



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

ORIONE ÁLVARES DA SILVA

A INFLUÊNCIA DOS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NA
HETEROGENEIDADE DE HABITATS E ESPACIALIZAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
BENTÔNICA

Recife
2020

ORIONE ÁLVARES DA SILVA

A INFLUÊNCIA DOS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NA
HETEROGENEIDADE DE HABITATS E ESPACIALIZAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
BENTÔNICA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco em parcial cumprimento dos requisitos para o grau de Doutor em Oceanografia.

Área de concentração: Oceanografia Abiótica.

Orientador: Prof. Dr. Marius Nils Müller.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586i Silva, Orione Álvares da.
A influência dos sedimentos da formação barreiras na heterogeneidade de habitats e espacialização da biodiversidade bentônica / Orione Álvares da Silva. - 2020.
135 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marius Nils Müller.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2020.
Inclui Referências.

1. Oceanografia. 2. Neotectônica. 3. Shelf Valley. 4. Geomorfometria. 5. Sedimento. 6. Coral. 7. Nível do mar. I. Müller, Marius Nils. (Orientador). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.) BCTG/2020-66

ORIONE ÁLVARES DA SILVA

A INFLUÊNCIA DOS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO BARREIRAS NA
HETEROGENEIDADE DE HABITATS E ESPACIALIZAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
BENTÔNICA

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco em parcial cumprimento dos requisitos para o grau de Doutor em Oceanografia.

Aprovada em: 07/02/2020

Prof. Dr. Marius Nils Müller (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Sigrid Neumann Leitão (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ralf Schwamborn (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jefferson Tavares Cruz Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Virgínio Henrique de Miranda Lopes Neumann (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedicada a
Hēphaistos e seu martelo

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marius Nils Müller pela orientação segura, competente e interdisciplinar.

Aos Professores do Departamento de Geologia da UFPE, José Antônio Barbosa, Osvaldo José Correia Filho, Jefferson Oliveira, João Aduino de Souza Neto, Edval Santos e a equipe do Laboratório GEOQUANTT/UFPE que pacientemente me guiaram, através de tantos processos geológicos.

Ao Prof. Dr. Alexandre D'Andrea e a equipe do Laboratório de Física dos Solos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, pelo imprescindível apoio e orientação nas análises granulométricas dos sedimentos marinhos.

A Aicá Diving e a Michel Russi, meu dupla de mergulho técnico TRIMIX, por todo o suporte operacional nos nossos longos mergulhos profundos nos Shelf Valleys. Seu entusiasmo, competência e interesse pelas ciências marinhas estão revelados em todas as suas fotos nos Shelf Valleys, que ilustram este trabalho.

A Mar Aberto Dive Center pelo suporte operacional nos mergulhos com ar e NITROX, e pela cessão da embarcação Jobson, capitaneada pelo Mestre Ninho, para a execução das expedições oceanográficas de coleta de dados.

Aos Professores do Departamento de Oceanografia da UFPE, Tereza Araújo e Ralf Schwamborn por todo o apoio durante o curso e pelas excelentes discussões técnicas.

A pesquisadora Pamela Stevens que fez um criterioso gerenciamento da base de dados, e ao Professor George Santos, da Universidade Federal do Cariri, pela identificação dos principais grupos de esponjas na área de estudo.

A Fundação Grupo Boticário de Proteção à Natureza (grant number 1044-20152) pelo financiamento desta pesquisa. O gerenciamento do Projeto ficou integralmente sob a competência do Professor Dr. Bráulio Almeida Santos da Universidade Federal da Paraíba, que também participou de todas as expedições oceanográficas para a coleta de sedimentos marinhos e obtenção de dados batimétricos.

Ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – Ministério do Meio Ambiente, que me concedeu licença integral para frequentar o curso de doutorado.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

A análise de dados multivariados e multiescalares em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) possibilita investigar os complexos processos ecológicos e evolutivos associados aos diversos níveis da biosfera. A presente Tese, investigou as possíveis interações entre os sedimentos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras com a geobiodiversidade bentônica da plataforma continental do Estado da Paraíba. O método integrou em um SIG dados biológicos, sedimentares, batimétricos, geomagnéticos e sísmicos para executar um fluxo de análises geoestatísticas e geomorfométricas em múltiplas escalas espaciais. O mapeamento da plataforma continental em macroescala ($> 50 \text{ km}^2$) abrangeu 2.538 km^2 , que revelou a existência de 6 tipos de estruturas bentônicas: *Flat Plains*, *Incised Valley*, *Flat Ridge Tops*, *Rock Outcrop Highs*, *Pinnacles on Valley* e *Local Pinnacles*. A modelagem espacial em meso e microescala ($< 50 \text{ km}^2$) e a aplicação do sistema CMECS - Marine Ecological Classification Standard, indicaram a existência de 6 tipos do *Geoform Component*, 9 tipos do *Substrate Component* e mais de 50 tipos de comunidades biológicas distribuídas em 7 grupos do *Biotic Component*. No *Coastal Area Subsystem*, as geoformas *Pavement Area*, *Tidal Inlet* e *Linear Coral Reef* constituíram um complexo e largo geohabitat, que foi diretamente influenciado pelos sedimentos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras. A *Fine Unconsolidated Substrate Subclass*, de origem geológica continental, apresentou tendência de distribuição orientada na direção NNE – SSW, em ângulo obtuso com a direção de distribuição da fração carbonato, e estruturou habitats em áreas de recifes mesofóticos próximas a zona de quebra da plataforma continental. Na *Offshore Area*, entre 30 e 75 metros de profundidade, a gênese e a estrutura do *Geoform Component*, representada por dois *Shelf Valleys*, foram controladas por processos neotectônicos, com estreito paralelismo aos processos morfotectônicos que caracterizaram a Formação Barreiras no continente. Esta pesquisa concluiu que a distribuição espacial da geobiodiversidade bentônica foi controlada pelo regime tectônico transcorrente regional e pelos sedimentos erodidos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras que foram, posteriormente, redepositados na plataforma continental. Os métodos apresentados e os resultados alcançados, contribuem para futuras investigações interdisciplinares da geobiodiversidade marinha na região tropical.

Palavras-chave: Neotectônica. Shelf Valley. Geomorfometria. Sedimento. Coral. Nível do mar.

ABSTRACT

The analysis of multivariate and multiscale data in the GIS (Geographic Information System) environment facilitates the investigation of complex ecological and evolutionary processes associated with the multiple levels of the biosphere. Here, a consistent georeferenced information system, structured on the ArcGis platform, was applied to investigate the possible interactions between the Barreiras/Post-Barreiras Formation sediments and the geobiodiversity of the continental shelf of the State of Paraíba, Brazil. The method integrated biological, sedimentary, bathymetric, geomagnetic and seismic data to perform a geostatistical and geomorphometric analysis on multiple spatial scales. The macro-scale ($> 50 \text{ km}^2$) mapping of the continental shelf covered $2,538 \text{ km}^2$ and revealed six types of benthic structures. The spatial modeling at the meso and micro scale ($< 50 \text{ km}^2$) together with the application of the CMECS - Marine Ecological Classification Standard indicated the existence of 6 Geofom Component types, 9 Substrate Component types and more than 70 biological community types distributed in 7 Biotic Component groups. In the Coastal Area Subsystem, the Pavement Area, Tidal Inlet and Linear Coral Reef geofoms constituted a complex and wide geohabitat, which was directly influenced by the sedimentary processes of the Barreiras/Post-Barreiras Formation. The Unconsolidated Mineral Substrate class of continental geological origin indicated a NNE - SSW distribution direction trend in an obtuse angle to the carbonate fraction distribution direction and structured habitats of the mesophotic reef areas near the shelf break zone. In the Offshore Area between 30 and 75 meters depth, the genesis and structure of the Geofom Component, represented by two Shelf Valleys, were controlled by neotectonic processes with a narrow parallelism to the morphotectonic processes that characterized the Barreiras Formation of the continent. This research concluded that the spatial geobiodiversity distribution is controlled by the regional tectonic regime and the eroded sediments of the Barreiras/Post-Barreiras Formation that were subsequently redeposited on the continental shelf. The presented methods and the achieved results give significant contributions to the scientific research on the interdisciplinary investigations of marine geobiodiversity in the tropical regions.

Keywords: Neotectonic. Shelf Valley. Geomorphometry. Sediment. Coral. Sea level.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	Obtenção de dados batimétricos	22
3.2	Classificação das estruturas bentônicas em macroescala	23
3.3	Classificação das zonas bentônicas em mesoescala	25
3.4	Dados geomagnéticos e sísmicos	26
3.5	Análise dos atributos do terreno em mesoescala	28
3.6	Dados geofísicos em microescala	29
3.7	Coleta de sedimentos	29
3.8	Processamento das amostras de sedimentos	30
3.9	Análise granulométrica dos sedimentos	31
3.10	Análises espaciais dos sedimentos	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	Geomorfometria da plataforma continental	37
4.2	Geohabitats marinhos	44
4.3	Análise da distribuição geográfica e de padrões espaciais	91
5	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO

Cientistas continuam revisitando as antigas trilhas percorridas pelos Naturalistas, até mesmo em uma época em que a humanidade está próxima de realizar a sua mais longa viagem interplanetária. Diversos grupos de cientistas na Europa, Ásia e Américas estão aderindo a Visão de Humboldt da Natureza, que objetiva promover o aumento da abordagem científica integrativa em oposição a uma ciência monotônica e pouco interdisciplinar.

Alexander Von Humboldt, naturalista e explorador, viajou extensivamente produzindo coleções zoo-botânicas e de minerais, além de realizar importantes observações geológicas, oceanográficas e astronômicas. Suas contribuições levaram a fundação de estudos geomagnéticos, monitoramento meteorológico e da moderna biogeografia, além de ser a primeira pessoa a pensar e discutir sobre as mudanças climáticas induzidas por humanos. Na visão de Humboldt, a natureza está interconectada em escala global determinando padrões que nunca poderiam ser entendidos em fatias ou pedaços. Os princípios fundamentais de sua abordagem científica influenciaram Charles Darwin e foram baseados na importância da observação, na interrelação de todas as ciências físicas e no uso preferencial de métodos quantitativos para coletar dados. Na sua obra *Kosmos* (palavra ressuscitada do Grego antigo), um tratado escrito em multi-volumes, Humboldt unificou diversos ramos do conhecimento científico e, desta forma, foi comparado a Aristóteles. Este notável filósofo grego foi fundador de uma escola denominada Liceu, onde as pesquisas interdisciplinares fundamentavam a formação acadêmica.

Atualmente, a expansão da visão de Humboldt tem levado a uma nova abordagem sistemática da história natural denominada Geobiodiversidade. Nela está implícito o conceito que os padrões dinâmicos da biodiversidade estão alicerçados na complexidade morfológica e topográfica da paisagem, bem como na quantidade e na sazonalidade energética dos ecossistemas, pois este conjunto de fatores tem um papel chave para a diversidade e qualidade de habitats em múltiplas escalas. A aplicação desta nova abordagem tem recebido atenção crescente na última década, pois tornou-se necessário adicionar o regime de perturbação antrópica ao fluxo evolutivo natural das biotas, para prever e gerir os futuros desafios da sustentabilidade ambiental.

A Terra tem 4,6 bilhões de anos e os processos geológicos estão moldando continuamente a sua superfície. Na mitologia Grega, estes processos eram atribuídos a Hēphaistos (em Grego) ou Hephaestus (em Latim), o deus ferreiro, pois, enquanto mantinha suas forjas aquecidas,

dirigia a atividade dos vulcões e combinava os minerais. Na Escala Geológica do Tempo, o éon Hadeano (Hades, é tio de Hēphaistos) é a base na escala fundamental para expressar a história da Terra. Já no Archeano (~3 bilhões de anos), estruturas orgânicas estavam em desenvolvimento no mar e marcaram o início da vida na Terra. As plantas vasculares somente ocuparam as porções emersas a partir da metade do Siluriano (~430 Ma), e deram início aos ecossistemas terrestres mais complexos. Subsequentemente, a interação entre ecossistemas marinhos e terrestres tornou-se parte central da evolução de toda a biosfera e do estabelecimento da geobiodiversidade global. Todo este processo dinâmico e interativo deixou notáveis registros na Escala Geológica do Tempo, indicados pelos grandes eventos macroevolutivos e pelas mudanças biogeográficas, os quais foram permeados por intrigantes ciclos de extinções em massa seguidos por radiação explosiva.

A geobiodiversidade foi moldada continuamente, através do tempo geológico, respondendo a perturbações físicas ao ambiente e a ação da seleção natural. Os registros cronoestratigráficos da Terra, mostram que seus ecossistemas têm alta resiliência a perturbações extremas. Mudanças ambientais drásticas em escala global foram circunstanciadas pelas variações no nível eustático dos oceanos e pela reconfiguração continental das placas tectônicas. Com isso, períodos de vulcanismo intenso e glaciações caracterizaram os períodos Neoproterozóico – Cambriano, Permiano – Triássico e Cretáceo – Paleogene. Contudo, a resiliência dos ecossistemas da Terra iria enfrentar um novo grande desafio vindo do processo evolutivo dos mamíferos no Plioceno – Pleistoceno: o gênero *Homo*.

O clima global e os ciclos biogeoquímicos da Terra nunca haviam experimentado um desequilíbrio intenso causado por uma única espécie. Então, em 2016, a *Subcommission on Quaternary Stratigraphy*, da *International Commission on Stratigraphy*, apresentou a proposta de atualização da *International Chronostratigraphic Chart*, pois os cientistas concluíram que uma nova época geológica estava em curso, o Antropoceno.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) propôs que redes de unidades de conservação, englobando ambientes heterogêneos, são a melhor estratégia para a proteção da geobiodiversidade no Antropoceno. Entretanto, a efetividade desta estratégia depende de um sofisticado entendimento das interferências entre a geodiversidade e a biodiversidade, o que deixa os ambientes marinhos em situação de maior vulnerabilidade, quando comparado ao conhecimento científico dos ambientes terrestres. Assim, o mapeamento e a classificação padronizada de geohabitats marinhos tem sido priorizado

globalmente, pois é considerado uma etapa fundamental para entender o funcionamento dos seus ecossistemas.

A linha de pesquisa que norteou esta tese segue este entendimento preconizado pelo PNUMA, e direcionou suas investigações para as bases evolutivas da geobiodiversidade marinha em uma abordagem de múltiplas escalas. No contexto regional da plataforma continental da Paraíba, a principal hipótese foi que a geobiodiversidade atual reflete os processos tectônicos e sedimentares relacionados a evolução da Formação Barreiras e Pós-Barreiras. A geologia da Bacia Paraíba na parte continental foi bem investigada em diversos trabalhos anteriores nos últimos 25 anos, mas há compreensíveis lacunas do conhecimento para além da linha de costa.

Nesta pesquisa, descritores geofísicos qualitativos e quantitativos de macro e mesoescala, representados pelos dados geomagnéticos, sísmica, composição sedimentar e batimetria foram selecionados para a investigação da geodiversidade. Dados da biodiversidade e de descritores geofísicos de microescala foram adquiridos por mergulhadores técnicos, através do registro de imagens dos principais grupos bióticos, da coleta de amostras e de medições geomorfométricas diretas das estruturas geológicas subaquáticas. Os dados foram organizados em um SIG, estruturado na plataforma ArcGis e integrado à linguagem computacional R, para a execução de análises da geomorfometria, análises espaciais em múltiplas escalas e análises estatística multivariada. Desta forma, diversos descritores relacionados ao padrão espacial da geobiodiversidade (e.g. conectividade, fragmentação, morfologia, topografia) foram acessados e interconectados durante as análises, para testar hipóteses e entender os processos subjacentes.

Finalmente, nosso trabalho intencionou aderir a Visão de Humboldt da Natureza, através de uma ciência marinha integrada ao moderno conceito interdisciplinar da geobiodiversidade, que é capaz de articular o ceticismo metodológico com a estória natural orquestrada por Hêphaistos e seu martelo.

1.1. OBJETIVOS

Geral: Conhecer a heterogeneidade de habitats e a distribuição espacial da biodiversidade do macrobentos, em um trecho da plataforma continental do nordeste brasileiro, adjacente às falésias da Formação Barreiras.

Específico:

- Organizar um consistente SIG (Sistema de Informação Geográfica) na plataforma ArcGis integrado com a linguagem computacional R.
- Selecionar descritores geofísicos e sedimentares para a investigação, que possibilitem conhecer a variação da anomalia magnética local, a estratigrafia da plataforma, o gradiente de profundidade, a composição e a granulometria das fácies sedimentares de amostras submersas.
- Realizar análise quantitativa em geomorfometria e análise geoestatística em múltiplas escalas, para avaliar a relação entre a heterogeneidade de habitats e a distribuição espacial da biodiversidade do macrobentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A caracterização da morfologia dos fundos marinhos é um processo fundamental para melhorar a nossa compreensão do sistema terrestre e das interações dos seus subsistemas, em múltiplas escalas espaciais e temporais (WITMAN; LAMB; BYRNES, 2015). A evolução da paisagem marinha é uma complexa interação entre os ambientes estuarino, costeiro e offshore, que é sustentada pelo fluxo permanente de organismos, sedimentos e energia (BISHOP et al., 2017). A detecção destes processos ou das características geomorfológicas associadas à paisagem marinha é limitada pela resolução espacial dos dados e pela escala selecionada para as análises. Em geral, análises de escala regional são atribuídas entre 1:1000000 a 1:50000, enquanto análises referenciadas a escala local são aplicadas entre 1:50000 a 1:10000 (BISHOP et al., 2012). Quanto a resolução espacial de dados batimétricos, quando obtidos em alta resolução, mostram-se mais adequados para múltiplas aplicações na zona da plataforma continental (SANDWELL; SMITH, 2009; WALBRIDGE et al., 2018).

Ao longo da última década, os procedimentos metodológicos e técnicos foram substancialmente melhorados devido ao aumento da capacidade de processamento computacional e da qualidade dos algoritmos disponíveis (DOLAN; LUCIEER, 2014; LECOURE et al., 2017; NOVACZEK; DEVILLERS; EDINGER, 2019). As recentes tecnologias geoespaciais e os softwares de mapeamento digital possibilitam acessar dados batimétricos adquiridos por altímetros de radar (SANDWELL; GILLE; SMITH, 2002), sensoriamento remoto acústico (GAFEIRA; DOLAN; MONTEYS, 2018), sensoriamento remoto óptico e por LiDAR (*light detection and ranging*) (JAWAK; VADLAMANI; LUIS, 2015). Os dados batimétricos são frequentemente usados para calcular a variabilidade e/ou complexidade da superfície, indicados pela declividade (SANDWELL; SMITH, 2009) e pela rugosidade (STORLAZZI et al., 2016), além de outras variáveis geomorfológicas adicionais (SCHWERDTNER MÁÑEZ et al., 2014).

Métodos acústicos de sensoriamento remoto, como sonares de varredura lateral (SSSs), sonares de feixe único (SBESs) e sonorizadores de feixe múltiplo (MBESs) fornecem dados de densidade relativamente alta em escalas regionais (LECOURE et al., 2016a). Neste cenário, a geomorfometria para o ambiente marinho pode ser implementada em cinco etapas (LECOURE et al., 2016a): (1) amostragem da profundidade do fundo do mar para obtenção de dados batimétricos, (2) geração de um modelo batimétrico digital (DBM), (3) pré-processamento para correção de erros e artefatos; (4) análise do modelo batimétrico digital

para geomorfometria geral e específica e (5) implementação de aplicações disponíveis (por exemplo, geomorfologia marinha, mapeamento de habitat marinho e hidrodinâmica).

As análises e procedimentos computacionais para caracterizar os habitats são facilitados pela combinação das caixas de ferramentas nativas do ArcGIS 10.x com as linguagens de programação Python e a estatística R (R CORE TEAM, 2014). Entretanto, a classificação dos ambientes marinhos e de suas biotas não é um processo trivial, pois há diferentes esquemas de classificação de habitats (STRONG et al., 2019), que tentam descrever uma miríade de comunidades e ecossistemas, que ocorrem em um vasto oceano majoritariamente inexplorado (HARRIS et al., 2014). Um passo fundamental para equacionar a nomenclatura dos ambientes foi alcançado com a publicação da *Coastal and Marine Ecological Classification Standard* (CMECS), que fornece uma diretriz comum para a classificação do habitat marinho e da biota (BUTLER et al., 2017; COMMITTEE, 2012; LUND; WILBUR, 2007).

O CMECS oferece um meio de organizar, interpretar e classificar os ambientes marinhos de forma padronizada e hierarquizada. Ele foi concebido com múltiplos componentes o que permite o usuário selecionar aqueles que melhor se ajustam as suas necessidades. Contudo, a determinação do tipo de substrato tem sido considerado como componente primário para o reconhecimento de habitats bentônicos (KINGON, 2018).

Os processos sedimentares e a evolução de fundos marinhos mistos de siliciclástico-carbonato tropical têm recebido crescente atenção em várias regiões do mundo (BROOKE et al., 2017; BUTLER et al., 2017; GOMES et al., 2015). O sistema siliciclástico-carbonato está presente em diferentes ambientes sedimentares (TCHEREPANOV et al., 2010), mas a composição varia em escalas regionais e locais. A variação é atribuída a interações entre variáveis geomorfológicas e oceanográficas em múltiplas escalas (BASTOS et al., 2015; FIGUEIREDO JR. et al., 2015). Em geral, a dinâmica sedimentar da plataforma depende das flutuações do nível do mar, ondas, marés, fisiografia e condicionamento geológico pré-existente (OBELCZ et al., 2014), e envolve múltiplas fases de deposição e remobilização (WRIGHT, 2012).

Os processos geodinâmicos e as condições climáticas controlam as características dos geohabitats marinhos em escala geológica (CHIOCCI; CHIVAS, 2014). Com mais de 7.000 km de litoral e diversos habitats costeiros e marinhos, a plataforma continental brasileira ainda carece de monitoramento sistemático de seus habitats marinhos tropicais (ELFES et al., 2014) e de melhor entendimento quanto a influência dos processos geológicos na estruturação

destes habitats (BASTOS et al., 2015; GOMES et al., 2014). A plataforma continental da região nordeste do Brasil é tectonicamente passiva e caracterizada por profundidades rasas, baixa oferta de sedimentos continentais e de largura média reduzida (< 40 km), quando comparada com a largura média global que é de 85 km (HARRIS et al., 2014; VITAL et al., 2010). Essas características incomuns da plataforma do nordeste brasileiro estão ligadas à evolução tectono-sedimentar do rift do Atlântico Sul, e também a longos períodos de exposição subaérea durante os últimos 1 milhão de anos (DOMINGUEZ et al., 2013; MAGALHÃES et al., 2014; MATOS, 1999).

Ciclos glaciares e processos sedimentares impactaram profundamente a vida marinha distribuída próxima a costa em todo o mundo (LUDT; ROCHA, 2015) e proporcionaram uma grande diversidade de habitats durante os períodos Neogene e Quaternário. Por exemplo, os recifes de corais brasileiros são endêmicos e ocorrem de forma paralela ao longo de 3.000 km da costa brasileira, o que lhes confere características morfológicas e biológicas diferentes de outros modelos de recifes (LEÃO et al., 2016). Entretanto, as regiões marinhas da América do Sul têm recebido pouca atenção em relação às variações espaciais e temporais de seus ecossistemas (SCHWERDTNER MÁÑEZ et al., 2014). Esta substancial falta de informação sobre a geobiodiversidade da plataforma continental está explícita em recente compilação de HARRIS & BAKER (2012) sobre a geomorfologia e habitats bentônicos, que não inclui qualquer contribuição proveniente de regiões do Atlântico Sul. Em consequência disso, a vasta Província Tropical Southwestern Atlantic não consta, até o final de 2019, no catálogo de unidades do CMECS (COMITTEE, 2012), que é o mais importante sistema das Américas para a classificação e definições de ecossistemas marinhos.

Estudos recentes da geomorfologia, composição de sedimentos e distribuição espacial do habitat trouxeram importantes avanços para o entendimento dos complexos geohabitats tropicais da plataforma brasileira (GOES; BROWN; ARAÚJO, 2019; SILVA; GOMES; VITAL, 2018). Na estreita plataforma continental do nordeste brasileiro, os centros de deposição sedimentar são controlados pela fisiografia da plataforma (DOMINGUEZ et al., 2013), que é um resultado da sua exposição subaérea e dos antecedentes geológicos regionais. A ação conjunta destes dois fatores de larga escala espacial e temporal criaram feições geomórficas denominadas *incised valleys* (DALRYMPLE; BOYD; ZAITLIN, 1994), *canyons head* (HUANG et al., 2014) ou *shelf valleys* (HARRIS et al., 2014). Estas feições geomorfológicas são caracterizadas por definirem largas áreas de rebaixamento na plataforma formando vales, que controlam o transporte de sedimentos entre o continente e o oceano

profundo (HARRIS et al., 2005; HUANG et al., 2014; WESCHENFELDER et al., 2014). Desta forma, a identificação e o mapeamento em microescala destas estruturas na plataforma é essencial para pesquisas que objetivam estudar as interações entre a configuração geológica continental e a estrutura dos geohabitats marinhos (NORDFJORD et al., 2006; PORĘBSKI, 2000), pois exercem influência direta no transporte de sedimentos através da plataforma (CAYCEDO GARCIA; CATUNEANU, 2018).

Shelf Valley na plataforma continental da Bacia Paraíba

Shelf Valleys ocorrem exclusivamente em plataformas continentais e apresentam morfologias e dimensões variáveis nas margens continentais em todo o planeta (HARRIS et al., 2014). No *Coastal and Marine Ecological Classification Standard* (CMECS), *Shelf Valley* é classificado no nível 1 do *Geoform Component*, o que coloca essa estrutura na classe de componentes de mesoescala (e.g. 1 – 50 Km²). Neste sistema de classificação, *Shelf Valley* é definido como “*a valley crossing the continental shelf, often forming an extension of an existing terrestrial river and terminating in a canyon as the valley reaches the shelf break*” (COMITTEE, 2012).

A origem do *Shelf Valley* em regiões de altas latitudes está ligada a processos erosivos causados pela evolução das geleiras (HARRIS et al., 2014). Em regiões tropicais e temperadas, a origem do *Shelf Valley* tem sido relacionada a processos hidrodinâmicos costeiros (e.g. rios, marés). Estes processos controlaram o avanço de sistemas fluviais sobre a plataforma, durante os períodos de quedas do nível do mar durante o Quaternário (CERAMICOLA et al., 2015a; CERI JAMES et al., 2012; GAO; COLLINS, 2014; MAUFFREY et al., 2015; THIELER et al., 2007; WESCHENFELDER et al., 2010).

A natureza da forma e o enchimento dos *Shelf Valleys* é influenciada por uma combinação de fatores locais e de grande escala. Entre estes fatores estão a descarga fluvial, o transporte de sedimentos através da plataforma, o regime tectônico e as flutuações do nível do mar durante o Último Máximo Glacial (DOLBY et al., 2016; THIELER et al., 2014). Assim, *Shelf Valleys* situados em diferentes partes do mundo, podem apresentar aspectos morfológicos similares. Por exemplo, o Bósforo Shelf Valley, no Mar de Marmara, é sinuoso com um gradiente íngreme e sua seção transversal apresenta forma de "U" (ÇAGATAY et al., 2015), o que é similar ao Nielsen Shelf Valley localizado na grande plataforma continental da região oeste da Antártida (HARRIS et al., 1996). *Shelf Valley* em plataformas de composição carbonática-siliciclástica podem ser controlados por processos cársticos (DUNCAN et al., 2003), e/ou uma combinação de crescimento de recifes e erosão por correntes de maré (HARRIS et al., 2005).

O Mar Mediterrâneo possui a menor área de *Shelf Valleys* do mundo, enquanto o Oceano Atlântico Norte contém a maior área (HARRIS et al., 2014). O Oceano Atlântico Sul tem quatro vezes menos *Shelf Valleys* e *canyons* do que o Oceano Atlântico Norte (HARRIS et al., 2014). *Shelf Valleys* podem apresentar grande extensão, como o Hudson Shelf Valley perto de Nova Jersey (THIELER et al., 2007), enquanto grandes sistemas de *Shelf Valleys* também são conhecidos nas plataformas continentais da Flórida (DUNCAN et al., 2003), Carolina do Norte (THIELER et al., 2014) e Reino Unido (CERI JAMES et al., 2012).

Shelf Valleys e *canyons* submarinos são geoformas topologicamente adjacentes e estão frequentemente ligados numa escala regional e/ou local (CERAMICOLA et al., 2015b; THIELER et al., 2007). Estudos recentes demonstraram que processos tectônicos controlaram a localização dos *canyons* no Mar Mediterrâneo (CERAMICOLA et al., 2015a), no Mar de Mamara (ÇAGATAY et al., 2015) e na Antártica (POREBSKI, 2000). No Mar do Timor, Veevers and Van Andel (1967) verificaram que a relação entre o eixo da Depressão Bonaparte e o Malita Shelf Valley refletia o arcabouço tectônico regional e a reativação das estruturas tectônicas pré-cambrianas.

A região Nordeste do Brasil está localizada na parte oeste da bacia do Atlântico Sul, que é considerada a margem passiva do continente sul-americano (HARRIS et al., 2014), e poucos estudos relacionaram processos neotectônicos e a formação de *Shelf Valley* na plataforma continental desta região (GOMES et al., 2014). Entretanto, vários estudos na porção terrestre das bacias sedimentares comprovaram que processos de reativação neotectônicos ocorreram durante o Quaternário, os quais influenciaram a deformação de depósitos sedimentares e a geomorfologia costeira (ALVES; ROSSETTI, 2017; BEZERRA et al., 2014; BRITO NEVES et al., 2004; FURRIER, 2007; LIMA; LAVOR; FURRIER, 2017; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

A plataforma continental adjacente à porção continental do Estado da Paraíba é estreita, e seria natural que o contexto tectônico da parte continental também estivesse representado no relevo de sua parte *offshore* (BLUM et al., 2013). Reativações tectônicas, em escala regional e local, reconhecidamente condicionaram diversos aspectos geomorfológicos e sedimentares na região costeira da Paraíba (ROSSETTI, 2011). Entretanto, não há estudos prévios que indiquem a ocorrência de *Shelf Valley*, ou a relação entre os geohabitats marinhos, o contexto tectônico e os sedimentos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras.

A área de estudo e o contexto regional da geobiodiversidade

A área de estudo está situada na província *Tropical Southwestern Atlantic*, ecorregião *Northeastern Brazil* (Fig. 1a) (SPALDING et al., 2007), e ocupa uma parte representativa da plataforma continental do Estado da Paraíba (Fig. 1b). A parte continental adjacente à área de estudo (Fig. 1c) foi descrita e classificada como um geossistema, no qual o estuário do Rio Paraíba exerce um papel central na configuração geomorfológica regional (STEVENS, 2014). Esta área recebe uma média anual de chuvas de 1.500 mm com temperaturas que variam entre 20°C e 35°C, o que corresponde a um clima tropical úmido e seco (Am), de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (BECK et al., 2018).

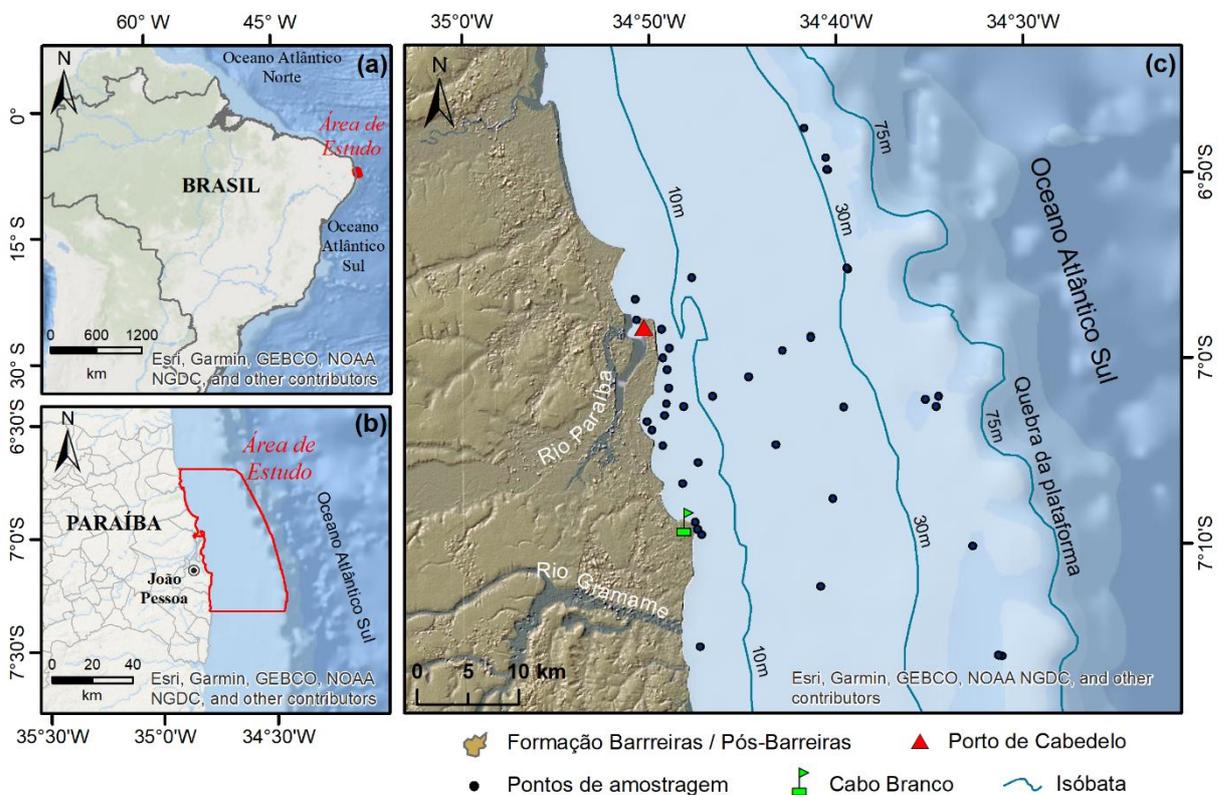


Figura 1. Localização da área de estudo. (a) Província *Tropical Southwestern Atlantic*, Ecorregião *Northeastern Brazil*; (b) A poligonal vermelha abrange cerca de 60% da área da plataforma continental do Estado da Paraíba. (c) O *layout* do mapa indica os limites norte e sul da área de estudo. A linha de costa e a isóbata de 75 metros delimitam a área de estudo a oeste e a leste, respectivamente.

Na região de estudo, a plataforma continental está delimitada a oeste pela linha de costa e a leste pela zona de quebra da plataforma na isóbata de 75 metros (Fig. 1c). A cobertura sedimentar predominante é uma mistura de sedimentos carbonáticos e siliciclásticos, que é

uma composição similar àquela encontrada em outras plataformas continentais do nordeste brasileiro (BARRETO et al., 2017; BASTOS et al., 2016; VITAL et al., 2010).

Na região costeira adjacente a área de estudo, as duas principais bacias de drenagem são representadas pelos sistemas dos rios Paraíba e Gramame, ao norte e ao sul, respectivamente. Ambos os sistemas fluviais foram formados pela erosão da drenagem em depósitos da Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras, devido principalmente as variações do nível do mar durante o Quaternário (ANDRADES FILHO; ROSSETTI, 2012).

No contexto geológico regional, a área de estudo está localizada na borda leste da Província Borborema. A Província da Borborema consiste em uma complexa combinação de massas continentais (ALMEIDA et al., 1981; SANTOS et al., 2010), que evoluiu durante uma série de eventos orogênicos pré-cambrianos (NEVES et al., 2012, 2015) e processos de rift tardio que culminaram com a ruptura continental durante o Cretáceo (CHANG et al., 1992; MATOS, 1992).

A formação de bacias marginais ao longo da costa brasileira foi fortemente controlada pela compartimentação da Província de Borborema e por grandes zonas de cisalhamento (MAGALHÃES et al., 2014; MATOS, 1999). A abertura do Atlântico Sul central ocorreu entre o Aptiano e o início do Albiano (BUARQUE et al., 2016; CAIXETA et al., 2015; TURNER et al., 2008). As partes da margem brasileira permaneceram tectonicamente ativas devido à processos relacionados com a formação da cordilheira andina e com o deslocamento das placas oceânicas (BEZERRA et al., 2014; MAROTTA et al., 2015).

A Província Borborema está dividida em três domínios, que são delimitados por zonas de cisalhamento em escala continental: o Domínio Sul, o Domínio Central ou Zona Transversal e o Domínio Norte (ARAUJO; WEINBERG; CORDANI, 2014; NEVES et al., 2015). As zonas de cisalhamento mais importantes dentro da Província Borborema são a Zona de Cisalhamento de Pernambuco e a Zona de Cisalhamento de Patos, que tendem principalmente para E-W e WSW-ENE, respectivamente. Essas zonas de cisalhamento e seus sistemas de ramificação foram reativados na margem do rift durante o Cretáceo (BARBOSA; LIMA FILHO, 2006; BEZERRA et al., 2007, 2011, 2014; MATOS, 1999), e marcaram os limites sul e norte da bacia terrestre da Paraíba (BARBOSA; LIMA FILHO, 2006; BUARQUE et al., 2016).

A Bacia da Paraíba tem 160 km de extensão e largura variável entre 30 e 40 km, e está localizada na parte central da fronteira leste da Província de Borborema (BARBOSA; LIMA

FILHO, 2006). A geomorfologia da Bacia da Paraíba foi influenciada principalmente por flutuações do nível do mar e processos neotectônicos durante o Quaternário, que afetaram os depósitos Cretáceos e Cenozóicos (ALVES; ROSSETTI, 2017; BEZERRA et al., 2014; BRITO NEVES et al., 2004).

Existem muitas evidências geomorfológicas de reativação tectônica na Bacia da Paraíba (ALVES et al., 2014; BEZERRA et al., 2008, 2014; FURRIER, 2007; LIMA; LAVOR; FURRIER, 2017; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013), entre elas está a deformação de depósitos datados do Paleogene ao Quaternário, semelhante ao documentado para as bacias sedimentares adjacentes (BEZERRA; VITA-FINZI, 2000). Em consequência desta dinâmica morfotectônica e sedimentar, formaram-se uma variedade de estruturas geomorfológicas costeiras como estuários afogados, planícies de maré e falésias ativas.

A cobertura sedimentar da plataforma continental na Bacia da Paraíba varia entre 1,5 a 2 km (BARBOSA; LIMA FILHO, 2006). A estratigrafia das suas áreas terrestres engloba cinco formações, com idades que variam do Cretáceo ao Eoceno (ALBERTÃO et al., 1994; BARBOSA; LIMA FILHO, 2006; CORREIA FILHO et al., 2015). De modo simplificado, a estratigrafia pode ser descrita como: arenitos basais fluviais a arenitos de transição da Formação Beberibe (Turoniano?/Santoniano); calcários marinhos superficiais, marls e calcários arenosos da Formação Itamaracá (Campaniano); calcários e marls da Formação Gramame (Maastrichtiano); calcários, marls e calcários arenosos da Formação Maria Farinha (Daniano); e calcários de recifes e marls da Formação Tambaba (Eoceno). Estes depósitos estão sobrepostos por arenitos fluviais a lacustres e argilosos da Formação Barreiras (Mioceno). A erosão subsequente levou à formação de uma série de depósitos siliciclásticos denominados Sedimentos Pós-Barreiras (ROSSETTI et al., 2011a; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

A Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras estão presentes em cerca de 3.000 km da zona costeira das bacias marginais brasileiras, desde a região norte até o setor sudeste da margem continental brasileira (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013). A Formação Barreiras é composta de depósitos fluviais/lacustres e estuarinos, dominados por argilas e por arenitos grossos a finos, os quais foram cobertos por sedimentos Pós-Barreiras. Os depósitos de Pós-Barreiras são compostos por arenitos grosseiros a médios e conglomerados (ARAÚJO et al., 2006; ROSSETTI et al., 2011b; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; ROSSETTI; GÓES, 2009).

A erosão contínua do Pós-Barreiras na área de estudo resultou na distribuição de litoclastos retrabalhados formando praias, domínios estuarinos e ecossistemas de manguezais. Devido à variação do nível do mar durante o Quaternário, a Formação Barreiras foi erodida/dissecada e foram formados terraços que são delimitados pelos rios na bacia costeira (ROSSETTI et al., 2011b; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

Em posição paralela ao eixo de ocorrência da Formação Barreiras/Pós-Barreiras no continente, na plataforma continental está presente a única formação de recifes do Atlântico Sul, que se estende também por quase 3 mil quilômetros, entre as regiões nordeste e sudeste (porção norte) do Brasil (FERREIRA; MAIDA, 2006; LEO; DOMINGUEZ, 2000). O arranjo espacial dos recifes e a sua forma alongada indicam que a maioria dessas estruturas foram formadas no topo de linhas de rocha, que resultou em bancos de recifes rasos ligados à costa em alguns trechos (LEÃO et al., 2016). Uma parte destes recifes está presente na área de estudo e apresentam ecossistemas de corais rasos (MORAIS; SANTOS, 2018), que são, em geral, reconhecidos como ecossistemas ricos em espécies (LEÃO et al., 2016).

Em relação à conservação dos ecossistemas nas zonas costeira e marinha da área de estudo, alguns estudos indicaram que há potencial vulnerabilidade as mudanças climáticas causadas pelas atividades antrópicas (LESSER; SLATTERY; LEICHTER, 2009; LOYA et al., 2016; MORAIS; MEDEIROS; SANTOS, 2018). Entretanto, os fatores de riscos imediatos para a conservação da biodiversidade regional, são atribuídos principalmente à expansão urbana e ao desmatamento nas áreas continentais adjacentes, que ocorrerem de forma expressiva desde o final da década de 1970 (STEVENS, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O conjunto de dados geofísicos, sedimentológicos e biológicos aplicados neste estudo foram organizados em um Sistema Informação Geográfica (SIG), executado na plataforma ESRI ArcGis, e estão referenciados ao Sistema de Coordenadas Projetadas WGS 1984 UTM Zone 25S.

3.1 Obtenção de dados batimétricos

Dois conjuntos independentes de dados batimétricos foram aplicados para a caracterização topográfica do leito marinho e para o cálculo das variáveis geomorfológicas. O primeiro conjunto de dados foi obtido no site da *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO), no formato ESRI ASCII, através do aplicativo *Gridded Bathymetry Data Download*, que está disponível em GEBCO COMPILATION GROUP (2019). O grid de dados batimétricos da área de estudo tem resolução nativa de 214 metros e assimila dados de fontes heterogêneas referenciados ao nível médio do mar, conforme descrição contidas no *Source Identifier* (SID) *Grid* e no *Data Type Identifier* (TID). Nesta pesquisa, este conjunto de dados foi utilizado para análises espaciais de macroescala ($> 50 \text{ km}^2$).

O segundo conjunto de dados batimétricos foi acumulado durante 22 expedições oceanográficas executadas em uma embarcação de 51 pés, entre dezembro de 2016 e abril de 2017. As expedições de pesquisa percorreram 1.800 km, que resultaram em um conjunto de 598.716 mil cotas batimétricas georreferenciadas (ÁLVARES-DA-SILVA, 2019). Os dados batimétricos foram adquiridos por sonificação, através de um sistema digital integrado pelo Trimble GeoExplorer 3000 Series GPS e um SonarMite *single-beam echo sounder* (SBES). O SBES foi configurado na frequência de 200 kHz e seu *transducer* ajustado para operar com 7° de ângulo de abertura (Fig. 2).

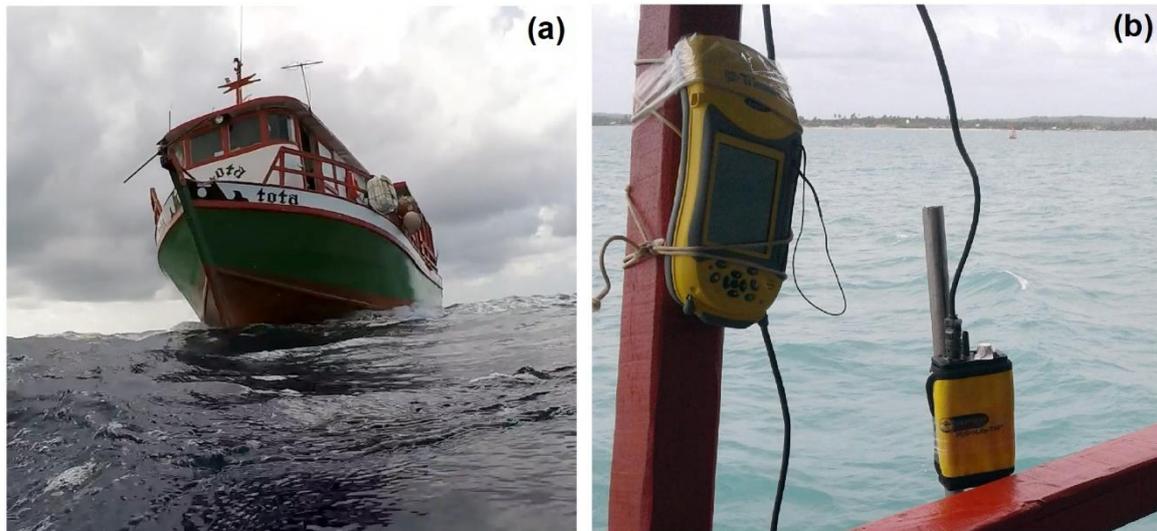


Figura 2. Expedições oceanográficas para a aquisição de dados batimétricos. (a) Embarcação de 51 pés. **(b)** Trimble GeoExplorer 3000 Series GPS integrado ao SonarMite single beam echosounder (SBES).

Os dois conjuntos de dados batimétricos foram reprocessados para corrigir redundâncias, erros e artefatos relacionados a variação na maré, velocidade das ondas acústicas devido a temperatura, salinidade e pressão (LECOURS et al., 2016a). O conjunto de dados em formato ASCII foi submetido a técnicas de reamostragem, para ajustar o modelo de superfície a resolução espacial de 200 X 200 metros. Para isto, foi usada a ferramenta *ArcTool Resample (Data Management, Raster Processing)*, e selecionado o algoritmo de interpolação cúbica. O método de interpolação vizinho natural (ESRI-ARCGIS, 2019) foi aplicado aos dados SBES, para criar modelos de superfícies de mesoescala (1-50 km²). Os modelos de superfície de macro a mesoescala, no formato raster, serão referenciados neste estudo, como modelo batimétrico digital.

3.2 Classificação das estruturas bentônicas em macroescala

O *Benthic Terrain Modeler (BTM)* versão 3.0 é uma extensão do ArcGIS 10.x (WALBRIDGE et al., 2018), que foi utilizada no fluxo de análise dos atributos do terreno em macroescala (> 50 km²) (Fig. 3, adaptada de WRIGHT et al., 2005), a partir do modelo batimétrico digital com resolução de 200 metros. As variáveis geomorfológicas (e.g. *slope*, *aspect*, *curvature*) foram calculadas com uma saída primária ajustada a uma superfície com janela espacial de 3 x 3 unidades.

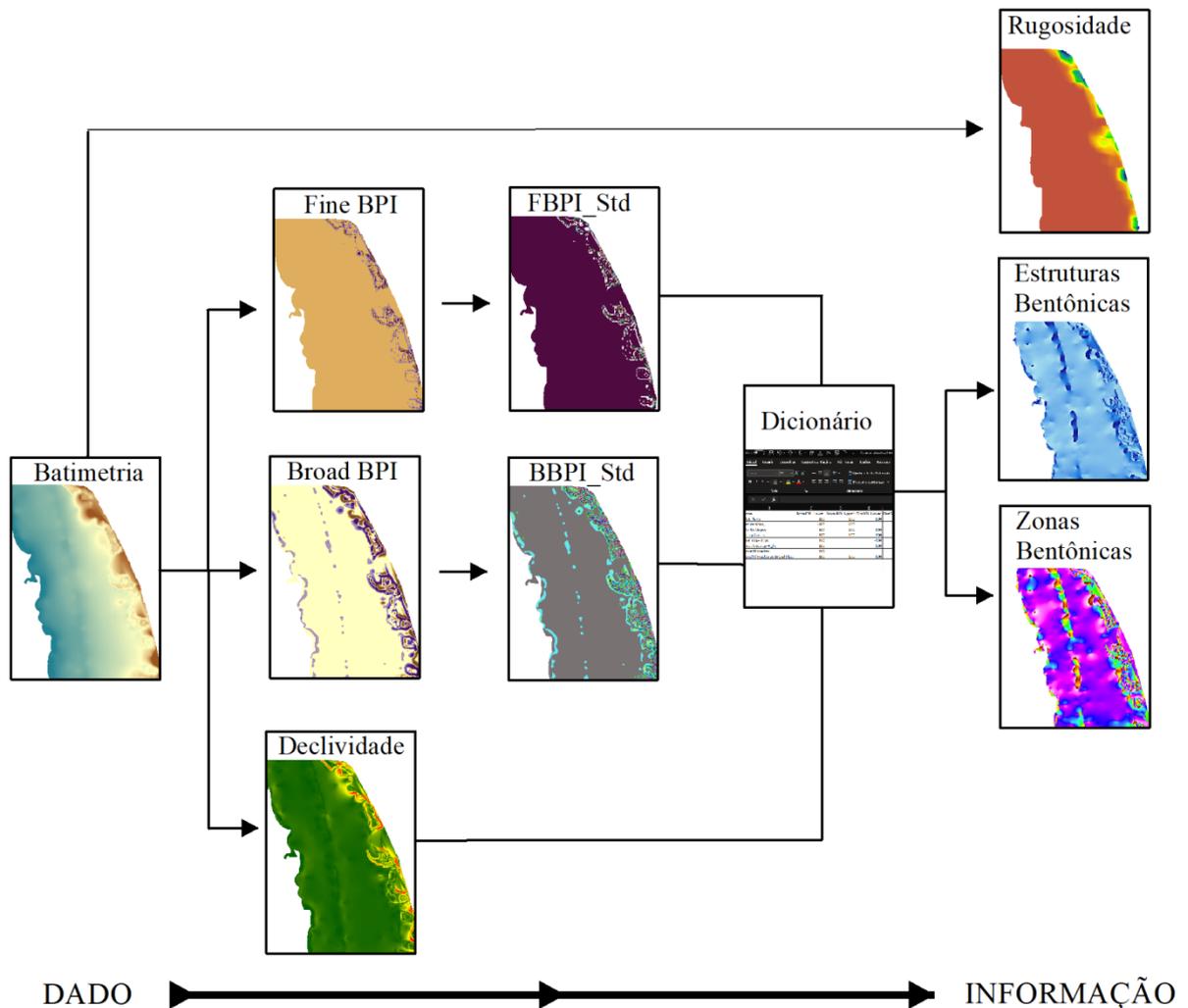


Figura 3. Esquema do fluxo de análises executado pelo algoritmo do BTM, para a caracterização e classificação do leito marinho em macroescala (> 50 km²).

A direção do gradiente da superfície da plataforma foi calculada pelo algoritmo da variável *aspect*, e foi expressa em medida angular. Em seguida, outras duas variáveis relativas à orientação do grid de células foram calculadas, com base em medidas trigonométricas da variação do seno e do cosseno: *Easternness of aspect* (orientação de leste a oeste, com índice variando de 1 a -1) e *Northernness of aspect*, (orientação de norte a sul, com índice variando de 1 a -1).

O Índice de Posição Batimétrica (BPI) foi computado na superfície batimétrica em duas escalas (*broad BPI* e *fine BPI*), para quantificar, através de índices, onde está situada verticalmente uma determinada localidade em relação à paisagem marinha do seu entorno (LUNDBLAD et al., 2006; WALBRIDGE et al., 2018). A complexidade da superfície do terreno foi computada pelo software BTM e expressa por dois índices: Medida de Robustez

Vectorial (VRM) e Relação Arco-Chord (ACR). Os valores do VRM combinam as variações da *slope* e *aspect* dentro de uma simples medida (MARTÍN-GARCÍA et al., 2013). Além disso, os valores do índice são padronizados e variam de 0 (sem variação) a 1 (variação completa) com valores típicos $\leq 0,4$ (WALBRIDGE et al., 2018). O ACR avaliou a robustez da superfície, através do cálculo entre a área contornada e a área de um plano de melhor ajuste (DU PREEZ, 2015). Nesta abordagem, a rugosidade é dissociada da inclinação da superfície e proporciona uma medida melhor da rugosidade da superfície. A ferramenta *Calculate Metrics* (ArcToolbox) foi utilizada para resumir as estatísticas do modelo batimétrico digital (e.g., profundidade média, desvio padrão, curtose) e para auxiliar nas análises geomorfométricas das variáveis do terreno derivadas do modelo batimétrico digital.

3.3 Classificação das zonas bentônicas em mesoescala

A classificação das zonas bentônicas, dos tipos de habitats e das assembleias das comunidades ocorreu através da aplicação do sistema *Coastal and Marine Ecological Classification Standard* – CMECS (COMITTEE, 2012). O sistema CMECS está organizado em níveis hierárquicos que abrangem múltiplas escalas, desde as características biogeográficas e aquáticas até níveis mais detalhados de descrição atribuídos a quatro componentes (Fig. 4). O componente *Water Column* (WC) não foi aplicado, porque utiliza parâmetros desnecessários para atingir os objetivos deste estudo.

Para identificar e classificar os principais tipos de habitats bentônicos, em conformidade com a organização hierárquica das unidades ecológicas do CMECS, foram utilizados dados primários e secundários atribuídos a: (a) configuração tectônica (e.g. margem passiva) e oceanográfica (e.g. variações da maré), para auxiliar na classificação nos níveis *Biogeographic Setting* e *Aquatic Setting*; (b) dados batimétricos em mesoescala (Fig.5), para a classificação no nível *Geoform Component* (GC), através das características estrutural e geomórfica do leito marinho; e (c) dados da composição dos sedimentos, para a classificação no nível *Substrate Component* (SC), através das variáveis composição e granulometria do substrato superficial.

Para alcançar o nível *Biotic Component* (BC), que é o nível mais detalhado do sistema de classificação CMECS, foram obtidos dados biológicos em microescala, através do registro de imagens dos principais grupos bióticos associados aos habitats. A identificação dos espécimes objetivou alcançar o nível taxonômico mais preciso possível, através da consulta a especialistas, ao herbário UFPB, a guias de campo especializados (HUMANN; DELOACH,

2014; LESSA; NÓBREGA, 2000; MURICY et al., 2011; NASSAR, 2012; ROBIN et al., 1986), a bases internacionais (VAN SOEST et al., 2019; “WoRMS Editorial Board”, 2019) e a estudos regionais (FEITOZA; ROSA; ROCHA, 2005; FIGUEIREDO et al., 2008; MORAIS; SANTOS, 2018; ROCHA; ROSA; ROSA, 2009; SANTOS et al., 2016).

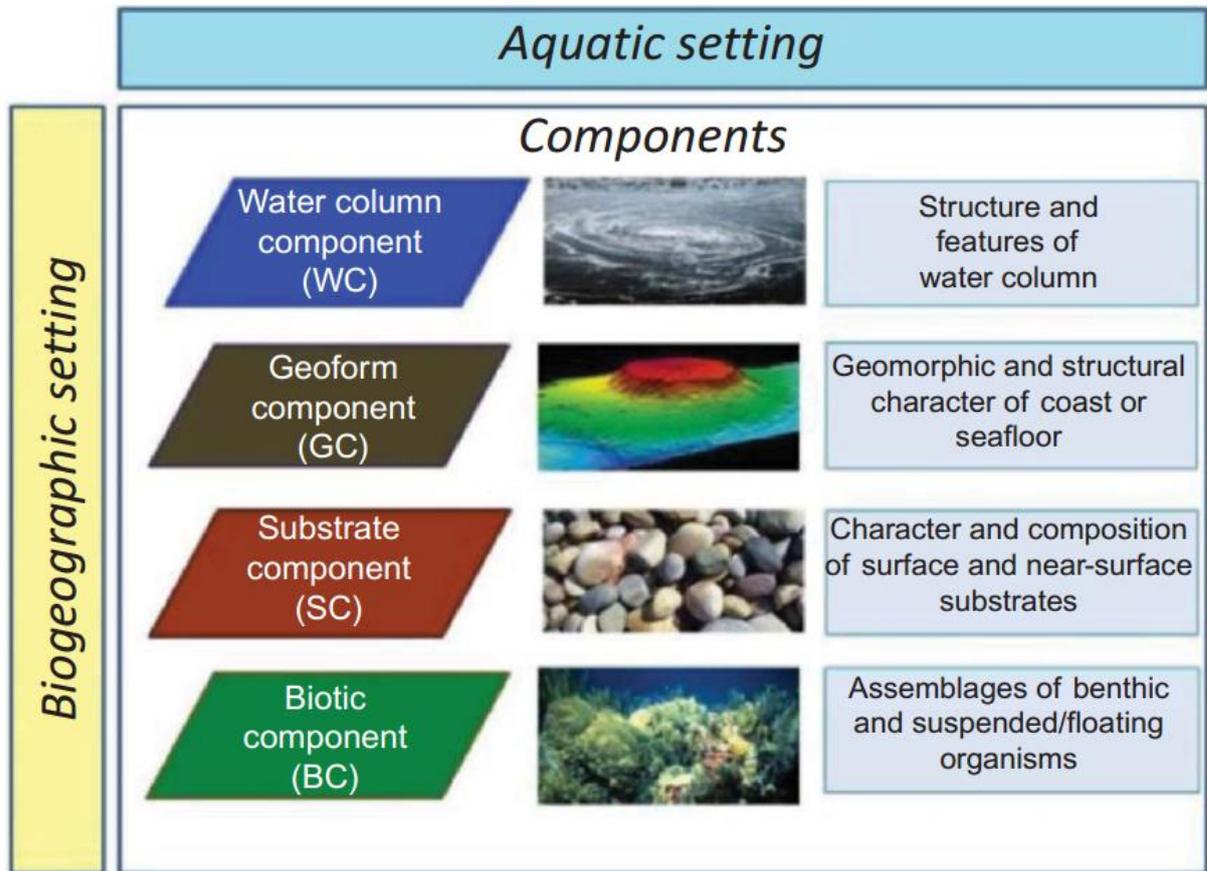


Figura 4. Diagrama da estrutura e organização hierárquica do *Coastal and Marine Ecological Classification Standard*. Imagem obtida do FGDCSTD-018–2012.

3.4 Dados geomagnéticos e sísmicos

Os três levantamentos magnéticos aéreos utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) (“BDEP - Exploration and Production Data Bank”, 2017) e pelo Serviço Geológico do Brasil (GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL, 2019).

O levantamento S1 (BDEP) foi realizado sobre a plataforma continental nordeste em 1970 com linhas de voo orientadas a NE-SW, espaçamento de 5 km e altura de voo de 700 m. O levantamento S2 (CPRM) foi realizado sobre o Planalto Pernambucano em 1988 com linhas de voo orientadas a NW-SE (N30°W), espaçamento de 3 km e altura de voo de 500 m. O

levantamento S3 (CPRM), que cobre o embasamento da Província Borborema adjacente à margem leste foi realizado em 2007, com linhas de voo orientadas a N-S, espaçamento de 500 m, linhas de controle orientadas a E-W e espaçadas 10 km, com altura de voo de 100 m.

O grid S1 foi interpolado pelo método de curvatura mínima, enquanto os grids S2 e S3 foram interpoladas usando o método de gradeamento bidirecional (JOHNSON; SARRIS; AMZA-PREIN, 1991), mas todos com resolução de 750 m. Para remover artefatos de nivelamento (JOHNSON; SARRIS; AMZA-PREIN, 1991), foram usados os métodos de decorrugação (micro-nivelamento) e filtros direcionais cosseno e Butterworth. O grids foram combinados considerando uma altitude de 700 m, com a aplicação da técnica de continuação para cima e o método de sutura (BLAKELY, 1995).

O filtro de amplitude de sinal analítico (ASA) foi aplicado ao mapa de campo magnético total. Este filtro é baseado no cálculo da raiz quadrada da soma quadrada das derivadas da anomalia do campo magnético (Eq. 1), nas direções x, y e z (NABIGHIAN, 1972; ROEST; VERHOEFS; PILKINGTON, 1992). O mapa ASA é uma ferramenta útil para a definição de bordas de corpos-fonte magnéticos, pois mapeia alterações no campo magnético, especialmente em regiões de latitudes baixas (ÖHMAN; AHOKAS; LAHTI, 2009). O mapa foi utilizado para interpretar a localização das zonas de cisalhamento na região da plataforma e no embasamento continental adjacente.

$$SA = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2 + \left(\frac{df}{dz}\right)^2}$$

Sísmica de reflexão

Dados de sísmica de reflexão 2D foram usados para entender a configuração das estruturas rasas da plataforma em subsuperfície. Ao todo o trabalho analisou cerca de 12 seções sísmicas 2D, que abrangem a plataforma da Bacia da Paraíba. Estes dados foram fornecidos pelo Banco Nacional de Dados de Exploração e Produção (BDEP), da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A seção sísmica 0048-0603 foi selecionada, porque intersecta o canal de um dos *Shelf Valleys* descoberto nesta pesquisa.

A interpretação dos dados sísmicos buscou identificar estruturas e feições sedimentares, que ocorrem em subsuperfície na sucessão estratigráfica rasa que recobre a plataforma. A seção utilizada representa um levantamento multicanal de sísmica de reflexão 2D migrada em tempo (TWT). O volume sísmico foi tratado com filtros de frequência tipo passa baixa (low band pass filter), com frequências entre 10 e 17 Hz, e passa alta (high band pass filter), com

frequência de 45 a 60 Hz, para enfatizar aspectos importantes como falhas e discordâncias na sucessão sedimentar. Devido à falta de poços offshore na Bacia Paraíba para caracterização do perfil litológico, foi realizada uma conversão de tempo profundidade simples baseada em um modelo de velocidade contínua, para obter uma estimativa da espessura dos estratos mais rasos.

3.5 Análise dos atributos do terreno em mesoescala

Os dados batimétricos obtidos das expedições oceanográficas foram usados para gerar o modelo batimétrico digital de mesoescala (1 – 50 km²), com resolução espacial entre 12 e 30 metros, em seis *Areas Of Interest* (AOI) da plataforma continental (Fig. 5).

O cálculo dos atributos do terreno das AOI foram executados pela extensão TASSE (*Terrain Attribute Selection for Spatial Ecology*) para ArcGIS (LECOURS, 2017), que está disponível em www.marinegis.com. Os seis atributos de terreno calculados foram: (1) desvio relativo do valor médio (uma medida da posição relativa para identificar picos e depressões); (2) desvio padrão (uma medida de rugosidade); (3) easterness e (4) northerness (medidas da variável aspect que é a orientação do declive), (5) declive e (6) média local.

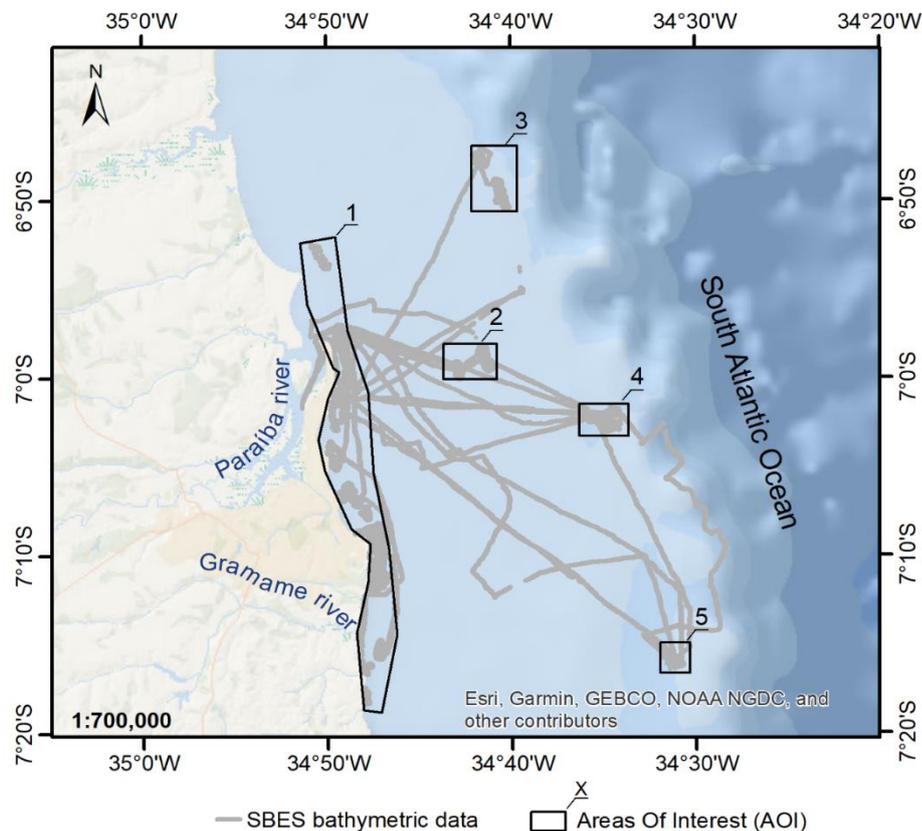


Figura 5. Rotas percorridas pelas expedições oceanográficas. Os números de 1 a 5 indicam AOI.

3.6 Dados geofísicos em microescala

Os mergulhadores técnicos foram equipados com câmeras GOPRO Hero 4™ e Digital DSLR Canon EOS Rebel T5™ para gravar a geobiodiversidade em microescala (< 1 km²) e destacar as estruturas geológicas ao longo de linhas de transecto previamente definidas. Os ângulos e direções dos transectos e das estruturas tectônicas foram medidos utilizando o módulo COMPASS do computador subaquático Ratio iX3M Tech+, que registrou também a temperatura e profundidade da água ao longo do perfil de mergulho (Fig. 6). Posteriormente, as imagens foram processadas e revisadas quanto à morfologia do fundo do mar, estrutura de habitats e sua biodiversidade associada. A validação dos dados foi realizada através da comparação entre as imagens e a geomorfometria local.

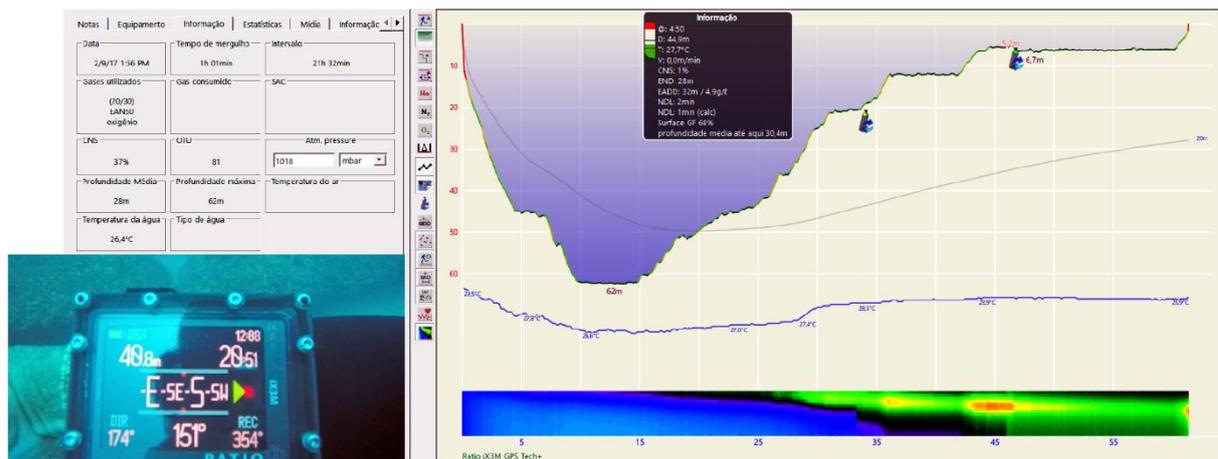


Figura 6. Dados geofísicos de microescala adquiridos durante as operações de mergulho.

3.7 Coleta de sedimentos

Os 5 cm superiores de sedimentos do fundo do mar foram amostrados em 42 locais (Fig. 1c), por mergulhadores técnicos. Em ambientes recifais, o coletor identificou áreas adjacentes as estruturas rochosas para realizar a coleta de sedimentos inconsolidados (Fig. 7a). Em banco de algas ou agrupamento de esponjas o coletor realizou a coleta entre os indivíduos da população (Fig. 7b). Para a coleta de sedimentos inconsolidados o coletor utilizou uma garrafa plástica de 300 ml com boca de 5 cm de diâmetro. A garrafa foi arrastada paralela ao fundo e mantendo a profundidade estabelecida, o que possibilitou a entrada do sedimento sem a manipulação direta da amostra (Fig. 7c). No caso de material consolidado, amostras representativas foram obtidas utilizando marreta de 1 kg e talhadeira de aço (Fig. 7d).



Figura 7. Coleta de sedimentos marinhos, através de mergulho. Coleta de sedimentos inconsolidados em (a) ambientes recifais, a 28 m de profundidade, e em (b) banco de algas do gênero *Halimeda*, a 26 m de profundidade. As imagens (c) e (d) mostram os materiais utilizados nas coletas de sedimentos inconsolidados e consolidados,

3.8 Processamento das amostras de sedimentos

No retorno à superfície, as amostras foram etiquetadas e acondicionadas em caixa térmica para o transporte até o laboratório. No laboratório, as amostras de sedimentos foram processadas seguindo a metodologia proposta pela USGS (POPPE et al., 2014) e classificadas de acordo com a tabela de granulometria da USGS Wentworth (WILLIAMS et al., 2006). Em linhas gerais, a metodologia USGS indica a secagem das amostras brutas em estufa abaixo de 100°C (Fig. 8a), para não afetar o tamanho do grão. Após um período que varia de 24 a 48 horas o material está seco para ser destorroado, homogeneizado e quarteado (Fig. 8b), pesado em frações de 50 gramas (Fig. 8c) e classificados no sistema de cores de Munsell (Fig. 8d).

Previamente ao fluxo de análises granulométricas, as amostras foram acondicionadas em saco plástico e indexadas no SIG com ID único.

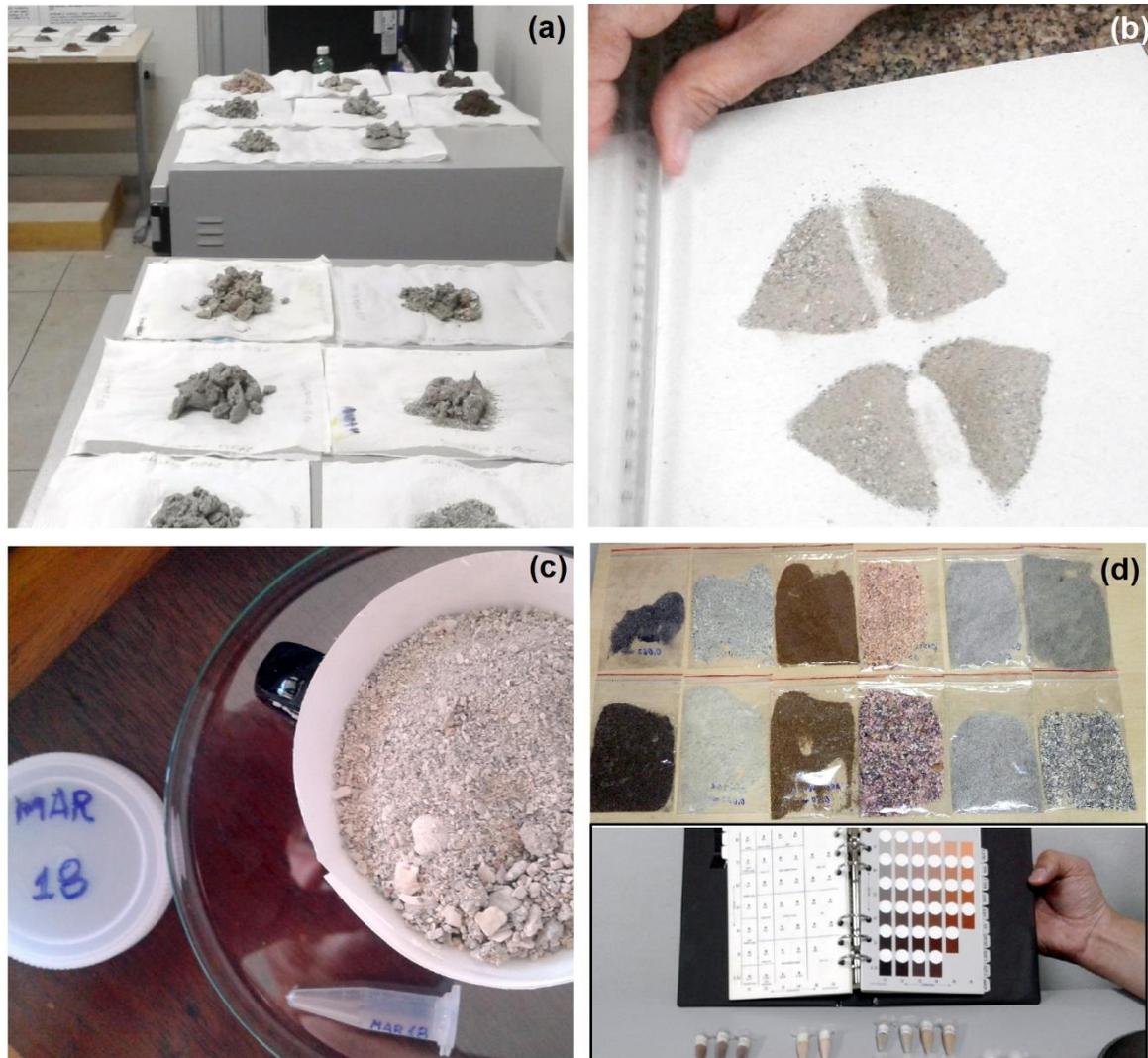


Figura 8. Etapas do processamento de amostras de sedimentos marinhos. (a) Secagem das amostras em estufas. (b) Quarteamento das amostras. (c) Pesagem e (d) classificação das amostras secas baseado no sistema de cores de Munsell, para posterior indexação no SIG com ID único.

3.9 Análise granulométrica dos sedimentos

A classificação granulométrica dos sedimentos foi obtida pela integração dos métodos de peneiramento e difração a laser (RODRÍGUEZ; URIARTE, 2009). A técnica de peneiramento foi utilizada para a análise de partículas entre 500 e 2000 μm (Fig. 9a).

Partículas com distribuição granulométrica entre 0,1 - 499 μm foram analisadas em modo seco pelo método de difração a laser (Figs. 9b - 9d). Para estas análises, o equipamento

(SILAS 1090) exige no mínimo 2 gramas de uma amostra representativa, após o peneiramento em malha de 500 μm (Fig. 9d).

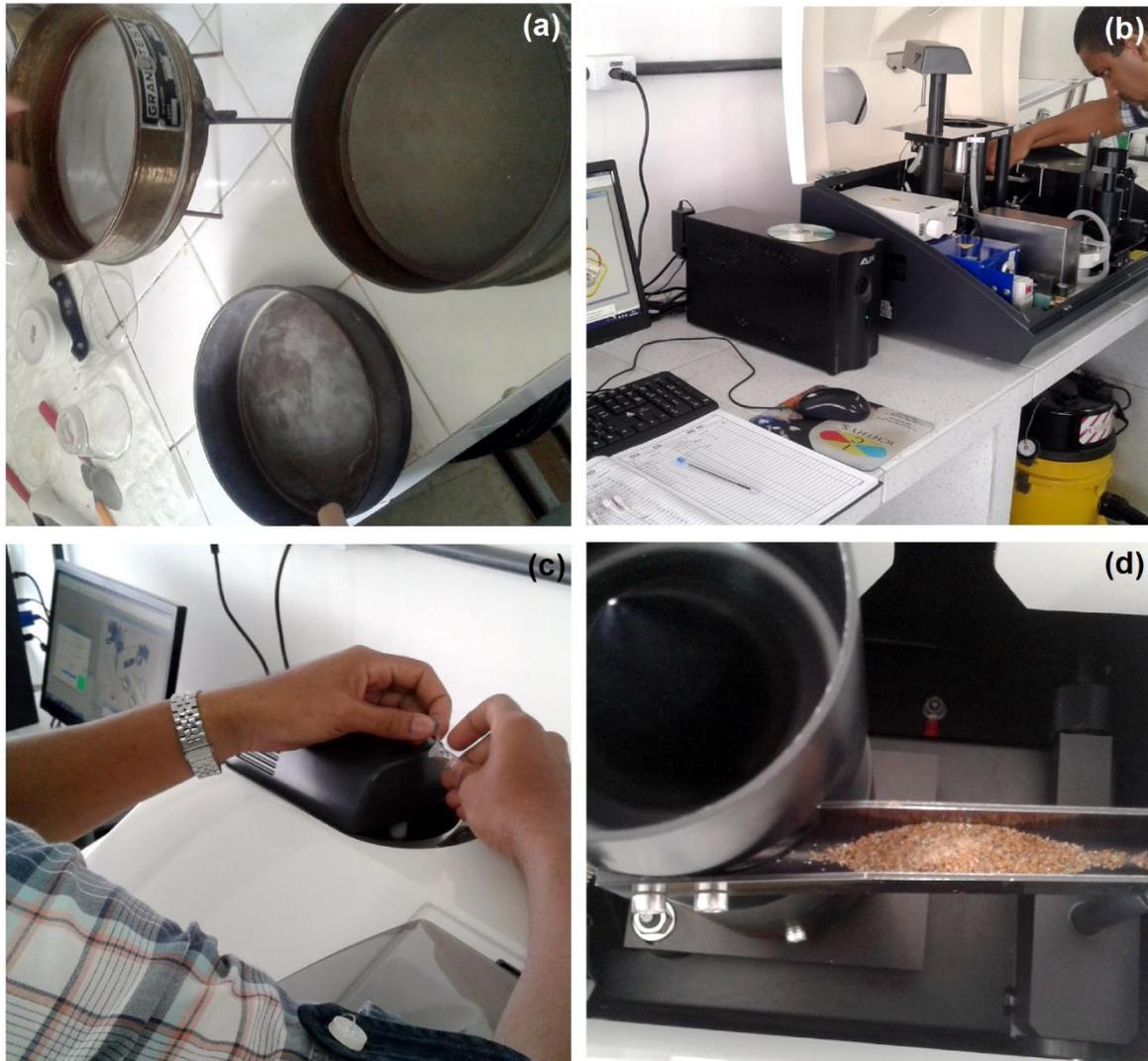


Figura 9. Análise granulométrica de amostras de sedimentos marinhos inconsolidados. (a) Método de classificação granulométrica por peneiramento. **(b)** Método de classificação granulométrica a laser, utilizando o analisador SILAS 1090. **(c)** e **(d)** Análise granulométrica a laser, em modo seco.

No presente estudo, seguindo o CMECS, *Fine Unconsolidated Substrate* (FUS) foi definido como a porção residual da amostra original, após o tratamento com HCl (15%), peróxido de hidrogênio (30%) e lavagem com água destilada por cinco vezes. Desta forma, FUS engloba as 3 classes de agregados de tamanho de grão, representadas por *Clay* ($< 3,9 \mu\text{m}$), *Silte* ($3,9 - 62,5 \mu\text{m}$) e *Sand* ($62,5 - 2.000 \mu\text{m}$).

3.10 Análises espaciais dos sedimentos

As tendências distribucionais das características dos sedimentos (composição, classes de agregados e frações de areia) foram analisadas usando a ferramenta ArcGis *Directional Distribution Tool* (*Spatial Statistics ArcToolbox*), cujo algoritmo calcula os desvios padrão de elipses em um hiperespaço. Este método, permite a identificação de tendências de distribuição espacial (GONG, 2002) e a comparação entre os padrões espaciais das características sedimentares e dos atributos geomorfométricos. Descrições detalhadas dos princípios matemáticos e algoritmos relacionados aos desvios padrão de elipses foram recentemente apresentados e minuciosamente discutidos (WANG; SHI; MIAO, 2015). No presente estudo, a direção de distribuição dos sedimentos inconsolidados foi calculada pelo algoritmo *Standard Deviational Ellipse* (*Spatial Statistics Tool*) no ArcGis, que é dado como:

$$C = \begin{pmatrix} var(x) & cov(x, y) \\ cov(y, x) & var(y) \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 & \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i \\ \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i & \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \end{pmatrix}$$

Onde

$$var(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2$$

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i$$

$$var(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2$$

e as variáveis x e y são as coordenadas da feição I , $\{\bar{x}, \bar{y}\}$ que representa o centro médio para as feições n igual ao número total de feições. A matriz de covariância das amostras é fatorada dentro de uma forma padrão, as quais resultam em uma segunda matriz representada por seus autovetores e autovalores (SINGH, 2014). O desvio padrão para os eixos x e y são calculados por:

$$\sigma_{1,2} = \left(\frac{(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 + \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2) \mp \sqrt{(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2)^2 + 4(\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i \tilde{y}_i)^2}}{2n} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Para analisar o padrão de distribuição espacial dos sedimentos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras e mapear os seus agrupamentos na plataforma continental, foram utilizadas ferramentas estatísticas da *Spatial Statistics ArcToolbox* executadas em ambiente SIG do geodatabase integrado a linguagem R (SCOTT; JANIKAS, 2010), conforme indicadas abaixo:.

(a) *Multi-Distance Spatial Cluster Analysis (Ripley's K Function)*: o algoritmo calculou se as feições ou os valores associados a um determinado parâmetro selecionado, exibiu agrupamento ou dispersão estatisticamente significativos em multidistâncias. Matematicamente, a ferramenta usa uma transformação da função de Ripley, onde o resultado esperado com a aleatorização dos pontos é similar estatisticamente à distribuição dos pontos da matriz de incidência. Durante a aplicação da ferramenta *Ripley's K Function*, o intervalo de confiança foi calculado com 999 permutações usando aleatoriamente valores do atributo *Unconsolidated Mineral Substrate* e selecionando o parâmetro Método Sem Correção de Limites. Detalhes da rotina operacional e da execução dos cálculos matemáticos estão disponíveis em ESRI ARCGIS (2019a);

(b) *High/Low Clustering (Getis-Ord General G)*: o algoritmo calculou a concentração de altos e baixos valores associados a distribuição espacial dos descritores granulométricos dos sedimentos. Esta ferramenta utiliza estatística inferencial, o que significa que os resultados das análises são interpretados no contexto da hipótese nula. Nesta pesquisa, a hipótese nula foi que não há agrupamento dos valores de atributos das amostras na plataforma continental, ou seja, há uma completa aleatoriedade na distribuição espacial dos sedimentos. A hipótese nula foi rejeitada, quando a estatística *Z_G-Score* retornou um *p-value* pequeno e estatisticamente significativo. Se o *Z_G-Score* foi positivo, a interpretação é que o *General G Index* observado é maior do que o *General G Index* esperado, o que indicou que altos valores do(s) atributo(s) do sedimento apresentam padrão de distribuição espacial agrupado na área de estudo. O mesmo princípio estatístico foi aplicado para interpretar os resultados dos agrupamentos do tipo *Low Clustering*. Detalhes da rotina operacional e da execução dos cálculos matemáticos estão disponíveis em ESRI ARCGIS (2019b);

(c) **Spatial Autocorrelation (Global Moran's Index)**: o algoritmo calculou a autocorrelação espacial baseado na localização e atributos da feição de pontos. Neste estudo, a ferramenta foi utilizada para avaliar o padrão de distribuição espacial de atributos dos sedimentos (e.g. fração de areia), ou seja, se os padrões encontrados indicavam significância estatística quanto ao agrupamento, dispersão ou aleatoriedade. Quando o *Z-score* ou *p-Value* indicam significância estatística, um valor positivo do Moran's I indica tendência de agrupamento, enquanto os valores negativos deste index indicam tendência para a dispersão. Desta forma, o index pode ser interpretado como uma medida de afastamento da aleatoriedade, onde a hipótese nula afirma que o atributo analisado está aleatoriamente distribuído através da área de estudo. No final da rotina de análises, a ferramenta criou um arquivo no formato HTML com o sumário gráfico dos resultados e cinco métricas estatísticas resultantes dos cálculos: *Moran's Index*, *Index Esperado*, *Variância*, *Z-score* e *p-Value*. Detalhes da rotina operacional e da execução dos cálculos matemáticos estão disponíveis em ESRI ARCGIS (2018);

(d) **Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran I)**: esta ferramenta foi utilizada como técnica geoestatística de mapeamento, com o objetivo de identificar agrupamentos e dados espaciais outliers e testar a hipótese nula, feição por feição, baseado no conjunto de 42 sítios amostrados (*feature class* do tipo ponto). A técnica consiste em obter uma nova classe de feição derivada de feições balanceadas (e.g. atribuindo maior peso para os atributos de interesse). Desta forma, a tabela de atributos da *output feature class* irá conter medidas da significância estatística (*Z-scores*, *p-Values*) do *Local I Index* e do tipo de *cluster/outlier*, os quais são indicados no campo *CoType* da tabela de atributos. Valores positivos altos do *Z-score* na tabela de atributos de uma feição indica que as feições vizinhas têm valor similar (ou alto valor ou baixo valor do(s) atributo(s) em análise). O campo *CoType* da nova classe de feição poderá conter o código padrão HH para cluster de altos valores estatisticamente significativos, e LL para clusters de baixos valores estatisticamente significativos. Valores negativos do *Z-score* (e.g. $< -3,96$) para uma feição, indica dados espaciais *Outliers* significativos. Neste estudo, o campo *CoType* foi programado para sempre indicar *cluster* e *outliers* para um nível de confiança de 95%. Detalhes da rotina operacional e da execução dos cálculos matemáticos estão disponíveis em ESRI ARCGIS (2019c).

(e) **Hot Spot Analysis (Getis-Ord G_i^*)**: esta ferramenta foi utilizada nesta pesquisa, como técnica geoestatística de mapeamento com o objetivo de identificar *cluster* de altos valores (*hot spot*) e *cluster* de baixos valores (*cold spot*) com base na análise espacial dos atributos dos sedimentos (e.g. *unconsolidated mineral substrate*, carbonatos, frações de areia). O

algoritmo da ferramenta gerou uma nova *Output Feature Class*, cuja tabela de atributos contém campos destinados ao cálculo das estatísticas *Z-score*, *p-Value* e nível de confiança (*G_i_Bin*) para cada feição da tabela de atributos do *Input Feature Class*. A análise é executada feição por feição, e os parâmetros estatísticos contidos na tabela de atributos da nova classe de feição indicam se a hipótese nula deve ou não ser rejeitada. As feições mapeadas pela ferramenta indicam se os clusters espaciais observados, de altos ou de baixos valores, são mais pronunciados do que poderia ser esperado em uma distribuição aleatória dos mesmos valores. O campo *G_i_Bin* criado durante a execução da ferramenta identificou *hot spots* ou *cold spots* dos sedimentos, baseado no nível de confiança de 95%, ou seja, feições indicadas como +/-2 bins. Feições indicadas por +/-1 ou 0 bin não foram consideradas *clusters* significativos. Alto *Z-score* e baixo *p-Value* para uma feição indicaram agrupamentos espaciais de altos valores, para um determinado parâmetro em análise. Valores negativos do *Z-score* e pequeno *p-Value* indicaram agrupamentos espaciais de baixos valores. Quanto mais alto (ou mais baixo) o *Z-score* mais intenso é o agrupamento, sendo que o *Z-score* próximo a zero revela a inexistência de agrupamentos. Detalhes da rotina operacional e da execução dos cálculos matemáticos estão disponíveis em ESRI ARCGIS (2019d).

De modo geral, a execução destas ferramentas de análises espaciais no ArcGis demanda a participação ativa do usuário, para selecionar adequadamente uma série de parâmetros complementares, mas que são essenciais para obter os resultados pretendidos. Nesta pesquisa, os parâmetros Distância Inversa e Distância de Manhattan foram selecionados ao executar as ferramentas *High/Low Cluster*, *Spatial Autocorrelation* (Moran I), *Outlier Analysis* e *Hot Spot Analysis*. Para o cálculo de pseudo-p-valores foram selecionadas 999 permutações, ao executar a ferramenta *Outlier Analysis*.

A matriz de diagrama de dispersão, exibindo o coeficiente de correlação de Spearman entre diferentes variáveis, foi obtida executando o algoritmo *Scatterplot Matrix for the Table Tool*, contida na extensão *Marine Geospatial Ecology Tools* v. 0.8a71 (ROBERTS et al., 2010), onde os cálculos estatísticos foram realizados no ArcGIS interconectado a linguagem de programação estatística R v. 3.5.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão discutidas as análises espaciais de macroescala.

4.1 Geomorfometria da plataforma continental

O modelo batimétrico digital abrangeu uma área de 2.548 km², que revelou uma plataforma continental estreita (< 30 km), com uma profundidade média de 23 m (\pm 13,1 m) e limitada pela quebra da plataforma na isóbata de 75 m (Fig. 10a). Profundidades inferiores a 20 m foram registradas em cerca de metade da área total da plataforma continental, onde a declividade raramente é superior a 1° (Fig. 10b). A Figura 11a mostra que, em geral, a declividade da plataforma tende principalmente para as direções NNE – E (0 – 112,5°).

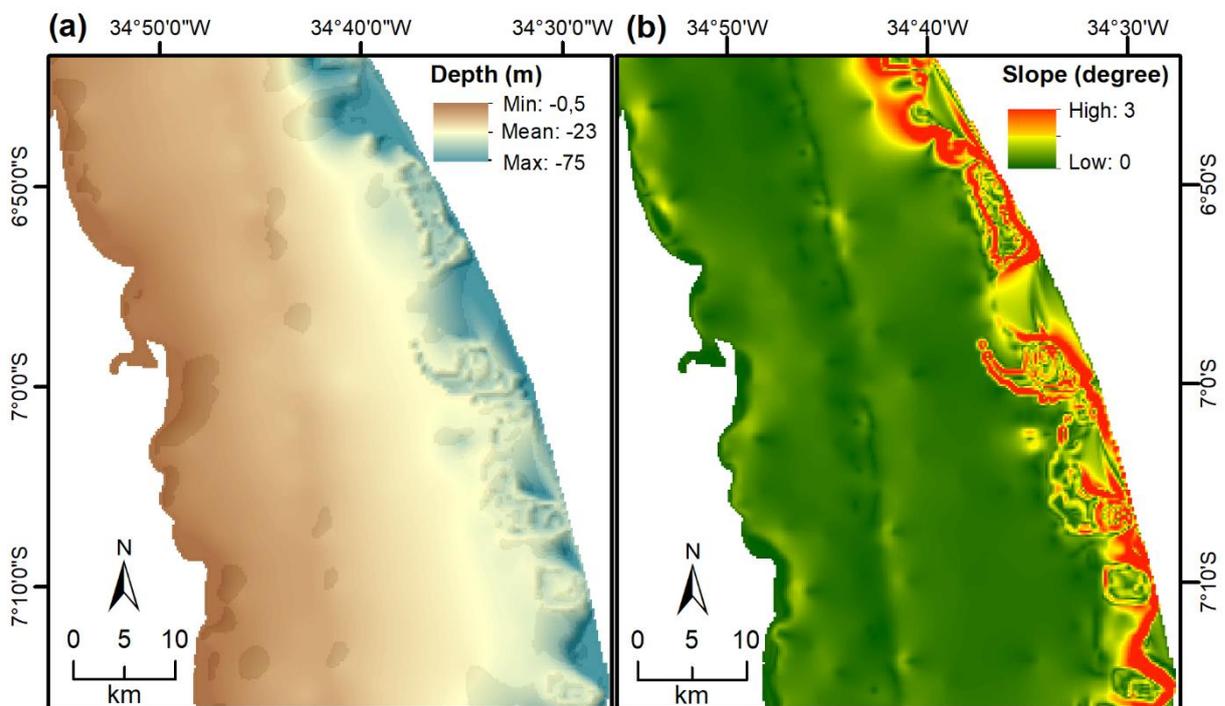


Figura 10. Gradiente batimétrico e declividade da plataforma continental. (a) Modelo batimétrico digital. **(b)** Mapa da declividade do terreno.

Na zona de entremarés (< 10 m de profundidade), o modelo batimétrico digital indicou zonas mais rasas, que foram identificadas como ambientes recifais, os quais ficam parcialmente expostos em condições de maré baixa. As regiões dos recifes voltadas para o mar (*front reef zone*), apresentaram declividade intermediária (Fig. 10b) e os desníveis mais acentuados na profundidade, de modo similar ao que foi observado em outras formações recifais (ARAÚJO; AMARAL, 2016; LEO; DOMINGUEZ, 2000). A *front reef zone* é a parte mais alta do recife, pois a direção predominante da declividade tende para a direção SSW – W (Fig. 11).

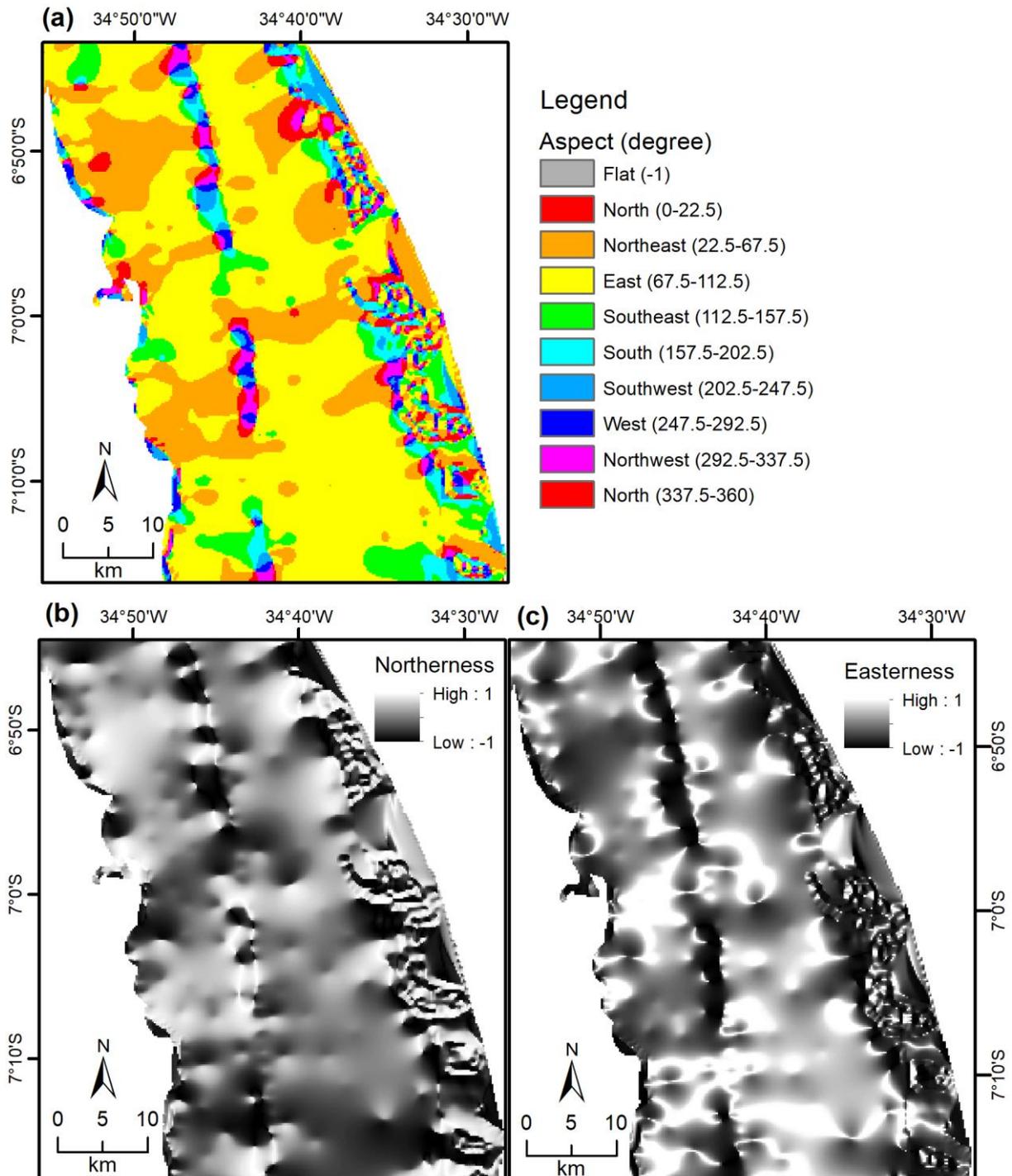


Figura 11. Direção do gradiente de superfície. (a) *Aspect*. (b) *Aspect* quantificado como *Northernness*. (c) *Aspect* quantificado como *Easternness*.

Na parte intermediária da plataforma (10 – 30 m de profundidade), o modelo batimétrico revelou a ocorrência de elevações intermitentes do fundo marinho, com orientação geral para a direção N – S. Estas elevações foram intercaladas por zonas sutilmente mais profundas, cuja a declividade tende para a direção NNE (Fig. 11b). Mergulhos realizados nesta região, confirmaram que se trata de estruturas constituídas por rocha calcária que os pescadores

denominam de “cabeços”. A direção predominante da declividade na região das elevações intermitentes é similar a direção de inclinação dos recifes costeiros e tendem acentuadamente para W (Fig. 11c).

Áreas com declividade entre 1 e 2° ocorrem de forma localizada na parte intermediária da plataforma, e estão associadas a face leste do eixo das elevações intermitentes. A face oeste desta estrutura, delimita regiões de baixa declividade da plataforma (Fig. 10b), e que estão predominantemente inclinadas na direção E (Figs. 11a e 11c). Contudo, a análise conjunta dos mapas de declividade (Fig. 10b), *Northernness* (Fig. 11b) e *Easternness* (Fig. 11c) indica a ocorrência de áreas com superfícies alternando de côncavo a convexo, o que confere ao relevo aparentemente simples, algum grau de movimentação.

Na parte externa da plataforma (> 30 m de profundidade), os maiores desvios de profundidade em relação à média (23 m) foram observados entre as isóbatas de 30 e 75 m. Esta região é caracterizada por um relevo movimentado, indicado pela declividade (Fig. 10b), o que lhe confere atributos do terreno diferenciados em relação ao padrão geral da plataforma. Esta variabilidade morfológica e topográfica, em zonas próximas a quebra da plataforma, ocorre tanto em margem passiva quanto ativa, e está relacionada a processos tectônicos e a variações no nível do mar durante o Neogene/Quaternário (HARRIS et al., 2014; HARRIS; WHITEWAY, 2011). Em consequência destes processos cíclicos de larga escala temporal e espacial surgem feições como *canyons*, vales incisos e *shelf valleys*, que são caracterizados morfolologicamente por acentuada variabilidade no gradiente batimétrico e na declividade (ALMEIDA; VITAL; GOMES, 2015; PUGA-BERNABÉU et al., 2013).

Em geral, a plataforma continental da Paraíba apresenta características fisiográficas similar com as plataformas Potiguar e de Pernambuco, pois são predominantemente planas, rasas e estreitas (MANSO; CORRÊA; GUERRA, 2003; VITAL et al., 2010). Assim, em relação a estes atributos geomorfométricos, parecem constituir uma região relativamente homogênea da plataforma do nordeste do Brasil.

O *broad-scale BPI index* (Fig. 12a) indicou que as estruturas geomorfológicas com desvios topográficos mais acentuados em relação a paisagem geral, ocorrem nas zonas interna, média e externa da plataforma continental. O *fine-scale BPI index* (Fig. 12b) indicou que as diferenças topográficas mais sutis, considerando a resolução espacial de 200 metros do modelo batimétrico, ocorrem exclusivamente na região mais próxima da quebra da

plataforma. Assim, a fisiografia da plataforma é marcada pela ocorrência de estruturas de considerável variabilidade topográfica, em áreas relativamente extensas.

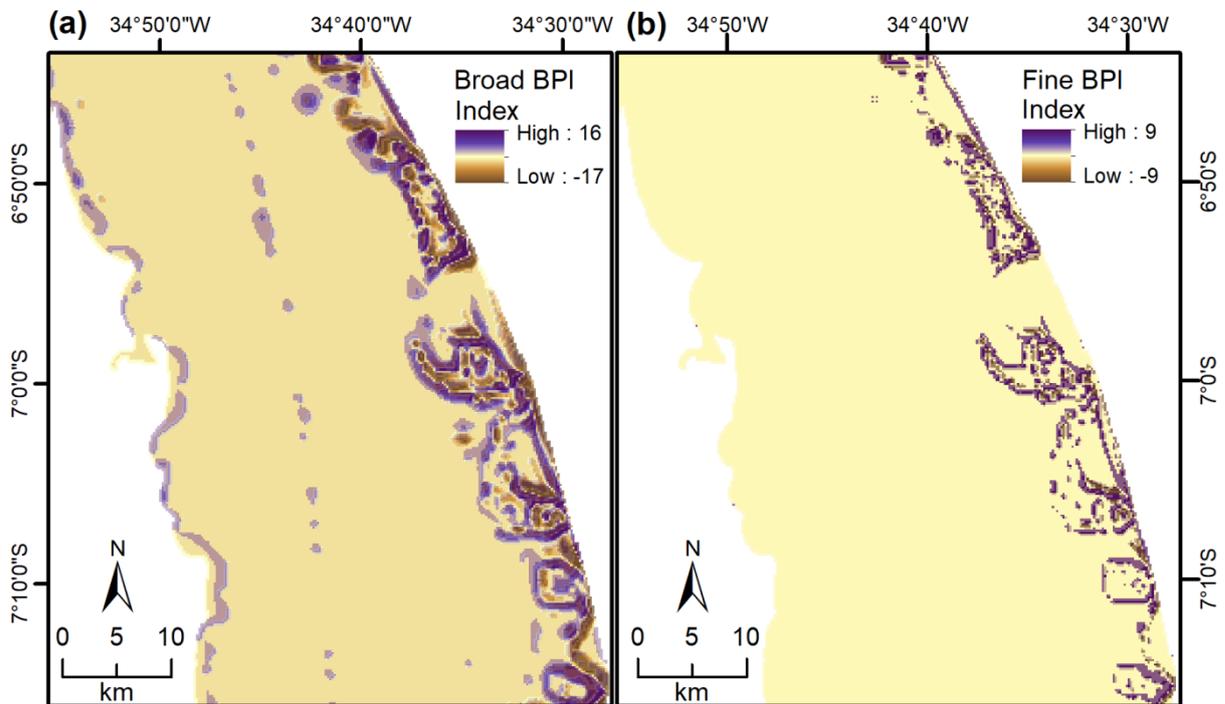


Figura 12. Variações na posição batimétrica calculada pelo *Bathymetric Position Index* (BPI). (a) *Broad BPI index* calculado com um fator de escala de 1.400. (b) *Fine BPI index* calculado com um fator de escala de 400.

A medida dos desvios topográficos do fundo marinho estão entre os parâmetros mais importantes para a caracterização de geohabitats (LECOURS et al., 2016b), pois a tridimensionalidade da estrutura estão associadas a riqueza de espécies (MACDONALD; BRIDGE; JONES, 2016). A complexidade estrutural de habitats, indicadas pelo BPI, tem efeito também sobre outros parâmetros oceanográficos (e.g. correntes) e sedimentares (e.g. zonas de deposição) e, por extensão, para o padrão geral das interações ecológicas na área de estudo. Para superar as limitações impostas pela resolução espacial dos dados batimétricos, novas tecnologias, como a teledetecção óptica e o LiDAR, podem levar a uma melhoria substancial do mapeamento de habitats bentônicos em macroescala (JAWAK; VADLAMANI; LUIS, 2015) e com menores custos operacionais, quando comparado a técnicas baseadas em aquisição de dados por métodos acústicos (PURKIS, 2017).

De acordo com o *broad BPI*, os recifes costeiros estão posicionados de forma paralela a subparalela aos contornos da linha de costa, com trechos delimitados por canais. Contudo, estes canais não representam cotas negativas do terreno, ou seja, eles não escavaram o leito marinho. Sua morfologia é definida pela a diferença entre a cota do leito marinho e a altura

dos recifes. Por isso, o *Broad BPI index* não indica cotas negativas na área dos recifes, onde as variações topográficas partem da base do leito marinho (cota de referência igual a zero) até valores positivos, que representam o topo dos recifes. A mesma explicação pode ser aplicada a linha de “cabeços”, com direção N – S, situados na região média da plataforma (Fig. 12a).

De acordo com o *Fine BPI index*, na plataforma externa ocorrem feições geomorfológicas caracterizadas por amplos desvios topográficos em pequenas distâncias, pois as feições foram mapeadas com resolução espacial de 200 metros e fator de escala igual a 400. Este index, assim como o *Broad BPI*, indicou um relevo extremamente movimentado na parte externa da plataforma. Os valores mais altos do index (valores positivos), indicaram a ocorrência de estruturas como pináculos e afloramentos rochosos, enquanto os valores negativos mostraram que depressões e canais complementam os principais contornos topográficos da paisagem. Todos estes elementos, que compõem a estrutura bentônica da plataforma externa, estão referenciados, pelo *BPI index*, em relação à região plana da plataforma, indicada por valores em torno de zero. Estas diferenças topográficas podem ser usadas como “*surrogates*” para métricas da heterogeneidade ambiental (DE LEO et al., 2013), entre localidades observadas em primeiro plano daquelas que estão em *background*, e explicam padrões espaciais nas características ecológicas ao longo de representações tridimensionais (ROBERT et al., 2017)

As áreas de maior complexidade estrutural foram indicadas por elevados índices de rugosidade (Fig. 13a), e ocorreram sobrepostas a áreas de maior declividade (Fig. 10b). Isto pode acontecer, dependendo da escala de análise das variáveis do terreno e da resolução espacial da batimetria (FRIEDMAN et al., 2012; LECOURE et al., 2015), ou mesmo indicar uma configuração topográfica específica do terreno, onde predomina um relevo de baixa declividade. Contudo, é importante observar que pode ocorrer a autocorrelação ou a covariação entre estes atributos (DU PREEZ, 2015), o que precisa ser apropriadamente considerado no caso destas variáveis serem utilizadas como preditoras ou “*surrogates*” na modelagem de habitats (LECOURE et al., 2016a; SUBARNO et al., 2016).

A necessidade de dissociação entre as variáveis declividade e rugosidade foi matematicamente solucionada com os métodos VRM e Arc-Chord (LECOURE et al., 2015). O índice VRM mostrou as variações de rugosidade em uma escala mais detalhada (Fig. 13a), uma vez que é baseado no cálculo do desvio padrão médio da superfície. O índice ACR (Fig. 13b) indicou as áreas de maior rugosidade por apresentarem o melhor plano de aderência (DU PREEZ, 2015; LECOURE et al., 2017), uma vez que o algoritmo calculou as superfícies tridimensionais interpoladas e, posteriormente, fez a projeção ortogonal no plano em UTM.

Desta forma, ambos os índices estão dissociados das métricas da declividade e realizaram as análises geomorfométricas adequadas as aplicações particulares desta pesquisa.

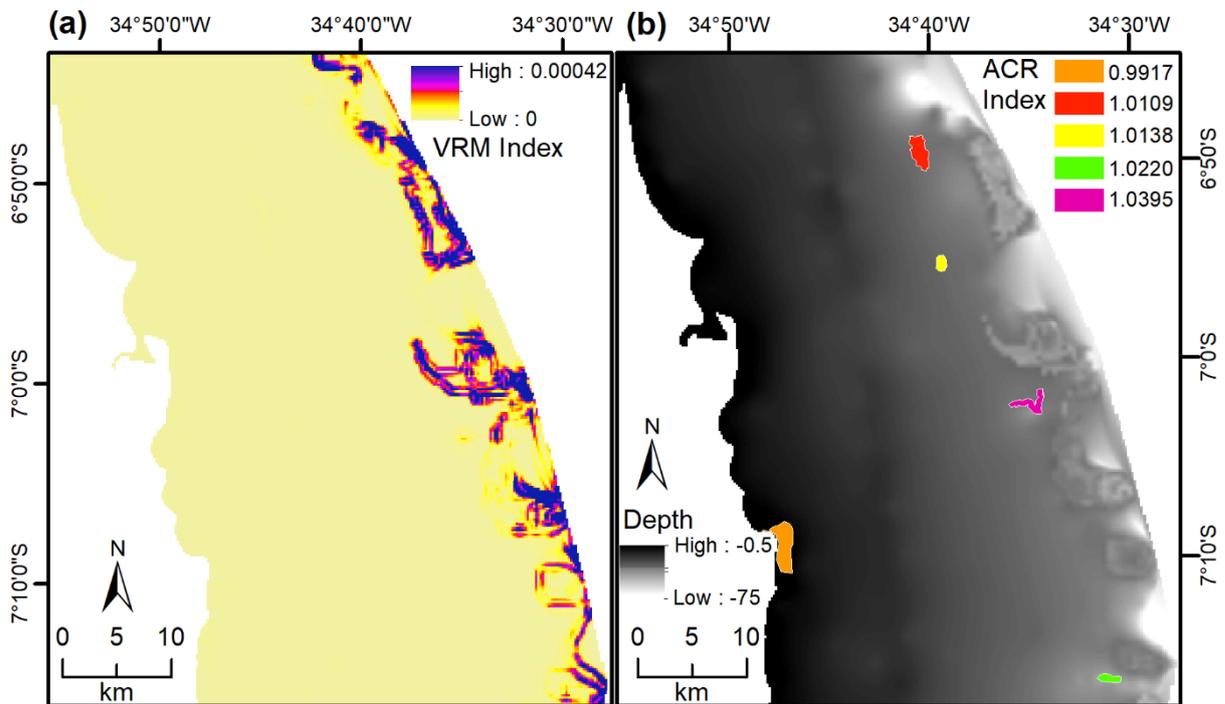


Figura 13. Variabilidade topográfica da plataforma. (a) Índice Vector Ruggedness Measure (VRM). (b) Índice Arc-Chord Ratio (ACR).

A rugosidade é amplamente utilizada em estudos interessados em investigar a influência da complexidade estrutural, sobre os padrões espaciais bióticos e abióticos em múltiplas escalas (BROWN et al., 2011). Ambos os índices de rugosidade, VRM e ACR (Figs. 13a e 13b), quantificaram a complexidade estrutural da paisagem, e indicaram que as áreas de maior heterogeneidade topográfica estão situadas na plataforma externa e nos recifes costeiros. As áreas indicadas pelo ACR *index* coincidem com as AOI previamente selecionadas (Fig. 5), o que possibilitou, posteriormente, investigar em mesoescala, os padrões espaciais de habitats e das assembleias de comunidades biológicas. Em estudos geomorfológicos regionais de macroescala, a rugosidade é um importante parâmetro para delimitar áreas na plataforma continental, pois a morfologia da superfície tem um relação intrínseca com as faces sedimentares (FIGUEIREDO JR. et al., 2015), com a delimitação de habitats (BOZEC; ALVAREZ-FILIP; MUMBY, 2015) e com o mapeamento e classificação das principais feições geomorfológicas (JEROSCH et al., 2016).

Na área de estudo, a aplicação de dados batimétricos obtidos da GEBCO, juntamente com as análises espaciais e geomorfométricas executadas em ambiente SIG, possibilitaram mapear e

classificar seis classes geomorfológicas reconhecidas como estruturas bentônicas (BLUM et al., 2013; GOES; BROWN; ARAÚJO, 2019; JEROSCH et al., 2016; LUNDBLAD et al., 2006). A Tabela 1 apresenta os atributos geomorfométricos selecionados, para categorizar as estruturas bentônicas. A Figura 14 apresenta as estruturas bentônicas que ocorrem na área de estudo, e destaca a representatividade e a diversidade morfológica das feições do leito marinho.

Tabela 1. Tabela de decisão, que resume os fatores usados para a classificação das estruturas bentônicas na área de estudo.

ID	Benthic Structures	Broad BPI		Fine BPI		Slope		ACR		VRM	
		Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
1	Flat Plains		-4				1				0
2	Incised Valley	-69	-1,107				1	1.022	1.039		
3	Flat Ridge Tops		60						0.991		
4	Rock Outcrop Highs	125	449	240	982			1.0109	1.013		
5	Pinnacles on Valley			-255	-2,236						0.001
6	Local Pinnacles	514	1,033	1,230	2,221						0.001

Os resultados do fluxo de análises geomorfométricas (Fig. 3), possibilitaram reconhecer os padrões do relevo da plataforma continental do Estado da Paraíba, ainda não descritos em qualquer trabalho anterior. O mapeamento de macroescala ajudou a conhecer e a entender as principais características topográficas e fisiográficas da área de estudo, além de estabelecer uma *baseline* para as análises espaciais em outras escalas (e.g. meso e microescalas). Assim, o mapeamento das estruturas bentônicas em macroescala passou a integrar o fluxo de análises, uma vez que mostrou-se adequado para aninhar o mapeamento temático de habitats em mesoescala, através do uso de técnicas similares àquelas empregadas em trabalhos recentes (DE CLIPPELE et al., 2017; GAFFEIRA; DOLAN; MONTEYS, 2018).

Entretanto, esta técnica exige consciência do usuário quanto as propriedades espaciais dos dados batimétricos, pois a heterogeneidade de habitats é dependente da escala espacial (DE LEO et al., 2013). O mapeamento geomorfológico de macroescala (Fig. 14) pode ser considerado adequado para indicar “habitats potenciais” (GOES; BROWN; ARAÚJO, 2019), mas não é suficiente para suportar análises espaciais relacionando a distribuição de

comunidades bentônicas com fatores ambientais, como sedimentos. Neste cenário, a modelagem de habitats e das comunidades biológicas necessita de razoável acuracidade e de validação dos dados em campo (FREITAS et al., 2006).

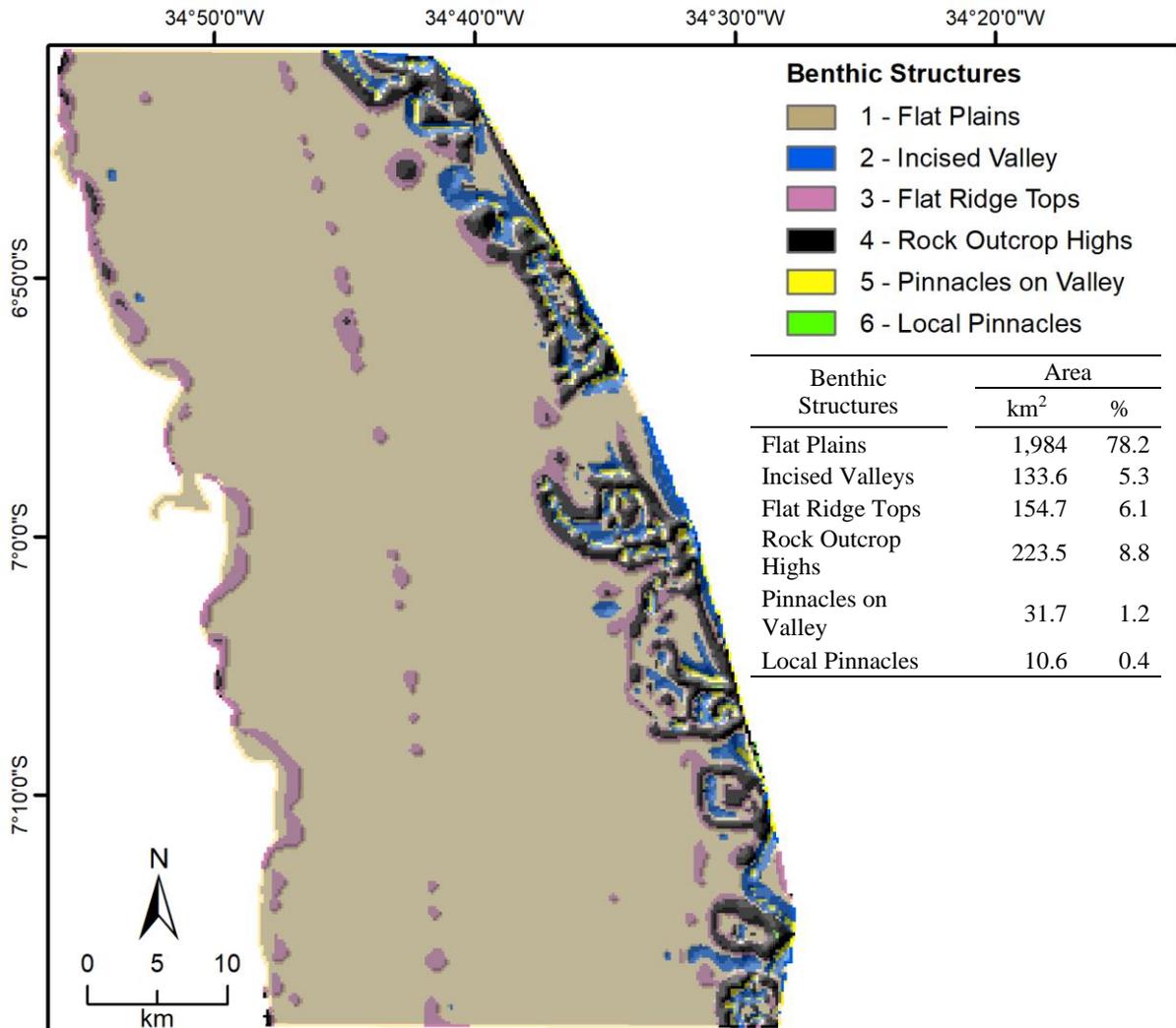


Figura 14. Classificação geomorfológica das estruturas bentônicas na área de estudo.

4.2 Geohabitats marinhos

Para atingir os objetivos desta pesquisa, foi conceitualmente assumido que “*multiple scale analyses are those that consider data at multiple successive scales, and multiscale analyses are those that integrate information from multiple scales simultaneously*” (DOLAN, 2012).

A modelagem espacial e a classificação de habitats bentônicos, através de modelos digitais do terreno e das variáveis ambientais (e.g. profundidade, declividade, rugosidade, tipo de substrato), é rigorosamente dependente da estratégia de análise (e.g. *multiple scale* e/ou *multiscales*) e da resolução espacial da batimetria (RENGSTORF et al., 2012). Estudos

recentes que investigaram a estrutura topográfica e o seu relacionamento com habitats de *cold-water corals* (MIYAMOTO et al., 2017), concluíram que é necessário uma resolução espacial de 100 metros ou menos, para a modelagem de habitats destes ambientes. Assim, o presente estudo utilizou modelos espaciais em *multiple scale analyses*, com resolução entre 12 e 30 metros, para investigar a distribuição de habitats e das comunidades bentônicas em setores específicos da plataforma (e.g. AOI, Fig. 5). Isto explica, a escolha de manter o mapa de classificação geomorfológico em macroescala, como base para integrar os dados e análises vindos de meso e microescala. Esta abordagem, mostrou-se adequada para estudar complexos ecossistemas tropicais e obter os potenciais benefícios do “*crowd-sourced regional seafloor mapping*” proposto em estudo recente (NOVACZEK; DEVILLERS; EDINGER, 2019).

De modo similar ao método aqui apresentado, a adição de fontes alternativas de dados batimétricos tem sido incentivada, para preencher lacunas na cobertura de batimetria de feixe único ou de feixe múltiplo (BROTHERS et al., 2013; ELVENES et al., 2014). Diferentes técnicas de batimetria são rotineiramente utilizadas, para obter informações sobre as características dos fundos marinhos (BROWN et al., 2011), e podem ser eficientemente combinadas entre si para melhorar a acuracidade do modelo batimétrico digital (CERI JAMES et al., 2012). Esta integração de dados é enfatizada dentro de um contexto, em que menos de 9% do leito marinho foram mapeados com dados batimétricos de alta resolução (GEBCO COMPILATION GROUP, 2019).

Contudo, mesmo em regiões do oceano com elevada cobertura de dados batimétricos, há limitações para o mapeamento de habitats em microescala (MISIUK; LECOURS; BELL, 2018). Este cenário decorre do fato que todas as técnicas e métodos aplicados têm certas limitações associadas aos custos (e.g. expedições oceanográficas), ao tipo de equipamento (e.g. frequência dos pulsos sonoros) e às condições ambientais (e.g. profundidade e turbidez). Para a aquisição de dados geofísicos ou da biodiversidade de microescala nas zonas mesofóticas, além de 40 metros de profundidade, observações e dados são obtidos através de submarinos ou veículos operados remotamente (VAN DEN BELD et al., 2017), mas raramente por mergulhadores e vídeo (MARTÍN-GARCÍA et al., 2013; ROCHA et al., 2018).

O processo científico para entender as características de geohabitats, impõe outro desafio que é a seleção de um método padronizado de classificação dos ambientes marinhos, pois eles diferem substancialmente em propriedades que comprometem os resultados do mapeamento (STRONG et al., 2019).

Esta pesquisa adotou o *Marine Ecological Classification Standard* – CMECS (COMITTEE, 2012) após criteriosa análise, na qual foram consideradas: a identificação das imagens de referência, apresentadas pelos manuais, com os ambientes da área de estudo; as técnicas de mapeamento utilizadas; a(s) escala(s) espaciais de análise(s); e os objetivos do estudo. O CMECS é um robusto sistema de classificação de ambientes marinhos, que possibilita ao pesquisador atingir alta assertividade na definição e delimitação dos tipos habitats bentônicos em ambientes tropicais, onde a diversidade de habitats e a variedade de biótopos é normalmente alta (KINGON, 2018; ZARE et al., 2017). Além disso, o sistema propiciou o correto enquadramento da área de estudo em um fluxo hierárquico de classificação (Fig. 15), através de exemplos ilustrados do manual de referência e de descrições de cada unidade.

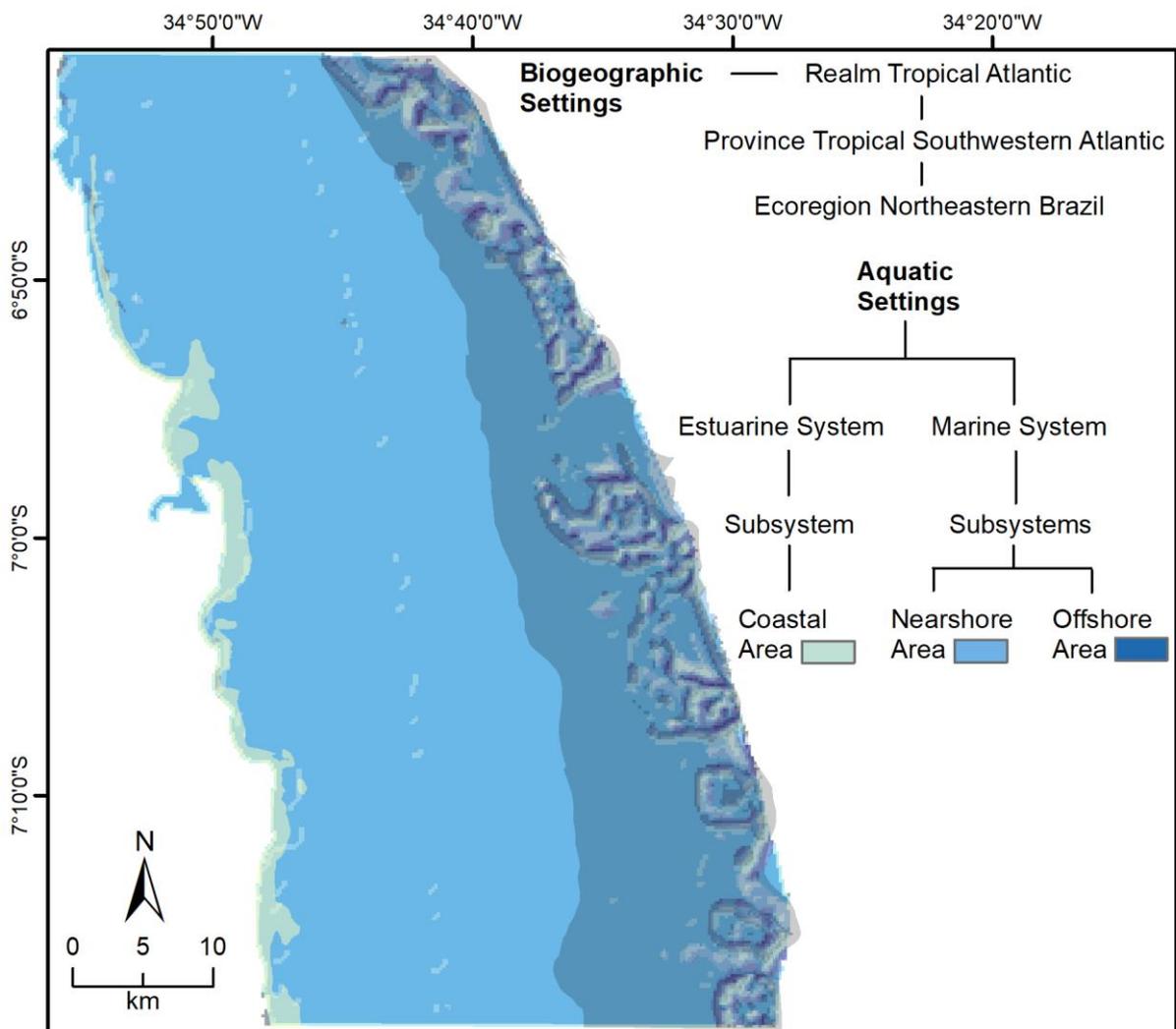


Figura 15. Biogeographic e Aquatic Settings da área de estudo.

Seguindo o enquadramento da área de estudo no sistema CMECS, a Figura 15 mostra que o *Biogeographic Settings* foi hierarquizado em *Realm Tropical Atlantic*, *Province Tropical*

Southwestern Atlantic, Ecoregion Northeastern Brazil. O *Aquatic Settings* está dividido entre dois sistemas, *Estuarine System* e *Marine System*, que foram identificados considerando a zona de influência de descargas de plumas de rios, a estabilidade da salinidade em 35, a influência do fluxo de marés de sizígia (MHWS – MLWS) e das marés de quadratura (MHWN – MLWN), e a posição de áreas naturalmente delimitadas na costa (Fig. 16). Posteriormente, os subsistemas foram categorizados de acordo com sua profundidade em *Coastal Area* (0 - 5 m), *Nearshore Area* (5 - 30 m) e *Offshore Area* (> 30 m).



Figure 16. *Aquatic Settings* da área de estudo. *Estuarine System* (a) ocorre sobre o continente limitado por terra, e se conecta diretamente ao *Marine System* através do *Coastal Area Subsystem* (b), que é adjacente ao *Nearshore Area Subsystem* (c). O *Offshore Area Subsystem* ocorre além da linha do horizonte na imagem, e é limitado pela quebra da plataforma continental. **Inset:** As falésias da Formação Barreiras/Pós-Barreiras predominam na parte continental, próximas a *Coastal Area*.

Geoform Components

Toda a área de estudo está localizada na plataforma continental (*Physiographic Setting*) de uma Margem Continental Passiva (*Tectonic Setting*), onde foram identificados e classificados seis *Geoform Type* (Fig. 17).

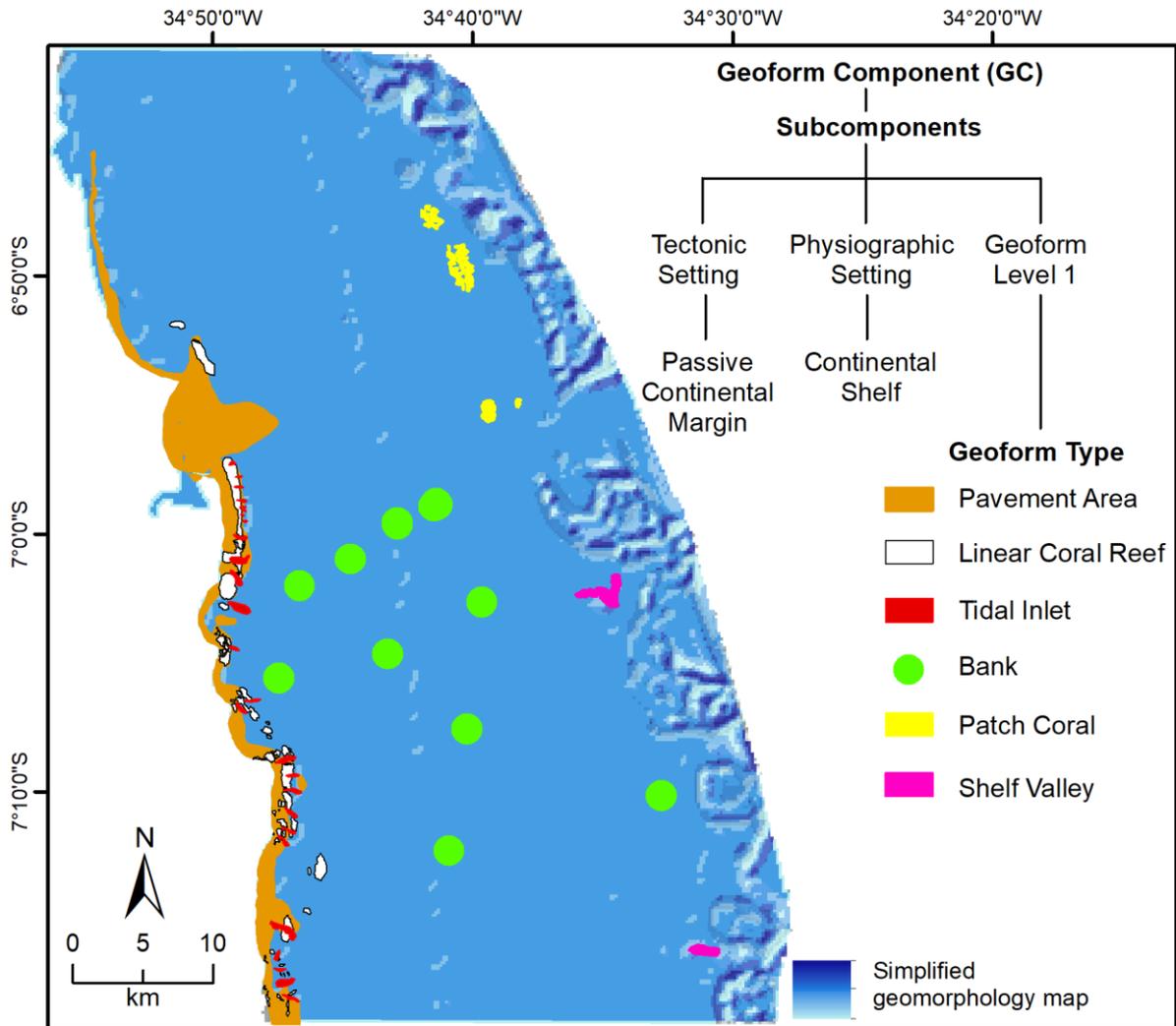


Figure 17. Geomorph Component (GC) da área de estudo.

Geomorph Type da área de estudo, estão contidos no nível hierárquico *Geomorph Level 1*, e foram classificados, quanto a origem, em *Geologic Geomorphs* e *Biogenic Geomorphs*.

Geologic Geomorphs são formadas por processos abióticos (e.g. erosão, deposição, soerguimento, subsidência), que podem ser resultado de processos sísmicos e tectônicos locais ou regionais. Outros fatores ambientais e geoquímicos como ondas, correntes, ventos e precipitação química contribuem para dar qualidades distintas as *Geologic Geomorphs*. Nesta categoria foram enquadradas as *Geomorph Type: Pavement Area, Bank, Shelf Valley* e *Tidal Inlet*.

Biogenic Geomorphs são feições físicas, nas quais ocorreu a ação de organismos e consistem, primariamente, dos diferentes tipos de recifes. Assim como em todas as definições e descrições relacionadas à *Geomorph Component*, no *Biogenic Component*, o importante é a forma física, geralmente dura e fixa que caracteriza o recife, e não a biologia viva que pode

ter participado na sua gênese. Assim, qualquer das *Biogenic Component* relacionadas a recifes, pode ou não ter corais vivos ou qualquer outra forma de vida presente, mas pode ter incorporado carbonato de cálcio dissolvido na estrutura do recife, incluindo a cimentação de outros tipos de sedimentos. Nesta categoria foram enquadradas as *Biogenic Component: Linear Coral Reef e Patch Coral*.

A Figura 17 indicou que *Pavement Area*, *Linear Coral Reef* e *Tidal Inlet* são topologicamente adjacentes e ocorreram justapostas a *Coastal Area* (Fig. 15). Assim, estas *Geoform Component* compõem um conjunto heterogêneo de geohabitats marinhos, que estão geograficamente mais próximos das falésias da Formação Barreiras/Pós-Barreiras (Fig. 16). *Bank* ocorreu predominantemente na *Nearshore Area* (apenas um sítio, em 32 m de profundidade), enquanto *Patch Coral* e *Shelf Valley* ocorreram exclusivamente na *Offshore Area*. Todos *Geoform Type* estão representadas como AOI (Fig. 5). Para cada AOI foi obtido o modelo batimétrico (Fig. 18), com resolução espacial entre 12 e 30 metros, e executado um fluxo de análises espaciais.

Detalhes da geomorfometria local de cada AOI foram usadas para apoiar a *multiple scale analyses* (DOLAN, 2012) dos geohabitats e das comunidades bentônicas. Esta estratégia ofereceu importantes evidências, em mesoescala, dos processos tectônicos e sedimentares relacionados a Formação Barreiras/Pós-Barreiras, além de mostrar como estes processos afetaram os padrões espaciais dos componentes bióticos e abióticos, na área da plataforma continental.

Area of Interest 1 (AOI 1): Pavement Area, Tidal Inlet e Linear Coral Reef

A morfologia da *Pavement Area* foi caracterizada pela baixa profundidade, inferior a 3 metros (Fig. 19a), pelo relevo sem desníveis pronunciados (Fig. 19b) e pela declividade próxima de zero (Fig. 19c).

Na *Pavement Area* a superfície do substrato inconsolidado está parcialmente recoberta por macroalgas e rodolitos (Fig. 20d e 20e), que conferem rugosidade à esta superfície somente detectável em escala muito fina (Fig. 19d). Macroalgas são visualmente predominantes, mas outros organismos bentônicos também podem ser encontrados (e.g. corais escleractíneos, zoantídeos, moluscos), mas não em densidade suficiente para obscurecer o substrato abaixo (Fig. 20e).

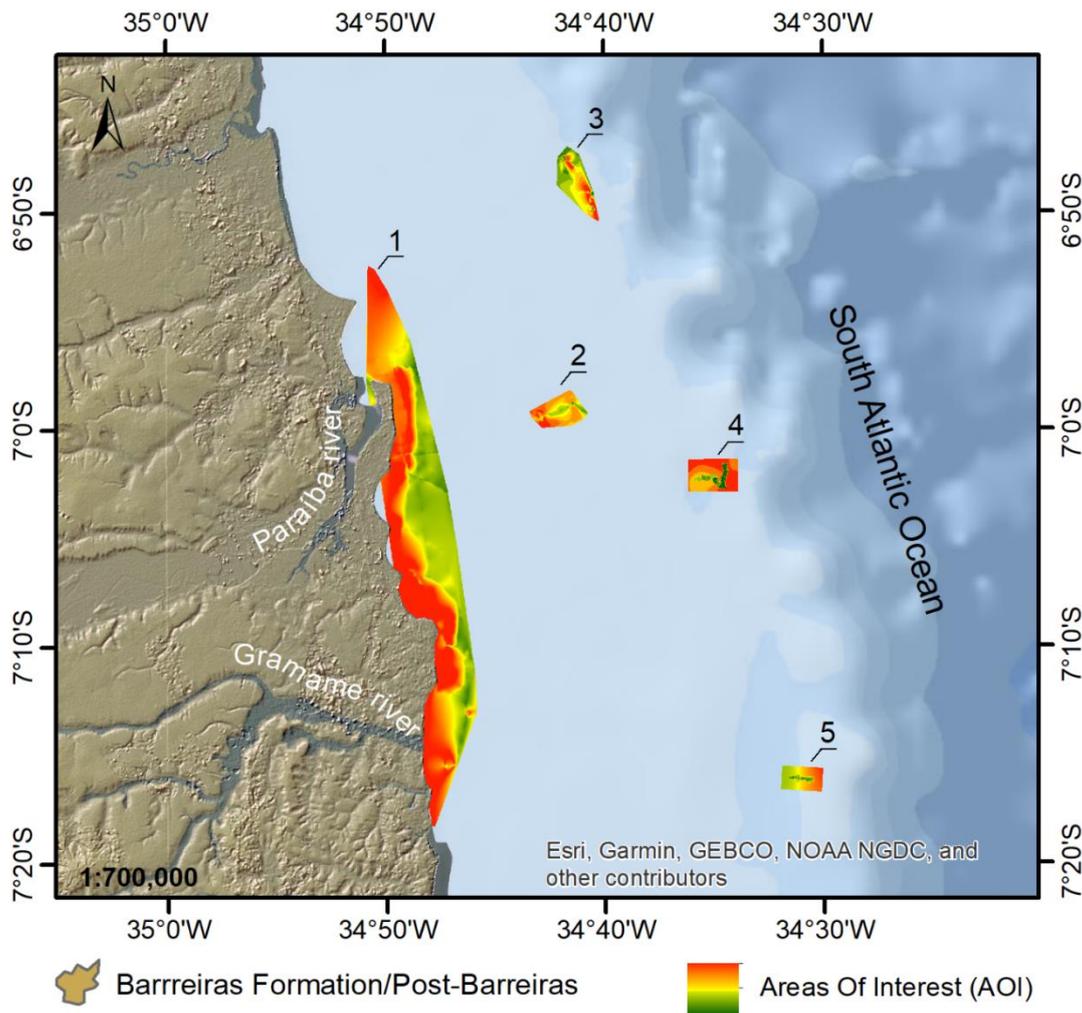


Figure 18. Modelos batimétricos digitais das *Areas Of Interest* (AOI). Os números indicam 5 áreas da plataforma, que foram mapeadas em mesoescala.

Uma característica importante da *Pavement Area*, é a de permanecer totalmente submersa mesmo durante as marés de sizígia de baixa-mar. A amplitude do ciclo de marés semidiurna e a fisiografia deste trecho da plataforma possibilitaram a perenidade da lâmina d'água em profundidade adequada. Nestas condições ambientais, ocorreu o ciclo permanente de colonização/recolonização, por diversos tipos de organismos, desde algas até infauna.

A análise dos sedimentos superficiais (Tabela 2) revelou elevada heterogeneidade sedimentar na *Pavement Area*, pois a composição das amostras variou entre 100% de carbonato e 99% de *Fine Unconsolidated Substrate (FUS)*, o qual é predominante composto pela fração *Sand*. O mapeamento de habitats na estreita plataforma continental do arquipélago de Maltese (PRAMPOLINI et al., 2018), revelou que a sua cobertura sedimentar heterogênea é influenciada pelo contexto tectônico e pelas características sedimentares das formações geológicas adjacentes. Na Bacia Potiguar (NE do Brasil), as fácies sedimentares são

igualmente heterogêneas em áreas próximas da costa, enquanto os habitats recifais, nos trechos médio a externo da plataforma, estão possivelmente estruturados em substratos da Formação Guamaré (GOMES et al., 2015).

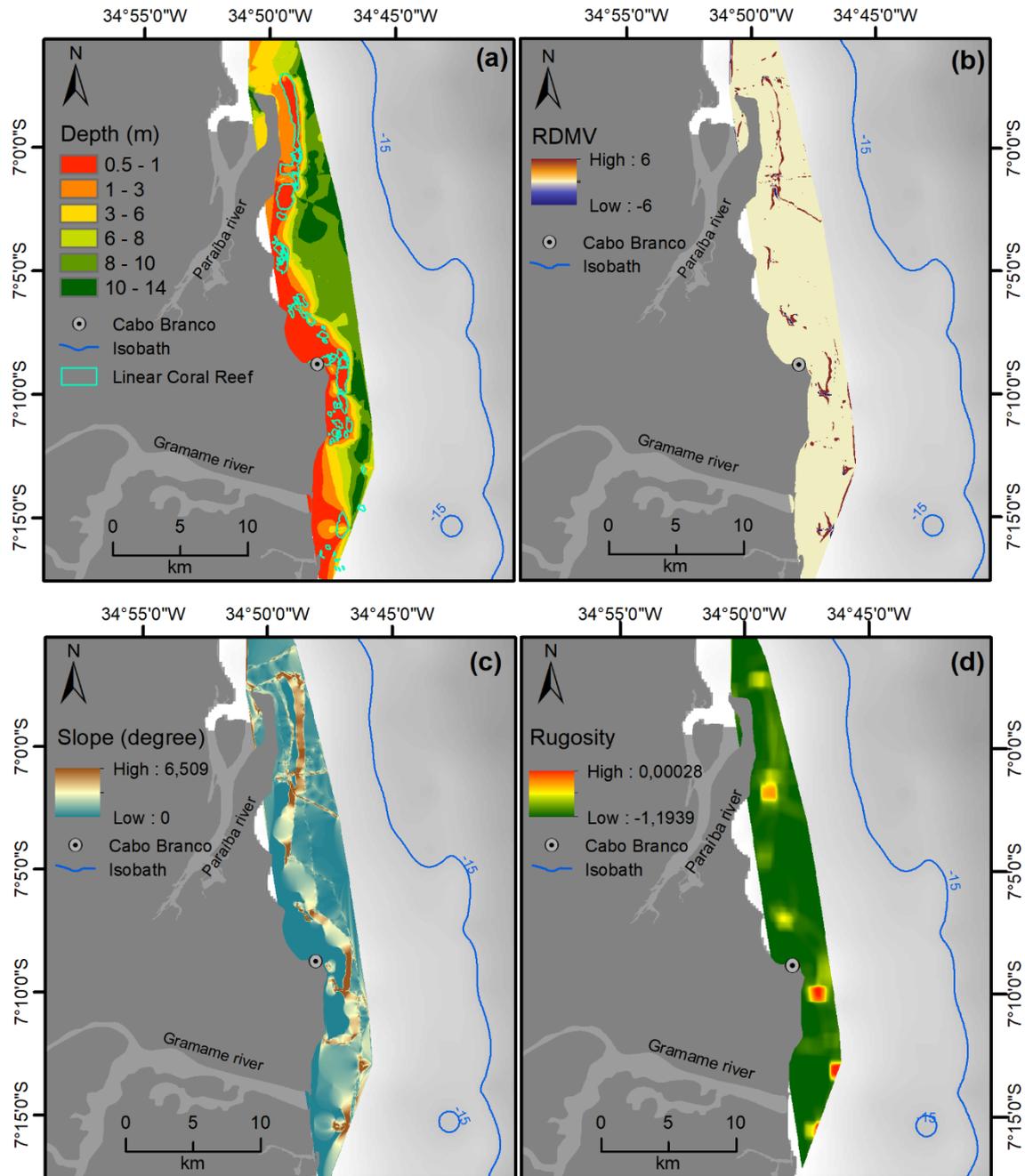


Figura 19. Geomorfometria da AOI 1. (a) Variação da profundidade (b) *Relative Deviation from Mean Value* – RDMV. (c) *Slope*. (d) *Rugosity*.

A *Pavement Area* é formada principalmente, mas não exclusivamente, por sedimentos erodidos das falésias adjacentes da Formação Barreiras/Pós-Barreiras (Fig. 21). A heterogeneidade sedimentar reflete a composição das fácies sedimentares do contexto

geológico, representados por depósitos de carbonatos (Cretáceos), depósitos siliciclásticos retrabalhados e cimentados por óxidos de ferro, além de carbonatos marinhos recentes (ANDRADES FILHO; ROSSETTI, 2015; BALSAMO et al., 2013; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

A massa de rochas, provenientes das falésias, é descrita e classificada pelo sistema CMECS, como *Geoform Type, de Geologic Origin* denominada *Overhang (Cliff)*, que podem formar cúspides rochosas ao longo da linha de costa (Fig. 20).



Figura 20. *Geoform Types* sobrepostas a *Coastal Area*. (a) Vista aérea parcial da *Coastal Area*. A seta indica exatamente o local da imagem (b), que mostra em detalhe a *Tidal Inlet*. (c) *Linear Coral Reef*, situado na zona de transição entre a *Coastal Area* (esquerda) e a *Nearshore Area*. (d) O círculo vermelho indica o local da imagem subaquática (e), na profundidade de 3 metros, que mostra o substrato inconsolidado da *Pavement Area* parcialmente recoberto por rodolitos e macroalgas.

Tabela 2: Composição e granulometria do sedimento carbonato-siliciclástico, na plataforma continental da Bacia da Paraíba.

Sites (ID)	Depth (m)	Composition (%)		FUS (%)			Sand Fraction (%)				
		CaCO ₃	FUS	Clay	Silt	Sand	VFS	FS	MS	CS	VCS
1	2.4	95.41	4.59	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	35.00	65.00
2	30.6	55.54	44.46	0.24	0.28	99.48	0.29	1.41	6.63	60.00	31.15
3	5.6	92.10	7.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	80.95	19.05
4	1.7	90.34	9.66	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	85.06	14.94
5	35.0	70.12	29.88	0.00	0.00	98.86	0.00	0.00	0.00	34.36	64.50
6	2.2	7.96	92.04	0.02	0.07	99.91	0.12	0.10	2.67	89.03	8.00
7	62.3	96.12	3.88	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	22.58	77.42
8	43.0	81.53	18.47	0.07	1.29	98.64	1.39	2.13	2.78	87.69	4.65
9	34.0	91.94	8.06	0.00	0.00	98.88	0.00	0.00	0.00	26.15	72.73
10	5.3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	3.4	20.03	79.97	0.14	0.07	99.79	0.20	0.27	4.38	76.48	18.46
12	33.0	86.48	13.52	0.33	3.87	95.80	3.95	3.06	4.30	70.21	14.29
13	26.6	97.27	2.73	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	7.69	92.31
14	9.7	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	4.6	86.64	13.36	0.01	0.46	99.53	0.18	0.96	6.04	66.67	25.69
16	27.0	66.36	33.64	0.13	0.83	99.04	0.82	3.38	10.33	72.31	12.20
17	38.0	79.25	20.75	0.29	0.47	99.25	0.68	1.97	3.97	81.74	10.88
18	52.0	89.44	10.56	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	34.62	65.38
19	34.4	70.89	29.11	0.22	0.29	99.49	0.77	1.68	7.14	54.71	35.19
20	42.0	86.08	13.92	0.03	0.80	99.17	1.25	1.93	4.14	82.54	9.32
21	33.0	46.88	53.12	0.01	0.32	99.67	0.35	1.60	4.88	81.09	11.75
22	46.0	95.20	4.80	0.00	0.00	89.95	0.00	0.00	0.00	48.48	41.46
23	35.8	44.28	55.72	0.08	0.45	99.47	0.22	0.36	1.37	71.02	26.49
24	33.0	6.21	93.79	0.19	0.09	99.73	0.51	2.21	7.03	81.52	8.46
25	7.7	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	3.3	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	20.1	98.35	1.65	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
28	30.0	69.26	30.74	0.10	0.32	99.58	1.16	2.52	10.03	71.14	14.73
29	2.6	92.73	7.27	0.15	2.31	97.54	2.40	5.06	6.58	57.58	25.93
30	31.0	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	9.1	89.77	10.23	0.17	0.34	99.48	0.92	0.22	10.52	69.77	18.06
32	24.5	92.23	7.77	0.06	0.93	99.01	2.62	4.13	6.95	71.88	13.43
33	20.1	94.50	5.50	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	48.94	51.06
34	3.0	0.83	99.17	0.08	0.68	99.24	0.59	4.84	18.59	68.66	6.57
35	9.4	53.17	46.83	3.21	9.89	85.90	4.47	2.45	3.23	68.83	6.92
36	2.7	1.53	98.47	0.03	0.00	99.97	0.10	0.21	1.73	97.62	0.31
37	13.4	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	2.4	86.33	13.67	1.35	2.26	96.39	2.10	2.14	1.19	84.00	6.96
39	14.4	4.33	95.67	0.03	0.00	99.97	0.08	0.11	1.56	94.98	3.23
40	10.4	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
41	6.5	71.84	28.16	0.24	1.21	98.55	0.95	1.11	1.59	90.16	4.72
42	3.0	94.18	5.82	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00

Percentages based on weight. Wentworth grain size chart from United States Geological Survey to aggregate class and sand fraction: clay < 3.9 μm ; silt in 3.9 – 62.5 μm ; very fine sand (VFS) in 62.5 –

125; fine sand (FS) in 125 – 250 μm ; medium sand (MS) in 0.25 – 0.5 mm; coarse sand (CS) in 0.5 – 1 mm and very coarse sand (VCS) in 1 – 2 mm. Fine Unconsolidated Substrate (FUS).



Figura 21: Sedimentos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras na Coastal Area. As imagens (a) e (b) mostram o processo erosivo das falésias e o acúmulo massivo de rochas na sua base, *Overhang (Cliff)*. Em algumas situações, ocorre a formação de cúspides ao longo da linha de costa (c) e (d), que deixam assinaturas (indicadas pelas setas) das mudanças do nível do mar, em consequência da glacioeustasia e/ou da subsidência regional da porção marginal da Bacia da Paraíba.

Na zona costeira da Bacia da Paraíba, complexos cenários geológicos e sedimentares terrestres resultaram na formação de diversos tipos de depósitos (ANDRADES-FILHO et al., 2014). Na área de estudo, a parte exposta da Formação Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras têm uma espessura média de ~50 m e consistem, principalmente, de arenitos de granulação muito fina a grossa (ROSSETTI et al., 2011a). A erosão e o retrabalho dos depósitos do Barreiras formaram paleossolos lateríticos com concreções colunares, de 3 a 10 metros de

espessura, que cobrem grandes áreas das zonas costeiras das bacias marginais no nordeste do Brasil (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

O retrabalho da unidade do Barreiras formou coberturas *lag-like*, compostas por classes lateríticas e rochas que compõem os depósitos Pós-Barreiras, em coberturas locais das zonas costeiras (ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013). Estes depósitos Pós-Barreiras apresentam um baixo grau de litificação, que depende da quantidade e do tipo de cimentação de óxido de ferro induzida pelo tempo (BALSAMO et al., 2013).

O processo erosivo das falésias costeiras, durante o Holoceno, foi causado principalmente pelas flutuações do nível do mar, e resultou na formação de substratos consolidados em subsistemas costeiros, em várias partes do nordeste do Brasil (ANDRADES-FILHO et al., 2014; BARRETO et al., 2002; LEAO; DOMINGUEZ, 2000; ROSSETTI et al., 2011b; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013; SUGUIO et al., 2013).

A geoforma *Linear Coral Reef* é a mais extensa feição da área de estudo e a sua forma física resulta do *Overhang (Cliff)* de paleofalésias, pois a sua estrutura e composição constituem, primariamente, de *clasts* e rochas lateríticas erodidas e redepositadas da Formação Barreiras/Pós-Barreiras (Figs. 22a e 22b), em grande parte cimentados por óxido de ferro (BALSAMO et al., 2013), que forneceram um substrato adequado para a colonização de várias espécies bentônicas na *Coastal Area* (Figs. 22c – 22h).

Linear Coral Reef está orientada de forma paralela a subparalela em relação a linha de costa e ao limite da plataforma, enquanto *Tidal Inlets* estão orientadas de forma perpendicular à estas feições. A morfologia de *Tidal Inlet* constitui em seções abertas, na forma de canais, que mantêm o fluxo hidrodinâmico das marés, entre os subsistemas *Coastal Area* e *Nearshore Area*. O índice RDMV (19b) indicou, pelos valores negativos, que em alguns locais, ocorreu o aprofundamento do leito marinho nas *Tidal Inlet*, provavelmente causado pelo fluxo das marés. Contudo, a sua gênese e estrutura decorre do arranjo espacial das rochas, que constituem a *Linear Coral Reef*. As amostras de sedimentos superficiais nas áreas da *Tidal Inlet* foram compostas, principalmente, de frações de areia grossa a muito grossa, transportadas pela alta energia hidrodinâmica das marés na região, que podem oscilar, em condições de sizígia, entre zero e 2,8 metros.

A natureza rochosa da *Linear Coral Reef* e o processo de sua gênese, condicionaram um padrão morfológico tridimensional e heterogêneo a sua geometria. O RDMV (Fig. 19b) indicou, pelos valores positivos, que a geoforma está em posição mais elevada do que

qualquer outra estrutura na AOI 1. As áreas de maior declividade estão voltadas para o mar (Fig. 19c) e são frequentemente associadas a alta rugosidade (Fig. 19d). Estes atributos do terreno indicam a complexidade morfológica destas superfícies e confirmam sua similaridade com outros recifes do NE do Brasil (ARAÚJO; AMARAL, 2016; LEÃO et al., 2016).



Fig. 22. Geofoma Linear Coral Reef na Coastal Area. (a) Vista geral da Formação Barreiras/Pós-Barreiras, no Cabo Branco. O processo contínuo de erosão das falésias costeiras resultou em *Overhands* (*Cliff*) em zonas intertidais (b). Estes depósitos, retrabalhados e depositados na *Coastal Area*, forneceram substrato para colonizadores de recifes como zoantídeos (c) e (d) e moluscos (h), na zona de entremarés (g), e para macroalgas (entre outros organismos) nas zonas de maior profundidade, entre as isóbatas de 10 e 12 metros (e).

Aplicando o conceito de *multiscale analysis* (DOLAN, 2012), a integração de informações geomorfométricas de mesoescala com informações geofísicas e imagens de microescala,

sugere que a AOI 1 é um indissociável mosaico de geohabitats. A gênese e a forma física dos *Geomorph Components* estão relacionadas a processos de larga escala espacial e temporal (e.g. glacioeustasia, subsidências), e estão sob a influência direta dos processos morfotectônico e sedimentar da Formação Barreiras/Pós-Barreiras.

Area of Interest 2 (AOI 2): Bank

Bank são áreas nas quais o relevo alterna a superfície entre trechos côncavos e trechos convexos sutilmente mais elevados, quando comparado ao nível médio do leito marinho da vizinhança. Este *Geomorph Type*, classificado como *Geologic Origin*, ocorreu exclusivamente na porção centro-sul da área de estudo, e em profundidades inferiores a 36 metros.

A geomorfometria indicou que, em alguns setores do leito marinho, pode ocorrer um gradiente batimétrico relativamente alto (~12 m), em uma distância geográfica pequena (< 1 km). Contudo, profundidades entre 23 e 27 m predominam na maior parte do leito marinho (Fig. 23a). O RDMV indicou que há dois setores da AOI 2, nos quais afloramentos rochosos e canais ocorrem de forma mais consistente e que caracterizam a paisagem local (Fig. 23b). A declividade nestes locais é relativamente acentuada (Fig. 23c), quando comparada à declividade indicada para plataforma em macroescala (Fig. 10b). Isto decorre da resolução espacial do modelo batimétrico digital (< 30 m), que providencia um melhor entendimento das características da paisagem marinha e confirmam o potencial benefício do *crowd-sourced regional* (NOVACZEK; DEVILLERS; EDINGER, 2019).

No algoritmo do TASSE (LECOURS, 2017), a declividade e a rugosidade estão matematicamente dissociadas (DU PREEZ, 2015), de forma que a sobreposição, entre estas duas variáveis do terreno (Figs. 23c e 23d), indica a ocorrência de geohabitats complexos estruturalmente. Estes parâmetros do terreno são considerados preditivos de alta biodiversidade (MARTÍN-GARCÍA et al., 2013; PRZESLAWSKI et al., 2011; RENGSTORF et al., 2012), pois a tridimensionalidade e a superfície heterogênea oferecem suporte para o desenvolvimento de comunidades biológicas com diferentes estratégias de colonização e recrutamento (DAVIES; MATZ; VIZE, 2013; ROBERT et al., 2017). Desta forma, as características estruturais da *Bank* sugerem temas para futuros estudos, sobre a importância de pequenas áreas de habitats complexos (EWERS; DIDHAM, 2006), para os padrões da diversidade biológica regional e para o planejamento de áreas protegidas.

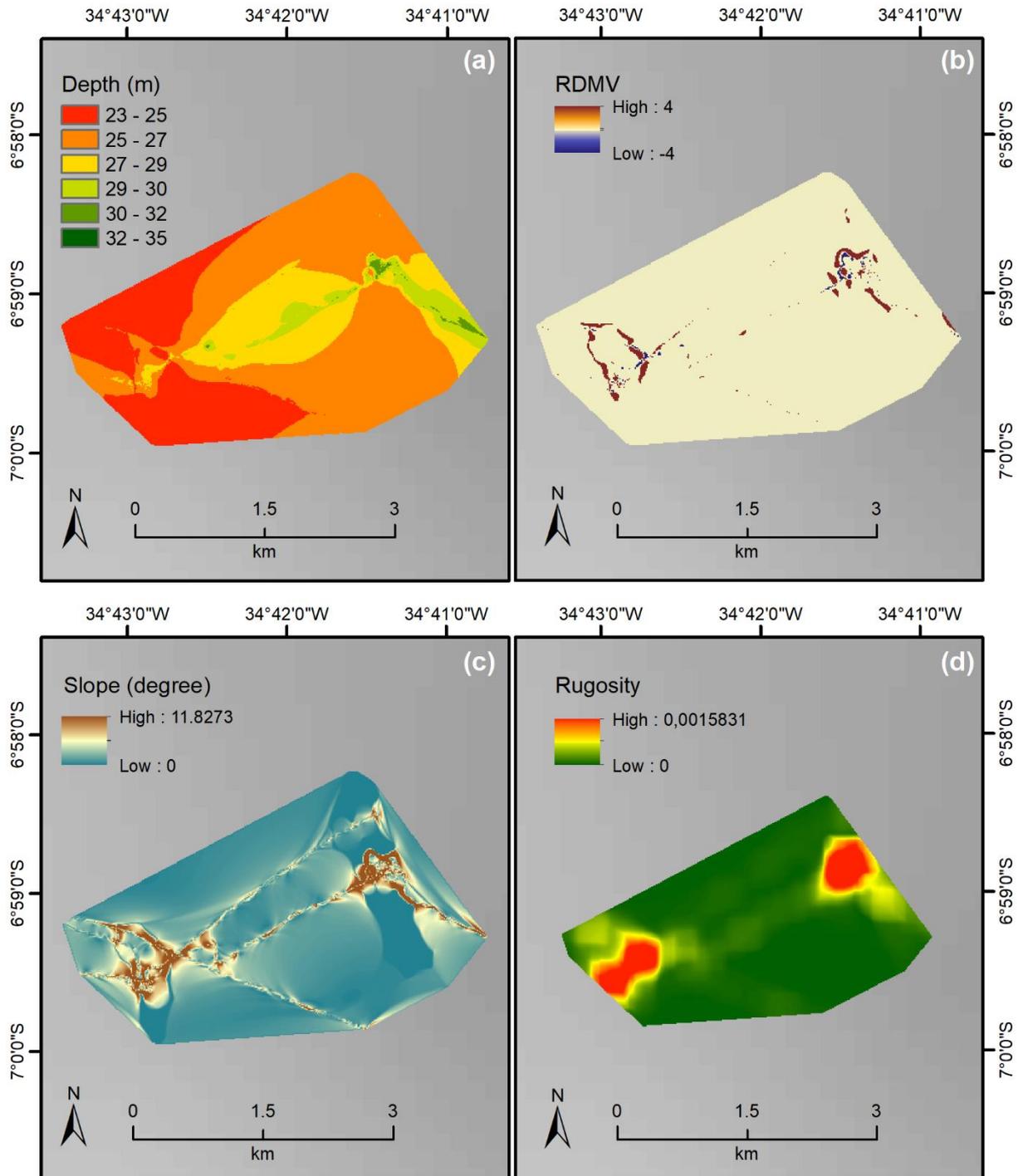


Figura 33: Geomorfometria da AOI 2. (a) Variação da profundidade **(b)** *Relative Deviation from Mean Value – RDMV*. **(c)** *Slope*. **(d)** *Rugosity*.

As amostras de sedimento superficial, coletado nos 9 sítios de ocorrência da *Bank*, apresentaram mais de 90% de carbonato em sua composição. Em alguns trechos da *Bank* ocorre a cobertura contínua de rocha carbonática por considerável extensão, normalmente coberta por uma fina camada de sedimentos inconsolidados e intercaladas por áreas de baixo relevo (Figs. 24a, 24b e 24d). Nestes locais, formam-se espaços (~ 1 metro de altura) entre o

substrato inconsolidado subjacente e a rocha carbonática capaz de abrigar a fauna marinha de maior porte (Fig.24c).

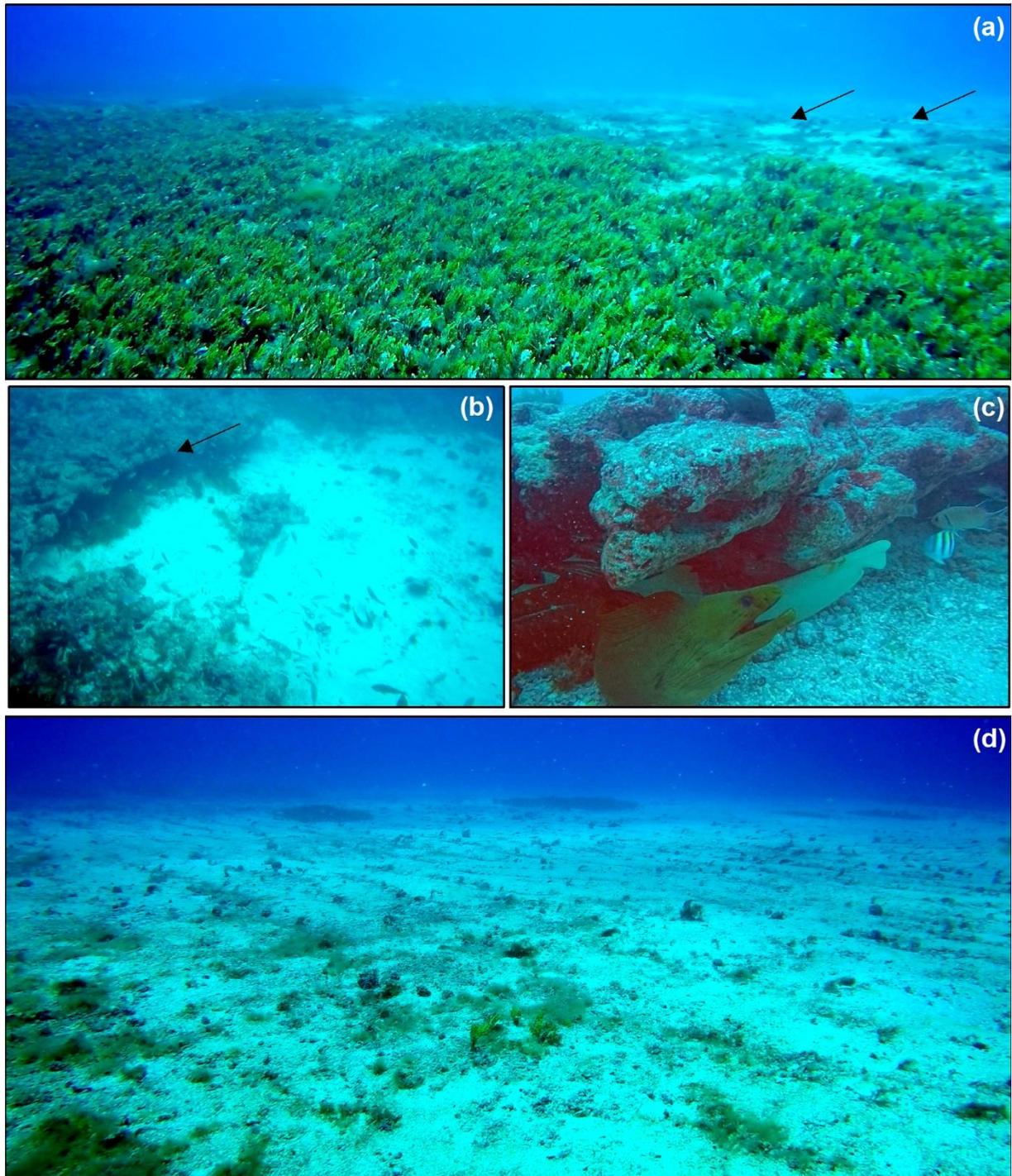


Figure 24: Geoforma *Bank*. A imagem (a) mostra uma paisagem típica da geoforma *Bank*. O seu relevo varia de plano a suave ondulado, com áreas de baixo relevo (indicadas pelas setas). (b) Área de baixo relevo delimitada por rocha carbonática (indicada pela seta). (c) Rochas carbonáticas formam superfícies rugosas e com cavidades, que abrigam a fauna marinha. (d) Mostra um trecho da geoforma *Bank* caracterizado por RDMV, declividade e rugosidade próximos de zero.

Area of Interest 3 (AOI 3): Patch Coral

Patch Coral ocorreu exclusivamente na área offshore mesofótica (> 30 m de profundidade), mas profundidades de até 23 m foram registradas na AOI 3, devido a heterogeneidade topográfica em mesoescala (Fig. 25). As áreas de *Patch Coral* apresentaram, em geral, um formato oblongo, onde ocorre estruturas verticais representadas por blocos de rocha individuais ou aglomerados, os quais são separadas por faixas de substrato inconsolidado recoberto por rodolitos (Figs. 26a – 26c). As estruturas verticais, individualmente, variam de 1 a 5 m de altura em relação ao fundo marinho circundante (Fig. 26d).

A Figura 25a, indicou que o gradiente batimétrico na AOI 3 pode variar entre 10 e 12 m. Os desvios do valor médio (RDMV), indicaram dois setores da AOI 3 nos quais os afloramentos rochosos (valores positivos) estão delimitados, ou por canais (valores negativos), ou por áreas com desvio topográfico próximo de zero (Fig. 25b). O índice também indicou que a estrutura vertical do *Patch Coral* é caracterizada pela assimetria vertical, onde a amplitude dos valores positivos é maior do que a dos valores negativos, o que é diferente da simetria vertical observada na *Bank* (Fig. 23b). Apesar da presença de canais, a morfologia dos afloramentos rochosos é o principal componente para explicar os valores acentuados na declividade local (Fig. 25c) e para a irregularidade das superfícies (Fig. 25d). O RDMV em si, ou combinado com outros atributos geomorfométricos (e.g. rugosidade, declividade), é considerado um indicador de substrato duro (HARRIS, 2012).

A origem da geomorfologia diversificada de *Patch Coral* foi relacionada a flutuações do nível do mar durante o Pleistoceno/Holoceno (HINE et al., 2008), formando “*smaller patch reefs*” menores que 1 km de diâmetro. No NE do Brasil, a geoforma pode abranger áreas mais extensas e estão relacionadas a rochas calcárias (GOMES et al., 2015). Na região do Atlântico Norte, a geoforma foi identificada em águas profundas (> 500 m), através de dados hidroacústicos em conjunção com vídeo (WIENBERG et al., 2013).

Além de suportar alta diversidade de corais escleractíneos em ambientes mesofóticos, *Patch Coral* promovem a conectividade entre outras feições marinhas (LOCKER et al., 2010). A geomorfologia heterogênea de *Patch Coral*, em mesoescala, pode ter um papel importante para diversidade gama, pois a diversidade biótica e abiótica estão intrinsecamente relacionadas em múltiplas escalas (BAVESTRELLO et al., 2018; LINKLATER et al., 2016; SUBARNO et al., 2016). Os transectos realizados pelos mergulhadores nas áreas de *Patch Coral*, revelaram que a camada superficial dos blocos foi colonizada principalmente por macroalgas, esponjas

encrustantes, corais escleractíneos e moluscos. Entre os blocos, nas faixas de substrato não consolidado, há relativa abundância de comunidades biológicas da epifauna.

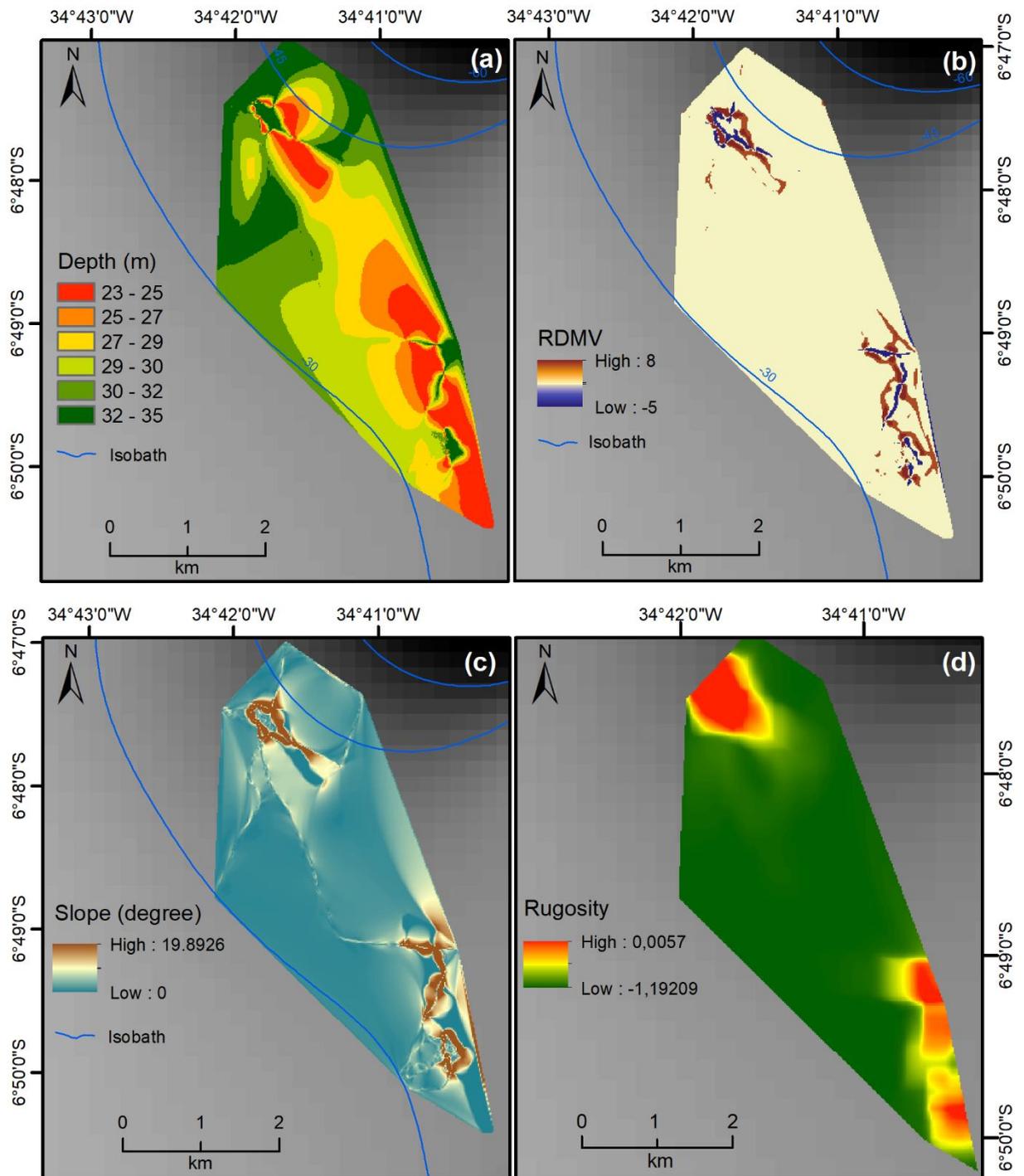


Figure 25: Geomorfometria da AOI 3. (a) Variação da profundidade (b) *Relative Deviation from Mean Value* – RDMV. (c) *Slope*. (d) *Rugosity*.

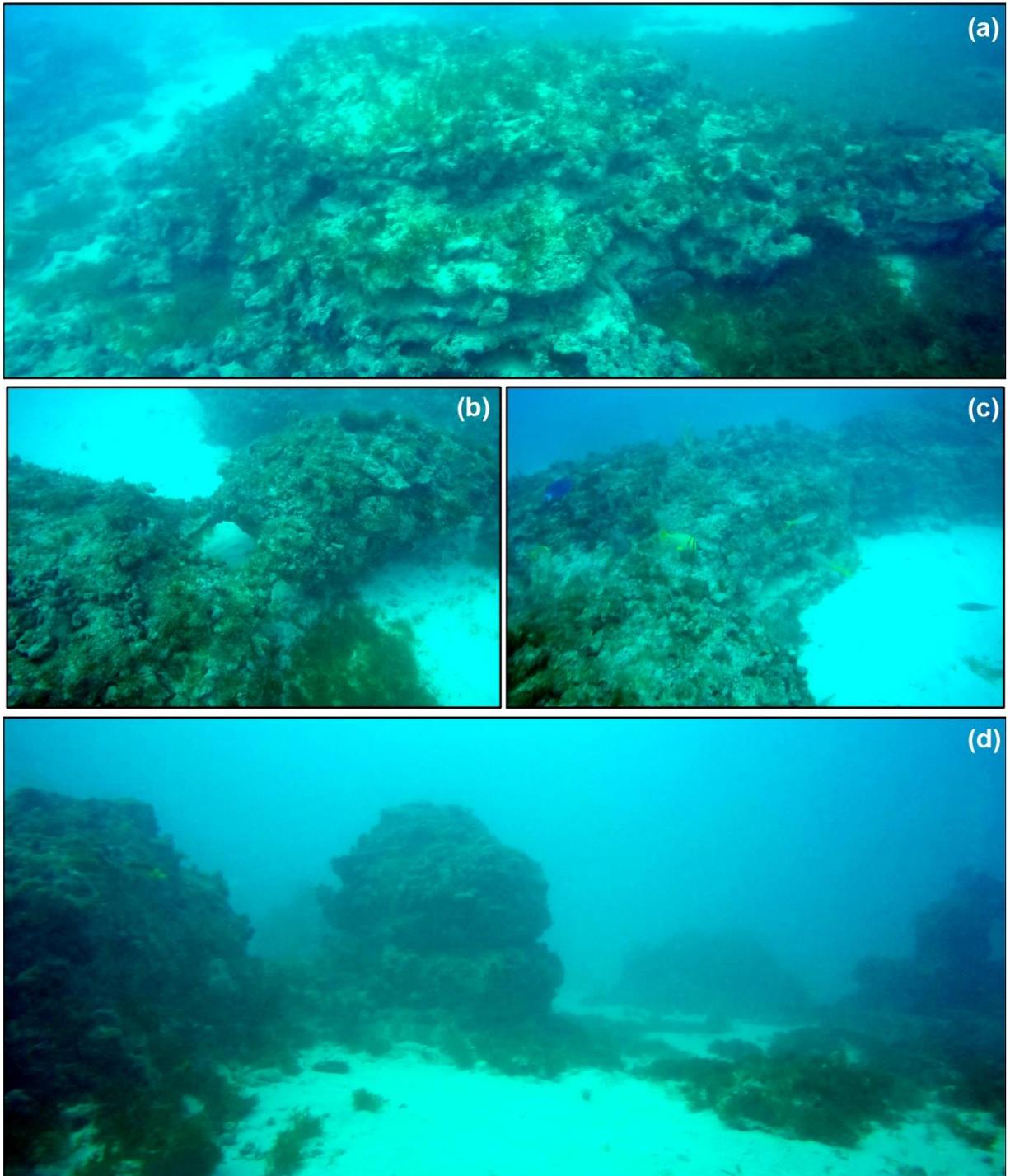


Figure 26. Geoforma *Patch Coral*. As imagens (a) – (c) mostram a heterogeneidade morfológica dos blocos de rocha calcária. (d) A imagem mostra uma paisagem típica da geoforma na área de estudo.

Area of Interest 4 e 5 (AOI 4 e 5): Shelf Valley

O levantamento batimétrico na AOI 4 e na AOI 5, resultou na aquisição de 95.364 e 63.960 cotas batimétricas georreferenciadas, respectivamente, que indicou duas depressões alongadas e de relevo movimentado, que foram identificadas no *Geoform Component* (COMITTEE, 2012) como *Shelf Valleys Type* (Fig. 27).



Figure 27: Morfologia geral do Shelf Valley. A geoforma é caracterizada pelo relevo geral movimentado e estruturas colapsadas (a), pelas paredes do canal definidas por planos verticais a subverticais (b) e (c) e pela presença de grandes blocos de rocha calcária (d).

A porção mais preservada destes dois *Shelf Valleys* estão localizadas na *Offshore Area*, entre as isóbatas de 30 e 40 m de profundidade, a aproximadamente 4,5 km da zona de quebra da plataforma e a 25 Km da linha de costa (Fig. 18). A extensão mapeada dos canais na AOI 4 e 5 variou de 2 a 5 km, respectivamente, com largura variável entre 150 e 550 m. Posteriormente, as feições AOI 4 e AOI 5 foram nomeadas Guaiubas e Gramame, respectivamente.

Shelf Valley são feições de mesoescala, que ocorrem exclusivamente na plataforma continental, mas que estão frequentemente conectados a *canyons* na zona de quebra da plataforma continental (CERAMICOLA et al., 2015b; COMMITTEE, 2012; THIELER et al., 2007). Eles são *Geofom Component* de *Geologic Origin*, que ocorrem tanto em margens continentais compressivas, quanto divergentes (CERAMICOLA et al., 2015a; HARRIS et al., 2014). No sistema CMECS, tanto *Submarine Canyons*, quanto *Shelf Valleys* estão contextualizados no *Tectonic Settings*, e são feições que promovem a interconectividade entre a bacia oceânica e a parte terrestre.

O controle tectônico da Formação Barreiras e a evolução de Shelf Valleys

Os *Shelf Valleys* Guaiubas e Gramame provavelmente estão conectados às estruturas bentônicas identificadas como *Incised Valley* no mapeamento geomorfológico de macroescala (Fig. 14). No sistema CMECS, as definições de *Submarine Cayon* e *Shelf Valley* englobam todas as definições e formas de *Incised Valley*, que é um termo mais utilizado em mapeamentos geomorfológicos de macroescala (BLUM et al., 2013).

A origem e a evolução do Guaiubas e do Gramame pode estar relacionada com processos tectônicos (ÇAGATAY et al., 2015; CERAMICOLA et al., 2015b; PORĘBSKI, 2000; VEEVERS; VAN ANDEL, 1967). Entretanto, processos oceanográficos e sedimentares são considerados mais importantes, para a definição de sua morfologia e enchimento dos canais (CERAMICOLA et al., 2015a; CERI JAMES et al., 2012; DUNCAN et al., 2003; GAO; COLLINS, 2014; HARRIS et al., 2005; MAUFFREY et al., 2015; THIELER et al., 2007; WESCHENFELDER et al., 2010).

Os *Shelf Valley* Guaiubas e Gramame estão localizados em uma plataforma continental estreita e rasa (Fig. 14), mas sujeitos a processos tectônicos mais amplos, relacionados a evolução da Província Borborema. Estudos recentes, nas bacias dos Estados da Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte, demonstraram que toda esta região da margem leste da Província Borborema está sujeita a um campo de tensões transcorrente, desde o

estabelecimento da fase pós-rifte durante o Cenozoico (BEZERRA et al., 2020; LIMA et al., 2016).

Estruturas profundas do embasamento, foram ativadas durante a fase rifte e estão indicadas, na Figura 28, pelas Zonas de Cisalhamento Pré-Cambrianas. Na borda leste da Província Borborema, esta reativação proporcionou a formação das bacias marginais durante a fase rifte (*Lower Cretaceous*) e a extensão da margem, o que criou falhas normais e oblíquas com direção N-S, NNW-SSE e NW-SE (BEZERRA et al., 2011).

Após o rifte e o início do processo de deriva da margem, um novo regime tectônico se instalou. Ele foi responsável pela reativação de zonas de cisalhamento na margem continental e no embasamento adjacente. Além disso, o novo regime tectônico reativou também falhas criadas pelo rifte, o que produziu a propagação de falhas antigas, além da criação de novos sistemas de falhas sob o novo regime (DE CASTRO; BEZERRA; CASTELO BRANCO, 2008; LIMA, 2011; MATOS, 2000).

A origem do campo de tensões transcorrente, que afeta a margem passiva sul-americana, está relacionado a um efeito de *far field*, devido a formação dos Andes, e a consequente diminuição da velocidade de espalhamento da placa oceânica do Atlântico Sul (BEZERRA et al., 2020; FOLGUERA et al., 2015; MAROTTA et al., 2015; MARQUES et al., 2013; RAMOS; FOLGUERA, 2009).

O regime tectônico da Bacia da Paraíba, que controla a sua evolução morfoestrutural, é caracterizado por uma compressão E-W e uma extensão com trend N-S, compatível com o campo de tensões transcorrente (BEZERRA et al., 2020, 2014; NOGUEIRA et al., 2015). Este processo, resultou no controle morfoestrutural da faixa costeira, com a formação de dobras e de sistemas de falhas, que envolveram componentes sob os regimes tectônicos transpressional e transtensional. Falhas, com rejeito normal e inverso, foram observadas em depósitos da Formação Barreiras (Mioceno - Pleisoceno) e em depósitos recentes do Holoceno (ROSSETTI et al., 2011a; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013).

A análise do mapa ASA (Fig. 28), mostrou uma série de anomalias alongadas, negativas e positivas, tendendo principalmente nas direções NE-SW e E-W, que se prolongam do embasamento continental adjacente para o embasamento da plataforma continental. A interpretação das anomalias magnéticas, indicou as principais zonas de cisalhamento na parte central da Bacia do Paraíba. As *Geoform Component* estão localizadas nas proximidades

dessas zonas de cisalhamento são caracterizadas pela presença de estruturas rochosas, desvios positivos e negativos no RDMV, declividade acentuada em alguns setores e alta rugosidade.

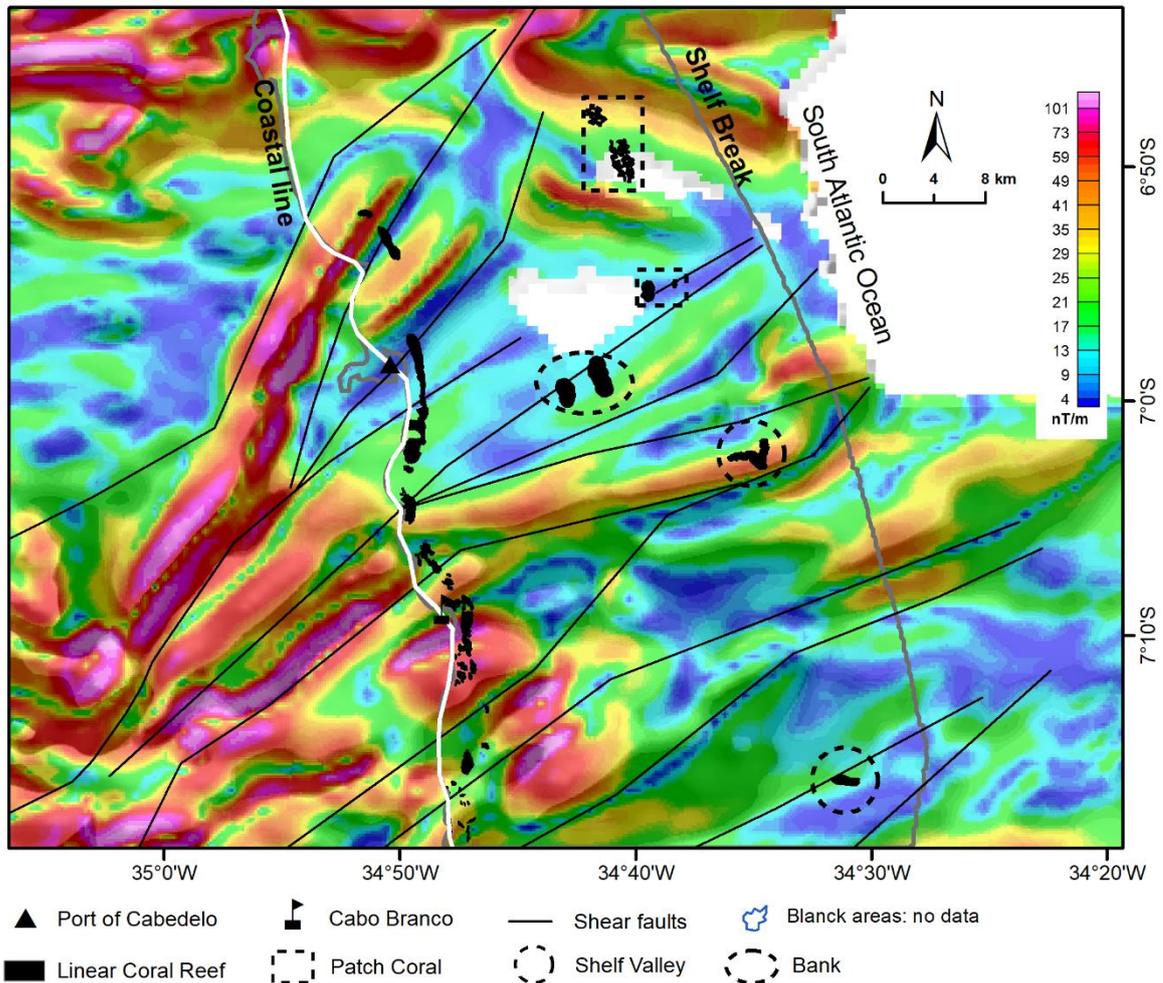


Figura 28. Mapa do sinal analítico da anomalia magnética na região central da Bacia Paraíba. A interpretação dos alinhamentos magnéticos, indicou a localização das principais zonas de cisalhamento (*shear faults*), que ocorrem no embasamento da bacia. Os polígonos na plataforma continental, em cor preta, indicam quatro *Geoform Types*.

O processo de reativação tectônica e as variações no nível do mar controlaram a evolução morfoestrutural da zona costeira afetando diretamente a morfologia da rede de drenagem, além dos processos erosivos e deposicionais mais recentes (ANDRADES FILHO; ROSSETTI, 2012; BEZERRA et al., 2008; LIMA et al., 2016; LIMA; LAVOR; FURRIER, 2017). Os canais do Gramame e parte do Guaiubas apresentaram orientação E-W, o que corresponde tanto aos alinhamentos magnéticos observados na mesma região, quanto a direção das zonas de cisalhamento do embasamento da bacia (Fig. 28).

A Figura 29a mostra o modelo batimétrico do Guaiubas Shelf Valley e a posição de um trecho da seção sísmica n° 0048-0603, representada pela reta S – S' (direção NNW - SSE). A Figura 29b mostra a integração deste trecho da seção sísmica, com o modelo de superfície construído com dados batimétricos. A Figura 29b revelou que o canal está encaixado sobre um sistema de falhas geológicas, que foram criadas por processos de reativação tectônica de falhas do rifte, originadas durante o processo de abertura do Atlântico.

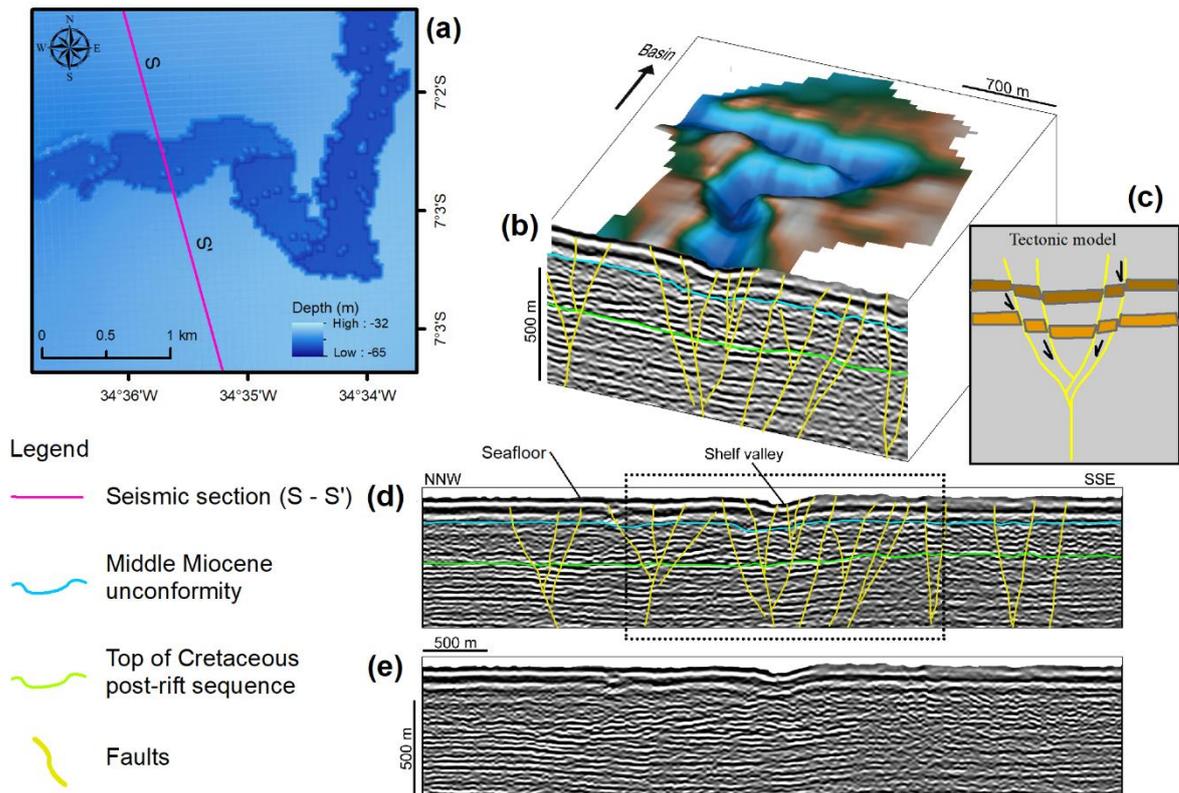


Figura 29. Sistema de falhas normais no Guaiubas Shelf Valley. (a) Posição da linha sísmica S - S' sobre o modelo batimétrico digital do Guaiubas Shelf Valley. (b) Bloco-diagrama 3D composto por partes do modelo batimétrico e da seção sísmica 2D interpretada. (c) Modelo tectônico representando uma estrutura em flor negativa. (d) Seção sísmica interpretada, onde estão indicados os depósitos sedimentares na plataforma continental e o sistema de falhas normais. (e) Seção sísmica não interpretada.

A geometria do sistema de falhas mostradas no perfil sísmico (Fig. 29d), indica o desenvolvimento de um modelo tectônico compatível com uma estrutura em flor negativa (Fig. 29c). No contexto geológico, as falhas normais originadas no embasamento, se propagaram através dos depósitos sedimentares pós-rifte, desde o Cretáceo Superior, Paleogene e Neogene, até alcançarem os depósitos do Holoceno. Apesar da componente vertical de movimento dos planos das falhas interpretadas, o Guaiubas Shelf Valley também

está associado a falhas *strike-slip*. O Gramame Shelf Valley, provavelmente, deve estar submetido a um modelo tectônico similar.

A reativação das falhas rifte, gerou dobras locais e falhas normais sintéticas e antitéticas. O canal do Guaiubas Shelf Valley aparece no perfil sísmico, como uma depressão do fundo do mar (ver retângulo tracejado na Figura 29d). As bordas do canal estão associadas as falhas normais e controlaram a geometria de sua seção (Figura 29b). A depressão formada pelo rebaixamento da parte central da estrutura em flor negativa, não afetou o horizonte interpretado como a discordância do Mioceno Médio (horizonte azul, Figura 2), o que sugere que a reativação tectônica e a erosão são posteriores a este período. Devido à inexistência de poços na Bacia da Paraíba, a interpretação da sucessão dos depósitos sedimentares foi estabelecida com base na correlação estratigráfica da sucessão sedimentar da Bacia de Alagoas.

A estrutura de flor negativa mostrada na Figura 29, resultou de falhas criadas durante o Cenozoico e do regime transtensivo (AKSOY; INCEÖZ; KOÇYIĞIT, 2007; HUANG; LIU, 2017; MITRA; PAUL, 2011; WU et al., 2009), os quais foram previamente reconhecidas em depósitos sedimentares (BEZERRA et al., 2008; ROSSETTI et al., 2011a) e no embasamento das Bacias da Paraíba e de Pernambuco (BEZERRA et al., 2014; LIMA et al., 2016).

Desta forma, o sistema de falhas normais apresentado na Figura 29, sugere que há um estreito paralelismo entre o modelo tectônico que controlou a evolução do *Shelf Valley* na plataforma com aqueles registrados na parte onshore da Bacia da Paraíba (LIMA et al., 2016; ROSSETTI; BEZERRA; DOMINGUEZ, 2013). Estas falhas são tardias em relação ao processo de abertura da bacia e ocorreram durante o processo de margem passiva (BEZERRA et al., 2020).

Análise morfoestrutural de dados geofísicos em mesoescala

A avaliação dos aspectos morfoestruturais do Guaiubas e do Gramame (Figs. 30 e 31), ocorreu com base no modelo tridimensional do terreno, cuja resolução espacial é de 12 m.

A batimetria na região dos canais revelou que a profundidade da plataforma variou entre 30 e 35 m, enquanto a profundidade máxima de 65 m foi atingida no leito do canal. A batimetria indicou pontos de menor profundidade no leito dos canais, que estão associados com a presença de blocos de rocha isolados, com até 15 m de altura, ou com o empilhamento de

blocos menores. Os blocos estão irregularmente distribuídos em toda a extensão do canal, mas com maior concentração em áreas próximas das paredes dos canais.

A geometria do canal apresenta trechos retos com mudanças de direção abruptas, em ângulo de até 90° . Isto sugere que a paleodrenagem, durante os períodos de exposição da plataforma, foi encaixada em falhas ou fraturas. A geometria do canal também indica, que a paleodrenagem foi controlada por pelo menos dois grupos de lineamentos, que possuem relação quase perpendicular: um sistema de lineamentos NE-SW a E-W, e um sistema com direção N-S a NNE-SSW.

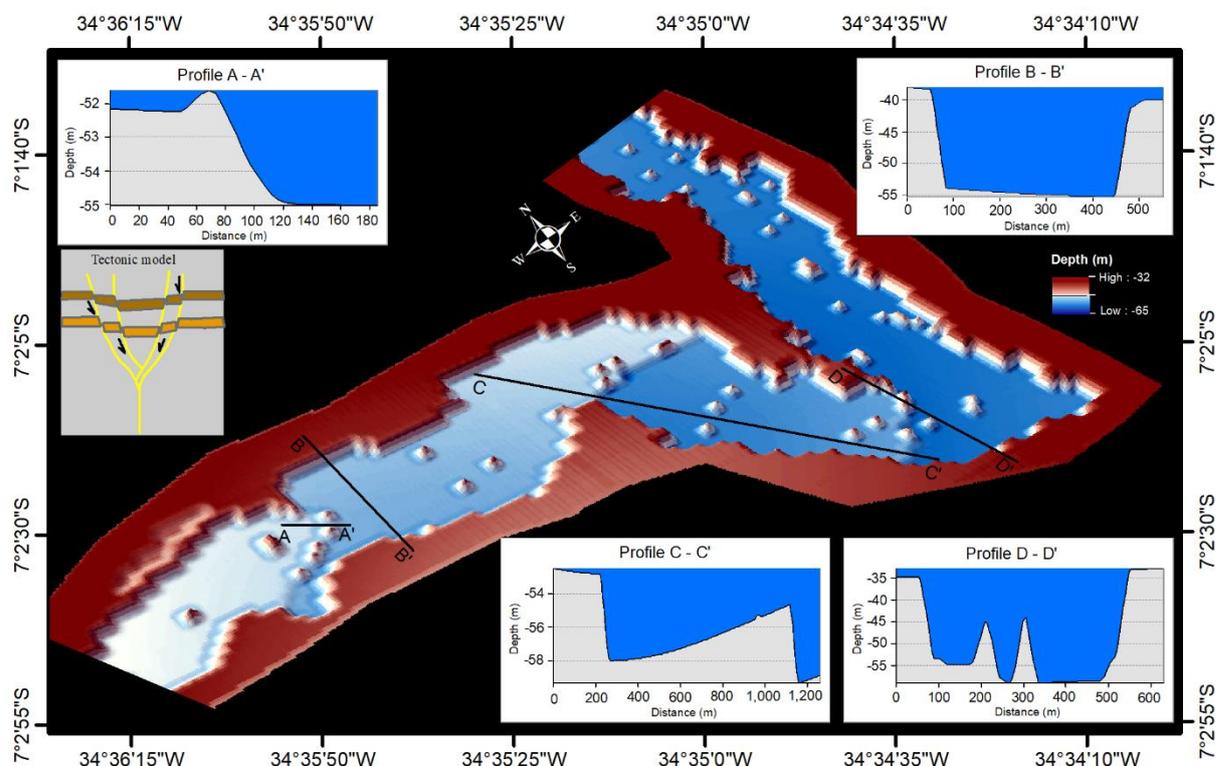


Figura 30. Modelo batimétrico do Guaiubas Shelf Valley, em perspectiva tridimensional. Os painéis *inset*, mostram quatro perfis batimétricos e o mesmo modelo tectônico da Figura 29, para comparação.

No leito do canal ocorrem estruturas isoladas, de tamanho variado, em toda a sua extensão. Os gráficos de perfis, obtidos do modelo batimétrico, indicaram que mudanças na topografia do terreno ocorrem ao longo do canal. Entre estas mudanças, indicativas de atividades neotectônicas, destacam-se as bordas escalonadas e as paredes íngremes (A-A'), a secção transversal em “U” assimétrico (B-B') e o basculamento de trechos do leito do canal formando degraus (C-C' e D-D').

Na parte interna dos canais ocorre uma grande quantidade de estruturas isoladas, cujas dimensões variam na ordem de dezenas de metros e foram registradas no mapeamento. Posteriormente, estas estruturas foram identificadas em análise de microescala, durante os mergulhos, como blocos de rocha calcária, cujas faces e arestas apresentam geometrias em ângulos de 60 e 90°. As informações morfológicas e de subsuperfície indicaram que o canal foi escavado sobre um sistema de falhas e fraturas (Fig. 29b). O padrão geométrico revelado pela batimetria é compatível com o sistema de falhas normais, a partir de uma estrutura em flor negativa, mas aponta também para a influência de um regime tectônico transtensional. Esta configuração tectônica proporcionou um encaixe para o vale do canal, com suas bordas cortadas pela propagação das falhas secundárias, sintéticas e antitéticas (Fig. 29b).

A batimetria do Guaiubas Shelf Valley revelou o basculamento de trechos da base do canal, pela ação de falhas, que formaram três degraus ao longo do seu leito. As falhas delimitaram quatro compartimentos (ver o gradiente de batimétrico do leito do canal na Figura 30). Em um desses compartimentos (ver perfil C-C'), que mede 1 km de extensão, o basculamento do leito do canal inverteu o sentido da sua declividade, em relação ao sentido da declividade predominante na plataforma. O basculamento do leito do canal, afetou a geometria do seu perfil transversal, e deixou registros em alguns trechos. Por exemplo, o leito do canal dos perfis B-B' e D-D' está basculado para sul, e apresentam seção em forma de "U" assimétrico e bordas com planos verticais íngremes.

O Gramame Shelf Valley (Fig. 31) também apresenta trechos retos, com mudanças abruptas de direção. O perfil A – A', mostrou que a seção do canal apresenta paredes íngremes verticais a subverticais. A seção A-A', revelou que a sua borda apresenta uma depressão e uma elevação antes da parede íngreme do canal. Esta depressão pode estar associada a feições de lineamentos, que ocorrem paralelos a borda do canal. Provavelmente, estes lineamentos estão relacionados à ocorrência de falhas ou fraturas, que compõem os sistemas de falhas observados na seção sísmica.

Os perfis transversais, B-B' e D-D', mostraram que a parte interna do canal, em alguns trechos, apresenta irregularidades na forma de elevações. Posteriormente, estas formas foram mensuradas e identificadas durante os mergulhos. Elas são blocos de rocha calcária colapsados a partir das paredes dos canais. Os perfis batimétricos também indicaram, que o processo de sedimentação do fundo do canal não recobriu os blocos, até o presente, o que confere um aspecto rugoso à superfície de seu leito.

O modelo batimétrico mostrou que a variação na direção do canal ocorreu entre um trecho na direção NNE-SSW e outro trecho na direção E-W. Sobre o leito do canal, bem como próximo as suas paredes, ocorreram blocos de rocha calcária colapsados que estão indicados pelas estruturas elevadas.

Os perfis A-A', B-B' e C-C' mostraram que as paredes do canal possuem planos íngremes, que variam de verticais a subverticais. Estes perfis também mostraram que a borda do canal apresenta pequenas elevações. O Perfil B-B' mostrou que a parede da borda norte do canal é íngreme, e que o seu leito é segmentado por discontinuidades da topografia. O perfil C-C' mostrou que a seção do canal apresenta forma de "U", que é estreita e possui paredes verticais.

O perfil D-D' indicou que o eixo longitudinal do leito do canal é marcado por discontinuidades. O canal está limitado, na extremidade leste, por charneiras (*hinge*), com cerca de 10 m de altura em relação ao leito do canal. As charneiras, com orientação N-S, sugerem a ocorrência de estruturas tectônicas ativas. Estas estruturas criaram compartimentos com profundidade e inclinação (*dip*) variáveis.

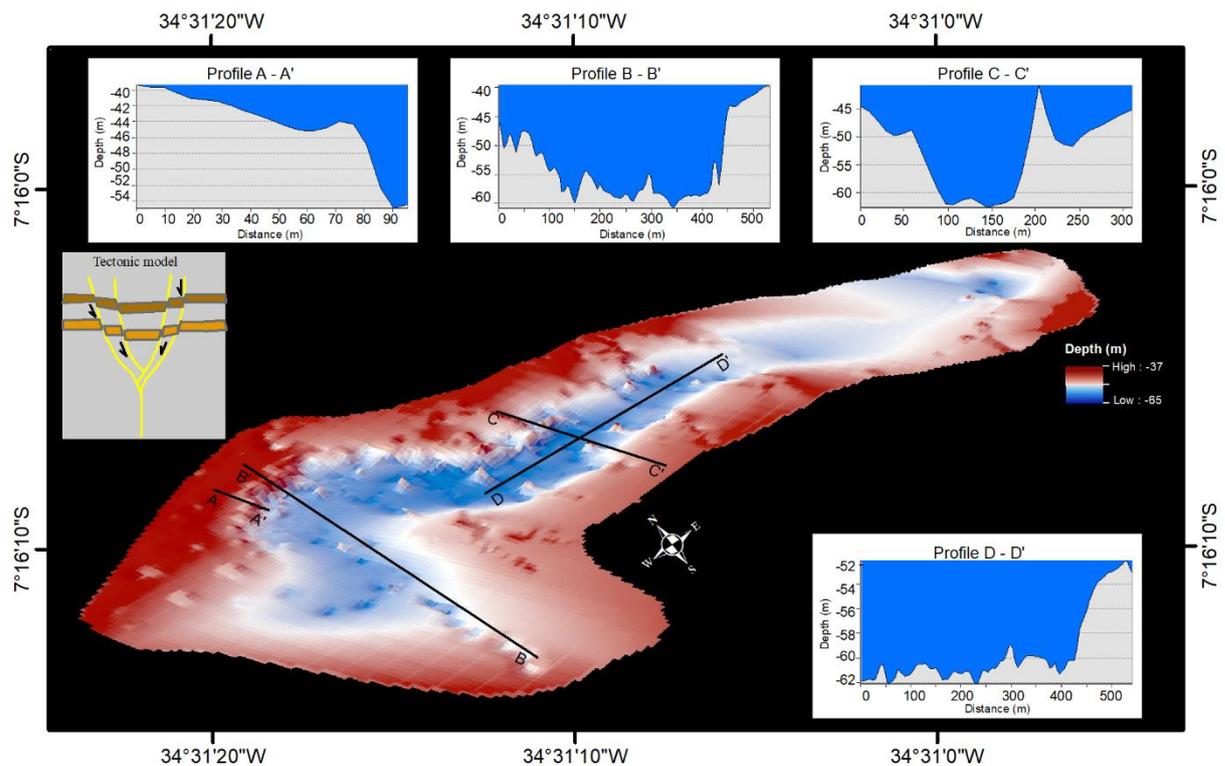


Figura 31. Modelo batimétrico do Gramame Shelf Valley, em perspectiva tridimensional. Os painéis *inset*, mostram quatro perfis batimétricos e o mesmo modelo tectônico da Figura 29, para comparação.

Os dados batimétricos mostraram que as bordas dos canais são flanqueadas por lineamentos, paralelos ao seu eixo. A abertura desses lineamentos na superfície está, possivelmente, associada ao sistema de falhas e fraturas indicado pelos dados sísmicos (Fig. 29). O desenvolvimento destas aberturas, pode ter criado os patamares entre a borda e a base da parede do canal (HUANG; LIU, 2017), às vezes formando *relay ramps* entre os lineamentos paralelos (FOSSEN; ROTEVATN, 2016), além de quebrar e bascular os blocos de rocha que colapsaram para dentro do canal.

Na área de estudo, as atividades neotectônicas puderam ser avaliadas através dos indicadores morfométricos (SEDRETTE; REBAÏ; MASTERE, 2016). O basculamento do assoalho do canal (perfil C-C', Figura 30) e as charneiras mapeadas no Gramame (perfil D-D', Figura 31), por exemplo, sugerem a reativação de falhas, em época relativamente recente, pois os desníveis ainda não foram preenchidos por sedimentos. Por outro lado, há que se considerar que o baixo aporte de sedimentos dos rios, nesta parte do Nordeste do Brasil, não favorecem o enterramento destas estruturas (BARRETO et al., 2017; VITAL et al., 2010).

Geomorfometria da *Geoform Type Shelf Valley*

As Figuras 32a e 32b mostram os modelos batimétricos digitais do Guaiubas e do Gramame, respectivamente. Os modelos digitais possibilitaram, através do fluxo de análises geomorfométricas, quantificar a inclinação da superfície (Figs. 32c e 32d) e a rugosidade (Figs. 32e e 32f). Os mapas revelaram que os *Shelf Valleys*, assim como a região circundante a eles, têm diferentes níveis de complexidade topográfica.

No Guaiubas, as áreas com maior declividade e rugosidade estão associadas aos blocos colapsados no leito do canal e a afloramentos rochosos nas suas bordas. As declividades intermediárias, observadas no leito do canal, estão associadas a formação de degraus. Estes degraus estão indicados por linhas amarelas, no sentido transversal a direção do canal, e delimitaram 4 trechos ao longo do canal (Fig. 32c). Estes trechos estão indicados na Figura 30, pelo gradiente da cor azul no leito do canal. Áreas com declividade baixa foram indicadas na área circundante ao canal do Guaiubas, bem como ao longo de todo o seu leito.

No Gramame, as áreas com maior declividade (Fig. 32d) e rugosidade (Fig. 32f) também correspondem aos blocos colapsados no seu leito e a afloramentos rochosos na sua borda. Áreas com declividade intermediária ocorreram próximas dos lineamentos, que estão posicionados de forma paralela as bordas do canal.

Em comparação com o Guaiubas, no Gramame foram registradas as paredes do canal com maior índice de declividade (Fig. 32d). As maiores declividades estão concentradas na sua borda norte, o que sugere uma atividade mais intensa de falhas e fraturas nesta região. As áreas da plataforma circundante ao Gramame também apresentaram maior declividade, quando comparadas com as áreas de plataforma próximas do Guaiubas. No Gramame, as áreas com declividade intermediária foram relativamente mais largas.

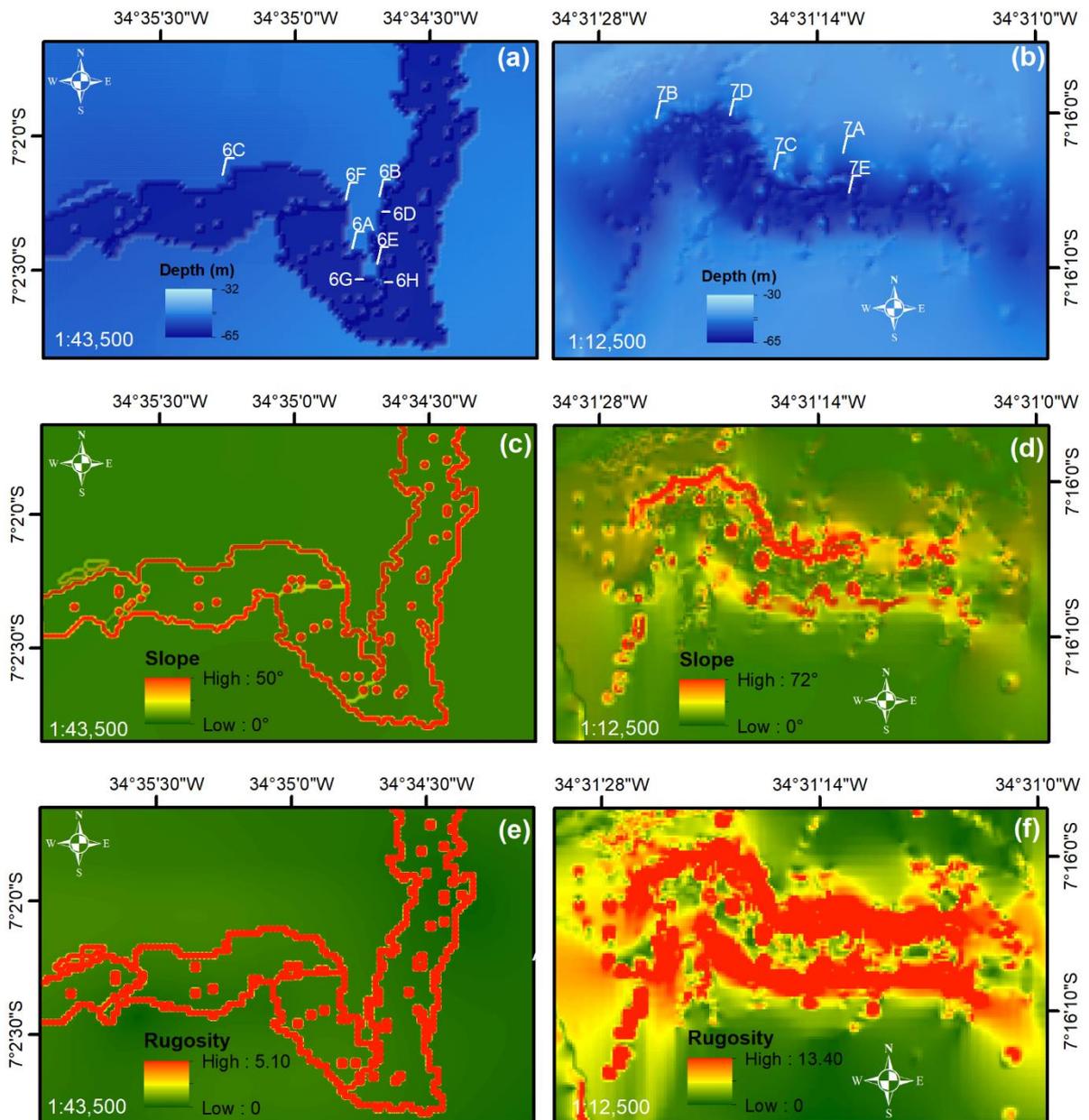


Figura 32. Mapas dos atributos do terreno dos *Shelf Valley* Guaiubas (coluna da esquerda) e do Gramame (direita): profundidade média (a) e (b); declividade (c) e (d); rugosidade (e) e (f). Nos mapas de profundidade, estão indicados os locais acessados através mergulho técnico.

O atributo do terreno rugosidade indicou que o Guaiubas e o Gramame têm superfícies de alta complexidade morfológica (Figs. 32e e 32f), e se destacaram quando comparados com qualquer outra *Geofom Type* da área de estudo. Entretanto, o Gramame mostrou maior heterogeneidade topográfica da superfície, tanto dentro do canal quanto nas áreas adjacentes a borda, quando comparado ao Guaiubas. A alta rugosidade destas *Geofom Type*, está relacionada principalmente ao agrupamento de blocos colapsados no interior do canal e aos blocos basculados na sua borda, em consequência de reativações do sistema de falhas. Outro fator importante a ser considerado para a complexidade de superfícies bentônicas, é que as superfícies rochosas irregulares constituem habitats adequados, para a fixação e o desenvolvimento de estruturas biogênicas (TURNER et al., 2017). Por exemplo, ambientes recifais colonizados por corais mesofóticos aumentam a complexidade da superfície e contribuem de forma direta para índices elevados de rugosidade (STORLAZZI et al., 2016).

Análise dos dados geofísicos de microescala: validando as análises de mesoescala

Vídeos subaquáticos e mapeamentos visuais são técnicas frequentemente utilizadas (MALLET; PELLETIER, 2014), principalmente em estudos de pequena escala espacial (e.g. distribuição de organismos na estrutura de recifes). Estas técnicas podem ser integradas com dados geofísicos de mesoescala (e.g. batimetria derivada de sonificação ou da reflexão luminosa), com o objetivo de descrever e classificar eficientemente os ambientes marinhos (DE CLIPPELE et al., 2017; FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE, 2012). A importância destas técnicas é ressaltada em estudos que objetivam modelar a distribuição de sedimentos rochosos, mas requerem a validação dos dados, mesmo em áreas que foram intensivamente amostradas por modernos equipamentos do tipo *multibeam acoustic backscatter* (SIWABESSY et al., 2018). No Guaiubas e no Gramame foram realizadas diversas operações de mergulho e em várias localidades (Figs. 32a e 32b), que possibilitaram identificar as morfoestruturas, adquirir dados geofísicos em microescala, validar resultados e obter novas informações (Figs 33 e 34).

As imagens registradas pelos mergulhadores validaram tanto o modelo batimétrico, quanto as variáveis do terreno, além de completar os dados geofísicos com observações locais. Por exemplo, os dados batimétricos indicaram que a borda de ambos os canais é controlada por lineamentos morfoestruturais, sendo que os mergulhadores confirmaram que eles estão orientados, principalmente, nas direções E-W, N-S, NNW-SSE e NNE-SSW. Em microescala, as medidas complementares indicaram que os lineamentos têm largura variável, de centímetros até dezenas de metros, e que formam depressões, às vezes com degraus, que

acompanham paralelamente a borda do canal em toda a sua extensão. Estes lineamentos foram indicados nos mapas geomorfométricos, pela declividade intermediária (cor mais próxima do amarelo, Figuras 32c e 32d) e pelo RDMV na Figura 35b, e foram bem documentados localmente, conforme as imagens mostradas nas Figuras 33 e 34.

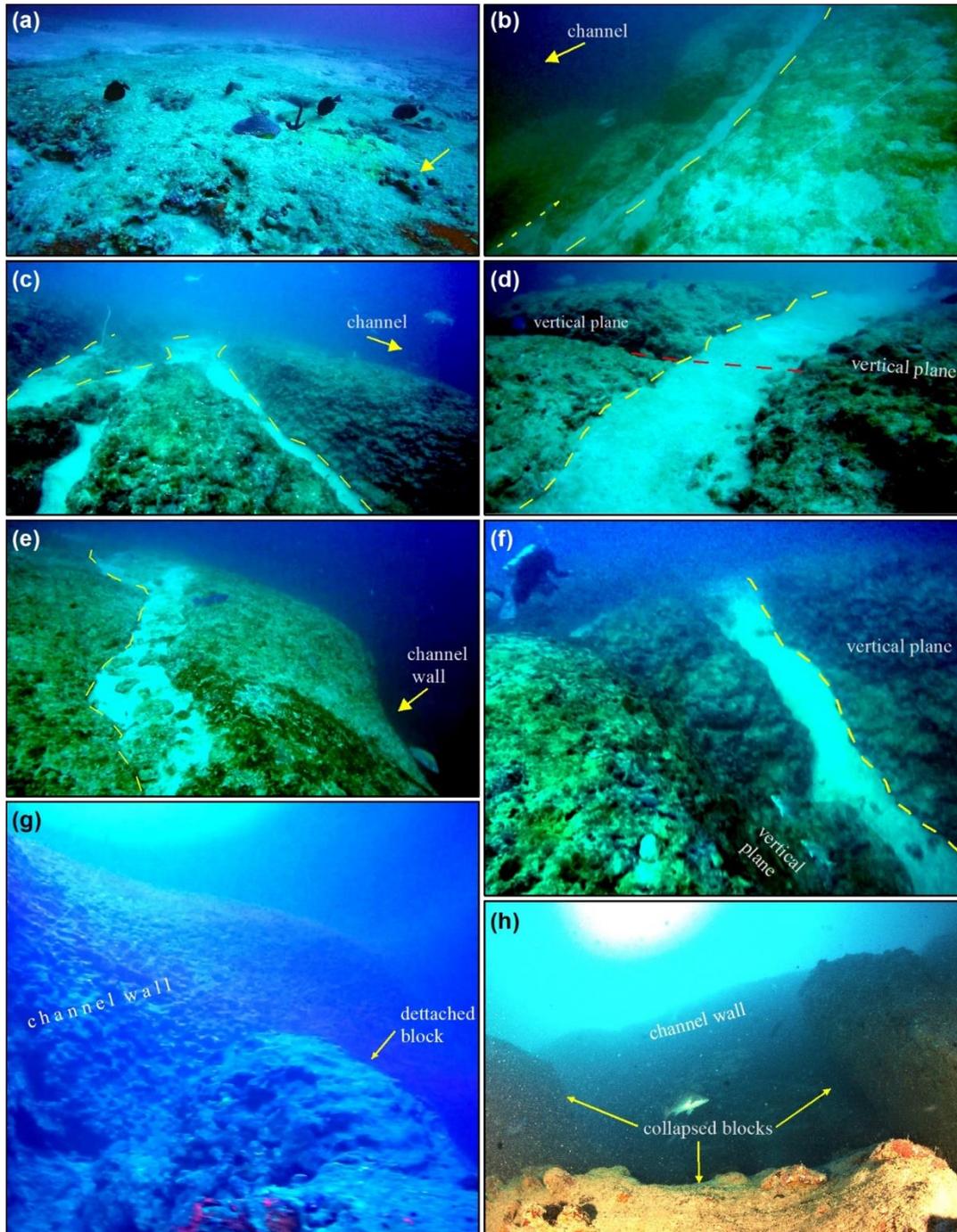


Figura 33. Imagens subaquáticas do Guaiubas Shelf Valley. (a) Rocha calcária litificada associada a carstificação. (b) As linhas indicam os lineamentos paralelos formando degraus. (c) Conexão de dois lineamentos flanqueados por substratos rochosos. (d) As linhas, vermelha (N-S) e amarela (E-W), indicam a intersecção perpendicular de dois lineamentos. (e) O lineamento segue paralelo a borda do canal, cuja parede apresenta alta declividade. (f) A linha indica um lineamento na borda do canal, que está flanqueado por planos verticais de blocos de rocha calcária basculados. (g) A seta indica um bloco colapsado na parte intermediária da parede do canal. (h) Blocos deslocados e colapsados no leito do canal (64 m de profundidade).

O recobrimento das depressões por sedimentos recentes impediu a verificação direta, pelos mergulhadores, de componentes estruturais dos lineamentos. Para o caso de falhas, seria importante observar o ângulo de mergulho das faces, a ocorrência de estrias e o efeito de rejeito. Contudo, foi registrado que o substrato da plataforma, onde os canais foram escavados, é formado por rocha calcária litificada e extremamente dura (Fig. 33a). Esta rocha, que predominante na borda do canal, apresenta uma cobertura rasa de sedimentos recentes e estruturas circulares. Estas estruturas podem ser resultado do processo de carstificação ocorrido durante os períodos de exposição subaérea deste trecho da plataforma.

Em geral, os lineamentos são depressões parcialmente preenchidas por sedimentos recentes, que acompanham a geometria da borda do canal (Figs. 33b-33d e 34b). Em algumas situações, os lineamentos podem intersectar em ângulo perpendicular (Fig. 33d e 34d). Sua largura pode variar, pois as vezes eles são relativamente estreitos (e.g. ~2,5 m) (Figs. 33b e 33e) ou atingirem dezenas de metros (Fig. 33f). Em razão do seu desenvolvimento, os lineamentos definem planos verticais nas estruturas rochosas que os flanqueiam (Figs. 33d, 33f, 34c e 34d).

A formação e o desenvolvimento destes lineamentos, em consequência do sistema de falhas normais, apresentaram faces verticais e formaram de 1 a 4 patamares na parede do canal (Figs. 33b, 33g e 34a). A evolução da abertura desses lineamentos é responsável pela quebra, descolamento e colapso dos blocos de rocha calcária, que compõem o substrato erodido e fraturado (Figs. 33b-33h e 34d-34e).

As intersecções de lineamentos foram frequentemente observadas pelos mergulhadores ao longo das paredes dos canais do Guaiubas e do Gramame, inclusive formando estruturas tectônicas típicas como *relay ramp* (Fig. 34c). Os lineamentos indicaram a interação das duas principais famílias de estruturas tectônicas, que afetaram o embasamento e a cobertura sedimentar da Bacia da Paraíba (LIMA et al., 2016). Desta forma, a geometria dos blocos apresenta ângulos e faces retas, pois foram fraturados a partir do processo de abertura dos lineamentos. As direções dos trends refletem perfeitamente as direções das estruturas tectônicas do embasamento (Figs. 28 e 29).

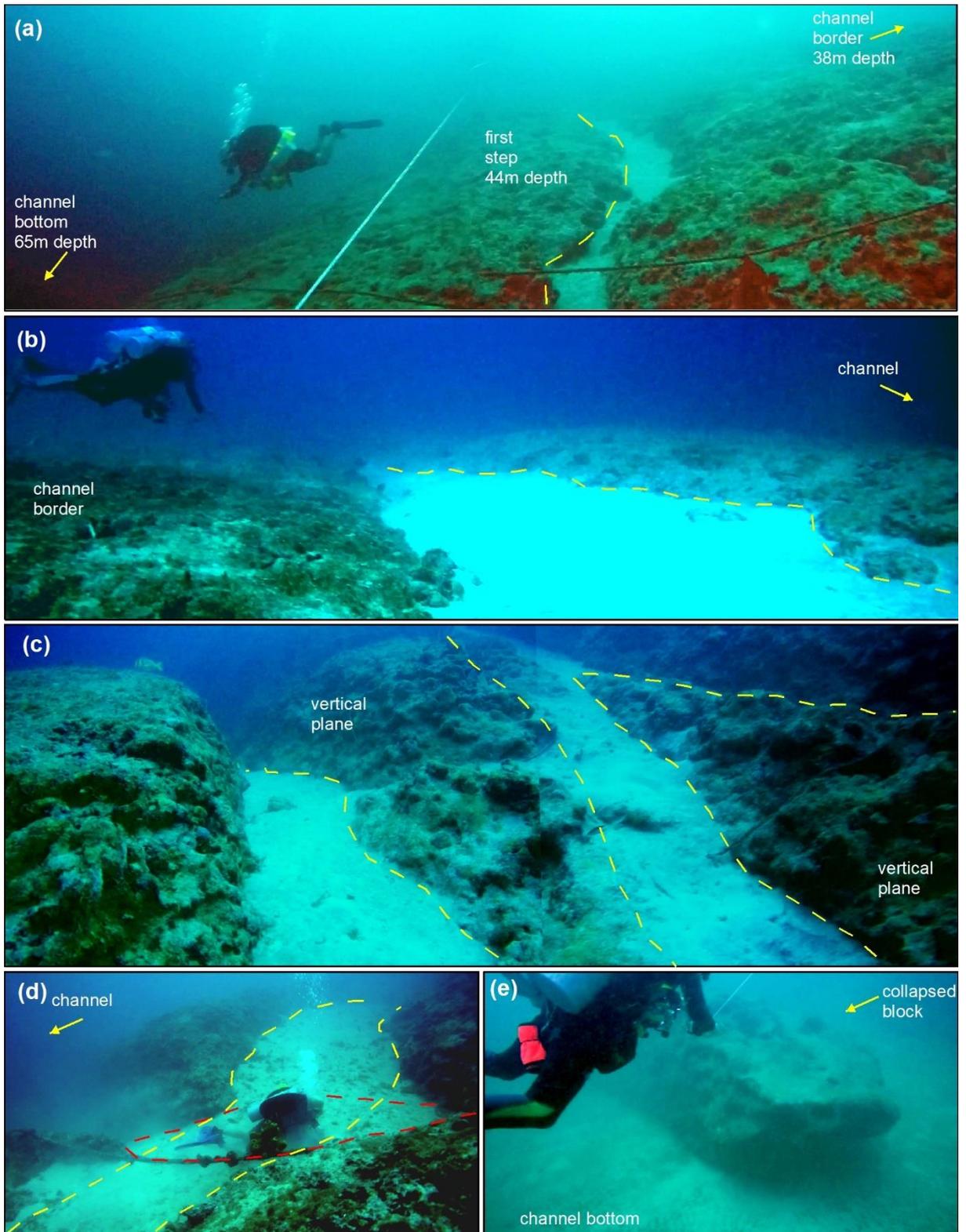


Figura 34. Imagens subaquáticas do Gramame Shelf Valley. (a) A imagem mostra o primeiro patamar, que se desenvolveu paralelo e abaixo da borda do canal. **(b)** Lineamento flanqueado pelos blocos rochosos da borda do canal. **(c)** Rampa de revezamento (relay ramp) **(d)** Intersecção perpendicular entre dois lineamentos abaixo da borda do canal com direção N-S e E-W. **(e)** Bloco colapsado das paredes e depositado no fundo do canal (63 m de profundidade).

A Figura 35a mostra um bloco-diagrama, que sintetiza a evolução morfológica da *Geoform Type Shelf Valley* na Bacia da Paraíba. As análises em meso e microescala indicaram que a gênese e as características morfoestruturais desta geoforma foram fortemente influenciadas por processos tectônicos, por processos erosivos e pelo transporte gravitacional dos blocos de rocha calcária.

O índice (RDMV), Figura 35b, é uma medida de posição relativa. Ele indicou desvios topográficos que acompanham de forma paralela a borda do canal. Em razão da resolução espacial dos dados batimétricos, o RDMV está indicando a existência dos patamares e não a forma geométrica de um lineamento específico. A borda do canal é a região mais elevada (menor profundidade) e está indicada pela cor verde escuro. Os patamares que ocorreram de forma paralela e abaixo da borda estão indicados pela cor vermelha. No leito do canal, a parte mais alta dos blocos colapsados estão indicados pela cor verde escuro, enquanto a região de sua base está indicada pela cor vermelha. A menor profundidade na região da borda está relacionada ao basculamento de blocos. O desvio topográfico registrado nos maiores blocos colapsados, pode estar relacionado ao agrupamento de blocos menores na sua base.

Os índices geométricos *Northernness* e *Easternness*, que foram quantificados pela variação angular do seno e do cosseno da direção da declividade, indicaram que as bordas e as paredes do canal estão inclinadas na direção do seu eixo (Figs 35c e 35d). No trecho do canal orientado na direção E-W, a variável *Northernness* indicou elevados índices na face S, e baixos valores do índice na face N. Nos dois trechos subsequentes do canal, com direções NW-SE e N-S, a variável *Easternness* apresentou elevados índices nas faces SW e W do canal e baixos índices nas faces NE e E.

Os resultados das análises apresentaram as primeiras evidências que o *Geoform Component Type Shelf Valley* e, possivelmente, *Submarine Canyons*, ambos considerados como *Incised Valley* na Figura 14, foram formados em consequência de um regime tectônico, no qual estão presentes esforços transtensivos e transpressivos em escala regional. Este regime transcorrente é caracterizado por uma trama de estruturas com geometria complexa, onde podem ocorrer falhas normais, falhas reversas e dobras (BEZERRA et al., 2020, 2014; LIMA et al., 2016).

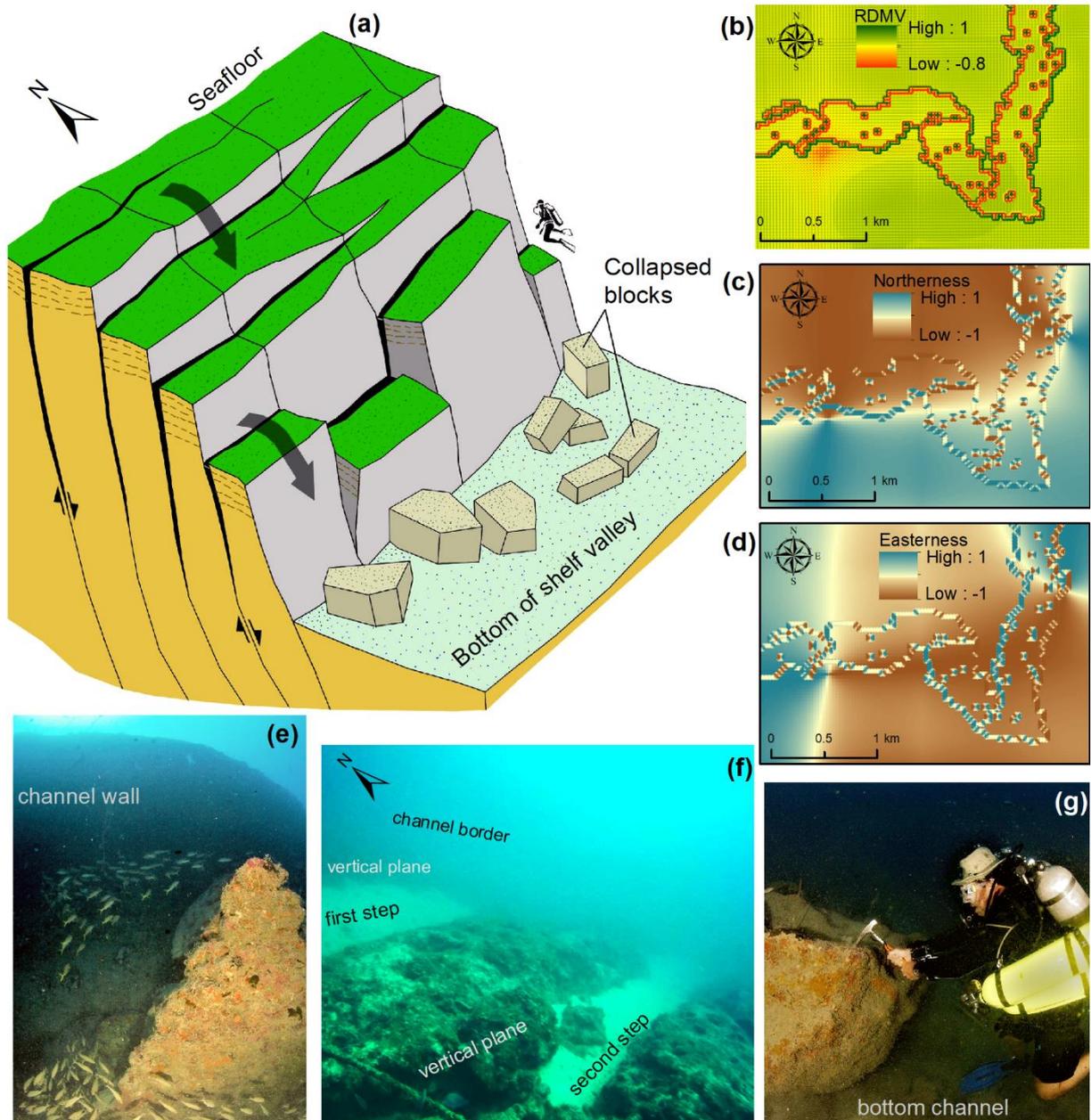


Figura 35. Representação do processo de formação da *Geoform Type Shelf Valley*, na plataforma da Bacia da Paraíba. (a) bloco diagrama mostrando o modelo para formação de *shelf valleys* na Bacia Paraíba. (b), (c) e (d) são mapas de três classes de atributos do terreno: desvio topográfico, *northernness* e *easterness*, respectivamente. (e) e (g) mostram blocos angulosos que sofreram ação de falhas. Eles descolaram da parede do canal e colapsaram para o seu leito (64 m de profundidade). (f) mostra uma área da parede do canal (~ 49 m de profundidade), que é representativa para o modelo geral dos *Shelf Valley* estudados, considerando seus aspectos estruturais, morfológicos e topográficos.

A existência de stress regional transpressivo e transtensivo, juntamente com a ativação/criação de planos de falhas, controlaram a formação do *Shelf Valley*. Após a sua formação, a continuação de esforços proporcionou a propagação de falhas e fraturas com

direções paralelas e perpendiculares aos principais trechos dos canais. A ocorrência de sistemas de lineamentos paralelos promoveu a formação de rampas de revezamento (*relay ramp*) (Fig. 34c). A formação destas estruturas indica a acomodação de esforços entre falhas paralelas (FOSSEN; ROTEVATN, 2016), e corrobora a ação dos sistemas de falhas indicados na seção sísmica.

A investigação direta da morfologia de *Shelf Valley* em escala local, através de mergulho, é rara, pois a dinâmica de erosão e sedimentação, na região da plataforma, favorecem o preenchimento dos canais (GOMES et al., 2014). Além disso, há limitações técnicas para acessar locais de considerável profundidade em condições de mar aberto (FOCK; HARRIS; SLADE, 2013; JABLONSKI, 2001). Outro aspecto metodológico importante alcançado na investigação do Guaiubas e do Gramame, foi a integração de dados de superfície e de subsuperfície, conforme utilizado em trabalhos anteriores (BUTMAN et al., 2003; ÇAGATAY et al., 2015; DENNY et al., 2007).

Em uma análise geral, ficou evidenciado que os processos tectônicos na *Offshore Area*, apresentam um estreito paralelismo com os processos tectônicos da parte continental, os quais desempenharam um papel central no contexto evolutivo da Formação Barreiras/Pós-Barreiras. Entretanto, ainda é necessário investigar se os sedimentos inconsolidados de origem continental influenciaram a distribuição geográfica de habitats, em outras partes da plataforma.

Substrate Components

Em continuidade aos resultados alcançados anteriormente, a caracterização e a análise espacial do *Substrate Component* utilizaram dados geofísicos de microescala, adquiridos em 67 sítios, através de mergulho. Deste total, 25 sítios foram classificados como *Rock Substrate Class* e 42 sítios classificados como *Unconsolidated Mineral Substrate Class*. A Figura 36 mostra a classificação e os sítios de ocorrência do *Substrate Components* na plataforma continental.

No CMECS, *Substrate Component* é definido como “*the non-living materials that form an aquatic bottom or seafloor, or that provide a surface (e.g., floating objects, buoys) for growth of attached biota. It is a characterization of the composition and particle size of the surface layers of the substrate*”.

Na área de estudo, *Rock Substrate Class* foi constituído de rochas sedimentares, com partículas maiores do que 4 m, em pelo menos uma dimensão, e que cobriram pelo menos 50% da superfície do *Geologic Substrate*. De modo complementar, *Unconsolidated Mineral Substrate Class* foram aqueles *Geologic Substrate*, com menos de 50% de cobertura de *Rock Substrate* (Fig. 37). Da amostra original de sedimentos superficiais inconsolidados, foram determinados os percentuais das frações *Carbonate* e *Fine Unconsolidated Substrate Subclass* (FUS). FUS é a porção residual da amostra original, após o tratamento com HCl (15%), peróxido de hidrogênio (30%) e lavagem com água destilada por cinco vezes. No CMECS, *Sand Group* é o sedimento superficial, que contém mais de 90% de partículas entre 0,062 e 2 mm. Assim, as frações *Clay* e *Silt*, determinadas por difração a laser, são frações pouco representativas no pool geral das amostras, mas estão melhor representadas na área da *Organic Mud Subclass*.

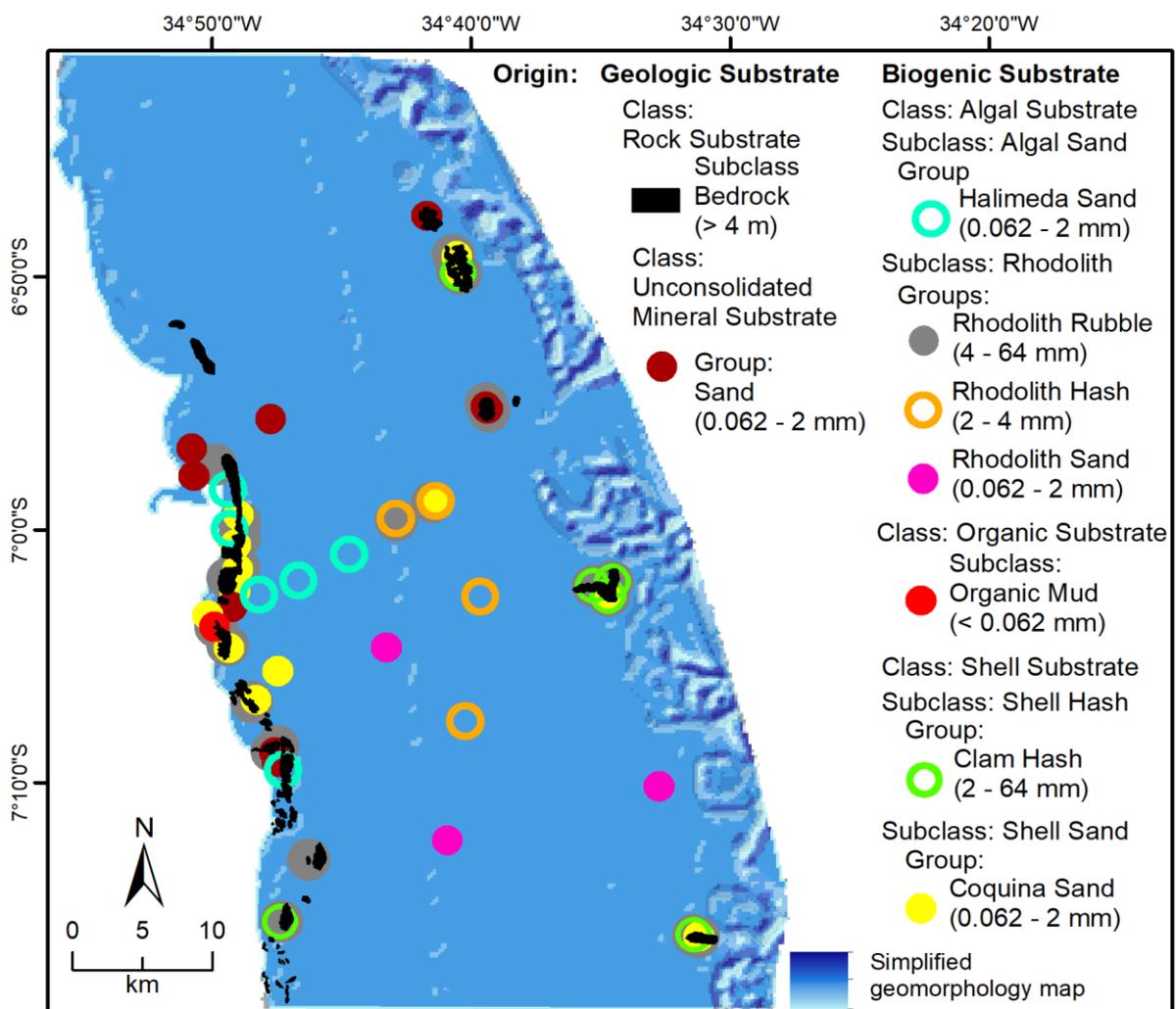


Figura 36. Classificação e mapeamento do Substrate Component, na plataforma continental.

A análise da composição do substrato de 42 amostras superficiais mostrou que a plataforma continental é predominantemente constituída por uma mistura carbonato-siliciclástica (Tabela 2). Plataformas continentais com este tipo de composição sedimentar ocorrem em várias regiões do mundo, mas são heterogêneas localmente, quando considerada a variação quantitativa dos parâmetros físico-químicos no espaço (DROXLER; JORRY, 2011; DUNCAN et al., 2003; GISCHLER, 2015; GOMES et al., 2016). Na área de estudo, a comparação entre as amostras confirmou esta tendência de heterogeneidade das variáveis físico-químicas, conforme indicado na Tabela 2 pelos parâmetros *composition*, *FUS* e *sand fraction*.

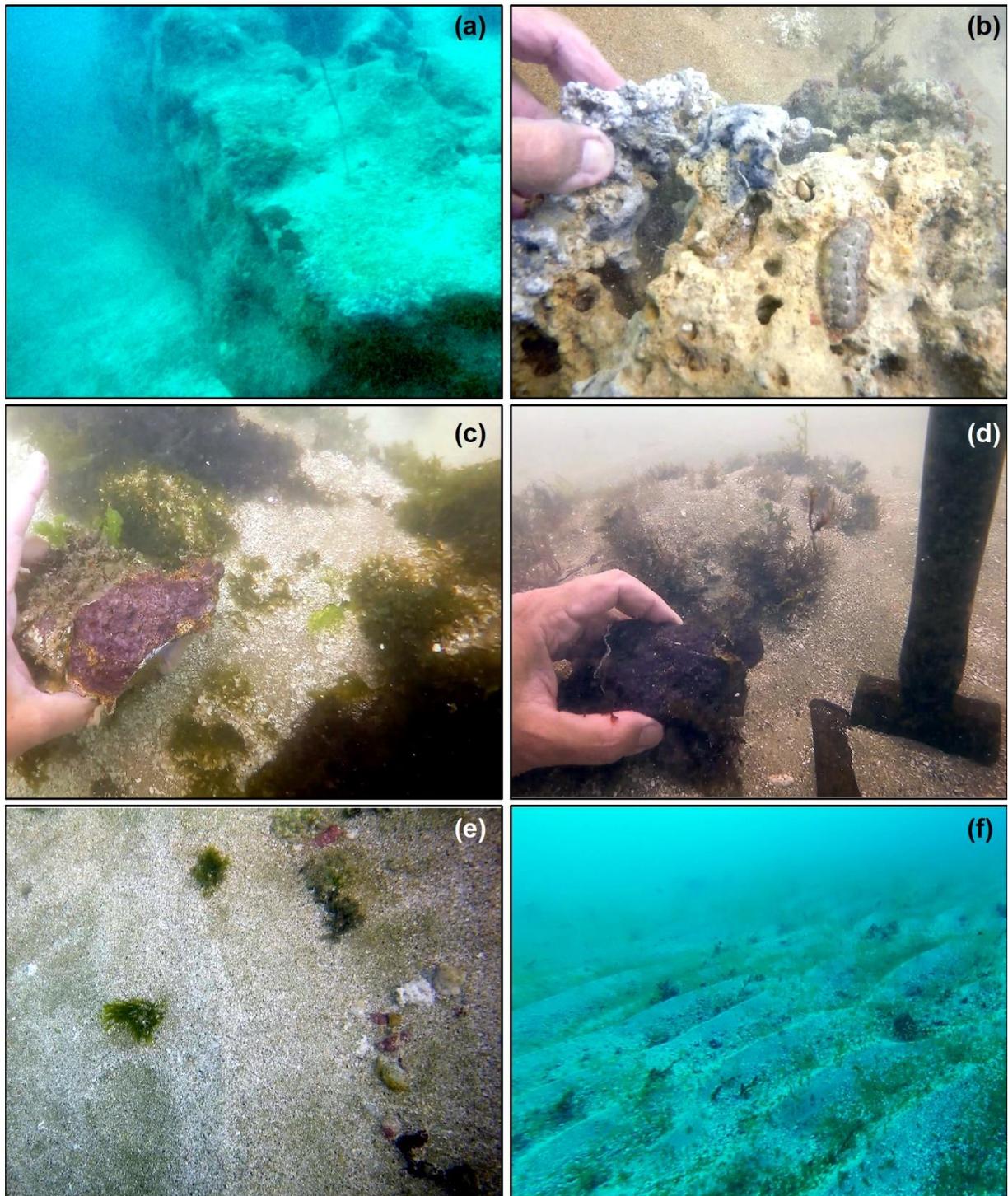


Figura 47. *Geologic Substrate* na área de estudo. *Rock Substrate Class (Bedrock)* apresenta rochas calcárias, imagens (a) e (b), além de clasts/rochas lateríticas erodidas e redepositadas da Formação Barreiras/Pós-Barreiras, imagens (c) e (d). (e) mostra uma parcela ($\sim 1 \text{ m}^2$) de *Unconsolidated Mineral Substrate Class*, e a imagem (f) mostra a paisagem em que ela está.

A Tabela 3 mostra a relação entre *Geoform Type* e *Substrate Group*. Entre os grupos *Substrate Component* identificados na área de estudo, quanto a origem, sete tipos são

substratos biogênicos e um tipo é substrato geológico. *Coquina Sand* e *Rhodolith Rubble* foram os *Substrate Group* mais frequentes na área de estudo (Fig. 38).

Tabela 3: Relação entre *Geoform Type* e *Substrate Group*.

Substrate Group	Geoform Type					
	Linear C.Reef	Tidal Inlets	Patch Corals	Shelf Valley	Bank	Pavement Area
Clam Hash			•	•	•	
Coquina Sand	•	•	•	•	•	•
Halimeda Sand					•	•
Rhodolith Rubble	•		•	•	•	
Rhodolith Hash			•			•
Rhodolith Sand						•
Sand		•	•			•
Organic Mud						•

O substrato *Halimeda Sand* (Fig. 39) foi associado à *Pavement Area* e a uma grande área dominada por *Bank*, entre 12 e 31 m de profundidade. *Rhodolith Substrate* (Fig. 40) apenas não ocorreu na *Tidal Inlets* e *Rhodolith Sand* ocorreu somente na *Pavement Area*.

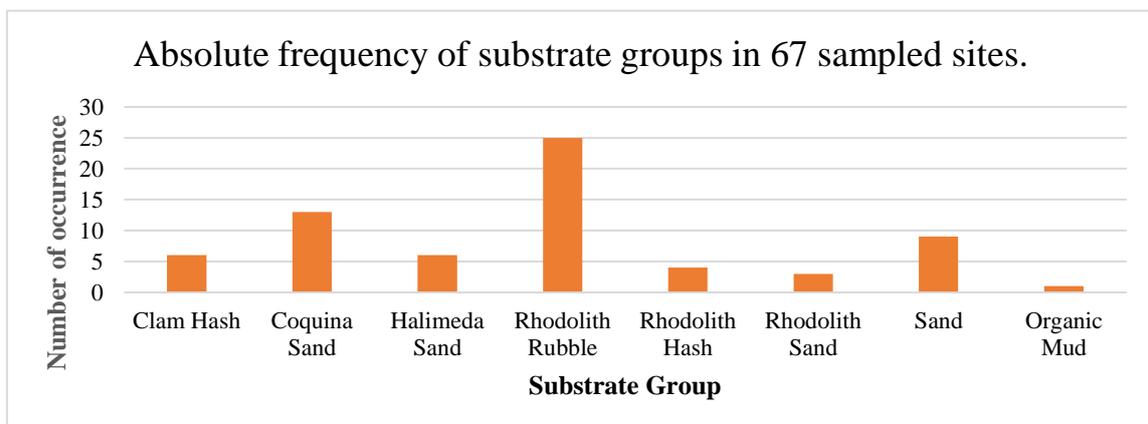


Figura 38. Frequência absoluta dos grupos de substrato, em 67 sítios da área de estudo.

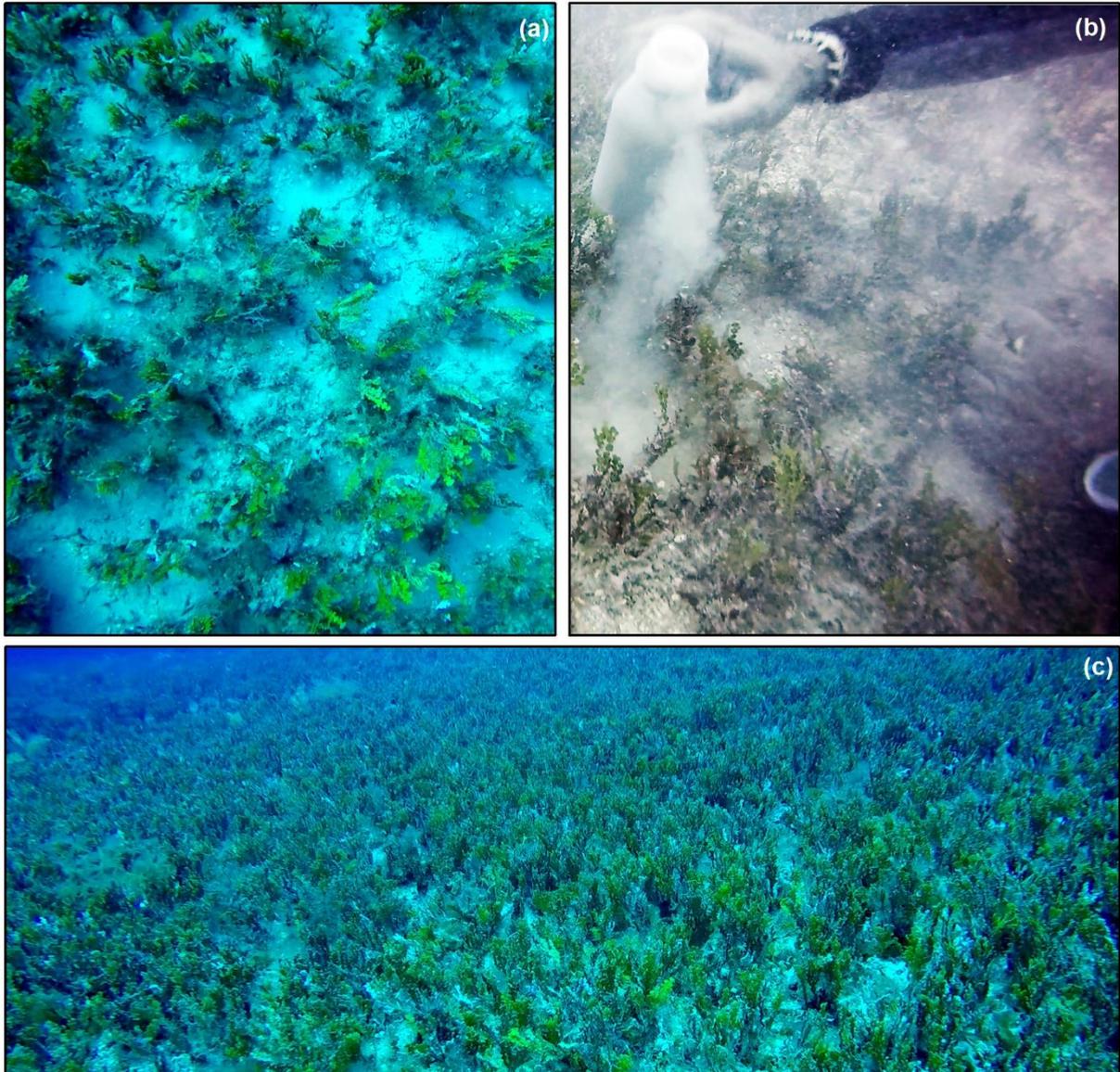


Figura 39. Biogenic Substrate, Halimeda Sand Group. (a) Substrato parcialmente recoberto por *Halimeda cuneata*. (b) Coleta de amostra do substrato, entre os indivíduos da população de *H. cuneata*. (c) A imagem mostra, na *Geoform Type Bank*, uma paisagem típica dos locais de ocorrência deste substrato.

Rhodolith Rubble ocorreu tanto nos ambientes recifais (e.g. *Linear Corals Reef*, *Patch Corals* e *Shelf Valleys*), quanto no relevo suave-ondulado da *Bank*. Contudo, foi observado que ocorre uma variação no tamanho deste grupo de rodolitos, entre os diferentes tipos de geoformas. Visualmente, amostras de maior tamanho (> 200 mm) são mais frequentes nas áreas circundantes aos *Shelf Valley*. Em *Patch Coral*, ocorrem rodolitos equivalentes em tamanho, mas com uma frequência inferior ao que foi observado no *Shelf Valley*. O substrato *Rhodolith Hash* ocorreu nas geoformas *Pavement Area* e *Patch Corals*, ou seja, nas zonas mais rasa e mais profunda da plataforma, respectivamente.

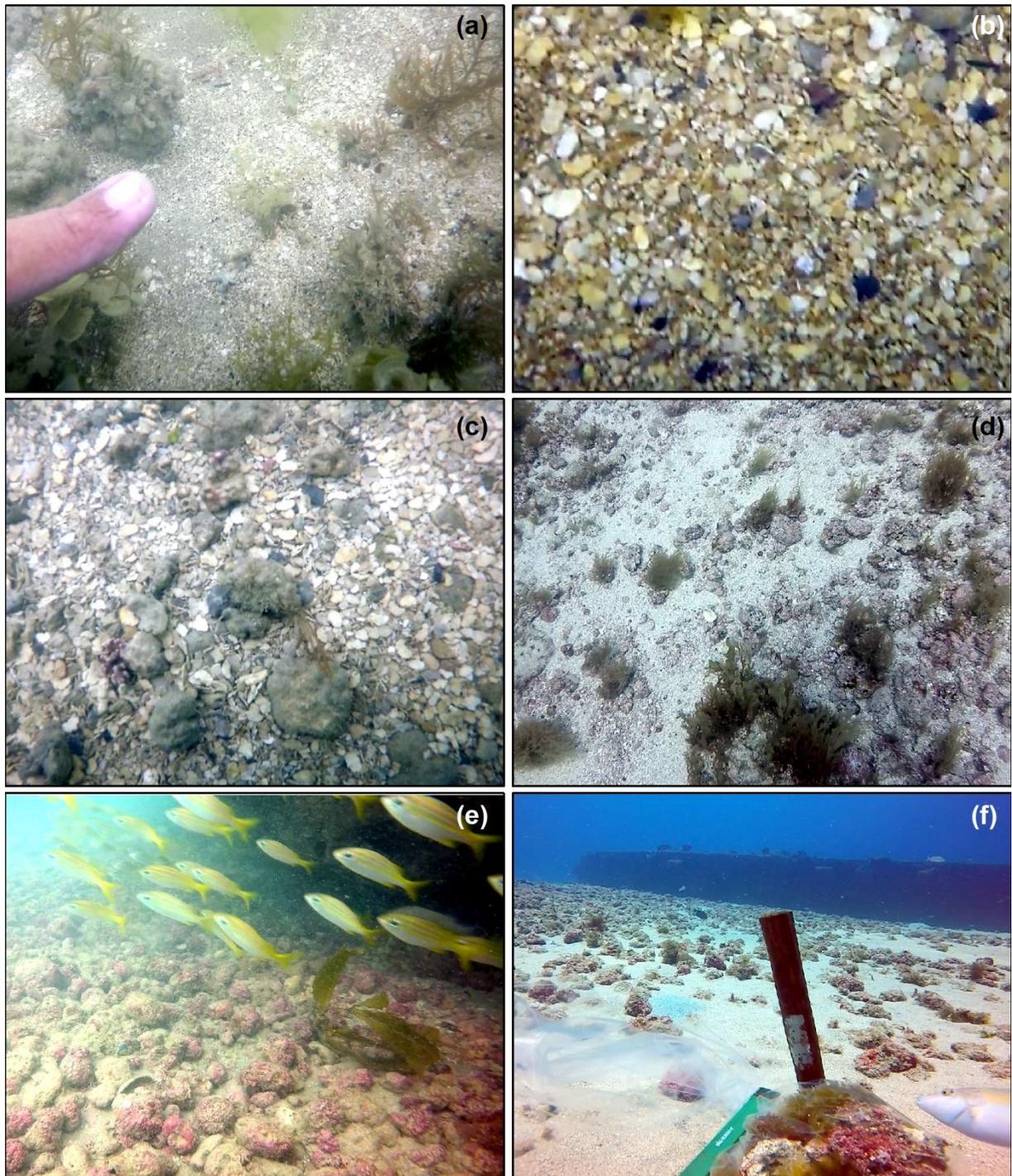


Figura 40. Biogenic Substrate, Rhodolith Subclass. (a) e (b) mostram as partículas pequenas (< 2mm) de *Rhodolith Sand Group*. (c) e (d) mostram *Rhodolith Hash Group*. (e) e (f) mostram, respectivamente, a ocorrência de *Rhodolith Rubble* na região circundante de ambientes recifais e em área da geoforma *Bank*. A estrutura vista no fundo da imagem (f), é um naufrágio do século passado.

Organic Mud Subclass (Fig. 41) ocorreu apenas na *Pavement Area*. Este tipo de substrato é extremamente fino (< 0,062 mm), e a sua ressuspensão, para a coluna d'água, ocorre de forma sazonal influenciada por ventos, marés e correntes. Nesta situação, mesmo estando associada

a áreas rasas (< 10 m), medidas fotométricas indicaram que a zona bentônica permanece períodos relativamente longos sem receber luz, ou seja, forma-se uma zona afótica temporária. Estas características ambientais, controladas pelo processo cíclico de deposição e ressuspensão do sedimento, e conseqüente redução da luz, impõem severas restrições fisiológicas às comunidades biológicas, para a colonização destes habitats (JUNJIE et al., 2014).

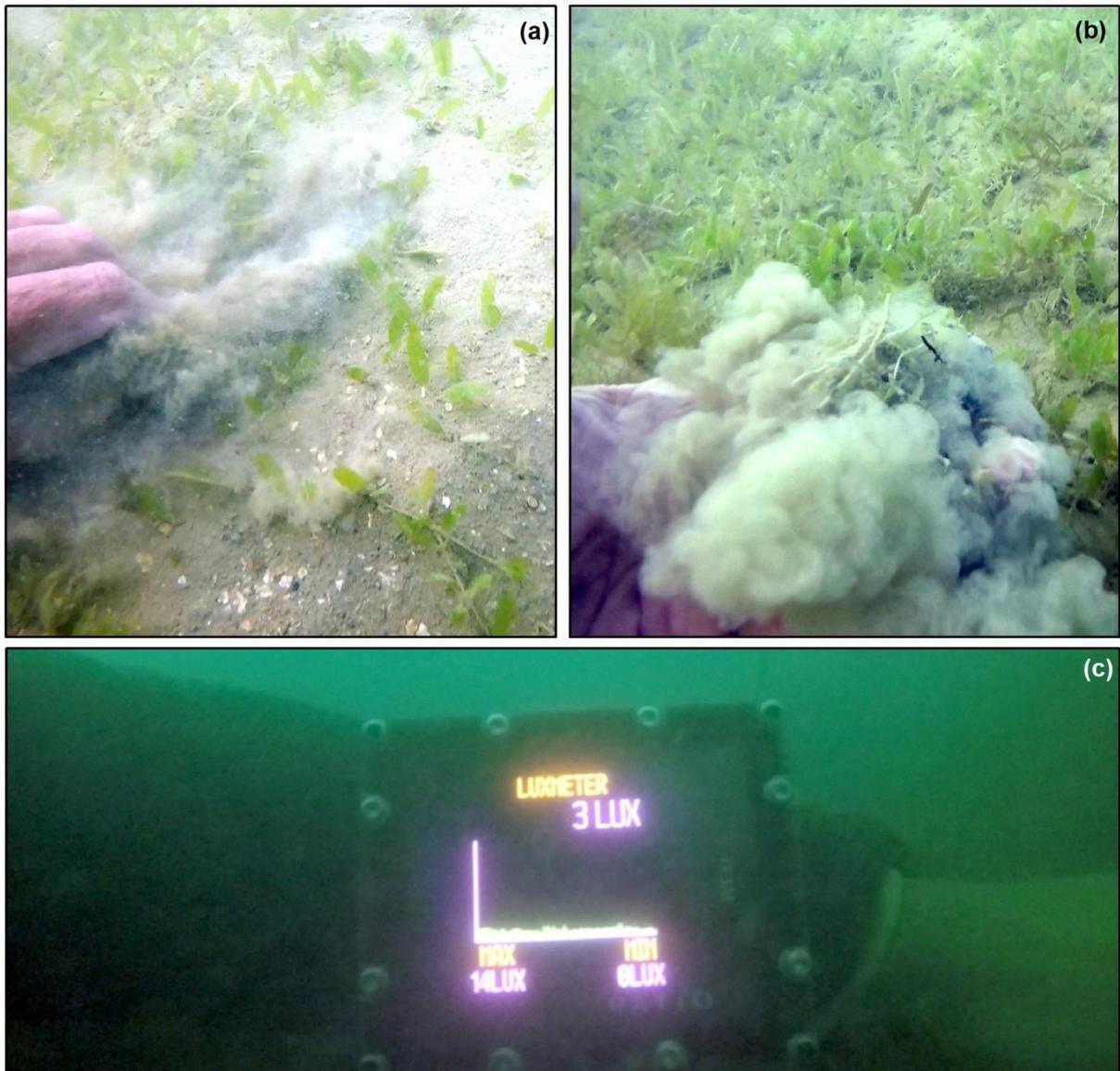


Figure 41. Biogenic Substrate, Organic Substrate Class. (a) e (b) mostram áreas recobertas por *Organic Mud Subclass*, que tem tamanho do grão inferior a 0,062 mm. A ressuspensão sazonal do substrato, pelas forçantes oceanográficas, condiciona zonas bentônicas afóticas, conforme registrado pela fotometria na imagem (c).

Shell Substrate Class (Fig. 42) ocorreu em todos os tipos de geoforma. *Clam Hash* ocorreu com maior frequência na *Offshore Area*, associada a geoforma *Shelf Valley*, e somente em

uma área da *Bank*, com 25 m de profundidade. *Coquina Sand* ocorreu em todos os tipos de geoformas, através de um amplo gradiente de profundidades, e foi o segundo mais frequente grupo de substrato na área de estudo (Fig. 38).



Figura 42. Biogenic Substrate, Shell Substrate Class. (a) mostra o substrato *Clam Hash Group*. (b) mostra o substrato *Coquina Sand Group*. A coloração amarelo-escuro, indica a mistura com sedimentos redepositados da Formação Barreiras. (c) mostra uma área da geoforma *Bank* recoberta por *Clam Hash*. (d) mostra uma área da geoforma *Patch Corals* recoberta por *Coquina Sand*

O substrato de origem geológica *Sand Group* ocorreu nas geoformas *Patch Coral*, *Pavement Area* e *Tidal Inlet*. Este registro indica que sedimentos oriundos do continente, incluindo àqueles originários da Formação Barreiras/Pós-Barreiras, foram transportados até alguns setores da *Offshore Area* durante o Holoceno (GOMES et al., 2015). Contudo, as amostras de

sedimento oriundas de outros setores da plataforma, onde as geoformas *Shelf Valley* estão localizadas, apresentaram baixos teores de *Sand*. Desta forma, a determinação da distribuição geográfica dos sedimentos e do seu padrão de agregação espacial, tornam-se elemento chave para entender a estruturação de habitats (LE ROUX; ROJAS, 2007; WRIGHT, 2012) e de ecossistemas mesofóticos (SHERMAN et al., 2016) na plataforma.

4.3. Análise da distribuição geográfica e de padrões espaciais

A Figura 43 mostra o design de amostragem dos sedimentos superficiais na plataforma continental. Os sítios das amostras foram plotados no mapa geomorfológico, que tem a mesma base de dados que indicou as estruturas bentônicas na Figura 14. Contudo, sua apresentação em perspectiva tridimensional possibilita melhor compreensão da distribuição espacial dos sedimentos, em relação as principais características fisiográficas da plataforma.

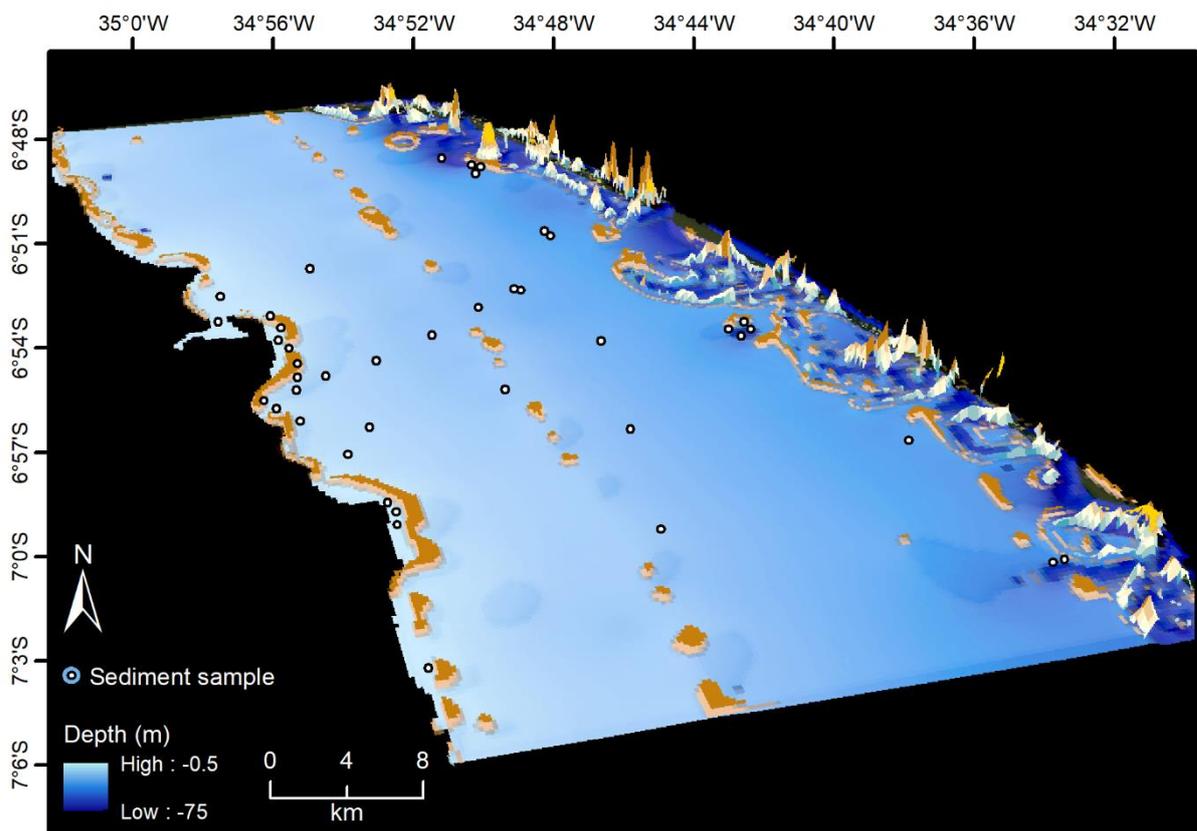


Figura 43. Mapa geomorfológico da plataforma continental do Estado da Paraíba, apresentado em perspectiva tridimensional. Os círculos indicam os pontos de coleta de amostras de *Fine Unconsolidated Substrate Subclass*.

A proporção de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos na camada superficial da plataforma da Paraíba (Fig. 44), é similar ao que foi quantificado na plataforma Potiguar (GOMES et al., 2015). A distribuição do tamanho dos grãos de *Sand Group* variou de very fine sand a very

coarse sand (VCS), mas as frações mais grossas de areia são as mais frequentes nas amostras. A fração *Coarse Sand* (CS) ocorreu em 83% das amostras e só não esteve presente em amostras que foram constituídas completamente por carbonato (Tabela 2).

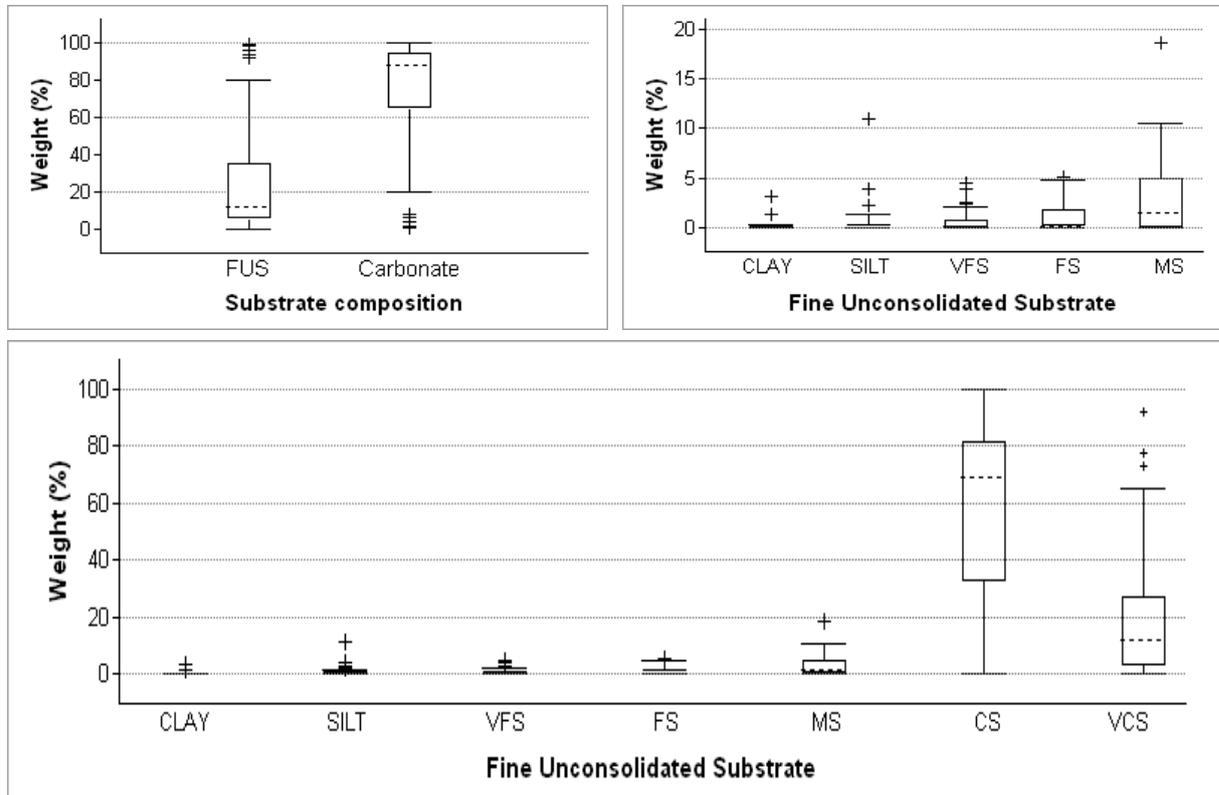


Figura 44. Heterogeneidade físico-química do substrato inconsolidado. As frações granulométricas de *Sand Group*, estão indicadas por *Very Fine Sand* (VFS), *Fine Sand* (FS), *Medium Sand* (MS), *Coarse Sand* (CS) e *Very Coarse Sand* (VCS). As classes de agregados Clay, Silt e Sand compõem a *Fine Unconsolidated Substrate Subclass* (FUS) das amostras.

A variável geomorfométrica *Slope* (Fig. 10a) indicou que mais de 90% da plataforma continental apresenta declividade próxima de zero. Portanto, a gravidade não parece exercer uma influência relevante, para o transporte de sedimentos entre a linha de costa e a zona de quebra de plataforma. Entretanto, é preciso considerar também outros elementos fisiográficos presentes na plataforma (COMITTEE, 2012), pois as variações sazonais no regime de marés, ondas e correntes na região interagem com a topografia do fundo marinho influenciando o fluxo de sedimentos e a diversidade de habitats em múltiplas escalas (BOUCHET et al., 2015; DOLAN; LUCIEER, 2014; LECOURS et al., 2016a).

O baixo aporte de sedimentos dos rios na plataforma continental nordestina é atribuído à fatores geomorfológicos e climáticos, os quais condicionaram a baixa drenagem das bacias (BARRETO et al., 2017; VITAL et al., 2010). Portanto, a deposição de sedimentos deveria ocorrer predominantemente próximo à costa, uma vez que o transporte de sedimentos ao

longo da plataforma é limitado pela baixa energia hidrodinâmica dos rios e pela baixa declividade. Entretanto, na área de estudo, a distribuição dos sedimentos do *Sand Group*, que representa a fração siliciclástica da amostra, não está correlacionada com a distância da linha de costa (Fig. 45). Uma possível explicação para isto, na plataforma do Rio Grande do Norte, foi que os sedimentos siliciclásticos são relíquias dos períodos de baixo nível do mar durante o Holoceno (GOMES et al., 2015). Outra possibilidade, proposta por estes autores, foi que afloramentos da Formação Tibau serviram de fonte de sedimentos siliciclásticos imaturos.

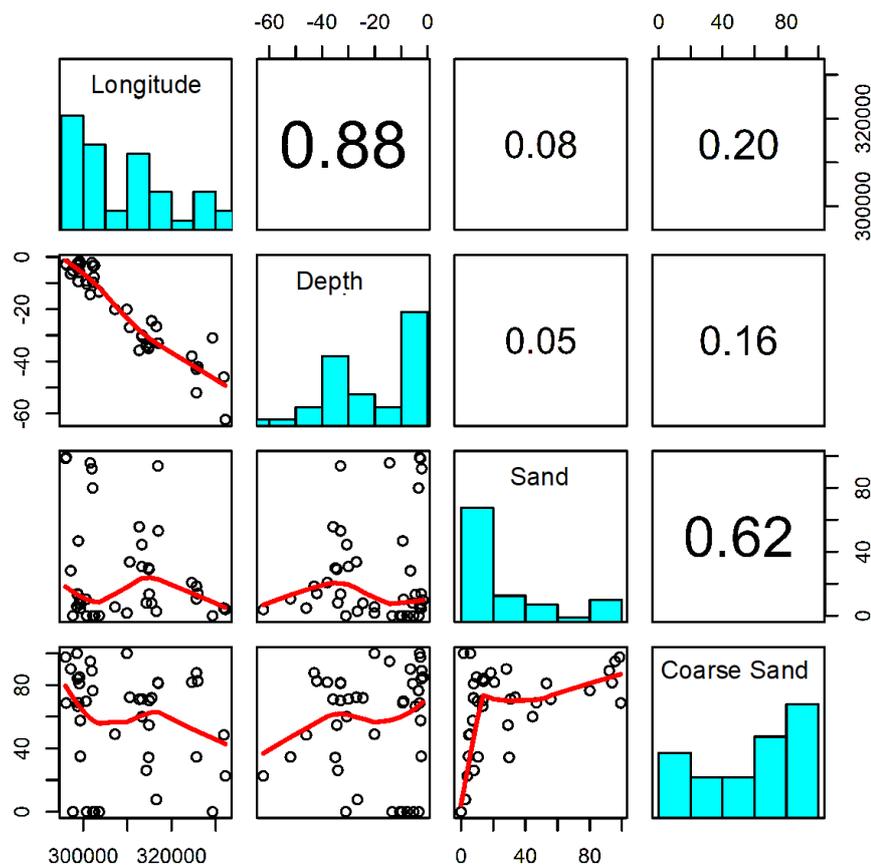


Figura 45. Correlação de Spearman entre variáveis geográficas, geomorfológicas e sedimentares. Os gráficos de histogramas, indicam a frequência de distribuição dos valores das variáveis. O coeficiente de correlação de Spearman, para os pares de variáveis, estão indicados nos painéis na parte superior e a direita. As correlações e o relacionamento entre os pares de variáveis, estão representados por linhas nos painéis na parte inferior e a esquerda.

Para a análise de correlação de Spearman (Fig. 45), os parâmetros longitude e profundidade foram considerados estimadores da distância entre a costa e as amostras (Fig. 43). O parâmetro *Sand Group* contém partículas finas, representadas em menor proporção, e todas as frações granulométricas de *Sand*. A fração *Coarse Sand* é a mais representativa em termos de

quantidade, considerando as amostras individualmente ou a frequência absoluta do pool de amostras (Fig. 44).

Na Bacia Potiguar (GOMES et al., 2015), a distribuição do tamanho dos grãos do sedimento superficial foi relacionada à características fisiográficas da plataforma, as condições hidrológicas de alta energia e as flutuações do nível do mar.

Na Bacia da Paraíba, a tendência de distribuição direcional das frações de *Carbonate*, *Sand Group* e *Silt* (Fig. 46) foi determinada pelo algoritmo da ferramenta *Directional Distribution* (*Spatial Statistics ArcToolbox*) integrada à linguagem de programação estatística R, em ambiente SIG.

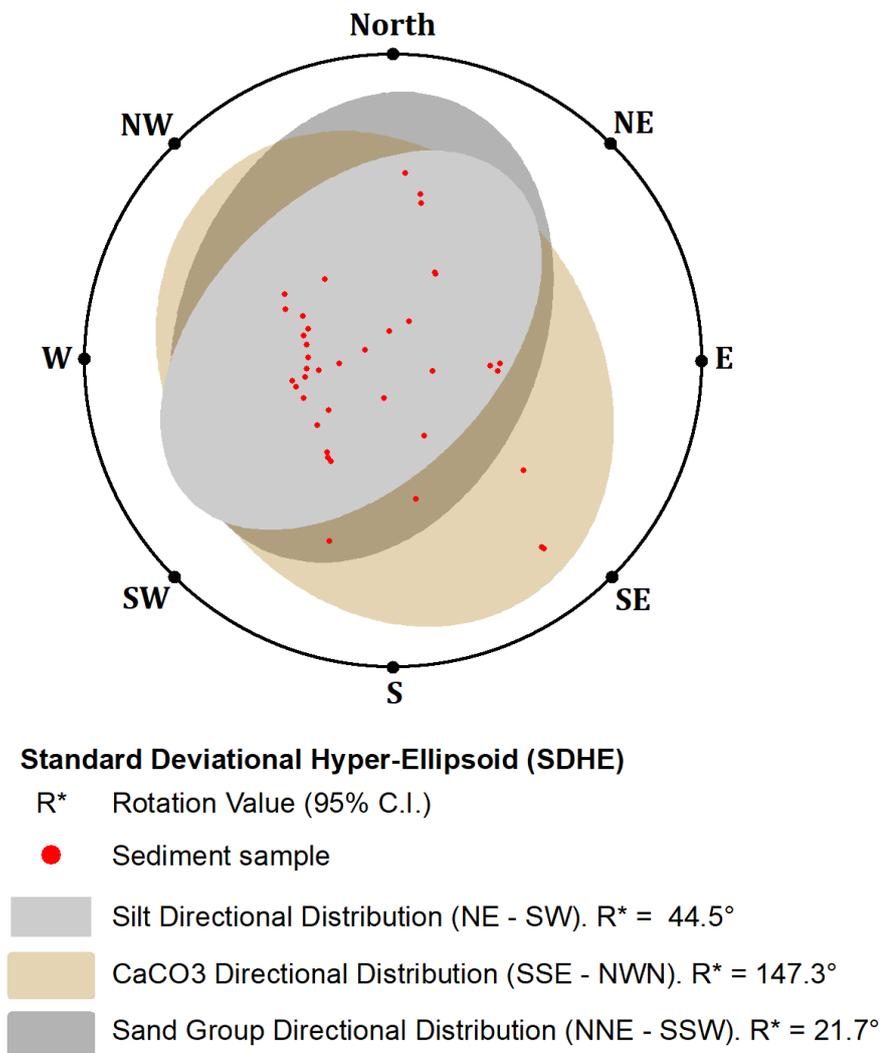


Figura 46. Hiper-elipsóide de padrões divergentes. As características geográficas e espaciais (tendência central, dispersão e tendência direcional) da composição sedimentar da área estudo, estão indicadas por padrões divergentes das elipses. A orientação das elipses, representa a rotação do eixo maior, em graus, medido no sentido horário, em relação ao norte verdadeiro.

A direção de distribuição dos sedimentos está indicada em relação ao norte verdadeiro, pois todos os sítios amostrados estão georreferenciados em um sistema de coordenadas projetadas em UTM. As frações *Carbonate*, *Sand Group* e *Silt* indicaram distintas tendências de distribuição direcional, expressas em medidas angulares, com intervalo de confiança de 95%.

Sand Group indicou uma distribuição orientada para N21,7°, que representa o vetor resultante da tendência de distribuição direcional de todas as frações que ela agrega (Fig. 44), onde *Coarse Sand* é a fração predominante. A fração *Silt*, indicou uma distribuição orientada para N44,5°, quando analisada isoladamente. A fração *Carbonate* indicou uma distribuição direcional para N147,3°, ou seja, um ângulo com desvio próximo a 120°, em relação a direção de distribuição da fração *Sand Group*.

Estes resultados mostram que distribuição espacial do *Component Substrate* na plataforma, indicado na Figura 36, está em perfeita concordância, com os padrões divergentes das elipses. Uma possível explicação para isto, é um controle, pelo menos parcial, de processos tectônicos de larga escala. Na Bacia Potiguar, foi demonstrado que a litologia e a herança estrutural, resultado de reativações de falhas do Cenozoico, influenciaram a geometria de *incised valley* e os ambientes de deposição de sedimentos (GOMES et al., 2016).

Na área de estudo, a aplicação do sistema CMECS indicou, quanto à origem, a ocorrência de substratos de origem geológica e biogênico. Por sua vez, os padrões divergentes das elipses indicaram que o *Geologic Substrate* > *Unconsolidated Mineral Substrate* > *Fine Unconsolidated Substrate Subclass* > *Sand Group* ocorre na direção NNE – SSW, o que é concordante com a principal direção de inclinação da plataforma (Fig. 11) e com a direção das principais zonas de cisalhamento (Fig. 28). Por outro lado, o *Biogenic Substrate* representado pela *Shell Substrate Class* e *Rhodolith Subclass*, está claramente associado ao setor SSE da plataforma.

O transporte e a deposição de sedimentos são processos dinâmicos influenciados pela geomorfologia, variáveis oceanográficas e heterogeneidade de partículas (BROOKE et al., 2017; CHIOCCI; CHIVAS, 2014; DURAFOR et al., 2013; GOES; BROWN; ARAÚJO, 2019; JORRY et al., 2010; ROSSETTI et al., 2011a). No entanto, a forma das partículas de sedimentos (especialmente a circularidade), pode ter exercido uma influência substancial na dinâmica do transporte de sedimentos, o que já foi observado em outras áreas com leito marinho plano (DURAFOR et al., 2015; KOMAR; LI, 1986). A hipótese é que as diferenças de tamanho e circularidade das partículas, em combinação com processos tectônicos,

exerceram um considerável controle na distribuição direcional dos sedimentos na área de estudo. Esta hipótese deve ser cuidadosamente avaliada, em estudos futuros, para melhorar a compreensão do transporte e a distribuição de sedimentos. Especialmente, porque pesquisas de laboratório ou de campo sobre o comportamento de diferentes formas de partículas ainda são escassas (DURAFOUR et al., 2013; KIRCHNER et al., 1990; ROUSSEAU; CAPS; WESFREID, 2004)

A análise do padrão espacial da *Sand Group* revelou agrupamentos multi-distância significativos (95% I.C.), que ocorrem na distância de até 4 mil metros da linha de costa (Fig. 47).

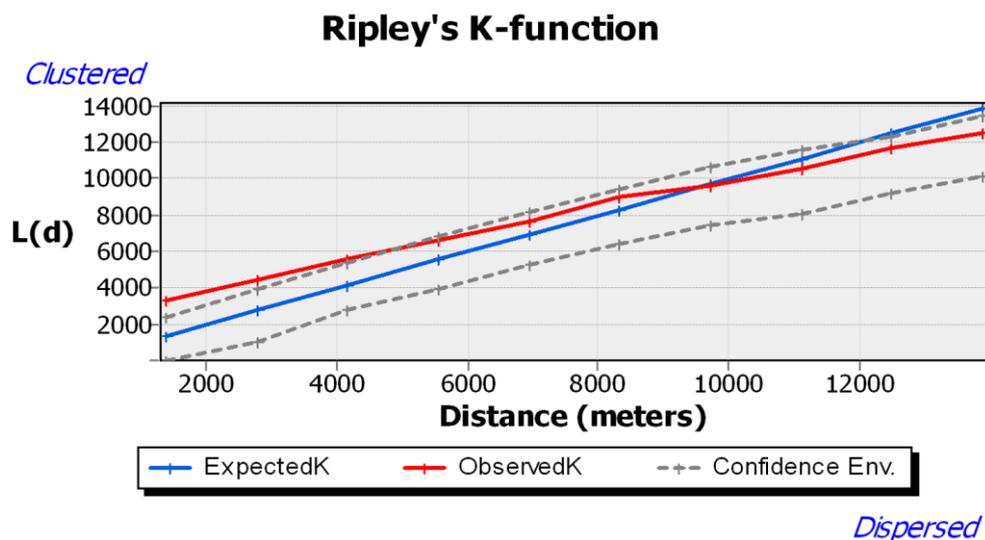


Figura 47. Distribuição geográfica do *Sand Group* na plataforma. A linha azul representa o padrão espacial aleatório esperado. A linha vermelha representa o padrão espacial observado, e as linhas tracejadas representam os limites superior e inferior do intervalo de confiança de 95%.

O padrão espacial agregado, mais próximo da linha de costa (Fig 47), indicou uma zona de aprisionamento e deposição de sedimentos, que pode ser explicada pelas características estruturais do *Geoform Types* sobrepostas à *Coastal Area* (Fig. 20). *Pavement Area*, *Tidal Inlet* e *Linear Coral Reef* constituem um largo e complexo geohabitat, com características fisiográficas, que impõem barreiras físicas à zona de transição entre *Coastal Area Subsystem* e *Nearshore Area Subsystem* (Fig. 15). Além disso, os sedimentos do continente, transportados pelas correntes de maré, podem ser aprisionados, mais especificamente, pela morfologia horizontal e vertical complexas apresentada pela *Linear Coral Reef* (ARAÚJO; AMARAL, 2016). Esta complexidade morfológica de *Linear Coral Reef* foi quantificada pelas variáveis

geomorfométricas declividade e rugosidade (Fig. 19). Estes atributos geomórficos estão diretamente relacionados ao fluxo de sedimentos em plataformas continentais com diferentes características estruturais (DOLAN; LUCIEER, 2014; MISIUK; LECOURS; BELL, 2018; WALBRIDGE et al., 2018).

A Figura 48 indicou que *Sand Group* forma agrupamentos relativamente intensos na plataforma. Agrupamentos espaciais com altos valores (*hotspot*), estatisticamente significativos (95% C.I.), foram mapeados e são apresentados Figura 49.

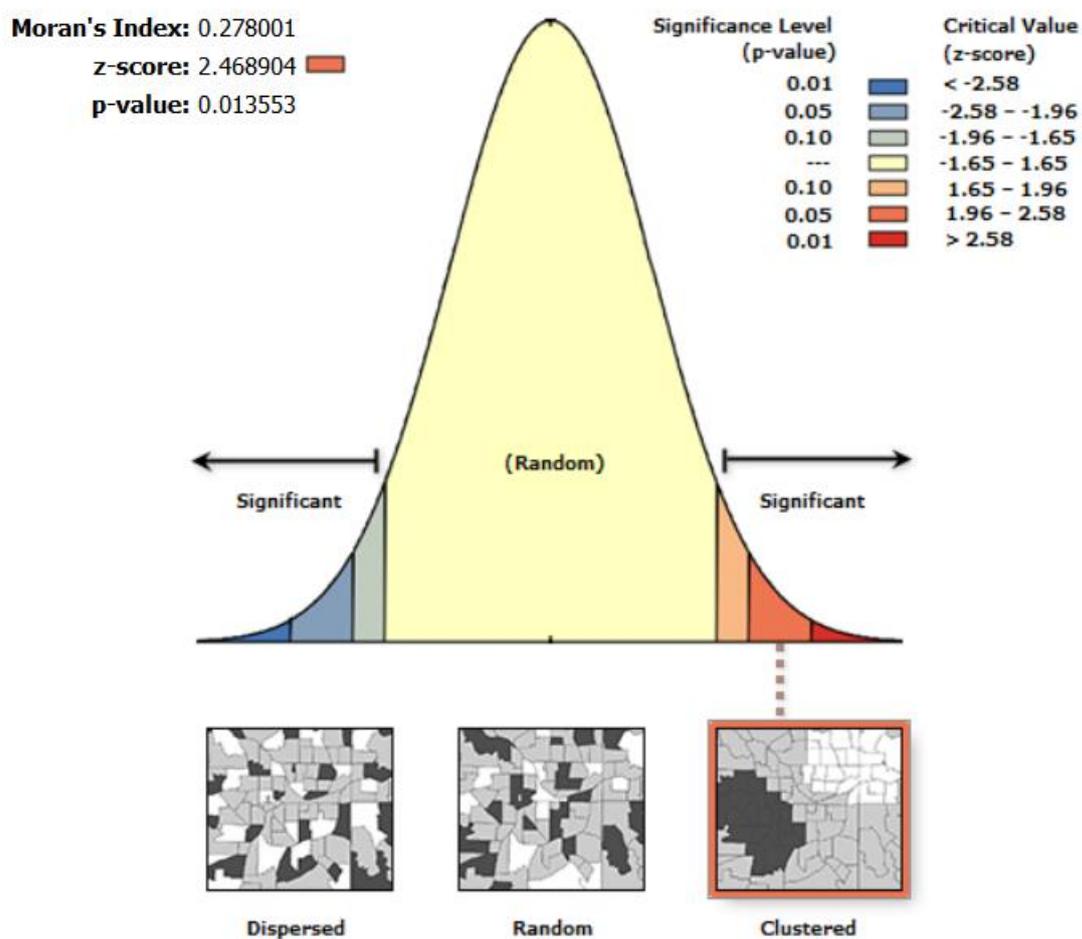


Figura 48. Padrão de distribuição espacial de *Sand Group*. O Z-score e p-Value indicaram significância estatística (95% CI), para um valor positivo do Moran's I, o que mostra tendência de agrupamento do sedimento.

O agrupamento de altos valores (*hot spots*), apresentado na Figura 49, indicou que uma parte dos *hot spots* foram espacialmente conectados à foz do rio Paraíba, em um contexto estuarino de alta energia cinemática (e.g. marés, correntes, descarga do rio). Os outros *hot spots* estão associados à ambientes diferentes da plataforma como, por exemplo, ao complexo geohabitat

da *Coastal Area* e a *Offshore Area* onde o hot spot foi topologicamente coincidente com *Patch Coral Reef*.

A ocorrência de hot spots, nas áreas mais próximas da linha de costa, pode ser explicada pela morfologia e pela topografia das geoformas que compõem o complexo geohabitats da *Coastal Area*, as quais favorecem a captura e o acúmulo de sedimentos (ARAÚJO; AMARAL, 2016; DOMINGUEZ et al., 2013; LEÃO et al., 2016).

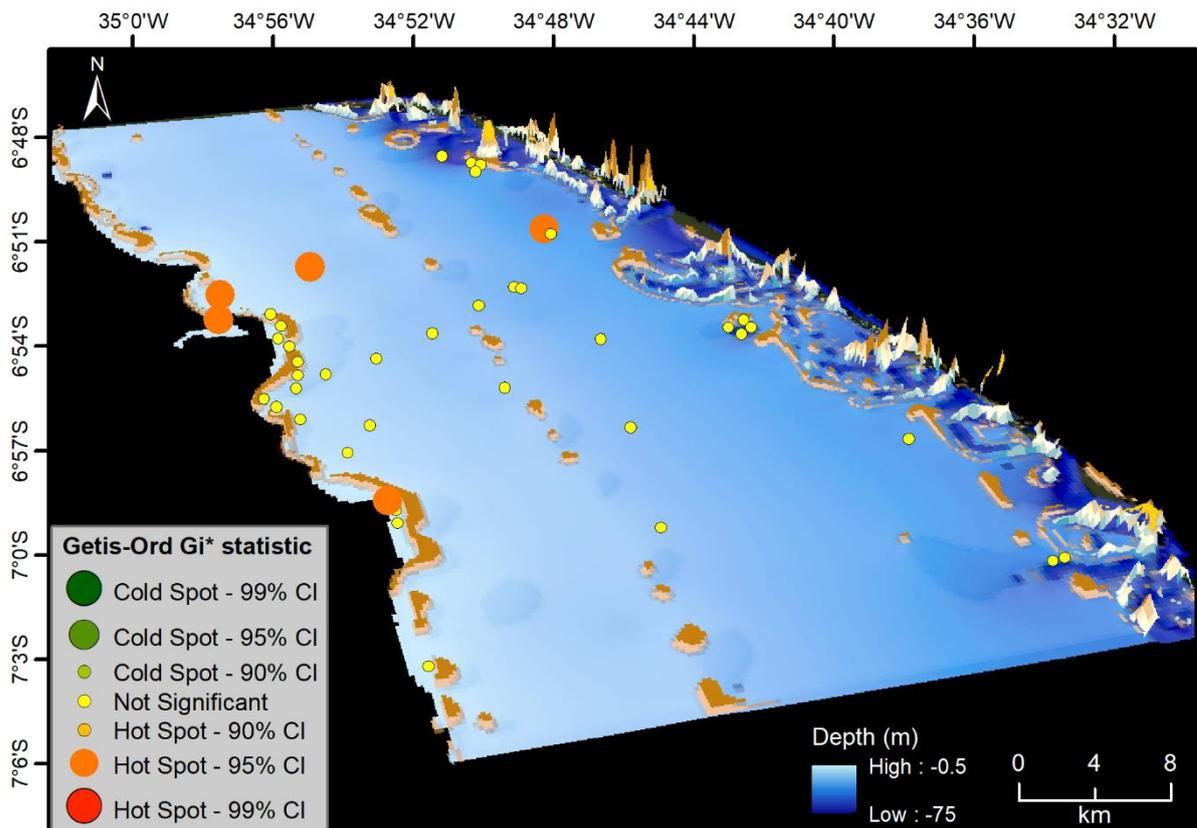


Figura 49. Getis-Ord G_i^* statistic. O mapa de *Sand Group* indica agrupamentos de altos valores (*hot spot*) e a inexistência de agrupamentos de baixos valores (*cold spot*).

Duas hipóteses foram consideradas para explicar a sobreposição do hot spot com *Patch Coral Reef*. A primeira, é que ele representa relíquias de depósitos do Holoceno formados durante os períodos de exposição subaérea da plataforma no Quaternário (BARRETO et al., 2002; GOMES et al., 2015). A hipótese alternativa, é que o depósito de sedimentos, com frações de areia grossa a muito grossa, foi formado em consequência do alinhamento da geoforma com a distribuição direcional do *Sand Group* na plataforma (Fig. 46). Neste último caso, os depósitos teriam sido formados após o fim do período de Máximo Glacial, que marcou a elevação do nível do oceano (SUGUIO et al., 2013). Esta última hipótese foi reforçada pela posição dos hot spots na foz do rio Paraíba e pela fraca contribuição de *Sand Group* nos

sedimentos superficiais dos *Shelf Valleys*, no setor SSE da plataforma. Este setor da plataforma está predominantemente alinhado com a distribuição direcional de carbonatos (Fig. 46).

Outliers High e Low (ESRI/ARCGIS GUIDE, 2016), indicados na Figura 50, revelaram singularidades da distribuição espacial dos sedimentos em escala mais fina. Estas singularidades espaciais resultaram, possivelmente, de distintos componentes geofísicos que controlaram a distribuição de sedimentos e a sua direção de distribuição em microescala. O *Anselin Local Moran I* indicou que duas regiões na plataforma apresentam mudança abrupta na composição do sedimento em uma distância geográfica pequena. Em outras duas regiões da plataforma, as fácies sedimentares formaram agrupamentos em mesoescala, como indicado pelo *Cluster High (Sand Group)* e pelo *Cluster Low (Carbonate)*. Contudo, nestas duas regiões, não foi possível determinar se as fronteiras entre as fácies sedimentares são graduais ou abruptas. Na Bacia Potiguar, mudanças graduais e abruptas entre as fácies sedimentares foram relacionadas à migração de corpos arenosos e a alta declividade (GOMES et al., 2015).

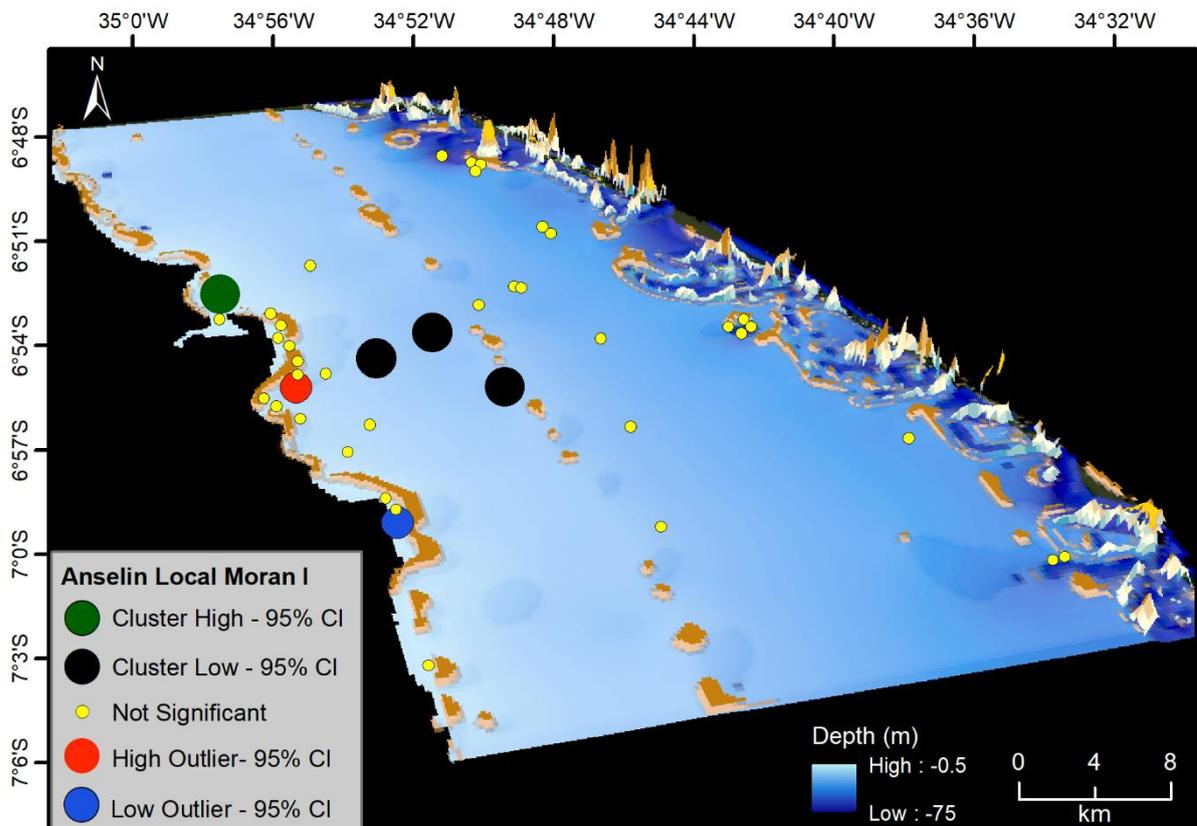


Figura 50. Anselin Local Moran I státics. O mapa indica os agrupamentos e dados espaciais outliers, com base na composição do substrato de 42 sítios amostrados.

As características fisiográficas, morfológicas e ecológicas da plataforma tiveram um papel relevante na ocorrência e na distribuição espacial dos sedimentos, de modo similar ao que foi previamente observado em plataformas adjacentes (DO NASCIMENTO SILVA; GOMES; VITAL, 2018; GOES; BROWN; ARAÚJO, 2019; VITAL et al., 2010). A zona *High Outlier*, associada à geoforma *Tidal Inlet*, está sujeita a fortes correntes de maré, que causam a ressuspensão de partículas planctônicas e de sedimentos terrígenos selecionados e depositados localmente. A zona *Low Outlier* está associada às características morfológicas da geoforma *Linear Coral Reef* onde a seleção e a deposição dos sedimentos ocorreram em condições de menor energia hidrodinâmica, alta rugosidade e com a presença de estruturas verticais heterogêneas.

Biotic Components

Na área de estudo, a análise do *Biotic Components* revelou quais os *Biotic Groups* estavam fixados ou proximamente associados com o substrato do fundo marinho. O mapeamento em mesoescala (Fig. 51) indicou a distribuição espacial de *Biotic Groups*, através da plataforma continental.

As comunidades bióticas mais frequentemente observadas durante os mergulhos, assim como as características dos habitats, foram registradas em vídeo. Posteriormente, a análise conjunta dos dados geofísicos, biológicos e das imagens foram fundamentais para o mapeamento de habitats, a identificação das comunidades bióticas e a descrição dos biótopos em microescala. Vídeos subaquáticos são usualmente utilizados para a integração de escalas de análises (WITMAN; LAMB; BYRNES, 2015), em estudos de ecologia funcional em zonas mesofóticas (LESSER; SLATTERY; MOBLEY, 2018), no mapeamento de habitats em fina escala espacial (PRAMPOLINI et al., 2018) e na determinação dos padrões espaciais da biodiversidade marinha (TURNER et al., 2017).

No CMECS, comunidades bióticas são definidas como “*a repeatable grouping of species that is relatively uniform in structure, species composition, and habitat conditions*”. Com o tempo e o acúmulo de informações adquiridas com os resultados da *Geoform Components* e do *Substrate Components*, as análises alcançaram o nível mais refinado de descrição, que o CMECS define como biótopos. Neste sistema de classificação, biótopos podem ser reconhecidos e descritos quando “*individual BC biotic communities are repeatedly associated with unique combinations of the abiotic features.*”

Na área de estudo, cerca de 2/3 do total das comunidades bióticas identificadas (~70) ocorreram na *Reef Biota Class*. A biodiversidade da infauna, no *Fine Unconsolidated Substrate*, não foi investigada neste estudo. Somente a *Large Megafauna*, com tamanho maior que 3 cm, foi considerada para a categorização na *Faunal Bed Class*. A *Aquatic Vegetation Bed Class* foi caracterizada pela *Calcareous Algal Bed Group*, com somente uma espécie, e pela alta diversidade da *Leathery/Leafy Algal Bed Group*.

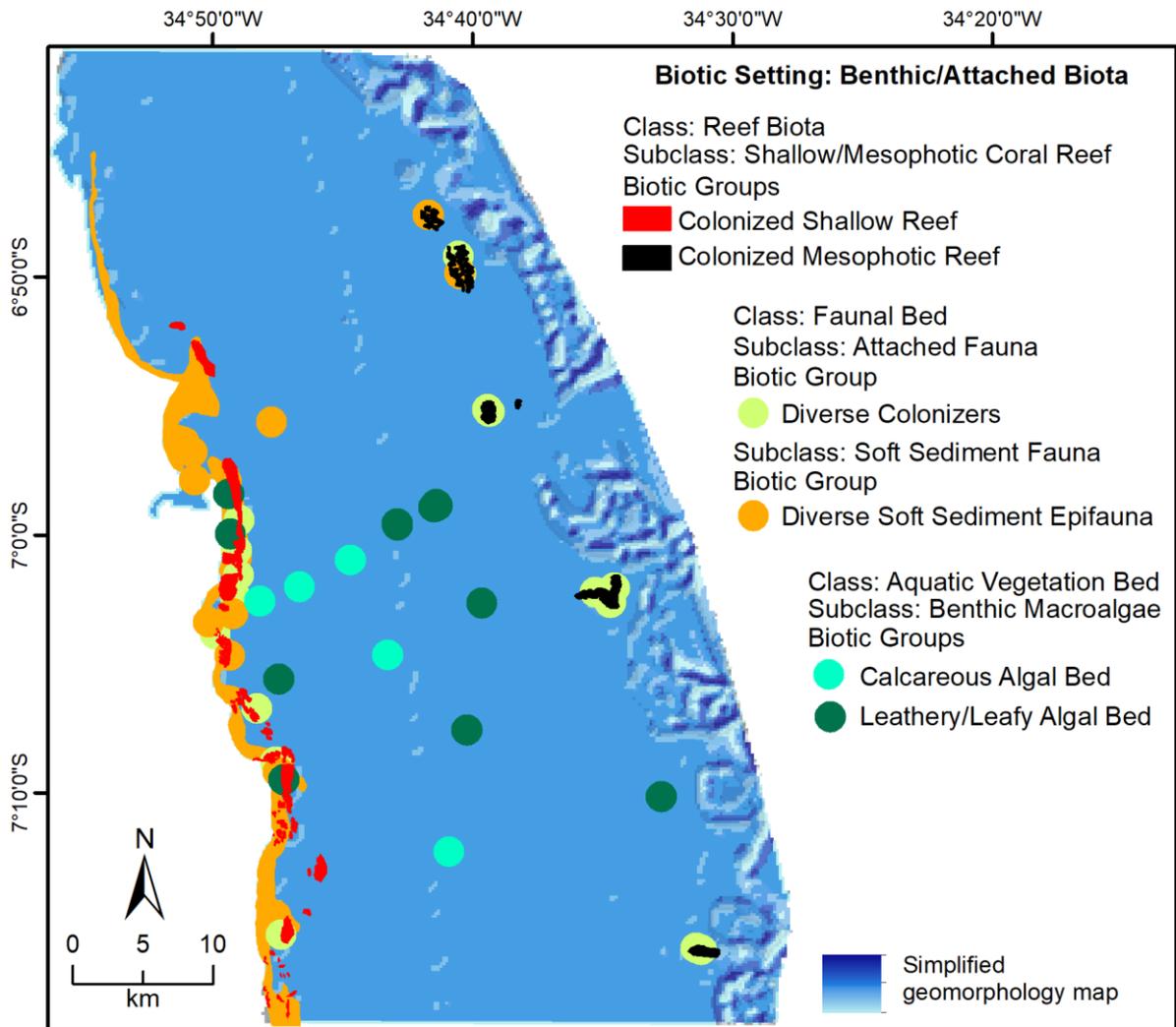


Figure 51. Classificação e mapeamento de *Biotic Groups*, na plataforma continental.

Os dois grupos bióticos relacionados a *Reef Biota Class* (Fig. 51) são estruturalmente complexos e ricos em biodiversidade (Fig. 52). A aplicação do método de avaliação visual, indicado pelo CMECS, mostrou que os corais escleractíneos estiveram sempre presentes nos dois *Biotic Groups*, mas não foram dominantes. A cobertura da *Rock Substrate Class* foi dominada por outros organismos colonizadores como algas, esponjas e moluscos. Esta classe

de substrato foi encontrada nas geoformas *Bank*, *Linear Coral Reef*, *Patch Coral Reef* e *Shelf Valley*,

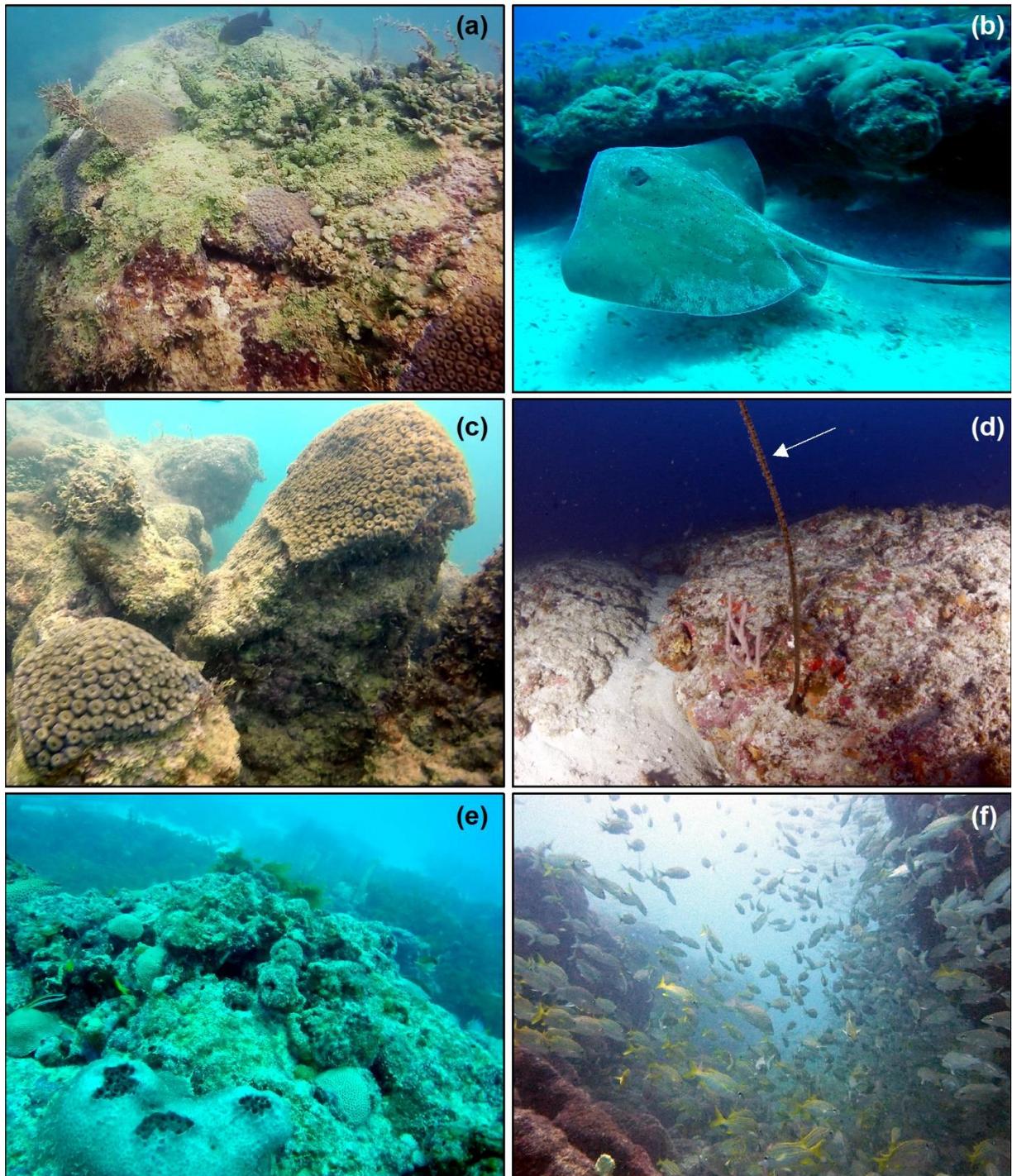


Figure 52. Reef Biota Class. Biotic Group Colonized Shallow Reef: (a) Mostra a alta diversidade de colonizadores, representados principalmente por comunidades de macroalgas, esponjas, moluscos e corais escleractíneos. (b) Mostra colônias de *Siderastrea stellata*, fixadas em rocha carbonática; (c) Indica que comunidades de *Montastrea cavernosa* podem formar grandes colônias, mas corais escleractíneos não são visualmente dominantes nos ambientes recifais. **Biotic Group Colonized Mesophotic Reef:** (d) Mostra um coral mesofótico de alta biodiversidade na geoforma *Shelf Valley*. A seta indica um coral negro do gênero *Cirrhipathes* (~ 50 m de profundidade). (e) e (f) mostram recifes mesofóticos na geoforma *Patch Coral*, entre 30 e 40 m de profundidade.

Desta forma, os biótopos foram categorizados e descritos conforme o *Subsystem* em que está situado o *Geoform Component*. *Linear Coral Reef* e *Bank* estão situadas em *Subsystems* com profundidades inferiores a 30 m. Então, nelas ocorreu o *Colonized Shallow Reef Group*. No caso de *Patch Coral Reef* e *Shelf Valley*, que estão situados exclusivamente na *Offshore Area* (i.e., > 30 m de profundidade), em ambos ocorreu o *Colonized Mesophotic Reef Group*.

Os *Reef Groups* são densamente colonizados por organismos com dimensão, forma e hábito variados (e.g. ereta, esferoidal, incrustante, cupulada, tubular, leque), formando uma camada relativamente espessa e complexa (RIDING, 2002) sobre o *Rock Substrate* (Fig. 36). Na área de estudo, a fonte deste tipo de substrato na *Coastal Area* foi claramente relacionada à Formação Barreiras/Pós-Barreiras, enquanto processos neotectônicos controlaram a origem de afloramentos rochosos na *Offshore Area*. Neste cenário, os biótopos estiveram sob crítica pressão de seleção durante o Holoceno, devido as flutuações do mar (ANGULO; LESSA; SOUZA, 2006; BARRETO et al., 2002). A determinação das variáveis evolutivas que condicionaram sua resiliência, bem como as possíveis áreas de refúgio, ainda permanecem em debate (DOLBY et al., 2016; MORAIS; SANTOS, 2018; ROCHA et al., 2018; WEISS, 2017).

Comunidades bióticas dos *Reef Biota Groups* estão em ambientes muito distintos, quando considerados os parâmetros físicos da coluna d'água (e.g., temperatura, luz, pressão, correntes e turbidez). Estes parâmetros estão fortemente correlacionados com o gradiente de profundidade (COLES; RIEGL, 2013; JONES et al., 2018), além de apresentarem padrões sazonais em resposta à mudanças no sistema oceano – atmosfera (CLARK et al., 2002).

Na área de estudo, uma parte das comunidades bióticas revelou tolerância ao gradiente ambiental imposto pelos parâmetros físicos da coluna d'água, pois estiveram presentes no *Shallow* e no *Mesophotic Reefs Groups* (Tabela 4). Entretanto, algumas comunidades bióticas foram associadas exclusivamente a *Offshore Area*, como esponjas dos gêneros *Clathria* e *Aplysina*, peixes, das famílias Carangidae e Sphyraenidae, e corais azooxantelados de profundidade, como o coral negro do gênero *Cirrhopathes*. A distribuição da *Faunal Bed Class* tem um padrão generalista (LAURANCE; DIDHAM; POWER, 2001), e está representada em todos os habitats da plataforma, o que pode ser explicado pela história evolutiva dos seus grupos, com espécies representadas por artrópodes marinhos, equinodermos e moluscos (Fig. 53). A análise de *Aquatic Vegetation Bed Class* indicou (Fig. 51), que a distribuição e a frequência de seus grupos respondem ao gradiente dos parâmetros físicos e são limitados a profundidades inferiores a 40 m. A distribuição de *Calcareous Algal*

Bed Group na plataforma foi restrita aos subsistemas *Coastal Area* e *Nearshore Area* e associada as geoformas *Pavement Area* e *Bank* (Fig. 54).

Tabela 4. Classificação dos habitats bentônicos da plataforma continental do Estado da Paraíba, de acordo com o *Coastal and Marine Ecological Classification Standard – CMECS*.

Plataforma continental do Estado da Paraíba (0,5 – 75 m de profundidade)

Biogeographic Setting
 Realm: Tropical Atlantic
 Province: Tropical Southwestern Atlantic
 Ecoregion: Northeastern Brazil

Aquatic Setting
 System: Marine
 Subsystem: Nearshore Area
 Subsystem: Offshore Area
 System: Estuarine
 Subsystem: Coastal Area

Geoform Component (GC)
 Tectonic Setting: Passive Continental Margin
 Physiographic Setting: Continental Shelf
 Geoform Level 1: Geologic Origin
 Geoform Type: Pavement Area
 Geoform Type: Tidal Inlet
 Geoform Type: Shelf Valley
 Geoform Type: Bank
 Geoform Level 1: Biogenic Origin
 Geoform Type: Linear Coral Reef
 Geoform Type: Patch Coral Reef

Substrate Component (SC)
 Substrate Origin: Geologic Substrate
 Substrate Class: Rock Substrate
 Substrate Subclass: Bedrock
 Co-occurring Element: Sand
 Substrate Class: Unconsolidated Mineral Substrate
 Substrate Subclass: Fine Unconsolidated Substrate
 Substrate Group: Sand
 Substrate Subgroup Very Coarse Sand
 Substrate Subgroup Coarse Sand
 Substrate Subgroup Medium Sand
 Substrate Subgroup Fine Sand
 Substrate Subgroup Very Fine Sand
 Substrate Origin: Biogenic Substrate
 Substrate Class: Algal Substrate
 Substrate Subclass: Algal Sand
 Substrate Group: Halimeda Sand
 Substrate Class: Rhodolith Substrate
 Substrate Subclass: Rhodolith Rubble
 Substrate Subclass: Rhodolith Hash

Substrate Subclass: Rhodolith Sand
 Substrate Class: Organic Substrate
 Substrate Subclass: Organic Mud
 Substrate Class: Shell Substrate
 Substrate Subclass: Shell Rubble
 Substrate Subclass: Shell Hash
 Substrate Subclass: Shell Sand

Biotic Component (BC)

Biotic Setting: Benthic/Attached Biota

Biotic Class: Reef Biota

Biotic Subclass: Shallow/Mesophotic Coral Reef Biota

Biotic Group: Colonized Shallow Reef

Biotic Community: Calcareous Algae

Biotic Community: Coralline/Crustose Algae

Biotic Community: Encrusting Sponges

Biotic Community: Encrusting Mollusk Colonizers

Biotic Community: Encrusting *Siderastrea stellata*

Biotic Community: Encrusting *Montastraea cavernosa*

Biotic Community: Encrusting *Mussismilia hispida*

Biotic Community: Encrusting *Palythoa caribaeroum*

Biotic Community: Encrusting *Mussismilia harttii*

Biotic Community: Encrusting / Semi-spherical *Porites astreoides*

Biotic Community: Encrusting *Favia gravida*

Biotic Community: Foliose *Agaricia agaricites*

Biotic Community: Branching *Muriceopsis*

Biotic Community: Encrusting *Protopalythoa variabilis*

Biotic Community: Encrusting *Zoanthus sociatus*

Biotic Community: Branching *Millepora alcicornis*

Biotic Community: Encrusting *Meandrina braziliensis*

Biotic Group: Colonized Mesophotic Reef

Biotic Community: *Cirrhopathes* sp.

Biotic Community: Crustose Algae

Biotic Community: Encrusting Sponges

Biotic Community: *Clathria* sp. (racket-like form sponge)

Biotic Community: *Aplysina* sp. (branching tube sponge)

Biotic Community: *Ircina* sp. (barrel sponge)

Biotic Community: Encrusting *Siderastrea stellata*

Biotic Community: Encrusting *Montastraea cavernosa*

Biotic Community: Encrusting *Mussismilia hispida*

Biotic Community: Encrusting-spherical *Stephanocoenia michelini*

Biotic Community: Foliose *Agaricia fragilis*

Biotic Community: Branching *Madracis decactis*

Biotic Class: Faunal Bed

Biotic Subclass: Attached Fauna

Biotic Group: Diverse Colonizers

Biotic Community: Mollusk/Sponge/Hard Coral/Tunicate
 Colonizers (Large Megafauna)

Co-occurring Element: Benthic Macroalgae

Biotic Subclass: Soft Sediment Fauna

Biotic Group: Diverse Soft Sediment Epifauna
 Biotic Community: Ophiuroid/Sand Dollar/Mobile Mollusk Bed
 (Large Megafauna)
 Co-occurring Element: Mobile Crustaceans on Soft Sediment
 Biotic Class: Aquatic Vegetation Bed
 Biotic Subclass: Benthic Macroalgae
 Biotic Group: Calcareous Algal Bed
 Biotic Community: *Halimeda cuneata*
 Biotic Group: Leathery/Leafy Algal Bed
 Biotic Community: *Caulerpa* sp.
 Biotic Community: *Caulerpa prolifera*
 Biotic Community: *Caulerpa racemosa*
 Biotic Community: *Caulerpa sertularioides*
 Biotic Community: *Caulerpa verticillata*
 Biotic Community: *Codium decortcatum*
 Biotic Community: *Codium intertextum*
 Biotic Community: *Codium* sp.
 Biotic Community: *Bryopsis pennata*
 Biotic Community: *Chaetomorpha antennina*
 Biotic Community: *Cladophora ordinata*
 Biotic Community: *Cladophora* sp.
 Biotic Community: *Cladophoropsis membranacea*
 Biotic Community: *Rhizoclonium* sp.
 Biotic Community: *Udotea* sp.
 Biotic Community: *Ulva fascinata*
 Biotic Community: *Ulva flexuosa*
 Biotic Community: *Ulva lactuca*
 Biotic Community: *Valonia* sp.
 Biotic Community: *Valonia macrophysa*
 Biotic Community: *Canistrocarpus* sp.
 Biotic Community: *Dictyopteris plagiogramma*
 Biotic Community: *Dictyopteris* sp.
 Biotic Community: *Dictyota ciliolata*
 Biotic Community: *Dictyota* sp.
 Biotic Community: *Padina gymnospora*
 Biotic Community: *Sargassum vulgare*
 Biotic Community: *Spatoglossum* sp.
 Biotic Community: *Styopodium zonale*
 Biotic Community: *Amphiroa* sp.
 Biotic Community: *Bothyocladia* sp.
 Biotic Community: *Gracilaria* sp.
 Biotic Community: *Tricleocarpa* sp.

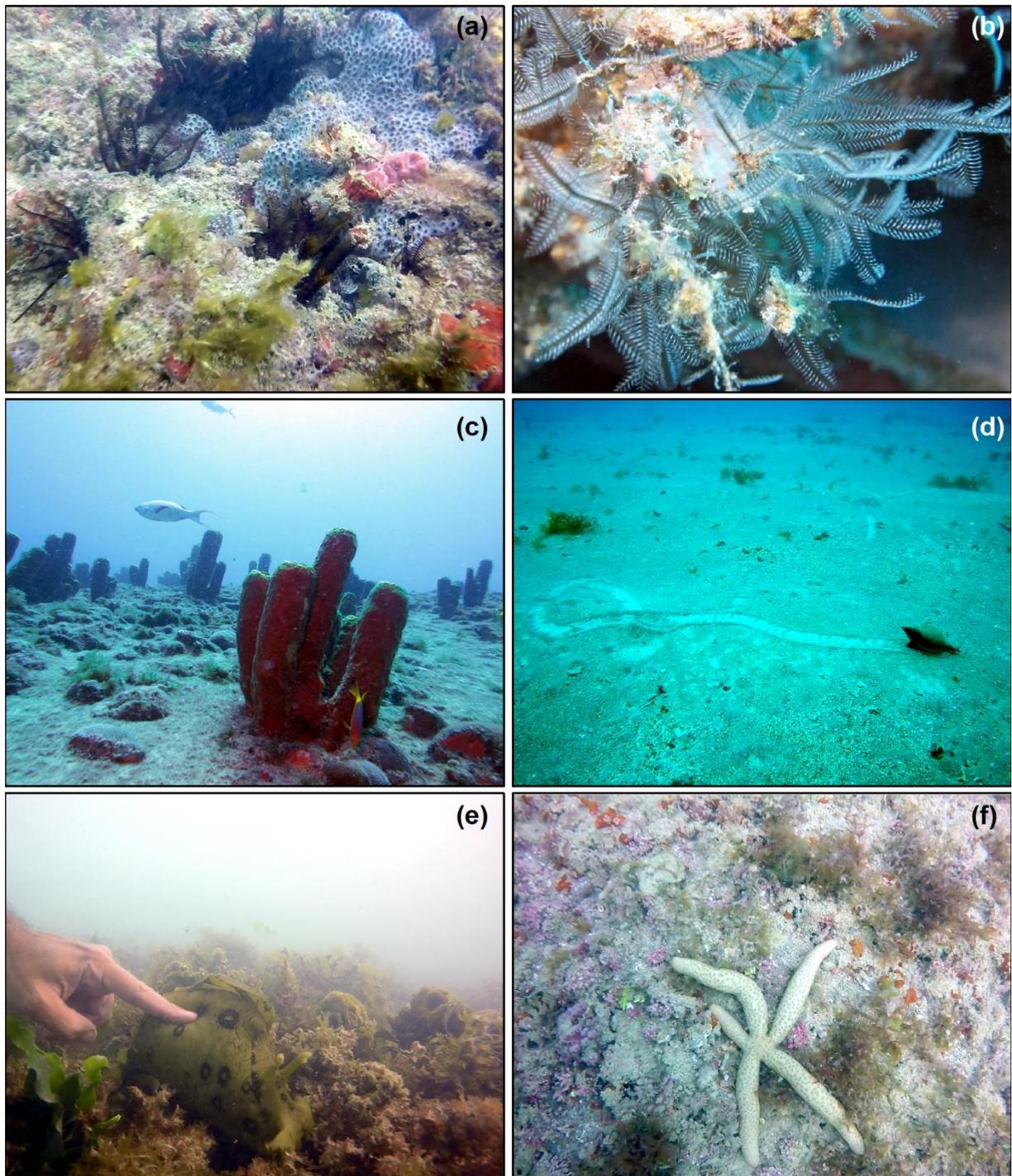


Figure 53. Faunal Bed Class. Biotic Group Diverse Colonizers: (a) Esponja e ascídia encrustantes; (b) Hydrozoários coloniais; (c) Agrupamento de esponjas do gênero *Aplysina*. **Biotic Group Diverse Soft Sediment Epifauna:** (d) e (e) Espécies da classe Gastropoda; (f) Estrela-do-Mar (filo Echinodermata).

O padrão espacial da biodiversidade, em mesoescala, esteve relacionado às variáveis do terreno, principalmente à declividade e a rugosidade, em todas as *Areas Of Interest* (AOI). Características topográficas e morfológicas foram, de modo similar, associadas a ocorrência de corais de água fria em regiões temperadas (DE MOL et al., 2002). Em geral, estruturas verticais marinhas abrigam alta biodiversidade (ROBERT et al., 2017), e o aumento da rugosidade promove o desenvolvimento de habitats estruturais complexos, resultando em altas diversidades de níveis alfa e beta (CORDES et al., 2010; KUFFNER et al., 2007; MARTÍN-GARCÍA et al., 2013). Contudo, a resposta ecológica a fragmentação do habitat e ao grau em que ele muda, é influenciado pela resiliência da comunidade e irá depender da estrutura de metacomunidades e da conectividade entre elas (THRUSH et al., 2008). Desta forma, a AOI 2, na *Bank Geoform* (Fig. 33), apresentou arranjos espaciais de alta diversidade morfológica, em escala alfa, o que confere, a estes setores da plataforma, atributos importantes para o planejamento da conservação em complementaridade aos ecossistemas de corais (MAGRIS et al., 2017).

Mudanças severas em habitats bentônicos podem estar associadas a impactos de tempestades (ABESAMIS et al., 2018). Outros fatores subjacentes, relacionados à biodiversidade, são frequentemente usados para estimar a riqueza de espécies nos ecossistemas e discutir sua distribuição espacial em ambientes marinhos. Entre os fatores estão a conectividade (BONGAERTS et al., 2017; MORAIS; SANTOS, 2018; ROCHA et al., 2018), a variabilidade e a complexidade morfológica de habitats (ARAÚJO; AMARAL, 2016; DARLING et al., 2017; SCHMAHL; HICKERSON; PRECHT, 2008) e as flutuações do nível do mar durante o Holoceno (LEÃO et al., 2016; PRATES, 2003),

Entretanto, o mapeamento de *Diverse Soft Sediment Epifauna Group* (Fig. 51) e a análise geoestatística, que indicou os *hot spots* (Fig. 49), sugerem que a distribuição espacial deste grupo está relacionada à ocorrência de *Sand Group*. Este grupo do *Substrate Component* é constituído por sedimentos terrígenos, com grão de diversos tamanhos (Fig. 44), cuja fonte, provavelmente, está relacionada à Formação Barreiras/Pós-Barreiras. De modo similar, mas associado a estrutura de outro tipo de habitat, o mapeamento de *Diverse Colonizers Group*, indicou que a sua distribuição geográfica na plataforma está correlacionada ao *Rock Substrate Subclass* (Fig. 36). Na *Coastal Area*, o *Overhang (Cliff)* das falésias da Formação Barreiras/Pós-Barreiras, é a fonte de *Rock Substrate* para *Colonizers Group*, enquanto na *Offshore Area*, os afloramentos de rocha calcária é que constituem habitats adequados para *Colonizers Group*.

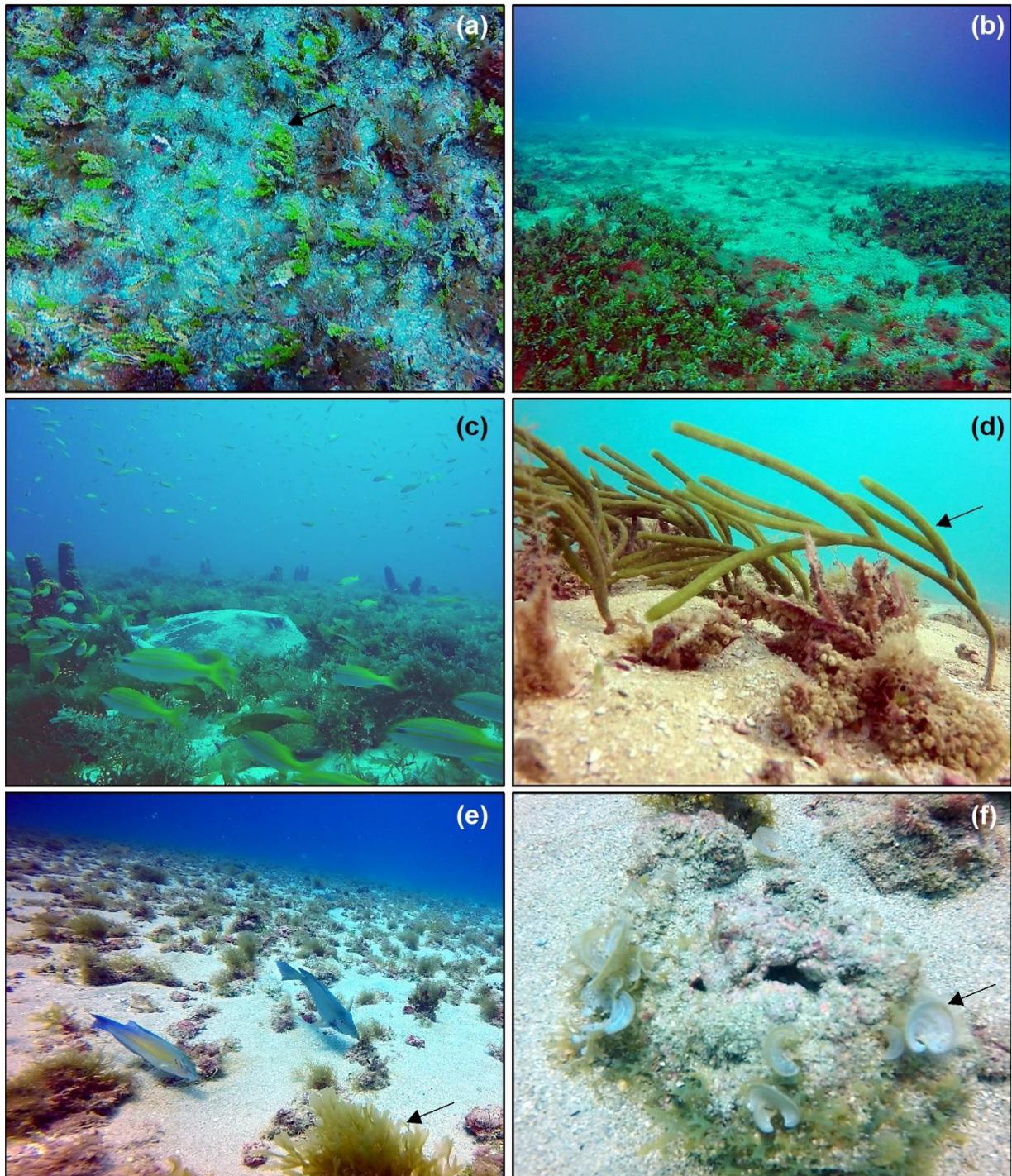


Figura 54. Aquatic Vegetation Bed Class. Calcareous Algal Bed Group: (a) *Halimeda cuneata* (indicada pela seta). (b) A imagem mostra um ecótono entre os dois grupos desta classe. **Leathery/Leafy Algal Bed Group:** (c) A imagem mostra uma paisagem típica deste grupo, que pode apresentar elevada biomassa. (d) *Codium decorticatum* fixado em *rhodolith* substrate. (e) Área dominada por espécimes do gênero *Dictyota* (indicada pela seta), que estão fixadas em *Rhodolith Hash Group*. *Acanthurus* sp. (a direita) é herbívoro, enquanto *Halichoeres* sp. é carnívoro. (f) *Padina gymnospora*, de cor parda clara, talo foliáceo arredondado com aspecto de leque flexível, fixada em rodolito.

No *Cluster Low*, indicado pela estatística Anselin Local Moran I (Fig. 50), a monodominância de *Halimeda cuneata*, parece contraditória à expectativa comum de alta biodiversidade em ambientes tropicais (TITLYANOV et al., 2017). Em ecossistemas terrestres, a fragmentação de habitats pode ter efeitos positivos e aumentar a diversidade beta (FAHRIG, 2017), com diferentes membros da comunidade explorando diferentes tipos de recursos em uma paisagem heterogênea (EWERS; DIDHAM, 2006). A ocorrência de monodominância, em florestas tropicais úmidas (PEH; LEWIS; LLOYD, 2011), considera um cenário de auto facilitação, entre o desenvolvimento populacional e a qualidade de seu habitat. O *feedback* é positivo, em áreas que experimentaram pouca ou nenhuma perturbação exógena, durante longos períodos de tempo (HART; HART; MURPHY, 1989), pois a perturbação desempenha um papel crítico na flutuação dinâmica da disponibilidade de habitat e diversidade biótica (TEMPERA et al., 2012). Desta forma, assumindo que há uma coesiva estrutura conceitual entre os efeitos da fragmentação de habitat em ambientes terrestres e marinhos, uma hipótese para explicar a associação entre o *Cluster Low* e o padrão de monodominância de *Halimeda*, é que este setor da plataforma esteve submetido a um regime menos intenso de perturbação e a comunidade biótica respondeu positivamente ao cenário de auto facilitação.

A distribuição de *Leathery/Leafy Algal Beds Group*, na área de estudo, foi concordante com padrões observados no Mar do Caribe (GARCIA-SAIS, 2010), onde o habitat foi caracterizado por *Rhodolith Substrate* e o relevo variou de plano a suave-ondulado. A distribuição de *Algal Beds*, na plataforma continental da Paraíba foi limitada às zonas mais rasas (e.g. *Coastal Area*, *Nearshore Area*), e raramente sua abundância foi considerada representativa além de 32 m de profundidade. No complexo geohabitats da *Coastal Area*, constituído pelas geoformas *Pavement Area*, *Tidal Inlet* e *Linear Coral Reef*, *Algal Beds Group* ocorreu, ou associada a *Rhodolith Substrate*, ou como importante colonizador de *Linear Coral Reef*. Na *Nearshore Area*, sua frequência e biomassa foram consideradas mais representativas em áreas da geoforma *Bank*. Neste caso, *Algal Beds* além de ocorrer fixadas em *Rhodolith Substrate*, mostrou-se um importante colonizador do *Rock Substrate* constituído por rochas calcárias.

5. CONCLUSÕES

A geobiodiversidade, de um trecho da plataforma continental do NE do Brasil, foi mapeada, analisada em múltiplas escalas espaciais e classificada hierarquicamente em um sistema internacional padronizado. As análises espaciais revelaram que os sedimentos da Formação Barreiras/Pós-Barreiras apresentaram tendência direcional de distribuição geográfica e desempenharam um papel central para a estrutura dos habitats e para a distribuição da biodiversidade na plataforma continental. A reativação de estruturas tectônicas Neoproterozóicas do embasamento, na região da plataforma continental, determinou a gênese, a localização e a evolução de *Geoform Components* e de *Substrate Components*, principalmente na *Offshore Area*. Estruturas morfológicas neotectônicas foram, pela primeira vez, descritas em microescala na plataforma da Bacia da Paraíba, e revelaram que a *Geoform Shelf Valley* providencia habitats adequados para abrigar alta biodiversidade, na zona mesofótica da plataforma

É possível que Hēphaistos esteja mantendo suas forjas acesas na região da Bacia da Paraíba, pois a ação de falhas e fraturas continua a afetar a morfologia e a evolução de *Geoform* e *Substrate Components*. Estes processos neotectônicos podem causar novas mudanças geomorfológicas na paisagem marinha durante o Antropoceno, pois são controlados pelo campo de tensões transcorrente regional que se instalou durante o Cenozoico, mas que ainda permanece ativo.

Em concordância com a Visão de Humboldt da Natureza, esta pesquisa confirmou que a geobiodiversidade da área de estudo, resulta de complexas interações entre a geologia regional, a geomorfologia, os processos sedimentares e a história evolutiva dos grupos bióticos.

Os métodos apresentados e os resultados alcançados, contribuem para futuros estudos interessados em investigações interdisciplinares da geobiodiversidade marinha na região tropical.

REFERÊNCIAS

- ABESAMIS, R. A. et al. Benthic habitat and fish assemblage structure from shallow to mesophotic depths in a storm-impacted marine protected area. **Coral Reefs**, v. 37, n. 1, p. 81–97, 2018.
- AKSOY, E.; INCEÖZ, M.; KOÇYIĞIT, A. Lake Hazar basin: A negative flower structure on the East Anatolian Fault System (EAFS), SE Turkey. **Turkish Journal of Earth Sciences**, v. 16, n. 3, p. 319–338, 2007.
- ALBERTÃO, G. A. et al. The Cretaceous-Tertiary boundary in southern low-latitude regions: preliminary study in Pernambuco, northeastern Brazil. **Terra Nova**, v. 6, p. 366–375, 1994.
- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian structural provinces: An introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1–2, p. 1–29, 1981.
- ALMEIDA, N. M.; VITAL, H.; GOMES, M. P. Morphology of submarine canyons along the continental margin of the Potiguar Basin, NE Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 68, p. 307–324, 2015.
- ÁLVARES-DA-SILVA, O. **Bathymetric survey on the tropical South Atlantic continental shelf**. Disponível em: <<https://www.seanoe.org/data/00504/61553/>>.
- ALVES, F. C. et al. Fator de assimetria e deformações neotectônicas na Bacia Paraíba, Nordeste do Brasil. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 6, p. 128–134, 2014.
- ALVES, F. C.; ROSSETTI, D. F. Late Holocene coastal dynamics and relative sea-level changes in the littoral of Paraíba, northeastern Brazil. **Progress in Physical Geography**, v. 41, n. 4, p. 375–392, 2017.
- ANDRADES-FILHO, C. DE O. et al. Mapping Neogene and Quaternary sedimentary deposits in northeastern Brazil by integrating geophysics, remote sensing and geological field data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 316–327, 2014.
- ANDRADES FILHO, C. DE O.; ROSSETTI, D. DE F. Intensidade da atividade tectônica na porção emersa da Bacia Paraíba e embasamento cristalino adjacente, Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 2, p. 113–130, 2015.
- ANDRADES FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F. Morphostructural characterization on the central portion of the Paraíba Basin (PB). **Geociências**, v. 31, n. 1, p. 13–29, 2012.

ANGULO, R. J.; LESSA, G. C.; SOUZA, M. C. DE. A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. **Quaternary Science Reviews**, v. 25, n. 5–6, p. 486–506, 2006.

ARAÚJO, C. E. G.; WEINBERG, R. F.; CORDANI, U. G. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): A two-stage Neoproterozoic collision process. **Terra Nova**, v. 26, n. 2, p. 157–168, 2014.

ARAÚJO, P. V. N.; AMARAL, R. F. Mapping of coral reefs in the continental shelf of Brazilian Northeast through remote sensing *. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 16, n. 1, p. 5–20, 2016.

ARAÚJO, V. D. et al. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. **Geol. USP Sér. Cient.**, v. 6, n. 2, p. 43–49, 2006.

BALSAMO, F. et al. Structural control on the formation of iron-oxide concretions and Liesegang bands in faulted, poorly lithified Cenozoic sandstones of the Paraíba basin, Brazil. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 125, n. 5–6, p. 913–931, 2013.

BARBOSA, J. A.; LIMA FILHO, M. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: Observações em dados de poços. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 14, n. 2, p. 287–306, 2006.

BARRETO, A. M. F. et al. Late Pleistocene marine terrace deposits in northeastern Brazil: Sea-level change and tectonic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 179, n. 1–2, p. 57–69, 2002.

BARRETO, E. P. et al. Análise sedimentológica da plataforma continental interna rasa da praia de São José da Coroa Grande - Litoral Sul de Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 246–266, 2017.

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. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 63, p. 125–136, 2015.

BASTOS, A. C. et al. Origin and sedimentary evolution of sinkholes (buracas) in the Abrolhos continental shelf, Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 462, p. 101–111, 2016.

BAVESTRELLO, G. et al. Differences in composition of shallow-water marine benthic communities associated with two ophiolitic rock substrata. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 200, p. 71–80, 2018.

BDEP - Exploration and Production Data Bank. Disponível em: <<http://rodadas.anp.gov.br/en/concession-of-exploratory-blocks/brazil-round-3/bdep-round-3>>.

BECK, H. E. et al. Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–12, 2018.

BEZERRA, F. H. et al. Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. **Marine and Petroleum Geology**, v. 111, n. December 2018, p. 88–104, 2020.

BEZERRA, F. H. R. et al. Coseismic reactivation of the Samambaia fault, Brazil. **Tectonophysics**, v. 430, p. 27–39, 2007.

BEZERRA, F. H. R. et al. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin - The Cariatá trough, northeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 97, n. 3–4, p. 555–582, 2008.

BEZERRA, F. H. R. et al. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America - Integration of seismological and paleoseismological data. **Tectonophysics**, v. 510, n. 3–4, p. 269–290, 2011.

BEZERRA, F. H. R. et al. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 78–90, 2014.

BEZERRA, F. H. R.; VITA-FINZI, C. How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brazil. **Geology**, v. 28, n. 7, p. 591, 2000.

BISHOP, M. J. et al. Effects of ocean sprawl on ecological connectivity: impacts and solutions. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 492, p. 7–30, 2017.

BISHOP, M. P. et al. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 5–26, 2012.

BLAKELY, R. J. **Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications.** Cambridge:

Cambridge University Press, 1995.

BLUM, M. et al. Paleovalley systems: Insights from Quaternary analogs and experiments. **Earth-Science Reviews**, v. 116, n. 1, p. 128–169, 2013.

BONGAERTS, P. et al. Deep reefs are not universal refuges: Reseeding potential varies among coral species. **Science Advances**, v. 3, n. 2, p. e1602373, 2017.

BOUCHET, P. J. et al. Topographic determinants of mobile vertebrate predator hotspots : current knowledge and future directions. **Biological Reviews**, v. 90, n. June, p. 699–728, 2015.

BOZEC, Y. M.; ALVAREZ-FILIP, L.; MUMBY, P. J. The dynamics of architectural complexity on coral reefs under climate change. **Global Change Biology**, v. 21, n. 1, p. 223–235, 2015.

BRITO NEVES, B. B. et al. O sistema tafrogênico Terciário do saliente oriental nordestino na Paraíba: um legado Proterozóico. **Rev. Brasil. Geociên.**, v. 34, p. 127–134, 2004.

BROOKE, B. P. et al. Palaeoshorelines on the Australian continental shelf: Morphology, sea-level relationship and applications to environmental management and archaeology. **Continental Shelf Research**, v. 134, n. September 2016, p. 26–38, 2017.

BROTHERS, D. S. et al. Geomorphic characterization of the U.S. Atlantic continental margin. **Marine Geology**, v. 338, p. 46–63, 2013.

BROWN, C. J. et al. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 92, n. 3, p. 502–520, 2011.

BUARQUE, B. V. et al. Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 70, p. 251–267, 2016.

BUTLER, C. et al. **Seamap Australia [Version 1.0] the development of a national benthic marine classification scheme for the Australian continental shelf**. Hobart, Tasmania: [s.n.]. Disponível em: <http://seamapaustralia.org/wp-content/uploads/2018/04/Seamap_Australia_Report_18_04_18.pdf>.

BUTMAN, B. et al. **Topography , shaded relief , and backscatter intensity of the Hudson Shelf Valley , offshore of New York**. Woods Hole, MA: [s.n.].

ÇAGATAY, N. M. et al. **Submarine canyons of the Sea of Marmara**. (F. Briand, Ed.) Submarine canyon dynamics in the Mediterranean and tributary seas - an integrated geological, oceanographic and biological perspective. **Anais...Monaco: CIESM**, 2015

CAIXETA, J. M. et al. O desenvolvimento da margem rifteada vulcânica albiã no Nordeste brasileiro e seu perfil para a geração de petróleo. **B. Geoci. Petrobras**, v. 23, n. 1/2, p. 18p., 2015.

CAYCEDO GARCIA, H. R.; CATUNEANU, O. Stratigraphic architecture of incised valleys and unincised channel systems in the Carbonera Formation (C6-C1 members: Upper Oligocene - Lower Miocene), Llanos basin, Colombia. **Journal of Geodynamics**, n. 113, p. 0–1, 2018.

CERAMICOLA, S. et al. Submarine canyon dynamics in the Mediterranean and tributary seas - An integrated geological, oceanographic and biological perspective. **CIESM Workshop Monographs n° 47**, n. March, p. 1–16, 2015a.

CERAMICOLA, S. et al. **Submarine canyon dynamics - Executive Summary**. (F. Briand, Ed.) Submarine canyon dynamics in the Mediterranean and tributary seas - An integrated geological, oceanographic and biological perspective. **Anais...Monaco: CIESM**, 2015b

CERI JAMES, J. W. et al. Open Shelf Valley System, Northern Palaeovalley, English Channel, UK. In: HARRIS, P. T.; BAKER, E. K. (Eds.). **Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat**. Elsevier ed. [s.l.] Elsevier Inc., 2012. p. 587–596.

CHANG, H. K. et al. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. **Tectonophysics**, v. 213, n. 1–2, p. 97–138, 1992.

CHIOCCI, F. L.; CHIVAS, A. R. Chapter 1 An overview of the continental shelves of the world. **Geological Society, London, Memoirs**, v. 41, n. 1, p. 1–5, 2014.

CLARK, P. U. et al. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. **Nature**, v. 415, p. 863–869, 2002.

COLES, S. L.; RIEGL, B. M. Thermal tolerances of reef corals in the Gulf: A review of the potential for increasing coral survival and adaptation to climate change through assisted translocation. **Marine Pollution Bulletin**, v. 72, n. 2, p. 323–332, 2013.

COMITTEE, F. G. D. **Coastal and marine ecological classification standard** National Oceanic and Atmospheric Administration. Reston, VA, USA: [s.n.]. Disponível em:

<http://webqa.csc.noaa.gov/benthic/cmecs/Version_III_Official_Review_Draft.doc>.

CORDES, E. E. et al. The influence of geological, geochemical, and biogenic habitat heterogeneity on seep biodiversity. **Marine Ecology**, v. 31, n. 1, p. 51–65, 2010.

CORREIA FILHO, J. O. et al. Proposta de formalização da Formação Tambaba, Eoceno da Bacia Paraíba, NE do Brasil. **Estudos Geológicos**, v. 25, n. 2, p. 61–81, 2015.

DALRYMPLE, R. W.; BOYD, R.; ZAITLIN, B. A. **History of research, types and internal organization of incised-valley systems: Introduction to the volume.** (R. W. Dalrymple, R. Boyd, B. A. Zaitlin, Eds.) Incised-valley systems: Origin and sedimentary sequences. **Anais...SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication 51**, 1994

DARLING, E. S. et al. Relationships between structural complexity, coral traits, and reef fish assemblages. **Coral Reefs**, v. 36, n. 2, p. 561–575, 2017.

DAVIES, S. W.; MATZ, M. V.; VIZE, P. D. Ecological Complexity of Coral Recruitment Processes: Effects of Invertebrate Herbivores on Coral Recruitment and Growth Depends Upon Substratum Properties and Coral Species. **PLoS ONE**, v. 8, n. 9, 2013.

DE CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H. R.; CASTELO BRANCO, R. M. G. Geophysical evidence of crustal-heterogeneity control of fault growth in the Neocomian Iguatu basin, NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 26, n. 3, p. 271–285, 2008.

DE CLIPPELE, L. H. et al. Using novel acoustic and visual mapping tools to predict the small-scale spatial distribution of live biogenic reef framework in cold-water coral habitats. **Coral Reefs**, v. 36, n. 1, p. 255–268, 2017.

DE LEO, F. C. DE et al. Spatial scale-dependent habitat heterogeneity influences submarine canyon macrofaunal abundance and diversity off the Main and Northwest Hawaiian Islands. **Deep-Sea Research Part II**, n. 1, p. 1–24, 2013.

DE MOL, B. et al. Large deep-water coral banks in the Porcupine Basin, southwest of Ireland. **Marine Geology**, v. 188, n. 1–2, p. 193–231, 2002.

DENNY, J. F. et al. **USGS Advances in Integrated, High-Resolution Sea-Floor Mapping: Inner Continental Shelf to Estuaries Coastal Sediments '07.** Woods Hole, MA: [s.n.].

DO NASCIMENTO SILVA, L. L.; GOMES, M. P.; VITAL, H. The Açú Reef morphology, distribution, and inter reef sedimentation on the outer shelf of the NE Brazil equatorial

margin. **Continental Shelf Research**, v. 160, n. April 2017, p. 10–22, 2018.

DOLAN, M. F. J. **Calculation of slope angle from bathymetry data using GIS-effects of computation algorithms, data resolution and analysis scale**. Trondheim (Norway): [s.n.].

DOLAN, M. F. J.; LUCIEER, V. L. Variation and Uncertainty in Bathymetric Slope Calculations Using Geographic Information Systems. **Marine Geodesy**, v. 37, n. 2, p. 187–219, 2014.

DOLBY, G. A. et al. Sea-level driven glacial-age refugia and post-glacial mixing on subtropical coasts, a palaeohabitat and genetic study. **Proceedings of the Royal Society Biological Sciences**, v. 283, p. 20161571, 2016.

DOMINGUEZ, J. M. L. et al. The narrow, shallow, low-accommodation shelf of central Brazil: Sedimentology, evolution, and human uses. **Geomorphology**, v. 203, p. 46–59, 2013.

DROXLER, A. W.; JORRY, S. J. Deglacial Origin of Barrier Reefs Along Low-Latitude Mixed Siliciclastic and Carbonate Continental Shelf Edges. **Annual Review of Marine Science**, v. 5, n. 1, p. 120928130849008, 2011.

DU PREEZ, C. A new arc–chord ratio (ACR) rugosity index for quantifying three-dimensional landscape structural complexity. **Landscape Ecology**, v. 30, n. 1, p. 181–192, 2015.

DUNCAN, D. S. et al. Mixed carbonate-siliciclastic infilling of a Neogene carbonate shelf-valley system: Tampa Bay, West-Central Florida. **Marine Geology**, v. 200, n. 1–4, p. 125–156, 2003.

DURAFOUR, M. et al. In-situ study of the influence of size and shape of sediments on bedload transport. **Coastal Dynamics**, v. 1, p. 541–552, 2013.

DURAFOUR, M. et al. Bedload transport for heterogeneous sediments. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 15, n. 4, p. 731–751, 2015.

ELFES, C. T. et al. A regional-scale ocean health index for Brazil. **PLoS ONE**, v. 9, n. 4, 2014.

ELVENES, S. et al. An evaluation of compiled single-beam bathymetry data as a basis for regional sediment and biotope mapping. **ICES Journal of Marine Science**, v. 71, n. 4, p. 867–881, 2014.

ESRI-ARCGIS. **An overview of the Interpolation toolset—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/geostatistical-analyst/an-overview-of-the-interpolation-toolset.htm>>.

ESRI/ARCGIS GUIDE. **How Local Outlier Analysis works—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/space-time-pattern-mining-toolbox/learnmorelocaloutlier.htm>>.

ESRI ARCGIS. **Spatial Autocorrelation (Global Moran's I)—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-statistics-toolbox/spatial-autocorrelation.htm>>. Acesso em: 27 dez. 2019.

ESRI ARCGIS. **Multi-Distance Spatial Cluster Analysis (Ripley's K Function)—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-statistics-toolbox/multi-distance-spatial-cluster-analysis.htm>>. Acesso em: 27 dez. 2019a.

ESRI ARCGIS. **How High/Low Clustering (Getis-Ord General G) works—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.5/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-high-low-clustering-getis-ord-general-g-spat.htm>>. Acesso em: 27 dez. 2019b.

ESRI ARCGIS. **How Cluster and Outlier Analysis (Anselin Local Moran's I) works—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-cluster-and-outlier-analysis-anselin-local-m.htm>>. Acesso em: 27 dez. 2019c.

ESRI ARCGIS. **Hot Spot Analysis (Getis-Ord Gi*)—Help | ArcGIS Desktop.** Disponível em: <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-statistics-toolbox/hot-spot-analysis.htm>>. Acesso em: 27 dez. 2019d.

EWERS, R. M.; DIDHAM, R. K. Confounding factors in the detection of species responses to habitat fragmentation. **Biol.Rev.**, v. 81, p. 117–142, 2006.

FAHRIG, L. Ecological Responses to Habitat Fragmentation Per Se. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 48, n. 1, p. 1–23, 2017.

FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE. **Coastal and Marine Ecological Classification Standard**National Oceanic and Atmospheric Administration. Reston, VA, USA: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.fgdc.gov/standards/projects/cmecs->

folder/CMECS_Version_06-2012_oc>.

FEITOZA, B. M.; ROSA, R. S.; ROCHA, L. A. Ecology and Zoogeography of Deep- Reef Fishes in Northeastern Brazil. **Bulletin of Marine Science**, v. 76, n. 3, p. 725–742, 2005.

FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. Monitoramento dos Recifes de Coral do Brasil: situação e perspectivas. **Monitoramento dos recifes de coral do Brasil**, p. 250, 2006.

FIGUEIREDO JR., A. G. et al. Continental shelf geomorphology and sedimentology. In: KOWSMANN, R. O. (Ed.). . **Geology and Geomorphology**. 1. ed. Rio: Elsevier Ltd., 2015. p. 13–32.

FIGUEIREDO, M. A. D. O. et al. Benthic marine algae of the coral reefs of Brazil: a literature review. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 02, p. 258–269, 2008.

FOCK, A.; HARRIS, R.; SLADE, M. Oxygen exposure and toxicity in recreational technical divers. **Diving and Hyperbaric Medicine**, 2013.

FOLGUERA, A. et al. A review about the mechanisms associated with active deformation, regional uplift and subsidence in southern South America. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 64, p. 511–529, 2015.

FOSSEN, H.; ROTEVATN, A. Fault linkage and relay structures in extensional settings-A review. **Earth-Science Reviews**, v. 154, p. 14–28, 2016.

FREITAS, R. et al. Validation of soft bottom benthic habitats identified by single-beam acoustics. **Marine Pollution Bulletin**, v. 53, n. 1, p. 72–79, 2006.

FRIEDMAN, A. et al. Multi-Scale Measures of Rugosity, Slope and Aspect from Benthic Stereo Image Reconstructions. **PLoS ONE**, v. 7, n. 12, 2012.

FURRIER, M. **Caracterização geomorfológica e do meio físico da folha João Pessoa - 1:100.000**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 18 abr. 2007.

GAFEIRA, J.; DOLAN, M.; MONTEYS, X. Geomorphometric Characterization of Pockmarks by Using a GIS-Based Semi-Automated Toolbox. **Geosciences**, v. 8, n. 5, p. 154, 2018.

GAO, S.; COLLINS, M. B. Holocene sedimentary systems on continental shelves. **Marine Geology**, v. 352, p. 268–294, 2014.

GARCIA-SAIS, J. R. Reef habitats and associated sessile-benthic and fish assemblages across a euphotic-mesophotic depth gradient in Isla Desecheo, Puerto Rico. **Coral Reefs**, v. 29, n. 2, p. 277–288, 2010.

GEBCO COMPILATION GROUP. **GEBCO 2019 Gridded Bathymetry Data Download**. Disponível em: <<https://download.gebco.net/>>. Acesso em: 11 dez. 2019.

GEOLOGICAL SURVEY OF BRAZIL. **GeoSGB Data, Information and Products of the Geological Survey of Brazil**. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>.

GISCHLER, E. Quaternary reef response to sea-level and environmental change in the western Atlantic. **Sedimentology**, 2015.

GOES, E. R.; BROWN, C. J.; ARAÚJO, T. C. Geomorphological Classification of the Benthic Structures on a Tropical Continental Shelf. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, n. February, p. 1–11, 2019.

GOMES, M. P. et al. The interplay between structural inheritance and morphology in the Equatorial Continental Shelf of Brazil. **Marine Geology**, v. 355, p. 150–161, 2014.

GOMES, M. P. et al. The investigation of a mixed carbonate-siliciclastic shelf, NE Brazil: Side-scan sonar imagery, underwater photography, and surface-sediment data. **Italian Journal of Geosciences**, v. 134, n. 1, p. 9–22, 2015.

GOMES, M. P. et al. Bedrock control on the Assu Incised Valley morphology and sedimentation in the Brazilian Equatorial Shelf. **International Journal of Sediment Research**, v. 31, n. 2, p. 181–193, 2016.

GONG, J. Clarifying the Standard Deviation Ellipse. **Geographical Analysis**, v. 32, n. 2, p. 155, 2002.

HARRIS, P. T. et al. Late quaternary history of sedimentation of the Mac.Robertson Shelf, East Antarctica: Problems with ¹⁴C-dating of marine sediment cores. **Papers and Proceedings of the Royal Society of Tasmania**, v. 130, n. 2, p. 47–53, 1996.

HARRIS, P. T. et al. Tidally incised valleys on tropical carbonate shelves: An example from the northern Great Barrier Reef, Australia. **Marine Geology**, v. 220, n. 1–4, p. 181–204, 2005.

HARRIS, P. T. Surrogacy. In: HARRIS, P. T.; BAKER, E. K. (Eds.). . **Seafloor**

Geomorphology as Benthic Habitat. London: Elsevier, 2012. p. 93–108.

HARRIS, P. T. et al. Geomorphology of the oceans. **Marine Geology**, v. 352, p. 4–24, 2014.

HARRIS, P. T.; BAKER, E. K. **Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat.** First ed. London: Elsevier Inc., 2012.

HARRIS, P. T.; WHITEWAY, T. Global distribution of large submarine canyons: Geomorphic differences between active and passive continental margins. **Marine Geology**, v. 285, n. 1–4, p. 69–86, 2011.

HART, T. B.; HART, J. A.; MURPHY, P. G. Monodominant and Species-Rich Forests of the Humid Tropics: Causes for Their Co-Occurrence. **The American Naturalist**, v. 133, n. 5, p. 613–633, 1989.

HINE, A. C. et al. Coral Reefs, Present and Past, on the West Florida Shelf and Platform Margin. In: RIEGL, B. M.; DODGE, R. E. (Eds.). . **Coral Reefs of the USA.** [s.l.] Springer Science + Business Media, 2008. p. 127–173.

HUANG, L.; LIU, C. Y. Three Types of Flower Structures in a Divergent-Wrench Fault Zone. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 122, n. 12, p. 10,478–10,497, 2017.

HUANG, Z. et al. Classification of submarine canyons of the Australian continental margin. **Marine Geology**, v. 357, p. 362–383, 2014.

HUMANN, P.; DELOACH, N. **Reef fish identification Florida Caribbean Bahamas.** Fourth ed. Jacksonville, FL: New World Publications, Inc., 2014.

JABLONSKI, J. Getting Clear on the Basics: The Fundamentals of Technical Diving. **Global Underwater Explorers, Florida**, 2001.

JAWAK, S. D.; VADLAMANI, S. S.; LUIS, A. J. A Synoptic Review on Deriving Bathymetry Information Using Remote Sensing Technologies: Models, Methods and Comparisons. **Advances in Remote Sensing**, v. 04, n. 02, p. 147–162, 2015.

JEROSCH, K. et al. A geomorphological seabed classification for the Weddell Sea, Antarctica. **Marine Geophysical Research**, v. 37, n. 2, p. 127–141, 2016.

JOHNSON, A. C.; SARRIS, A.; AMZA-PREIN, M. E. **A new interactive FFT-Based grid suturing technique applied to ground geophysical surveys in Greece.** Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition. **Anais...Istanbul**: 1991

JONES, A. G. et al. Interplay between abiotic factors and species assemblages mediated by the ecosystem engineer *Sabellaria alveolata* (Annelida: Polychaeta). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 200, p. 1–18, 2018.

JORRY, S. et al. Siliciclastic influx and burial of the Cenozoic carbonate system in the Gulf of Papua. **Marine and Petroleum Geology**, v. 27, n. 2, p. 533–554, 2010.

JUNJIE, R. K. et al. Impacts of Sediments on Coral Energetics : Partitioning the Effects of Turbidity and Settling Particles. **PLoS ONE**, v. 9, n. 9, 2014.

KINGON, K. Applying the Coastal and Marine Ecological Classification Standard (CMECS) to Nearshore Habitats in the Northeastern Gulf of Mexico. **Geosciences**, v. 8, n. 1, p. 22, 2018.

KIRCHNER, J. W. et al. The variability of critical shear stress, friction angle, and grain protrusion in water-worked sediments. **Sedimentology**, v. 37, p. 647–672, 1990.

KOMAR, P. D.; LI, Z. Pivoting analyses of the selective entrainment of sediments by shape and size with application to gravel threshold. **Sedimentology**, v. 33, p. 425–436, 1986.

KUFFNER, I. B. et al. Relationships between reef fish communities and remotely sensed rugosity measurements in Biscayne National Park, Florida, USA. **Environmental Biology of Fishes**, v. 78, n. 1, p. 71–82, 2007.

LAURANCE, W. F.; DIDHAM, R. K.; POWER, M. E. Ecological boundaries: A search for synthesis. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 16, n. 2, p. 70–71, 2001.

LE ROUX, J. P.; ROJAS, E. M. Sediment transport patterns determined from grain size parameters: Overview and state of the art. **Sedimentary Geology**, v. 202, n. 3, p. 473–488, 2007.

LEÃO, Z. M. A. N. et al. Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, p. 97–116, 2016.

LEAO, Z. M. A. N.; DOMINGUEZ, J. M. L. Tropical coast of Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 41, n. 1–6, p. 112–122, 2000.

LECOURS, V. et al. Spatial scale and geographic context in benthic habitat mapping: Review and future directions. **Marine Ecology Progress Series**, v. 535, p. 259–284, 2015.

LECOURS, V. et al. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the

seafloor. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 8, p. 3207–3244, 2016a.

LECOURS, V. et al. Comparing selections of environmental variables for ecological studies: A focus on terrain attributes. **PLoS ONE**, v. 11, n. 12, p. 1–18, 2016b.

LECOURS, V. et al. Towards a framework for terrain attribute selection in environmental studies. **Environmental Modelling and Software**, v. 89, p. 19–30, 2017.

LECOURS, V. **Terrain Attribute Selection for Spatial Ecology (TASSE), v.1.1.**, 2017.

Disponível

em:

<https://www.researchgate.net/publication/312530808_TASSE_Terrain_Attribute_Selection_for_Spatial_Ecology_Toolbox_for_ArcGis>

LESSA, R.; NÓBREGA, M. F. DE. Programa REVIZEE / SCORE-NE Guia de Identificação de Peixes Marinhos da Região Nordeste. **Revizee**, 2000.

LESSER, M. P.; SLATTERY, M.; LEICHTER, J. J. **Ecology of mesophotic coral reefs** *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009.

LESSER, M. P.; SLATTERY, M.; MOBLEY, C. D. Biodiversity and Functional Ecology of Mesophotic Coral Reefs. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 49, n. 1, p. 49–71, 2018.

LIMA, E. N. DE M. Tectônica pós-rifte na Bacia Potiguar. p. 165, 2011.

LIMA, J. C. F. et al. Neogene–Quaternary fault reactivation influences coastal basin sedimentation and landform in the continental margin of NE Brazil. **Quaternary International**, v. 438, p. 92–107, 2016.

LIMA, V. F.; LAVOR, L. F.; FURRIER, M. Estudos Neotectônicos Em Margem Continental Do Tipo Passiva. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 21, p. 206, 2017.

LINKLATER, M. et al. High coral cover on a mesophotic, subtropical island platform at the limits of coral reef growth. **Continental Shelf Research**, p. 38, 2016.

LOCKER, S. D. et al. Geomorphology of mesophotic coral ecosystems : current perspectives on morphology , distribution , and mapping strategies. p. 329–345, 2010.

LOYA, Y. et al. Theme section on mesophotic coral ecosystems : advances in knowledge and future perspectives. **Coral Reefs**, v. 35, n. 1, p. 1–9, 2016.

LUDT, W. B.; ROCHA, L. A. Shifting seas: The impacts of Pleistocene sea-level fluctuations

on the evolution of tropical marine taxa. **Journal of Biogeography**, v. 42, n. 1, p. 25–38, 2015.

LUND, K.; WILBUR, A. R. **Habitat Classification Feasibility Study for Coastal and Marine Environments in Massachusetts**. Boston, MA: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.mass.gov/files/documents/2016/08/xr/ma-habitat-classification-study.pdf>>.

LUNDBLAD, E. R. et al. A benthic terrain classification scheme for American Samoa. **Marine Geodesy**, v. 29, n. 2, p. 89–111, 2006.

MACDONALD, C.; BRIDGE, T. C. L.; JONES, G. P. Depth, bay position and habitat structure as determinants of coral reef fish distributions: Are deep reefs a potential refuge? **Marine Ecology Progress Series**, v. 561, p. 217–231, 2016.

MAGALHÃES, J. R. et al. Characterization of the ocean-continent transition in the Paraíba basin and natal platform region, NE Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, n. 3, p. 481–496, 2014.

MAGRIS, R. A. et al. Integrated conservation planning for coral reefs: Designing conservation zones for multiple conservation objectives in spatial prioritisation. **Global Ecology and Conservation**, v. 11, p. 53–68, 2017.

MALLET, D.; PELLETIER, D. Underwater video techniques for observing coastal marine biodiversity: A review of sixty years of publications (1952-2012). **Fisheries Research**, v. 154, p. 44–62, 2014.

MANSO, V. A. V.; CORRÊA, I. C. S.; GUERRA, N. C. Morfologia e Sedimentologia da Plataforma Continental Interna entre as Praias Porto de Galinhas e Campos - Litoral Sul de Pernambuco, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 30, n. 2, p. 17–25, 2003.

MAROTTA, G. S. A. et al. Strain rates estimated by geodetic observations in the Borborema Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 1–8, 2015.

MARQUES, F. O. et al. Testing the influence of far-field topographic forcing on subduction initiation at a passive margin. **Tectonophysics**, v. 608, p. 517–524, 2013.

MARTÍN-GARCÍA, L. et al. Use of topographic predictors for macrobenthic community mapping in the Marine Reserve of La Palma (Canary Islands, Spain). **Ecological Modelling**, v. 263, p. 19–31, 2013.

- MATOS, R. M. D. The northeast brazilian rift system. **Tectonics**, v. 11, n. 4, p. 766–791, 1992.
- MATOS, R. M. D. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: CAMERON, N. R.; BATE, R. H.; CLURE, V. S. (Eds.). . **The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic**. London: Geological Society, 1999. p. 55–73.
- MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the equatorial South Atlantic. In: MOHRIAK, W. U.; TALWANI, M. (Eds.). . **Atlantic rifts and continental margins**. [s.l.] AGU Geophysical Monograph, 115, 2000. p. 331–354.
- MAUFFREY, M. A. et al. Sea-level control on the connection between shelf-edge deltas and the Bourcart canyon head (western Mediterranean) during the last glacial/interglacial cycle. **Marine Geology**, v. 370, p. 1–19, 2015.
- MISIUK, B.; LECOURS, V.; BELL, T. A multiscale approach to mapping seabed sediments. **PLoS ONE**, v. 13, n. 2, p. 1–24, 2018.
- MITRA, S.; PAUL, D. Structural geometry and evolution of releasing and restraining bends: Insights from laser-scanned experimental models. **AAPG Bulletin**, v. 95, n. 7, p. 1147–1180, 2011.
- MIYAMOTO, M. et al. Effects of Bathymetric Grid-Cell Sizes on Habitat Suitability Analysis of Cold-water Gorgonian Corals on Seamounts. **Marine Geodesy**, v. 40, n. 4, p. 205–223, 2017.
- MORAIS, J.; MEDEIROS, A. P. M.; SANTOS, B. A. Research gaps of coral ecology in a changing world. **Marine Environmental Research**, v. 140, n. September, p. 243–250, 2018.
- MORAIS, J.; SANTOS, B. A. Limited potential of deep reefs to serve as refuges for tropical Southwestern Atlantic corals. **Ecosphere**, v. 9, n. 7, p. 2010–2013, 2018.
- MURICY, G. et al. **Catalogue of Brazilian Porifera**. [s.l.: s.n.].
- NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, v. 37, n. 3, p. 507–517, 1972.
- NASSAR, C. **Macroalgas Marinhas do Brasil - Guia de Campo das Principais Espécies**.

1^a ed. Rio de Janeiro, RJ: Technical Books Ed., 2012.

NEVES, S. P. et al. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil).

Journal of South American Earth Sciences, v. 38, p. 129–146, 2012.

NEVES, S. P. et al. Paleoproterozoic accretionary and collisional processes and the build-up of the Borborema Province (NE Brazil): Geochronological and geochemical evidence from the Central Domain. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 165–187, 2015.

NOGUEIRA, F. C. C. et al. Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: Insights from the Rio do Peixe Basin. **Tectonophysics**, v. 644, p. 92–107, 2015.

NORDFJORD, S. et al. Seismic Facies of Incised-Valley Fills, New Jersey Continental Shelf: Implications for Erosion and Preservation Processes Acting During Latest Pleistocene-Holocene Transgression. **Journal of Sedimentary Research**, v. 76, n. 12, p. 1284–1303, 2006.

NOVACZEK, E.; DEVILLERS, R.; EDINGER, E. Generating higher resolution regional seafloor maps from crowd-sourced bathymetry. **PLoS ONE**, v. 14, n. 6, 2019.

OBELCZ, J. et al. Geomorphic characterization of four shelf-sourced submarine canyons along the U.S. Mid-Atlantic continental margin. **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 104, p. 106–119, 2014.

ÖHMAN, I.; AHOKAS, T.; LAHTI, M. **The interpretation of aeromagnetic survey in Eurajoensalmi, Olkiluoto, Finland** Near Surface 2009 - 15th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. Olkiluoto, Finland: [s.n.].

PEH, K. S. H.; LEWIS, S. L.; LLOYD, J. Mechanisms of monodominance in diverse tropical tree-dominated systems. **Journal of Ecology**, v. 99, n. 4, p. 891–898, 2011.

POPPE, L. J. et al. **USGS east-coast sediment analysis: Procedures, database, and GIS data (ver. 3.0, November 2014)**. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/of/2005/1001/>>. Acesso em: 9 maio. 2018.

PORĘBSKI, S. J. Shelf-valley compound fill produced by fault subsidence and eustatic sea-level changes, Eocene La Meseta Formation, Seymour Island, Antarctica. **Geology**, v. 28, n. 2, p. 147–150, 2000.

PRAMPOLINI, M. et al. Habitat mapping of the Maltese continental shelf using acoustic textures and bathymetric analyses. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 207, p. 483–498, 2018.

PRATES, A. P. L. **Recifes de Coral e Unidades de Conservação Costeiras e Marinhas no Brasil: uma análise da representatividade e eficiência na conservação da biodiversidade**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2003.

PRZESLAWSKI, R. et al. Utility of a spatial habitat classification system as a surrogate of marine benthic community structure for the Australian margin. **ICES Journal of Marine Science**, v. 68, n. 9, p. 1954–1962, 2011.

PUGA-BERNABÉU, Á. et al. Variation in canyon morphology on the Great Barrier Reef margin, north-eastern Australia: The influence of slope and barrier reefs. **Geomorphology**, v. 191, p. 35–50, 2013.

PURKIS, S. J. Remote Sensing Tropical Coral Reefs: The View from Above. **Annual Review of Marine Science**, v. 10, n. 1, p. 149–168, 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, , 2014. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>

RAMOS, V. A.; FOLGUERA, A. Andean flat-slab subduction through time. **Geological Society Special Publication**, v. 327, p. 31–54, 2009.

RENGSTORF, A. M. et al. Towards High-Resolution Habitat Suitability Modeling of Vulnerable Marine Ecosystems in the Deep-Sea: Resolving Terrain Attribute Dependencies. **Marine Geodesy**, v. 35, n. 4, p. 343–361, 2012.

RIDING, R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories. **Earth Science Reviews**, v. 58, n. 1–2, p. 163–231, 2002.

ROBERT, K. et al. New approaches to high-resolution mapping of marine vertical structures. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–14, 2017.

ROBERTS, J. J. et al. Marine Geospatial Ecology Tools: An integrated framework for ecological geoprocessing with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and C++. **Environmental Modelling and Software**, v. 25, n. 10, p. 1197–1207, 2010.

ROBIN, C. R. et al. **A Field Guide to Atlantic Coast Fishes of North America**. First ed. New York: Houghton Mifflin Company, 1986.

ROCHA, L. A. et al. Mesophotic coral ecosystems are threatened and ecologically distinct from shallow water reefs. **Science**, v. 361, n. 6399, p. 281–284, 2018.

ROCHA, L. A.; ROSA, I. L.; ROSA, R. S. Peixes recifais da costa da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, 2009.

RODRÍGUEZ, J. G.; URIARTE, A. Laser Diffraction and Dry-Sieving Grain Size Analyses Undertaken on Fine- and Medium-Grained Sandy Marine Sediments: A Note. **Journal of Coastal Research**, v. 251, n. 251, p. 257–264, 2009.

ROEST, W. R.; VERHOEFS, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, v. 57, n. 1, p. 116–125, 1992.

ROSSETTI, D. DE F. The Role of Tectonics on the Preservation of Incised-Valley Estuaries in Areas with Low Accommodation Rates: Examples from Upper Cretaceous and Miocene Successions in Northern Brazil. In: **Incised Valleys in Time and Space**. [s.l.] SEPM (Society for Sedimentary Geology), 2011. p. 199–217.

ROSSETTI, D. F. et al. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: Evidence for paleoseismicity in a passive margin. **Sedimentary Geology**, v. 235, n. 3–4, p. 172–187, 2011a.

ROSSETTI, D. F. et al. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: Landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 300, n. 1–4, p. 191–204, 2011b.

ROSSETTI, D. F.; BEZERRA, F. H. R.; DOMINGUEZ, J. M. L. Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. **Earth-Science Reviews**, v. 123, p. 87–112, 2013.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Marine influence in the barreiras formation, State of Alagoas, northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 81, n. 4, p. 741–755, 2009.

ROUSSEAU, G.; CAPS, H.; WESFREID, J. E. Granular size segregation in underwater sand ripples. **Eur.Phys. J.**, v. 13, p. 213–219, 2004.

SANDWELL, D. T.; GILLE, S. T.; SMITH, W. H. F. **Bathymetry from space: oceanography, geophysics, and climate** *Geoscience Professional Service*. Bethesda, Maryland: [s.n.]. Disponível em: <ww.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop>.

SANDWELL, D. T.; SMITH, W. H. F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 114, n. 1, p. 1–18, 2009.

SANTOS, E. J. et al. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, n. 1, p. 61–76, 2010.

SANTOS, G. G. et al. New Genus and species of Heteroxyidae from Brazil (Axinellida: Demospongiae: Porifera), with a revised identification key for the family. **Zootaxa**, v. 4158, n. 1, p. 105–116, 2016.

SCHMAHL, G. P.; HICKERSON, E. L.; PRECHT, W. F. Biology and Ecology of Coral Reefs and Coral Communities in the Flower Garden Banks Region, Northwestern Gulf of Mexico. In: RIEGL, B.; DODGE, R. E. (Eds.). . **Coral Reef of the USA**. Coral Reef ed. Dania, Florida: Springer Science+Business Media B.V.2008, 2008. p. 221–261.

SCHWERDTNER MÁÑEZ, K. et al. The future of the oceans past: towards a global marine historical research initiative. **PloS one**, v. 9, n. 7, p. e101466, 2014.

SCOTT, L. M.; JANIKAS, M. V. Spatial Statistics in ArcGIS. In: FISCHER, M. M.; GETIS, A. (Eds.). . **Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications**. [s.l.] Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. p. 27–41.

SEDRETTE, S.; REBAÏ, N.; MASTERE, M. Evaluation of Neotectonic Signature Using Morphometric Indicators: Case Study in Nefza, North-West of Tunisia. **Journal of Geographic Information System**, v. 08, n. 03, p. 338–350, 2016.

SHERMAN, C. et al. Sediment dynamics and their potential influence on insular-slope mesophotic coral ecosystems. **Continental Shelf Research**, v. 129, p. 1–9, 2016.

SILVA, L. L. N.; GOMES, M. P.; VITAL, H. The Açu Reef morphology, distribution, and inter reef sedimentation on the outer shelf of the NE Brazil equatorial margin. **Continental Shelf Research**, v. 160, p. 10–22, 2018.

SINGH, K. **Linear Algebra**. First ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2014.

- SIWABESSY, P. J. W. et al. Modelling the distribution of hard seabed using calibrated multibeam acoustic backscatter data in a tropical, macrotidal embayment: Darwin Harbour, Australia. **Marine Geophysical Research**, v. 39, n. 1–2, p. 249–269, 2018.
- SPALDING, M. D. et al. Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas. **BioScience**, v. 57, n. 7, p. 573–583, 2007.
- STEVENS, P. O. **Dinâmica da paisagem no geossistema do Estuário do Rio Paraíba - extremo oriental das américas: estimativas de perdas de habitat e cenários de recuperação da biodiversidade**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2014.
- STORLAZZI, C. D. et al. End of the chain? Rugosity and fine-scale bathymetry from existing underwater digital imagery using structure-from-motion (SfM) technology. **Coral Reefs**, v. 35, n. 3, p. 889–894, 2016.
- STRONG, J. A. et al. A review of the influence of marine habitat classification schemes on mapping studies: Inherent assumptions, influence on end products, and suggestions for future developments. **ICES Journal of Marine Science**, v. 76, n. 1, p. 10–22, 2019.
- SUBARNO, T. et al. Modelling Complex Terrain of Reef Geomorphological Structures in Harapan-kelapa Island, Kepulauan Seribu. **Procedia Environmental Sciences**, v. 33, p. 478–486, 2016.
- SUGUIO, K. et al. Indicators of Holocene sea level changes along the coast of the states of Pernambuco and Paraíba, Brazil. **Geologia USP - Serie Científica**, v. 13, n. 4, p. 141–152, 2013.
- TCHEREPANOV, E. N. et al. Siliciclastic influx and burial of the Cenozoic carbonate system in the Gulf of Papua. **Marine and Petroleum Geology**, v. 27, n. 2, p. 533–554, 2010.
- TEMPERA, F. et al. Predictive Modeling of Dominant Macroalgae Abundance on Temperate Island Shelves (Azores, Northeast Atlantic). In: HARRIS, P. T.; BAKER, E. K. (Eds.). . **Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat**. First ed. London: Elsevier Inc., 2012. p. 169–184.
- THIELER, E. R. et al. A catastrophic meltwater flood event and the formation of the Hudson Shelf Valley. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 246, n. 1, p. 120–136, 2007.
- THIELER, E. R. et al. Geologic framework of the northern North Carolina, USA inner

- continental shelf and its influence on coastal evolution. **Marine Geology**, v. 348, p. 113–130, 2014.
- THRUSH, S. F. et al. The effects of habitat loss, fragmentation, and community homogenization on resilience in estuaries. **Ecological Applications**, v. 18, n. 1, p. 12–21, 2008.
- TITLYANOV, E. A. et al. Marine Plants of Coral Reefs. In: CHINA SCIENCE PUBLISHING & MEDIA LTD. (Ed.). . **Coral Reef Marine Plants of Hainan Island**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017. p. 5–39.
- TURNER, J. A. et al. Deep thinking: A systematic review of mesophotic coral ecosystems. **ICES Journal of Marine Science**, v. 74, n. 9, p. 2309–2320, 2017.
- TURNER, J. P. et al. Thermal history of the Rio Muni (West Africa)-NE Brazil margins during continental breakup. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 270, n. 3–4, p. 354–367, 2008.
- VAN DEN BELD, I. M. J. et al. Cold-water coral habitats in submarine canyons of the Bay of Biscay. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, n. MAY, 2017.
- VAN SOEST, R. W. M. et al. **World Porifera Database**. Disponível em: <<http://www.marinespecies.org/porifera>>.
- VEEVERS, J. J.; VAN ANDEL, T. H. Morphology and basement of the Sahul Shelf. **Marine Geology**, v. 5, p. 293–298, 1967.
- VITAL, H. et al. Characterization of the Brazilian continental shelf adjacent to Rio Grande do Norte State, Ne Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, p. 43–54, 2010.
- WALBRIDGE, S. et al. Unified Geomorphological Analysis Workflows with Benthic Terrain Modeler. **Geosciences**, v. 8, n. 3, p. 94, 2018.
- WANG, B.; SHI, W.; MIAO, Z. Confidence Analysis of Standard Deviation Ellipse and Its Extension into Higher Dimensional Euclidean Space. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, p. 1–17, 2015.
- WEISS, K. R. Can deep reefs rescue shallow ones? **Science**, v. 355, n. 6328, p. 903–903, 2017.
- WESCHENFELDER, J. et al. Paleochannels related to late quaternary sea-level changes in southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, p. 35–44, 2010.

WESCHENFELDER, J. et al. Quaternary incised valleys in southern Brazil coastal zone. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 55, p. 83–93, 2014.

WIENBERG, C. et al. Coral patch seamount (NE Atlantic) - A sedimentological and megafaunal reconnaissance based on video and hydroacoustic surveys. **Biogeosciences**, v. 10, n. 5, p. 3421–3443, 2013.

WILLIAMS, S. J. et al. **Surficial Sediment Character of the Louisiana Offshore Continental Shelf Region: a GIS Compilation**. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/2006/1195/index.htm>>.

WITMAN, J. D.; LAMB, R. W.; BYRNES, J. E. K. Towards an integration of scale and complexity in marine Ecology. **Ecological Monographs**, v. 85, n. 4, p. 475–504, 2015.

WoRMS Editorial Board. Disponível em: <<http://www.marinespecies.org>>.

WRIGHT, D. J. et al. Benthic Terrain Modeler. v. 1.0, 2005.

WRIGHT, L. D. Recent advances in understanding continental shelf sediment transport. In: LI, M. Z.; SHERWOOD, C. R.; HILL, P. R. (Eds.). . **Sediments, Morphology and Sedimentary Processes on Continental Shelves. Advances in Technologies, Research, and Applications**. Spec. Publ ed. [s.l.] International Association of Sedimentologists, 2012. v. 44p. 159–172.

WU, J. E. et al. 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, n. 8, p. 1608–1623, 2009.

ZARE, R. et al. Application of coastal and marine ecological classification standard to organize island ecosystem: the abu musa island, persian gulf case study. **Biodiversitas**, v. 18, n. 1, p. 53–159, 2017.