the Palaeontological Society of India**. v. 50. p.1-11, 2005.

TEIXEIRA, C. D. et al. Sustained mass coral bleaching (2016–2017) in Brazilian turbid-zone reefs: taxonomic, crossshelf and habitat-related trends. **Coral Reefs**, v. 38, p. 801-813, 2019.

TEIXEIRA, J. B.; MOURA, R. L.; MILLS, M.; KLEIN, C.; BROWN, C. J.; ADAMS, V. M.; GRANTHAM, H.; WATTS, M.; FARIA, D.; AMADO-FILHO, G. M.; BASTOS, A. C.; LOURIVAL, R.; POSSINGHAM, H. P. A habitat-based approach to predict impacts of marine protected areas on fishers. **Conservation Biology**, v. 32, n. 5, p. 1096–1106, 2018.

TITSCHACK, J.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J. Magnesium quantification in calcites [(Ca,Mg)CO<sub>3</sub>] by Rietveld-based XRD analysis: Revisiting a well-established method. **American mineralogist.**, v. 96, n. 7, p. 1028–1038, 2011.

TOLLER, W. W. et al. Repopulation of zooxanthellae in the Caribbean corals *Montastraea annularis* and *M. faveolata* following experimental and disease-associated bleaching. **The Biological Bulletin**, v. 201, n. 3, p. 360-373, 2001.

TOMAS, C.R. Identifying Marine Phytoplankton. San Diego: Academic Press, 1997.

TORTOLERO-LANGARICA, J. A. et al. Accelerated recovery of calcium carbonate production in coral reefs using low-tech ecological restoration. **Ecol. Engin.**, v. 128, p. 89-97, 2019.

UNDERWOOD, A. J. Beyond BACI: experimental designs for detecting human environmental impacts on temporal variations in natural populations. **Mar. Freshw. Res.**, v. 42, n. 5, p. 569-587, 1991.

UNDERWOOD, A. J. Beyond BACI: the detection of environmental impacts on populations in the real, but variable, world. **Journal of Exp. Mar. Biol. Ecol.**, v. 161, n. 2, p. 145-178, 1992.

UTERMÖHL, H. Zur vervollkommung der quantitativen phytoplankton methodik. Mitt. Int. Ver. Limnol. v. 9, p. 1-38, 1958.

VALE, N. F. L. et al. Structure and composition of rhodoliths from the Amazon River mouth. **Journal of South American Earth Science**, v. 84, p. 149-159, 2018.

VAN DER MERWE, E. **Systematics of the non-geniculate coralline red algae from the South African south coast**. 344p. 2014. Tese (Doutorado) – University of the Western Cape, Bellville.

VANZAN M. et al. Picoplankton and nanoplankton variability in an Antarctic shallow coastal zone (Admiralty Bay) during the austral summer of 2010/2011. *Polar Biol.* v.38, p. 1-18, 2015.

VILLAS-BÔAS, A. B. et al.. Rhodolith-forming Species of *Lithophyllum* (Corallinales; Rhodophyta) from Espírito Santo State, Brazil, Including the Description of *L. depressum* sp. nov. **Phycologia**, v. 48, p. 237-248, 2009.

WANGENSTEEN, O. S.; TURON, X. Metabarcoding techniques for assessing biodiversity of marine animal forests. **Marine Animal Forests**, p. 1–24, 2017.

WATANABE, H. et al. Effects of sediment influx on the settlement and survival of canopy-forming macrophytes. **Scientific Reports**, n. 6, p. 18677, 2016.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal of Geology**, v. 30, p. 377–392, 1922.

WESSLANDER, K. et al. Observed carbon dioxide and oxygen dynamics in a Baltic Sea coastal region. **Journal of Marine Systems.**, v. 86, p. 1–9, 2011.

WILLIAMS, S. L. et al. Large-scale coral reef rehabilitation after blast fishing in Indonesia. **Rest. Ecol.**, v. 27, n. 2, p. 447-56, 2019.

WILLIS, K. J. et al. Biodiversity baselines, thresholds and resilience: testing predictions and assumptions using palaeoecological data. **Trends Ecol. Evol.**, v. 25, n. 10, p. 583-591, 2010.

WILLIS, K. J. et al. Biodiversity baselines, thresholds and resilience: testing predictions and assumptions using palaeoecological data. **Trends Ecol. Evol.**, v. 25, n. 10, p. 583-591, 2010.

WILSON, S.; BLAKE, C.; BERGES, J. A.; MAGGS, C. A. Environmental tolerances of free-living coralline algae (Maerl): implications for European marine conservation. **Biol. Conserv.**, v. 120, p. 279-289, 2004.

WOELKERLING, W.J. The coralline red algae: an analysis of the genera and subfamilies of nongeniculate Corallinaceae. **British Museum (Natural History), London and Oxford University Press**, p. 268, 1988.

WOELKERLING, W.J.; IRVINE, L.M.; HARVEY, A. Growth-forms in non-geniculate coralline red algae (Corallinales, Rhodophyta). **Australian Systematic Botany.**, v. 6, p. 277-293, 1993.

WOODARD, H. H. The Geology and Paragenesis of the Lord Hill pegmatite, Stoneham, Maine. **American Mineralogist**, v. 36, p. 869-883, 1951.

WOODLEY, C. M. et al. Diseases of Corals. New Jersey: John Wiley & Sons (Inc. Blackwell), 2016.

WULFF, J. L.; BUSS, L. W. Do sponges help hold coral reefs together? **Nature**, v. 281, n. 5731, p. 474-475, 1979.

YODER, H. S.; EUGSTER, H. P. Synthetic and natural muscovites. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 8, p. 225-280, 1955.

YONESHIGUE-VALENTIN, Y.; GESTINARI, L. M. S.; FERNANDES, D. R. P. **Macroalgas**. In: Biodiversidade bentônica da região central da Zona Econômica Exclusiva brasileira. LAVRADO H. P.; IGNACIO B. L. Rio de Janeiro: Museu Nacional, 2006.

YOON, H. S.; HACKETT, J. D.; BHATTACHARYA, D. A single origin of the peridinin- and fucoxanthin-containing plastids in dinoflagellates through tertiary endosymbiosis. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.**, v. 99, n. 18, p. 11724–11729, 2002.

ZHOU, Q. et al. Toxicological responses of the hard clam *Meretrix meretrix* exposed to excess dissolved iron or challenged by *Vibrio parahaemolyticus*. **Aquat. Toxicol.**, v. 156, p. 240–247, 2014.