



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

Enatielly Rosane Goes

**Mapeamento preditivo dos habitats marinhos na plataforma continental interna
adjacente aos municípios de Paulista e Olinda (PE)**

Recife

2018

Enatielly Rosane Goes

Mapeamento preditivo dos habitats marinhos na plataforma continental interna
adjacente aos municípios de Paulista e Olinda (PE)

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Oceanografia do
Departamento de Oceanografia da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Oceanografia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tereza Cristina
Medeiros Araújo
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Vicente
Ferreira Jr.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

G598m Goes, Enatielly Rosane.

Mapeamento preditivo dos habitats marinhos na plataforma
continental interna adjacente aos municípios de Paulista e Olinda (PE) /
Enatielly Rosane Goes - 2018.
73 folhas. Il., e Tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tereza Cristina Medeiros Araújo.
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Vicente Ferreira Junior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2018.
Inclui Referências.

1. Oceanografia. 2. Habitats marinhos. 3. Mapeamento.
4. Geodiversidade. 5. Atlântico Sul Tropical. 6. Batimetria monofeixe.
I. Araújo, Tereza Cristina Medeiros (Orientadora). II. Ferreira Junior,
Antônio Vicente(Coorientador). III. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2018 - 140

Enatielly Rosane Goes

Mapeamento preditivo dos habitats marinhos na plataforma continental interna
adjacente aos municípios de Paulista e Olinda (PE)

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Oceanografia do
Departamento de Oceanografia da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito para obtenção do grau de
Mestre em Oceanografia.

Aprovado em: 19 de fevereiro de 2018

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tereza Cristina
Medeiros Araújo
Coorientador: Prof. Dr. Antônio Vicente
Ferreira Jr.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Tereza Cristina Medeiros de Araújo
(Orientadora/Presidente/Titular Interna PPGO)

Prof. Dr. Jesser Fidelis de Souza Filho
(Titular Interno/UFPE)

Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos
(Titular Externo/UFES)

*Ao meu pequeno príncipe, com minhas sinceras
desculpas pela ausência dos últimos meses.*

Agradecimentos

Primeiramente ao Universo, que conspirou e me deu forças para seguir, mesmo nos momentos mais difíceis ao longo desses dois anos.

Aos meus pais, muitíssimo obrigada por todo apoio, por todas as conversas e por todo amor. Sem vocês eu nada seria.

Ao meu filho eu agradeço todo o carinho, afeto e abraços apertados que me acalentaram e me deram força pra continuar (vocês que pararam pra ler estes agradecimentos, acreditem, 2017 não foi um ano fácil).

Ao meu companheiro, André, obrigada por aguentar as barras mais difíceis sem desistir. Sempre pensando positivo. Obrigada pelas conversas, pela atenção, pelo carinho, pela guarita, pelos almoços e jantares. Sem tu eu nem sei.

À minha orientadora Tereza, que me encorajou quando nem eu acreditava nas minhas palavras escritas e pensadas, obrigada pela força e pelas conversas! Obrigada também por acreditar em mim!

Cibele e Aline, obrigada por cuidarem de mim mesmo de longe, por toda a tranquilidade que vocês me passaram desde o começo da nossa amizade! Obrigada pelas gordices também!

Lara, tu me inspira que só! Obrigada pelas boas energias, carinho e amor!!

Raq, minha irmãzinha do Pará, muito obrigada pelas conversas e pelos momentos compartilhados!

Anne, Brenno, Marcos, obrigada pelo apoio de sempre!

Agradeço ao meu coorientador Antônio por ter sido porta para tudo isso.

Luciana, Anderson e Laís obrigada por terem me ensinado tanto!

À CAPES, obrigada pela concessão da bolsa de mestrado acadêmico.

Eu que sempre tive tantos sonhos dormindo, nunca tinha sonhado acordada com um mestrado. Muito obrigada a todos que fizeram parte disso.

“(…) Dia de luz
Festa do azul celestial
Casa Caiada
Água Salgada
Imaginando a vida toda submarina
Deitada na estampa colorida da toalha
E Todas as cores secando ao sol
Todos os oceanos já estão condenados aos ataques
Impulsionados por um desequilíbrio feroz
Quem sabe ainda sobre alguma chance
A tarde
O vento
E o mar.”

(Bairro Novo/Casa Caiada - Banda Eddie)

Resumo

A complexidade topográfica atribuída a plataformas continentais tropicais exerce uma gama de influências sobre associações de organismos bentônicos. Propôs-se, aqui, um estudo sobre a geodiversidade da plataforma continental tropical ao norte do Estado de Pernambuco, afim de espacializar, em caráter preditivo, a distribuição potencial de habitats marinhos bentônicos na região. Procurou-se estabelecer geoestatisticamente as diferenças existentes na área de estudo, resultando no mapeamento final. Foi utilizada parte da base de dados do Projeto MAI (Monitoramento Ambiental Integrado), desenvolvido entre os anos de 2006 e 2009, que possui dados batimétricos, sonográficos e sedimentológicos. Foram realizadas novas coletas para aquisição de dados sedimentológicos, nos anos de 2016 e 2017. Foram utilizados softwares para o tratamento dos dados, softwares estatísticos e outro voltado ao geoprocessamento dos bancos de dados. A extensão *Benthic Terrain Modeler* (BTM) para ArcGIS® 10.x também foi utilizada. Primeiramente identificou-se os grupos geométricos de relevo presentes na área de estudo. Primeiramente, 5 diferenças principais foram observadas, informando o grau de heterogeneidade da área de estudo. O Grupo A (18% da área), bastante homogêneo, sem grandes alterações ao longo do gradiente de profundidade. O Grupo B (10,5% da área), com alterações pontuais ao longo do gradiente de profundidade. No Grupo C (26,8% da área) observou-se variações ao longo do mesmo gradiente, sem a presença de feições marcantes. No Grupo E (11,2% da área) foi observado um gradiente de profundidade similar ao do Grupo A, enquanto o Grupo D (33,5% da área) é marcado pela presença de feições marcantes como recifes destacados da costa e canais. Posteriormente, o mesmo terreno foi estudado com base no Índice de Posição Batimétrica (BPI) e na *slope*, resultando na classificação das estruturas bentônicas existentes. Esta abordagem quantitativa mostrou que 8 classes de fundo marinho compõem o terreno da área: planícies (65% da área), depressões (11% da área), topos de afloramentos rochosos (7% da área), encostas suaves (6% da área), superfícies planas em encostas (4% da área), pináculos locais em grandes áreas planas (4% da área), encostas íngremes (3% da área) e pináculos locais em depressões (menos de 1% da área). A seguir, análises qualitativas foram realizadas entre a disposição dos sedimentos superficiais e as classes de fundo marinho encontradas. Ao final da abordagem empregada, observou-se padrões de distribuição dos sedimentos superficiais em relação as classes de fundo marinho presentes na área de estudo. Foi, então, possível estabelecer, de forma inédita, o mapeamento da distribuição potencial de habitats marinhos bentônicos para a região. Esta distribuição mostrou-se bastante heterogênea, controlada por alterações ao longo do gradiente de profundidade, com classes de fundo marinho bem diferenciadas, e que podem influenciar a ocorrência de diferentes composições de sedimentos superficiais.

Palavras-chave: Habitats marinhos. Mapeamento. Geodiversidade. Atlântico Sul Tropical. Batimetria monofeixe.

Abstract

The topographical complexity attributed to tropical continental shelves perform a range of influences on associations of benthic organisms. A study was proposed here on the geodiversity of the tropical continental shelf to the north of the State of Pernambuco, in order to spatialize, on a predictive basis, the potential distribution of benthic marine habitats in the region. Part of the MAI Project database was used (Monitoramento Ambiental Integrado), developed between the years 2006 and 2009, which has bathymetric, sonographic and sedimentological data. New data collections were carried out to acquire sedimentological data between 2016 and 2017. Thus, it was sought to establish geostatistically, the differences existing throughout the study area, resulting in the final mapping. Were used software for data processing, statistical software and other geoprocessing of databases. The Benthic Terrain Modeler (BTM) extension for ArcGIS® 10.x was also used. Firstly, 5 main differences were observed, indicating the degree of heterogeneity of the study area. The Group A (18% of the area), very homogeneous, without major changes along the depth gradient. The Group B (10.5% of the area), with point changes along the depth gradient. In Group C (26.8% of the area), variations were observed along the same gradient, without the presence of features remarkable. In Group E (11.2% of the area), the depth gradient is similar to that of Group A, while Group D (33.5% of the area) is marked by presence of striking features as reefs and channels. Posteriorly, the same terrain was studied based based on the Bathymetric Position Index (BPI) and the slope, resulting in the classification of existing benthic structures. This quantitative approach disclosed that 8 seabed classes compound the area: flat plains (65% of area), depressions (11% of area), rocky outcrops highs (7% of area), gentle slopes (6% of area), local pinnacles on broad flats (4% of the area), flat ridge tops (4% of area), steep slopes (3% of area) and local pinnacles in depressions (less than 1% of area). Next, qualitative analyzes were performed between the arrangement of the surface sediments and the seabed classes found. At the end of the approach, it was possible to observe patterns of distribution of the surface sediments in relation to the seabed classes present in the study area. In addition, it was possible to establish, in an unprecedented way, the mapping of the potential distribution of benthic marine habitats for the region. This distribution was very heterogeneous, controlled by alterations along the depth gradient, with well differentiated seabed classes, which may influence the occurrence of different compositions of surface sediments.

Keywords: Marine habitats. Mapping. Geodiversity. Tropical South Atlantic. Single-beam bathymetry.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Localization of the study area. (a) and (b) Satellite images of the study area, showing coral reef and beachrocks growth parallel to the main shoreline axis. Images from Google Earth Pro	19
Figura 2 - (a) Satellite image of the northern boundary of the study area. An elongated reef is seen parallel to the main shoreline axis. (b) Satellite image of the study area, showing coral reef growth parallel to the main shoreline axis. Images from Google Earth Pro	20
Figura 3 – Bathymetric profiles surveyed at the study area	22
Figura 4 - Digital bathymetric model (DBM), for the study area, showing its morphometric heterogeneity. (a) and (b) corresponds to the satellite images of Figure 22.....	24
Figura 5 – Hierarchical dendrogram produced by Cluster Analysis. On the x-axis is the Euclidean distance (see methodology for more information) and on the y-axis are the studied profiles ranked by their dissimilarities.....	26
Figura 6 – Results from the multidimensional scaling (MDS) analysis in two dimensions showing the different groups found for the 110 studied profiles	27
Figura 7 – Representative profile of the Group A, showing a homogeneous morphology.....	27
Figura 8 - Representative profile of the Group B showing a heterogeneous morphology.....	28
Figura 9 - Representative profile of the Group C, showing a heterogeneous morphology, with bank reefs and channels.....	28
Figura 10 - Representative profile of the Group D, showing a heterogeneous morphology, with the presence of bank reefs and channels.	29
Figura 11 - Representative profile of the Group E.	29
Figura 12 – Spatial distribution of geomorphometric groups identified by cluster analysis and bathymetric profiles representative of each group.....	30
Figura 13 – Localização da área de estudo.....	39
Figura 14 – Localização dos perfis batimétricos utilizados neste estudo.....	40
Figura 15 – Localização das amostras de sedimentos superficiais coletadas na área de estudo.....	44
Figura 16 – Modelo batimétrico digital (MBD) para área de estudo	46
Figura 17 – Slope derivado do MBD para área de estudo.....	47
Figura 18 – BPI, escala ampla, derivado do MBD para área de estudo	48
Figura 19 – BPI, escala fina, derivado do MBD para área de estudo.....	49
Figura 20 – Mapa da distribuição potencial de habitats marinhos bentônicos para a plataforma continental interna ao norte do Estado de Pernambuco, a partir do <i>surrogate</i> abiótico “Classes de fundo marinho”.	52
Figura 21 – Mapa de substratos de acordo com o diâmetro médio dos grãos.....	53
Figura 22 – Relação entre o diâmetro médio do grão e as classes de fundo marinho. O número corresponde ao quantitativo de amostras coletadas.....	54
Figura 23 – Amostras de sedimento localizadas ao longo dos perfis representantes dos grupos morfológicos da área de estudo, com percentuais de cascalho, areia e lama.	56
Figura 24 – Grupo geométrico de relevo A e suas classes de fundo	57
Figura 25 – Grupo geométrico de relevo E e suas classes de fundo	58
Figura 26 – Grupo geométrico de relevo D e suas classes de fundo.	58
Figura 27 – Grupo geométrico de relevo B e suas classes de fundo	60
Figura 28 – Grupo geométrico de relevo C e suas classes de fundo. (*) Pináculos locais em grandes áreas planas.	61

Lista de tabelas

Tabela 1 - R-statistic values and significance level from ANOSIM between the suggested groups	24
Tabela 2 – Summary of the different groups and their main morphometric/habitats characteristics for the study área	31
Tabela 3 – Dicionário de classificação que resume os fatores utilizados para a definição de classes do fundo marinho na PCI ao norte do Estado de Pernambuco	44
Tabela 4 - Classificação dos tipos de Substratos, adaptado de Schlacher et al.[29]	46
Tabela 5 – (Coluna 1) Classes de fundo marinho. (Coluna 2) Número de amostras de sedimento por classe de fundo marinho. (Coluna 3) Área ocupada por cada classe de fundo. (Coluna 4) Área ocupada por cada classe de fundo em percentual.....	52
Tabela 6 – (Coluna 1) Perfis representantes dos grupos geométricos presentes na área de estudo. (Coluna 2) Amostras de sedimentos superficiais em cada perfil representante. (Coluna 3) Tamanho médio do grão presente nas amostras. (Coluna 4, 5 e 6) Percentuais de cascalho, areia e lama presentes nas amostras. (Coluna 7) Classes de fundo marinho sob cada amostra de sedimento superficial	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	THE MORPHOMETRY OF A TROPICAL CONTINENTAL SHELF IN NORTHEAST BRAZIL	17
2.1	Abstract	17
2.2	Introduction	17
2.3	Material and methods	19
2.3.1	<i>Study area</i>	19
2.3.2	<i>Bathymetric survey</i>	21
2.4	Results	24
2.5	Discussion	30
2.6	Conclusions	32
2.7	References	33
3	CLASSIFICAÇÃO DO FUNDO MARINHO EM UMA PLATAFORMA CONTINENTAL TROPICAL DO NORDESTE DO BRASIL	37
3.1	Resumo	37
3.2	Introdução	37
3.2.1	<i>Área de estudo</i>	38
3.3	Material e métodos	39
3.3.1	<i>Dados batimétricos</i>	40
3.3.2	<i>Variáveis de terreno derivadas dos dados batimétricos</i>	41
3.3.3	<i>Classificação geomorfológica</i>	42
3.3.4	<i>Caracterização sedimentar das classes do fundo marinho</i>	43
3.4	Resultados	45
3.4.1	<i>Distribuição das classes do fundo marinho</i>	45
3.4.2	<i>Associação entre classes de fundo e composição superficial de sedimentos (diâmetro médio do grão)</i>	54
3.4.3	<i>Associação entre classes de fundo e composição superficial de sedimentos (teores dos componentes cascalho, areia e lama)</i>	56
3.5	Discussão	61
3.6	Conclusões	63
3.7	Referências	64
4	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO GERAL

Investigar a relação espécie-ambiente é importante para o mapeamento de habitats, para classificação biogeográfica, conservação e gerenciamento dos habitats marinhos (Harris e Baker, 2012).

A variação das propriedades físicas nos ambientes marinhos, que incluem profundidade, inclinação, rugosidade, exposição a correntes, geologia dos fundos marinhos, além das propriedades do sedimento, proporcionam uma gama de influências e interações aos atributos biológicos, sendo o oposto também verdadeiro, criando assim distribuições irregulares (Harris, 2012). Organismos apresentam adequações distintas em relação ao habitat no qual vive, comumente relacionando-se com um tipo específico de substrato, posição topográfica e regime de energia (Verfaillie et al., 2009).

Espécies bentônicas, em geral, demonstram preferências por determinadas profundidades, e às propriedades a esta associadas, como sugere Post (2008), bem como a condições topográficas inerentes a diferentes níveis de profundidades. Ao realizar a análise dos perfis batimétricos de determinada região, pode-se compartimentá-la em zonas distintas, que espelham características distintas quanto à distribuição da biota (Brown et al., 2011).

Diferenças de substratos em um ambiente são conhecidas por manter complexas relações com a biodiversidade existente, configurando-se como um fator de alto poder de predição da disposição espacial de habitats. Estudos tem oferecido indícios de que há diferenças significativas no estabelecimento de organismos entre substratos consolidados e inconsolidados, e entre diferentes percentuais de tipos de grãos em um ambiente (Beaman e Harris, 2007; McArthur et al., 2010).

Habitats são compostos por uma gama de interações entre fatores bióticos e abióticos. Assim, a utilização de dados abióticos podem conferir o estabelecimento de unidades espaciais, de limites distintos e mudanças graduais, que possuem características únicas (Brown et al., 2011).

Distintas localizações e tipos diferentes de substratos, sedimentos e rugosidade são importantes influenciadores na distribuição de habitats (McArthur et al., 2010). Desta maneira, substitutos físicos podem descrever a distribuição potencial de comunidades ecológicas (Post, 2008).

Atualmente, há uma crescente necessidade de se mapear os habitats marinhos, seja para fins de manejo, de gestão ou ainda estabelecimento de zonas protegidas.

Entretanto, as maiores dificuldades para a realização destes estudos, continuam sendo a obtenção de dados biológicos com precisão e em larga escala. Vários esquemas para mapeamento de habitats têm sido utilizados em vários estudos. Nos últimos tempos, três estratégias vem sendo bastante utilizadas e divulgadas (Brown et al, 2011). Adaptadas da ecologia terrestre (Ferrier e Guisan, 2006), as mesmas consistem em produzir informações sobre a distribuição dos habitats marinhos. São elas:

“Estratégia 1 – Substitutos Abióticos (Não-Supervisionada)”, analisa os padrões ambientais puramente abióticos, dos quais tendências biológicas podem ser inferidas. As outras duas estratégias, tem por fundamento o mapeamento dos habitats com base na investigação conjunta de dados abióticos e bióticos.

“Estratégia 2 – Montar em primeiro lugar, prever mais tarde (não supervisionada)”, prevê a organização de fatores ambientais e coleta in situ de dados geológico e biológicos, para posterior combinação dos mesmos.

“Estratégia 3: Prever em primeiro lugar, montar mais tarde (classificação supervisionada)” utiliza os dados in situ para informar a organização e segmentação dos dados ambientais (Brown et al., 2011).

As pesquisas de cunho geológico, com dados coletados de maneira relativamente mais rápida (quando comparada as coletas de dados biológicos) a partir da utilização de métodos geofísicos diretos e indiretos e por apresentar a ideia de continuidade espacial, vêm sendo cada vez mais realizadas no cenário mundial, como alternativa ao mapeamento de habitats (autores como: Harris, 2007; Huang et al., 2011; Kostylev e Hannah, 2007; Lucieer, 2007; Roff et al., 2003).

Este tipo de pesquisa não apresenta suficiência para a substituição das pesquisas de cunho biológico, entretanto, a classificação prévia dos tipos de habitats, como um primeiro ato, fornece subsídios para uma futura comprovação (Post, 2008). Nesta perspectiva, estudos realizados com este tipo de enfoque apresentam em suas revisões, a validação por meio de dados biológicos, que indicam que a utilização de atributos físicos é bastante eficaz (Freitas et al., 2006).

Pode-se afirmar que através de atributos abióticos, posição topográfica e tipos específicos de substratos de uma região (Verfaillie et al., 2009), podem-se delinear os limites que separam habitats distintos (Brown et al 2011), ou seja, o mapeamento geológico pode ser realizado a fim de que bases geológicas dos habitats possam ser estabelecidas, assim diferenciando-os.

À atributos abióticos pode ser conferida a qualidade de atributos de terreno, podendo ser derivados de modelos batimétricos digitais (MBD) (Lecours et al., 2017). Estes apresentam uma série de relações com a distribuição de comunidades bentônicas em diferentes tipos de ambientes, rotineiramente integrados em estudos ambientais ao redor do mundo (Lecours et al., 2016), com grande lacuna no Oceano Atlântico Tropical (Harris e Baker, 2012).

Uma vez adquiridos podem ser utilizados na descrição de habitats em uma determinada região (Pittman e Brown, 2011). Através de um conjunto de algoritmos padrão, esses produtos e as relações entre eles podem ser examinados para classificar paisagens bentônicas (Erdey-Heydorn, 2008).

Há uma crescente necessidade do conhecimento sobre habitats marinhos que estão dispostos na Zona Econômica Exclusiva Brasileira, seja pertinente à economia, à gestão ou ao manejo sustentável das áreas por ela compreendidas. Definir habitats potencialmente representativos, é um pré-requisito fundamental para muitas finalidades (Roff et al., 2003), pois esta definição pode formar base para análises posteriores, que incluem definição de tipos de habitats, relações comunitárias, avaliação de potenciais papéis de espécies chaves para a conservação marinha, entre outras (Roff et al., 2003).

Harris e Baker (2012) afirmam que os dados colhidos para a construção de mapas de habitats proveem base para uma variedade de aplicações, tais como: no âmbito industrial, na gestão do ambiente marinho e no turismo. Podem ainda, ser utilizados como aporte a estudos de ordenamento territorial, da biodiversidade e gestão de conservação, referentes à exploração de recursos minerais, bem como aplicações a fins socioeconômicos (Brown et al., 2012).

De natureza preditiva, esta pesquisa oferecerá subsídios para outros estudos, tanto para uma futura validação, quanto a outros estudos relacionados à ecologia, à biogeografia e áreas afins. Esta é uma etapa de vital importância, para desvendar as complexidades ecológicas dos habitats marinhos da área de estudo. Além de contribuir para estudos futuros relacionados à biodiversidade marinha na plataforma continental de Pernambuco.

O presente trabalho justifica-se, ademais, em contribuição a efetivação das Metas de Aichi 2011-2020 (CBD, 2010), desenvolvidas em referência à conservação da biodiversidade presente no território brasileiro, em pelo menos duas:

- Meta 11, presente no objetivo estratégico C “Melhorar a situação de biodiversidade protegendo ecossistemas, espécies e diversidade genética”, que versa

sobre a expansão e implementação de sistemas de áreas marinhas protegidas, estabelecendo que até o ano de 2020 ao menos 10% de áreas marinhas e costeiras brasileiras estejam conservadas no âmbito do sistema de áreas marinhas protegidas;

- Meta 19, constante no objetivo estratégico E “Aumentar a implementação por meio de planejamento participativo, gestão de conhecimento e capacitação”, esta que trata da ampliação, melhoramento, compartilhamento, transferência e aplicação de conhecimento, bases científicas e tecnologias ligadas à biodiversidade.

Por conseguinte, apoia-se também na Portaria do Ministério do Meio Ambiente (MMA) nº 09, de 23/01/2007 (Ministério do Meio Ambiente, 2007), uma vez que a área de estudo a ser investigada é uma das áreas prioritárias para conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios, referidas na mesma.

Assim, essa pesquisa propõe a construção de um mapeamento da distribuição potencial de habitats marinhos bentônicos, realizado com base nas diferenças e padrões estabelecidos no terreno da área de estudo, em análise conjunta com amostras de substratos superficiais existentes, a fim de descrever conjuntos de condições distintas do fundo marinho. Essa pesquisa pode, futuramente, ser utilizada para o mapeamento dos “habitats reais” presentes na região (Greene et al., 2005, 2007), realizado com o auxílio da verdade de campo.

O objetivo principal deste trabalho é o de compreender, através da geodiversidade, o padrão de distribuição espacial dos habitats marinhos da área de estudo, visando contribuir a projetos relacionados à conservação marinha. Para isso propôs-se a análise da morfologia do fundo marinho, a partir de dados batimétricos; a identificação dos tipos de substratos presentes na área e sua relação com as classes de fundo constantes na mesma; além de mapear, em caráter preditivo, a distribuição potencial dos habitats bentônicos presentes na área.

Este documento está dividido em dois capítulos. O primeiro capítulo, intitulado “The morphometry of a tropical continental shelf in northeast Brazil” é voltado à análise geomorfométrica entre modelo batimétrico digital (MBD) e perfis batimétricos da área de estudo. É baseado em banco de dados batimétricos advindo do Projeto MAI (Monitoramento Ambiental Integrado) (FINEP/UFPE, 2009).

O segundo capítulo, intitulado “Classificação do fundo marinho em uma plataforma continental tropical do nordeste do Brasil”, é relacionado à análise geomorfológica da área de estudo, por meio do mesmo banco de dados do primeiro capítulo, aliado à amostras de sedimentos superficiais advindas do projeto homônimo.

Tais análises foram realizadas com auxílio da extensão BTM para Arcgis, através da utilização do *Bathymetric Position Index* (BPI), e em seguida foi investigada a relação da geomorfologia com os sedimentos superficiais, em uma abordagem qualitativa.

Ambos capítulos foram escritos em forma de artigos científicos. Portanto, cada capítulo possui elementos textuais próprios, além de referências bibliográficas distintas. O capítulo 2 já foi submetido ao número especial sobre Geomorfometria do *Geosciences Journal* e o capítulo 3 está em processo de preparação para submissão.

Ao final foram feitas conclusões e considerações finais que incorporam os dois capítulos constantes neste documento.

2 The morphometry of a tropical continental shelf in northeast Brazil

2.1 Abstract

In this study, we present a morphometric characterization of a tropical continental shelf in northeast Brazil in order to predict the availability of marine habitats. A bathymetric survey was conducted using a single-beam echo sounder with a total of 110 profiles. The raw bathymetric data allowed to identify a complex morphology along the area, showing patches, bank reefs and channels. Through a statistical analysis five groups were identified: Group A, B, C, D and E. Group A (18% of total area) presents smooth and homogeneous morphometry. The Group B (10.5% of the area), with point changes along the depth gradient. In Group C (26.8% of the area) variations were observed along the same gradient, without the presence of striking features. In Group E (11.2% of the area) the depth gradient is similar to that of Group A, while Group D (33.5% of the area) is marked by presence of striking features as reefs and channels. Such difference are shown by the analysis of similarities (ANOSIM) to be statistically significant. The Group D presents the most diverse geomorphometry, mainly due to the occurrence of bank reefs and channels, correlating to the changes along the depth gradient. This approach can be used by brazilian agencies to help marine planning and management.

Keywords: marine geomorphology; single-beam echosounding; geomorphometry; tropical shelf; Brazil.

2.2 Introduction

The geomorphometry helps to describe digital bathymetric models (DBM) using terrain attributes, and can also be used as abiotic surrogates of species distribution for the production of habitat maps [1].

The researches involving terrain attributes for environmental studies have been growing in recent years, mainly those focused on the mapping of marine habitats [1–8]. However, there is still a large gap for studies over the South Atlantic Ocean, especially those in tropical areas [9]. Tropical beaches fronted by coral reefs generally present complex topography, steep slopes and rough bottoms, which result in a complex three-dimensional morphometry [10].

The complexity topographic describe the shape, geometry and configuration of natural terrain surfaces in three-dimensional space. And from a purely statistical viewpoint, this reflects variability in one or multiple quantitatively measured geomorphometric variables such as elevation, slope, curvature, among others [11].

These areas of relief complexity are generally correlated with the existence of three-dimensional morphology in a given area [11,12], such as the existence of paleoshorelines [13] and coral reefs [10,14], among others.

The mapping of more complex morphological patterns in a landscape (which could be associated with probable hotspots) may indicate which sites would be most attractive for predator aggregation: either because they are more amenable to foraging, for reproduction, or for rest [11].

Benthic (seafloor) habitats are physically distinct areas of seabed that are associated with particular or communities, consistently occur together [9]. Therefore, habitats have a particular form of distribution concerning these interactions, across a range of space-time and organizational scales [15], in which the physical nature of the environment plays a fundamental role in the determination and function of benthic communities[16].

Abrupt changes in the depth gradient, associated with the presence of a consolidated substrate that provide steeper slopes, may increase the biodiversity of fish, for example [17]. Algal-dominated communities tend to be denser and less heterogeneous in places less exposed to waves [12], while decapod distribution patterns at the global level demonstrate greater richness between the depth range of 1 to 10 m, showing more variable organization with depth increase[18]. Likewise, there are indications that, at sites with higher bathymetric variations, there are higher densities of sessile invertebrates [19].

The aim of this work is to present a morphometric characterization of a tropical continental shelf, based on the possible differentiations along the depth gradient, to predict the availability of marine habitats. We took into account the premise that the more heterogeneous the morphology of an area, the greater the number of communities associated with it and therefore, the greater de diversity of habitats. The work will focus on the inner continental shelf located in northeast Brazil, improving morphometric informations and contributing to development of marine datasets for Brazil, for use in marine planning and management.

2.3 Material and methods

2.3.1 Study area

The study area (91 km²) is located in the northeast part of the Brazilian continental shelf adjacent to the coast of the municipalities of Olinda and Paulista, in the state of Pernambuco. It is limited to the south by the Port of Recife and to the north by the northern boundary of the municipality of Paulista (Fig. 1).

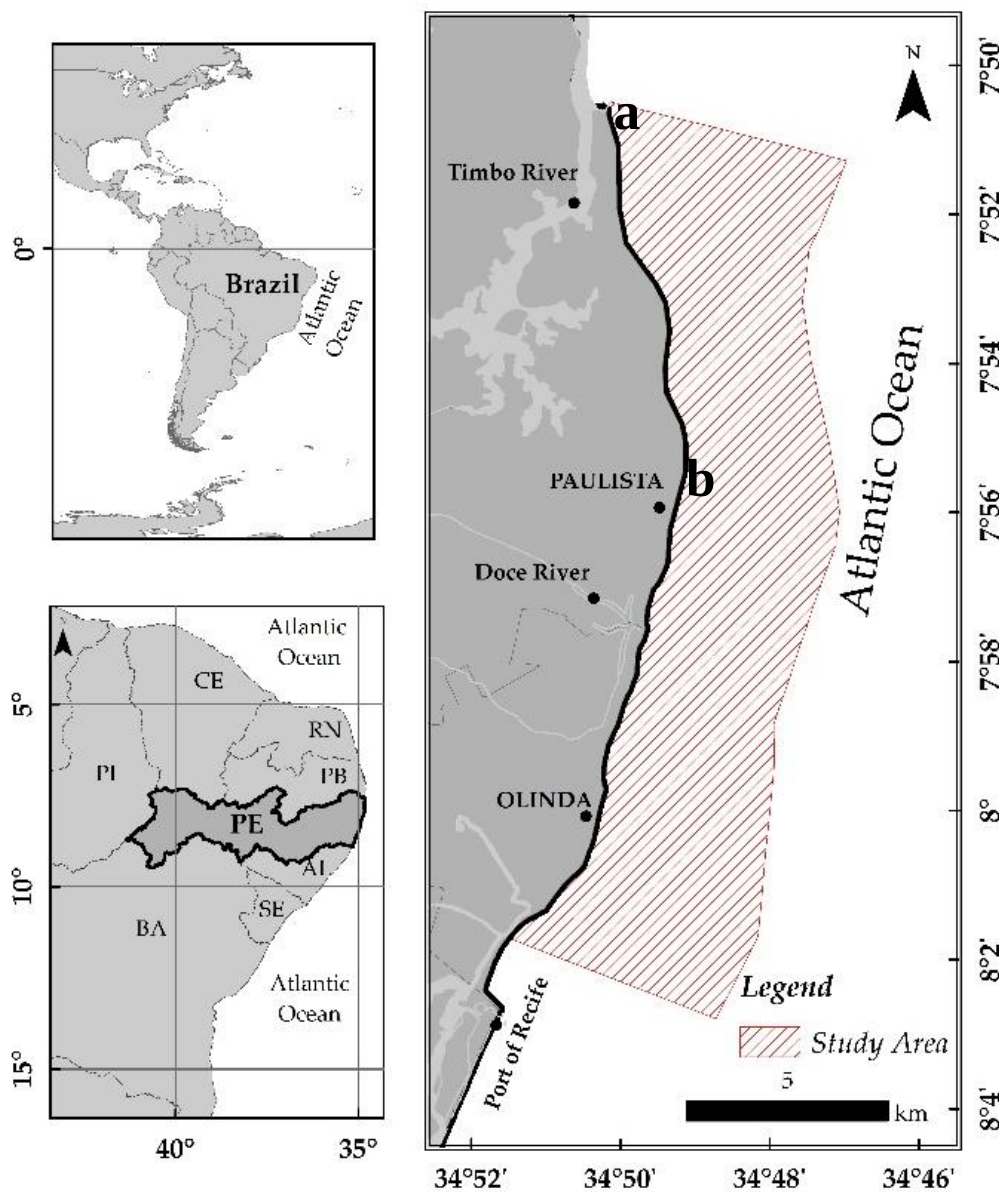


Figure 1 – Localization of the study area. (a) and (b) Satellite images of the study area, showing coral reef and beachrocks growth parallel to the main shoreline axis. Images from Google Earth Pro.

Pernambuco Continental Shelf (PCS) is part of the Eastern Brazilian Continental Margin, being therefore characterized by a small width, with an average value of only 34 km and its break located around 60 m deep [20,21]. Since the end of the last century this continental shelf is divided into three sectors, according to its morphological characteristics and the distribution of its sediments: inner shelf (up to 20 m deep) with a predominance of terrigenous sands; middle shelf (from 20 to 40 m) with a dominance of carbonate sediments; and outer shelf (from 40 m to the shelf break) with a calcium carbonate content of more than 75% and very reworked carbonate associations [22].

The low rate of continental erosion and marine sedimentation, associated with structural factors in the area, may be responsible for the reduced width of the PCS, while its shallow depth is attributed to the inefficiency of marine processes in the last geological periods [23].

One of the main features of the northeastern Brazilian coast and continental shelf is the peculiar characteristic of coral reef and beachrocks growth parallel to the main shoreline axis [24–28]. On the shallower portion of the continental shelf of Pernambuco, the presence of beachrocks is a striking feature in the landscape (Fig. 2). These sedimentary rocks are intertidal in the shallower parts, been exposed during low tides, while deeper lines remain completely submerged at the greater depths [26,29,30].



Figure 2 - (a) Satellite image of the northern boundary of the study area.

An elongated reef is seen parallel to the main shoreline axis. (b) Satellite image of the study area, showing coral reef growth parallel to the main shoreline axis. Images from Google Earth Pro.

In the region, conditions were favorable for coral reefs to develop on top of these hard substrata (beachrocks), and they can occur in several ways, which confers a great morphological complexity to the region [26,28,30]. These coral reefs are mostly patch or elongated banks reefs of various shapes and dimensions; some are attached to the coast and others are not attached, generally lying parallel to the coast at depths of approximately 5 m to 10 m [28]. Such complexity in the coral reefs morphology is responsible for impact on water flow, species diversity, nutrient absorption and wave energy dissipation [10,27].

2.3.2 Bathymetric survey

The dataset used in this work was composed of hydroacoustic data, collected in the scope of MAI project, covering an area of 91 km² (Fig. 3). A detailed bathymetric survey was conducted using the available equipment, single-beam 200-kHz echo sounder (Garmin 298 with a GPS antenna for navigation and positioning), sampled at a rate of three soundings per second. The sounder was mounted off the side of a monohull vessel (draft of 24 cm), which allowed for a closer approach to the coastline. The bathymetric survey was performed in periods for the most high tide (> 2.50 m). In many cases, this resulted in values above de water line (in order of 0.40 cm).

It is known that the use of multibeam echo sounders, with higher sampling rates than single beam, offers a higher resolution of the seabed morphology. However, to date, multibeam echo sounder data is not available for this area.

A total of 110 profiles were measured covering the entire length of the study area, from the shoreline to the 20 m isobaths, corresponding to the internal continental shelf. The profiles were perpendicular to the main shoreline axis and were spaced at approximate intervals of 200 m (Fig. 3). All depth values were tidally corrected to the vertical datum of the national nautical charts (Mean Spring LowWater — MSLW).

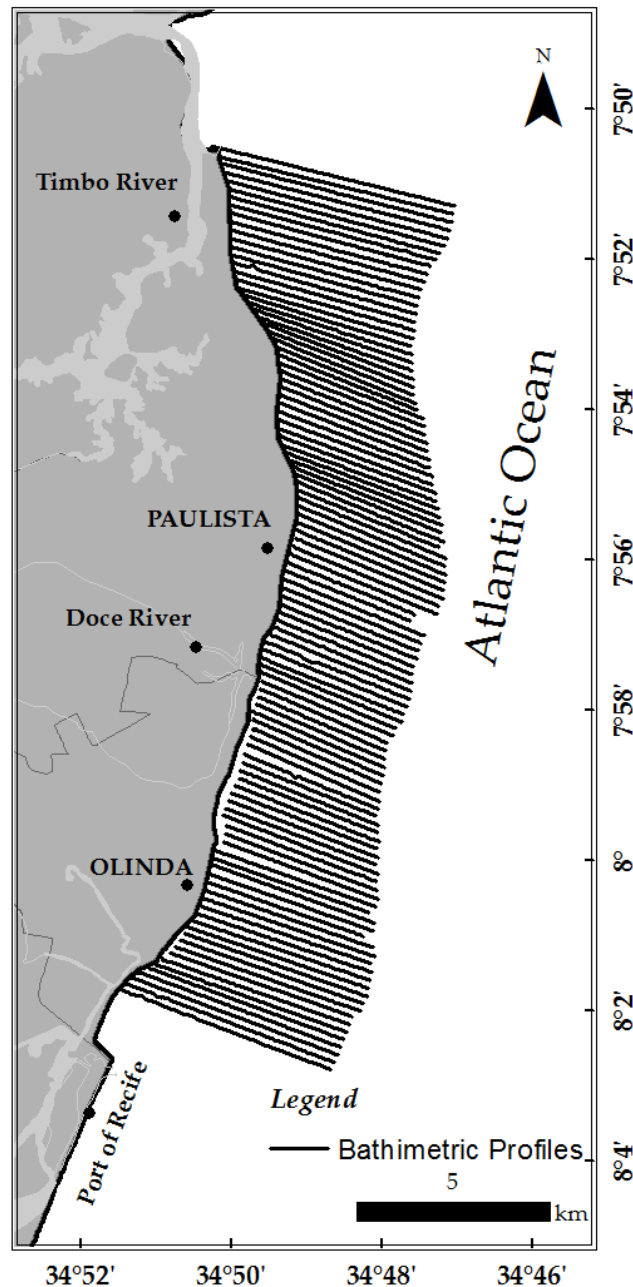


Figure 3 – Bathymetric profiles surveyed at the study area.

All bathymetric data (55.102 points) was pooled and submitted to a natural neighbor interpolation method to generate a raster surface with 10m cell size (software ArcGIS®v.10.3 trial versions). From the same database, an exploratory statistical analysis was conducted in order to quantitatively define geometric groups that best express the morphological differences of the area.

A dissimilarity analysis of the 110 surveyed profiles has been conducted in order to group and to define the morphology along the studied area. The Euclidean distance matrix, with the coefficient of dissimilarity, is the most suitable for studies with abiotic

variables [31], so that different groups of geomorphological features are mathematically established. The dissimilarity matrix was performed using rows of 5 m grid discretizations, from the first to the last point of each profile. This matrix considers the bathymetric profiles as samples and the discretized depths as response variables. This was used to perform a hierarchical cluster analysis, using a group-average linking method to represent the reef geometry groups, using PRIMER® v.6 software (educational version). Finally the Multidimensional Scaling (MDS) was used to support the understanding of the result obtained in cluster analysis, and a similarity analysis (ANOSIM) was carried out *a posteriori*.

The cluster analysis was used to find groups that naturally exist in an environment or any data set [32]. In order that the groups suggested by cluster analysis were displayed in other type of plot, a MDS was carried out. Then ANOSIM was carried out to verify if the formed groups are really distinct from each other. It needs to be pointed out, that both techniques, the Clustering and the MDS are what is called exploratory techniques (data mining) that may be used as a first step to any kind of more robust analysis such as the ANOSIM [32].

The ANOSIM was used initially to determine the extent of the overall differences in the groups found using the Clustering and MDS (Global $R = 0.91$). The test was also used subsequently to ascertain the extent of any significant differences in any group indicated using Clustering and MDS [32]. The results showed that the groups are significantly different, with a significance level of 0.1 % (Fig. 11). All the pair wise comparisons between groups (Table 1) were significant and showed that the greatest differences between groups occurred between group B and A ($R=1$) and between B and E ($R=1$), while the least difference was detected between groups D and E ($R=0.69$).

Groups	R Statistic	Significance Level %
B, C	0.86	0.1
B, D	0.96	0.1
B, E	1	0.1
B, A	1	0.1
C, D	0.91	0.1
C, E	0.95	0.1
C, A	0.93	0.1
D, E	0.69	0.1
D, A	0.99	0.1

Table 1 - R-statistic values and significance level from ANOSIM between the suggested groups.

2.4 Results

The DBM generated through the interpolation of the bathymetric data allowed the visualization of the morphology of the study area (Fig. 4). The raw bathymetric data, even using data acquired with a single-beam system, can visualize the morphology of the study area with a good resolution.

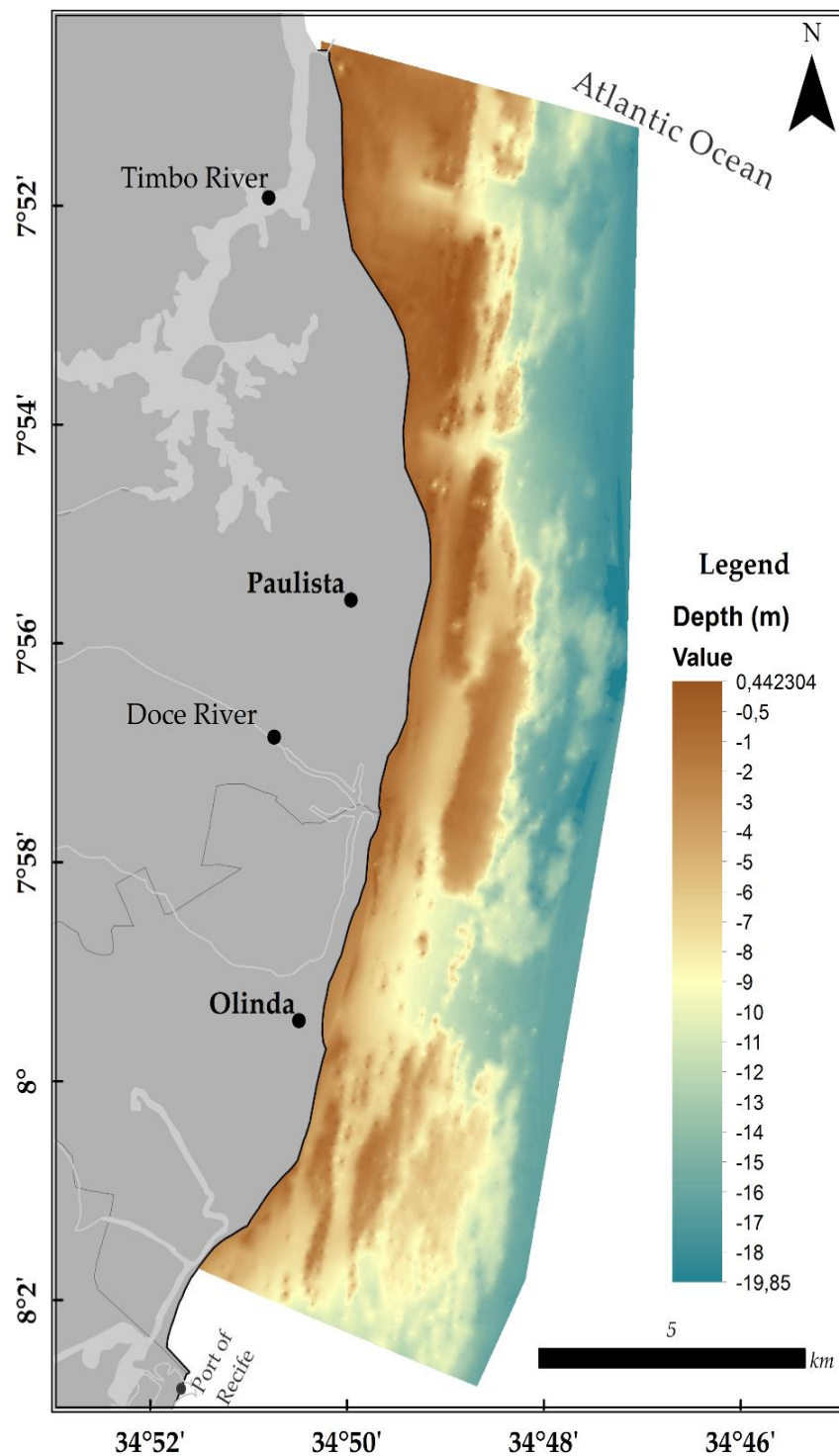


Figure 4 - Digital bathymetric model (DBM), for the study area, showing its morphometric heterogeneity.

It was possible to identify the great heterogeneity of the geomorphological features, both in size and location, mainly due to the occurrence of bank reefs and channels. In the northern part of the study area, the bank reef is closed to the coast. However in the central part it is possible to identify the presence of two elongated bank reefs, not attached to the coast, with channels between them. In the transition to the southern part of the area the presence of the reef banks are not expressive, occurring only as discontinuous features (small patches). The bank reefs come back to be more present in the southern part, but not as expressive as in the central part of the area.

The presence or absence of the reef banks and channels cause changes along the depth gradient, which allows to identify the morphological complexity of the area, with positive and negative reliefs. Positive reliefs were associated to the drowned reefs (patches and bank reefs) and beachrock lines while negative reliefs indicate the presence of channels, many of them formed between the reef lines.

In order to better describe and quantify this morphological complexity, and according to the dissimilarity coefficient, it was possible to identify that the area presented five main geometric differentiations, grouped at the distance of 120 (Figs. 4).

Group A (18% of the area), corresponding to the northern sector, presents few changes along the depth gradient, while Group B (11.2% of the total area) presents some spots of positive relief. Group C (26.8% of the area) marked by the presence of bank reefs, while Group D (33.5% of the total area) presents greater variability along the depth gradient and Group E (10.5% of the area), although close to Group A, shows more changes along the depth gradient than this. This confirms the great morphometric heterogeneity of the area, mainly related to the presence or absence of reefs, as well as its morphology.

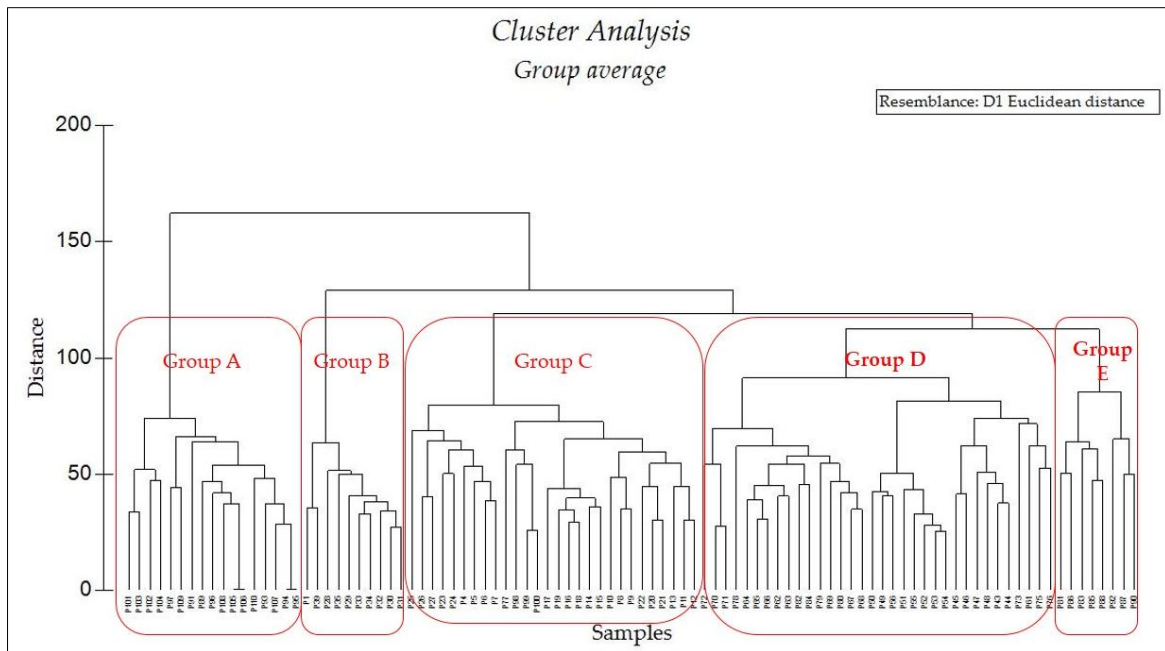


Figure 5 – Hierarchical dendrogram produced by Cluster Analysis. On the x-axis is the Euclidean distance (see methodology for more information) and on the y-axis are the studied profiles ranked by their dissimilarities.

The MDS was performed to explore the groups suggested by the Clustering analysis as well as the conclusions and possible explanations for their existence. The groups suggested by cluster analysis were assigned as factor for each bathymetric profile. From the use of a two dimensional MDS it was possible to differentiate 5 geometric groups of bathymetric profiles (Fig. 5):

- Group A is represented by profiles present in the north of the area, homogeneous up to 3,500 m distant from the coast;
- Group B is represented by profiles of greater slope than the others and of features more spaced;
- Group C is represented by profiles of discontinuous features and in smaller depths;
- Group D is represented by profiles containing two elongated reefs parallel to the coast;
- Group E is represented by profiles where slope is accentuated in the 3,000 offshore.

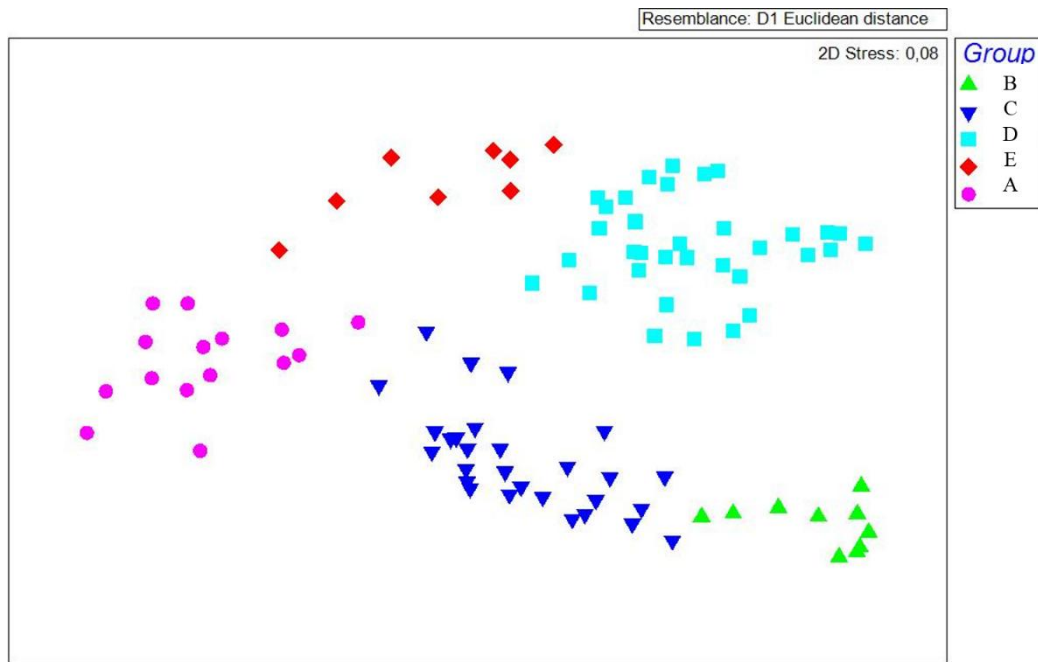


Figure 6 – Results from the multidimensional scaling (MDS) analysis in two dimensions showing the different groups found for the 110 studied profiles.

Group A (Fig. 7) shows a more homogeneous morphology with a fairly smooth slope. The mean depth in this sector is 1m, along 3,500 m distant from the coast, with no major changes along the depth gradient. This group presents in its morphology a bank reef closed to the coast, elongated both perpendicularly and longitudinally to the coastline.

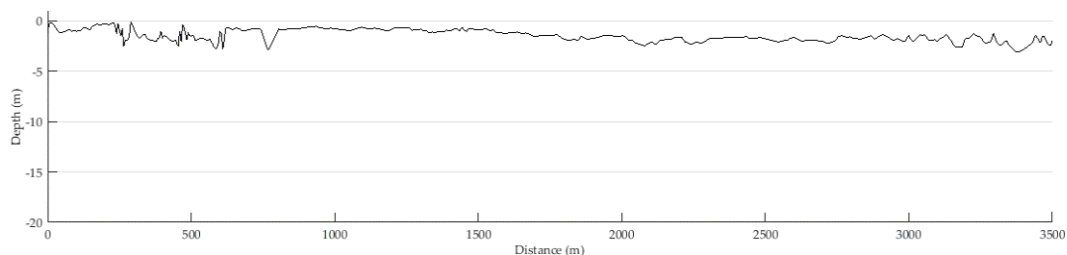


Figure 7 – Representative profile of the Group A, showing a homogeneous morphology.

Profiles of Group B (Fig. 8) present smaller features – like patches, isolated, and bigger slope than the other groups. The first feature is closer to the coast, between 0 and 5m deep, with a width of less than 10 m. The second feature is 1km from the coast, between 5 and 10m deep, about 200 m wide. And the third is 2 km from the coast, located between 10 and 15 m deep, and approximately 200 m wide.

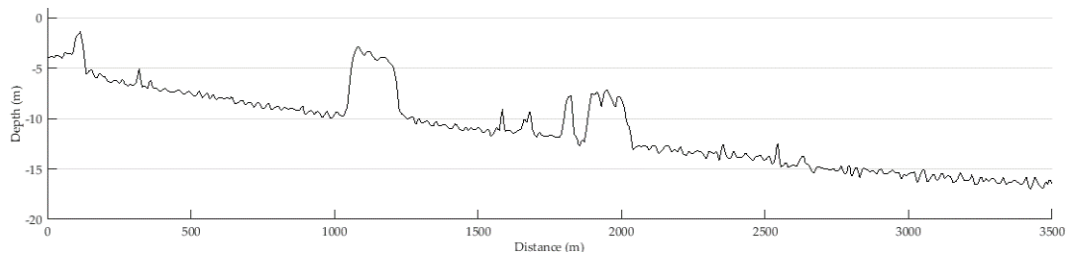


Figure 8 - Representative profile of the Group B showing a heterogeneous morphology.

Profiles of Group C (Fig. 9) are composed of more wide and elongated features (bank reefs), occurring at lower depths. The first one is less than 1km from the coast, between 0 and 5 m deep and with an average width of 500 m. After this feature there is a channel, approximately 10 m deep and 400 m wide. Offshore, another bank reef is present, more elongated, with an average depth of 3 m and approximately 1km in length. 2km from the coast the relief is quite rough, with an average depth of 7m.

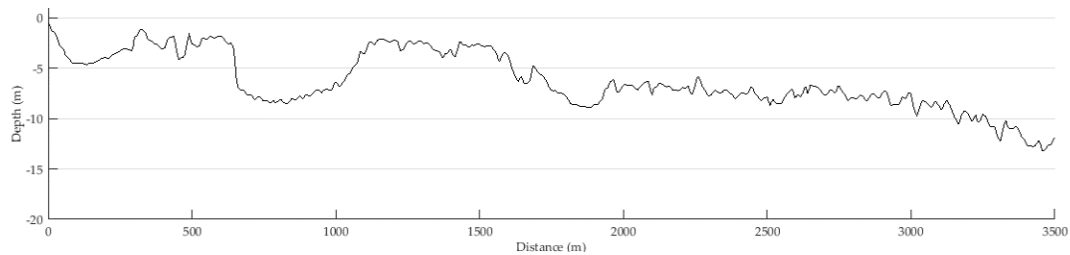


Figure 9 - Representative profile of the Group C, showing a heterogeneous morphology, with bank reefs and channels.

The profiles of the Group D (Fig. 10) presented the highest morphometric variations for the study area. There are two channels: the first one closest to the coast, approximately 4m deep and 300 m wide, and the second deepest, approximately 8m deep and 800m wide.

The two main features related to the bank reefs are located between these channels. The first, shallower, is about 1 m deep, approximately 400 m wide. The second feature, larger and deeper, is approximately 4m deep and approximately 800 m wide. This configuration exhibits correlates on the American coast, more precisely in southeastern Florida, which suggested genesis during the Pleistocene or Holocene, depending on the depth at which these features are found [33].

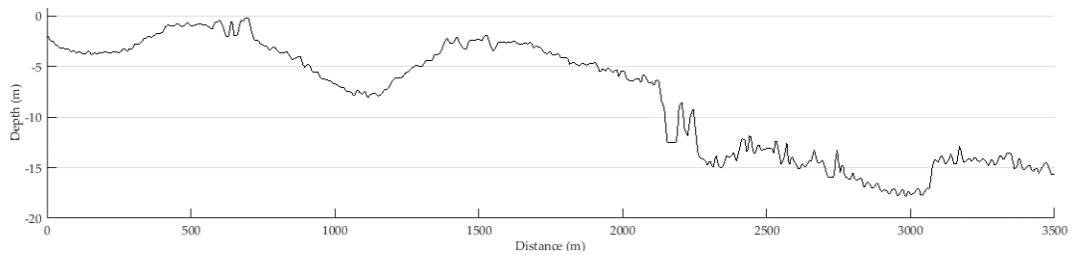


Figure 10 - Representative profile of the Group D, showing a heterogeneous morphology, with the presence of bank reefs and channels.

Profiles of Group E (Fig. 11) show greater variations in the depth gradient than the profiles for the Group A. Its smaller depths, between 2000 and 3000 m distant from the coast, with accentuation of the slope from 3000 m, is what differentiates it from Group A, since it remains relatively flat and with less changes up to 3500 m.

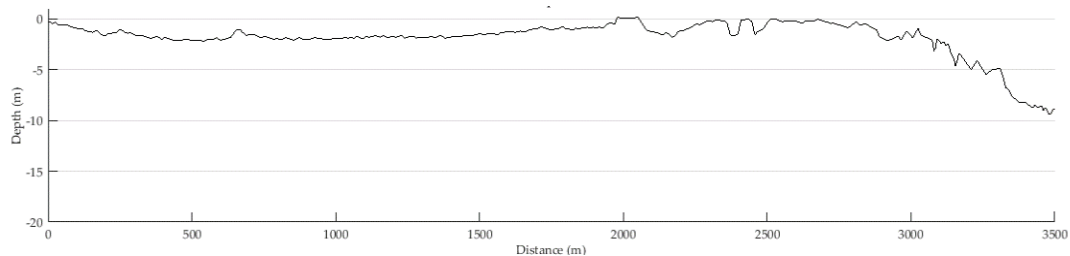


Figure 11 - Representative profile of the Group E.

The systematic analysis between DBM and the geomorphometric classification (Fig.12) shows the geometric differentiation and the morphometric complexity of the area, strongly related to the presence or absence of reefs as well as their morphology.

Table 2 presents a summary of the main morphometric characteristics found in the study area. Groups A and E showed lower morphological complexity while the groups B, C and D showed more complexity. However, the highest morphometric variation was found in group D, mainly due to the existence of a more elongated reef, which occurred parallel and longitudinally in the central part of the study area.

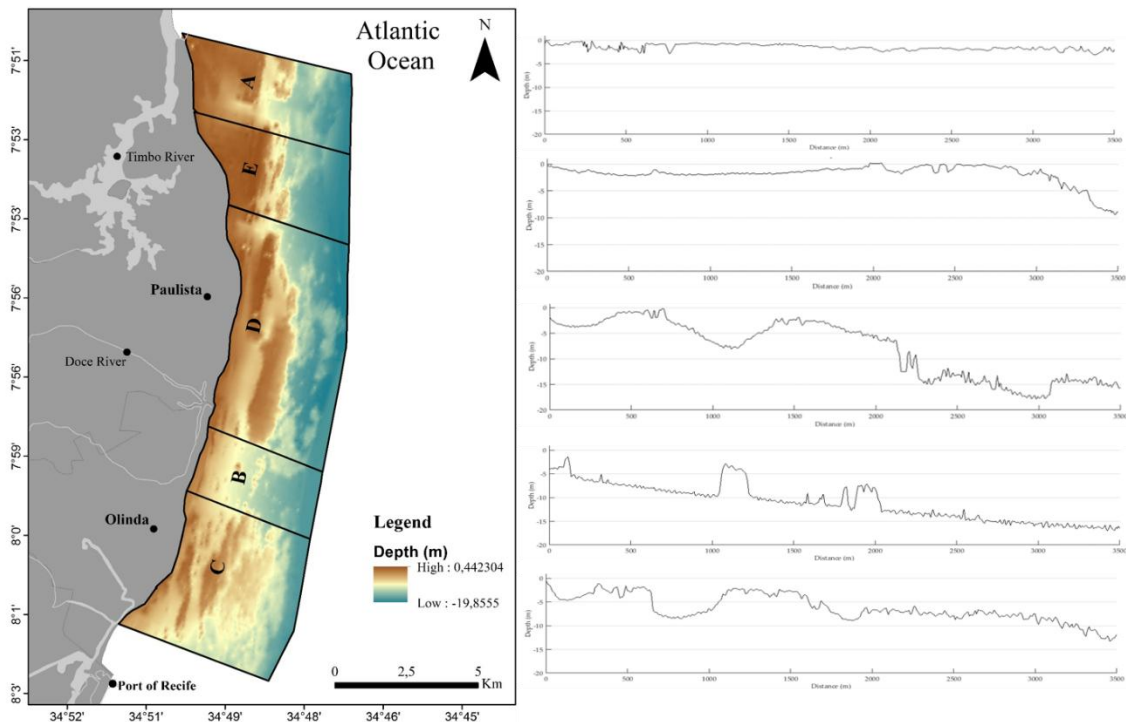


Figure 12 – Spatial distribution of geomorphometric groups identified by cluster analysis and bathymetric profiles representative of each group.

Groups	Morphometric characteristics (Depth gradient)
A	More homogeneous morphology with a fairly smooth slope; No major changes along the depth gradient.
B	Smaller features – like patches, isolated, and bigger slope; Few changes in the depth gradient.
C	Soft changes in the depth gradient, due to bank reefs occurring at lower depths.
D	Homogeneous morphology at lower depths, but with more variations in the depth gradient than the profiles for the Group A, after 3,000 m offshore.
E	Presented the highest morphometric variations for the study area, with bank reefs and well defined channels; Greater differentiations along the depth gradient than its surroundings.

Table 2 – Summary of the different groups and their main morphometric/habitats characteristics for the study area.

2.5 Discussion

The 5 relief geometric classes that occur in the internal continental shelf of north Pernambuco highlight the geomorphometric complexity in the study area. It includes reefs (patches and bank reefs of various forms and dimensions) and channels (Fig. 12). There are correlates, under similar environmental conditions, that such bank reefs lines originate from paleoshorelines [27,33].

As previously mentioned, the bathymetric data used in this study were acquired with a single-beam echo sounder. It is known that the use of multibeam echo sounder (MBES), with higher sampling rates than SBES, offers a higher resolution of the seabed. Until the moment, MBES data are not available for this area. However, SBES data were used in this study. In addition, it should be noted that both the DBM and the statistical analysis presented a good resolution and accuracy, if compared to non-smoothed bathymetric profiles and satellite images (Fig. 2 and 4).

Applying the geomorphometric analysis approach, it was possible to identify the geometric complexity of the area, and five groups were identified: Group A, Group B, Group C, Group D and Group E.

Group A, more homogeneous from a geomorphometric point of view, has as main characteristic, the presence of a reef line attached to the coast. Correlates are found along the metropolitan region of Recife, adjacent to the municipalities of Recife, Jaboatão dos Guararapes and Cabo de Santo Agostinho [25,27].

On the other hand, Group D is marked by a great geomorphometric variability, due to the presence of bank reefs of the coast, in many shapes and sizes. The formation of parallel lines, gradually deeper, correlates along the coast of Pernambuco, as well as on the American coast, in southeastern Florida, where the internal platform presents three lines of reefs parallel to the coast, discontinuous and of varying proportions [27,33,34].

The D Group (Fig. 10), with the greatest variability along the depth gradient of the area, shows the presence of two channels: the first between the coast and the first geomorphological feature, 5m deep, and the second, between the two features mentioned above, with 8m depth. After these features are found smaller ones, between 8 and 13m deep.

A large part of the variability in the spatialization of benthic communities is related to differences in the incidence of sunlight, temperature, wave exposure and food availability, which are provided by changes in the depth gradient [12]. Therefore, the features that are related to the changes in the depth gradient are influencing the spatialization of the communities, since benthic communities have different habitat adequations, related to the topographic position, to a specific type of substrate, or to the energy regime [35].

An area that presents more heterogeneous attributes, to the detriment of the adjacent sectors, has a degree of variability in the greater depth gradient, whereas the

number of associated communities tends to be larger, being this one of greater biodiversity than the others in the same study area. The most abrupt changes in this gradient, then have the greatest changes in terms of communities or functionality [11].

In this sense, the main features responsible for changes along the depth gradient of the area are set in the D Group (Fig. 10). In relation to the D group, the presence of macroalgae and calcareous algae [12], sessile and mobile invertebrates [36] can be inferred, besides being an environment more conducive to the aggregation of predators [11].

Groups that showed lower morphological complexity were found (Group A and Group E), which may have a smaller variety of associated communities [10]. The highest morphometric variation was found in Group D, mainly due to the existence of a more elongated reef, which occurred parallel and longitudinally in the central part of the study area. Structures such as those found in Group D may form physically more complex zones to the detriment of adjacent relatively flat areas [37,38]. Their three dimensional morphology provides attributes for the association of several communities [13].

2.6 Conclusions

Using the bathymetric data available it was possible to apply grouping techniques such as Clustering and non-metric multidimensional scaling and obtain a quantitative classification of seabed of the inner continental shelf of Northeast of Brazil.

The morphometric complexity of the area is strongly related to the presence or absence of reefs as well as their morphology. The dendrogram shows mathematically the morphological heterogeneity existing in the investigated area, reflecting the differences in the possible distribution of benthic communities. These differences, a priori, can be observed qualitatively, both by satellite images and in the DBM itself, were found in the MDS and verified by ANOSIM.

Irregularities of the terrain allow changes in the depth gradient that support associations of different communities. Knowing the location of these features and their associated groups it is possible to infer the spatial distribution of potentially associated communities. The results can be used as a starting-point for future habitat mapping, especially in the continental shelf of Pernambuco.

2.7 References

1. Lecours, V.; Dolan, M. F. J.; Micallef, A.; Lucieer, V. L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2016**, *20*, 3207–3244, doi:10.5194/hess-20-3207-2016.
2. Harris, P. T. Applications of geophysical information to the design of a representative system of marine protected areas in southeastern Australia. In *Mapping the Seafloor for Habitat Characterization*; Geological Association of Canada, Special Paper 47, 2007; Vol. 47, pp. 463–482.
3. Huang, Z.; Brooke, B. P.; Harris, P. T. A new approach to mapping marine benthic habitats using physical environmental data. *Cont. Shelf Res.* **2011**, *31*, S4–S16, doi:10.1016/j.csr.2010.03.012.
4. Kostylev, V. E.; Hannah, C. G. Process-driven characterization and mapping of seabed habitats. *Mapp. Seafloor Habitat Charact. Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.* **2007**, *47*, 171–184.
5. Lucieer, V. L. The application of automated segmentation methods and fragmentation statistics to characterise rocky reef habitat. *J. Spat. Sci.* **2007**, *52*, 81–91.
6. Roff, J. C.; Taylor, M. E.; Laughren, J. Geophysical approaches to the classification, delineation and monitoring of marine habitats and their communities. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* **2003**, *13*, 77–90, doi:10.1002/aqc.525.
7. Bishop, M. J.; Byers, J. E.; Marcek, B. J.; Gribben, P. E. Density-dependent facilitation cascades determine epifaunal community structure in temperate Australian mangroves. *Ecology* **2012**, *93*, 1388–1401.
8. Lecours, V.; Lucieer, V. L.; Dolan, M. F. J.; Micallef, A. An ocean of possibilities: applications and challenges of marine geomorphometry. *Geomorphometry Geosci. Int. Soc. Geomorphometry Pozn. Pol.* **2015**, 23–26.
9. *Seafloor geomorphology as benthic habitat: GeoHAB atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats*; Harris, P. T., Baker, E. K., Eds.; Elsevier insights; 1st ed.; Elsevier: Amsterdam ; Boston, 2012; ISBN 978-0-12-385140-6.
10. Zawada, D. G.; Piniak, G. A.; Hearn, C. J. Topographic complexity and roughness of a tropical benthic seascape: SEASCAPE ROUGHNESS. *Geophys. Res. Lett.* **2010**, *37*, n/a-n/a, doi:10.1029/2010GL043789.
11. Bouchet, P. J.; Meeuwig, J. J.; Salgado Kent, C. P.; Letessier, T. B.; Jenner, C. K. Topographic determinants of mobile vertebrate predator hotspots: current

- knowledge and future directions: Landscape models of mobile predator hotspots. *Biol. Rev.* **2015**, *90*, 699–728, doi:10.1111/brv.12130.
12. Garrabou, J.; Riera, J.; Zabala, M. Landscape pattern indices applied to Mediterranean subtidal rocky benthic communities. *Landsc. Ecol.* **1998**, *13*, 225–247.
 13. Brooke, B. P.; Nichol, S. L.; Huang, Z.; Beaman, R. J. Palaeoshorelines on the Australian continental shelf: Morphology, sea-level relationship and applications to environmental management and archaeology. *Cont. Shelf Res.* **2017**, *134*, 26–38, doi:10.1016/j.csr.2016.12.012.
 14. Pittman, J. K.; Dean, A. P.; Osundeko, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresour. Technol.* **2011**, *102*, 17–25, doi:10.1016/j.biortech.2010.06.035.
 15. Harris, P. T. Biogeography, benthic ecology, and habitat classification schemes. *Seafloor Geomorphol. Benthic Habitat GeoHAB Atlas Seafloor Geomorphic Featur. Benthic Habitats* **2012**, 61–92.
 16. Kenny, A. J.; Sotheran, I. Characterising the physical properties of seabed habitats. *Methods Study Mar. Benthos Fourth Ed.* **2013**, 47–95.
 17. Malcolm, H. A.; Jordan, A.; Smith, S. D. A. Testing a depth-based Habitat Classification System against reef fish assemblage patterns in a subtropical marine park. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* **2011**, *21*, 173–185, doi:10.1002/aqc.1165.
 18. Pohle, G.; Iken, K.; Clarke, K. R.; Trott, T.; Konar, B.; Cruz-Motta, J. J.; Wong, M.; Benedetti-Cecchi, L.; Mead, A.; Miloslavich, P. Aspects of benthic decapod diversity and distribution from rocky nearshore habitat at geographically widely dispersed sites. *PLoS One* **2011**, *6*, e18606.
 19. Kendall, M. S.; Jensen, O. P.; Alexander, C.; Field, D.; McFall, G.; Bohne, R.; Monaco, M. E. Benthic Mapping Using Sonar, Video Transects, and an Innovative Approach to Accuracy Assessment: A Characterization of Bottom Features in the Georgia Bight. *J. Coast. Res.* **2005**, *216*, 1154–1165, doi:10.2112/03-0101R.1.
 20. Araújo, T. de; Seoane, J. C. S.; Coutinho, P. da N. Geomorfologia da plataforma continental de Pernambuco. *Ça EE Neumann-Leitão Costa MF Oceanogr. Um Cenário Trop. Recife Bagaço* **2004**, 39–57.
 21. Camargo, J. M. R.; Araújo, T. C. M.; Ferreira, B. P.; Maida, M. Topographic features related to recent sea level history in a sediment-starved tropical shelf:

- Linking the past, present and future. *Reg. Stud. Mar. Sci.* **2015**, 2, 203–211, doi:10.1016/j.rsma.2015.10.009.
22. Coutinho, P. N. Geologia marinha da plataforma continental Alagoas-Sergipe. Recife. 119p, Tese de Livre Docência. Universidade Federal de Pernambuco, 1976.
 23. Manso, V. A. V.; Valença, L. M. M.; Coutinho, P. N.; Guerra, N. C. Sedimentologia da Plataforma Continental. In *Oceanografia: um cenário tropical*; Bagaço, 2004.
 24. Laborel, J. On brazilian coral reefs.(summary). *An. Acadêmia Bras. Ciênc.* **1965**, 37.
 25. Dominguez, J. M. L.; Bittencourt, A.; Leão, Z.; Azevedo, A. E. G. Geologia do Quaternário costeiro do estado de Pernambuco. *Rev. Bras. Geociências* **1990**, 20.
 26. Maida, M.; Ferreira, B. P. Coral reefs of Brazil: an overview. In *Proceedings of the 8th international coral reef symposium*; 1997; Vol. 1, pp. 263–274.
 27. Costa, M. B. S. F.; Araújo, M.; Araújo, T. C. M.; Siegle, E. Influence of reef geometry on wave attenuation on a Brazilian coral reef. *Geomorphology* **2016**, 253, 318–327, doi:10.1016/j.geomorph.2015.11.001.
 28. Leão, Z. M. A. N.; Kikuchi, R. K. P.; Ferreira, B. P.; Neves, E. G.; Sovierzoski, H. H.; Oliveira, M. D. M.; Maida, M.; Correia, M. D.; Johnsson, R. Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. *Braz. J. Oceanogr.* **2016**, 64, 97–116, doi:10.1590/S1679-875920160916064sp2.
 29. Mabesoone, J. M. Origin and age of the sandstone reefs of Pernambuco (Northeastern Brazil). *J. Sediment. Res.* **1964**, 34.
 30. Laborel, J. *Madréporaires et hydrocoralliaires récifaux des cotes brésiliennes: systématique, écologie, répartition verticale et géographique*; Masson, 1970;
 31. Legendre, P.; Legendre, L. F. *Numerical ecology*; Elsevier, 2012; Vol. 24;.
 32. de Souza Pereira, P.; Calliari, L. J.; do Carmo Barletta, R. Heterogeneity and homogeneity of Southern Brazilian beaches: A morphodynamic and statistical approach. *Cont. Shelf Res.* **2010**, 30, 270–280.
 33. Banks, K. W.; Riegl, B. M.; Shinn, E. A.; Piller, W. E.; Dodge, R. E. Geomorphology of the Southeast Florida continental reef tract (Miami-Dade, Broward, and Palm Beach Counties, USA). *Coral Reefs* **2007**, 26, 617–633, doi:10.1007/s00338-007-0231-0.
 34. Finkl, C. W.; Warner, M. T. Morphologic features and morphodynamic zones along the inner continental shelf of southeastern Florida: an example of form and process controlled by lithology. *J. Coast. Res.* **2005**, 79–96.

35. Verfaillie, E.; Degraer, S.; Schelfaut, K.; Willems, W.; Van Lancker, V. A protocol for classifying ecologically relevant marine zones, a statistical approach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2009**, *83*, 175–185, doi:10.1016/j.ecss.2009.03.003.
36. Martins, G. M.; Patarra, R. F.; Álvaro, N. V.; Prestes, A. C. L.; Neto, A. I. Effects of coastal orientation and depth on the distribution of subtidal benthic assemblages. *Mar. Ecol.* **2013**, *34*, 289–297, doi:10.1111/maec.12014.
37. Banks, K. W.; Riegl, B. M.; Richards, V. P.; Walker, B. K.; Helmle, K. P.; Jordan, L. K.; Phipps, J.; Shivji, M. S.; Spieler, R. E.; Dodge, R. E. The reef tract of continental southeast Florida (Miami-Dade, Broward and Palm Beach counties, USA). *Coral Reefs USA* **2008**, 175–220.
38. McArthur, M. A.; Brooke, B. P.; Przeslawski, R.; Ryan, D. A.; Lucieer, V. L.; Nichol, S.; McCallum, A. W.; Mellin, C.; Cresswell, I. D.; Radke, L. C. On the use of abiotic surrogates to describe marine benthic biodiversity. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2010**, *88*, 21–32, doi:10.1016/j.ecss.2010.03.003.

3 Classificação do fundo marinho em uma plataforma continental tropical do nordeste do Brasil

3.1 Resumo

A partir de um conjunto de dados batimétricos foi realizada uma análise geomorfológica do fundo marinho da plataforma continental interna ao norte do Estado de Pernambuco. Foram adquiridos atributos de terreno como inclinação (*slope*) e índice de posicionamento bentônico (*Benthic Positioning Index* - BPI), necessários para classificar matematicamente as classes do fundo marinho dispostas na área de estudo. Com auxílio do *Benthic Terrain Modeler* (BTM) foram identificadas 8 classes de fundo marinho (ou estruturas bentônicas): planícies (65% da área), depressões (11% da área), topos de afloramentos rochosos (7% da área), encostas suaves (6% da área), superfícies planas em encostas (4% da área), pináculos locais em grandes áreas planas (4% da área), encostas íngremes (3% da área) e pináculos locais em depressões (menos de 1% da área). Posteriormente foi analisada a relação entre as classes de fundo encontradas e os sedimentos superficiais presentes na área. Observou-se que a ocorrência de grãos mais grossos está relacionada a presença de feições geomórficas mais expostas, como os topos de afloramentos rochosos. Além disso a ocorrência de grãos mais finos é vista em áreas mais planas e em depressões. Os resultados obtidos demonstram a heterogeneidade do terreno e foram utilizados como forma de espacializar a distribuição potencial de habitats marinhos bentônicos na área de estudo.

Palavras-chave: Bathymetric Position Index (BPI); Benthic Terrain Modeler (BTM); Sedimentos superficiais; Batimetria monofeixe; Plataforma tropical; Brasil.

3.2 Introdução

Habitats marinhos bentônicos são áreas fisicamente distintas do fundo do mar que estão associadas à espécies ou comunidades que ocorrem constantemente juntos [1]. Podem ser classificados, também, como áreas (geo)estaticamente diferentes dos seus arredores em características físicas, químicas e biológicas [2], quando observadas em escalas espaciais e temporais particulares [2,3]. Estas áreas podem ainda, serem definidas como paisagens marinhas [4].

Organismos apresentam adaptações distintas aos habitats em que vivem, relacionando-se a tipos específicos de substratos e posições topográficas [5]. Assim, o

estabelecimento de habitats bentônicos está condicionado às características morfossedimentares do ambiente [6].

Atributos de terreno apresentam uma série de relações com a distribuição de organismos em diferentes tipos de ambientes, rotineiramente integrados em estudos ambientais ao redor do mundo [7], com grande lacuna no Oceano Atlântico Tropical [1].

Estes atributos podem ser derivados de modelos batimétricos digitais (MBD) [8]. Uma vez adquiridos podem ser utilizados na descrição de habitats em uma determinada região [9]. Através de um conjunto de algoritmos padrão, esses produtos e as relações entre eles podem ser examinados para classificar paisagens bentônicas [10].

Investigar a relação espécie-ambiente é importante para o mapeamento de habitats, para classificação biogeográfica, conservação e gerenciamento dos habitats marinhos [1]. A seleção de áreas marinhas protegidas baseadas em locais de maior complexidade morfológica, é mais significativa que sua eleição aleatória [11].

Com base em dados batimétricos [12], realizou-se uma classificação geomorfológica para a plataforma continental interna (PCI) ao norte do Estado de Pernambuco, aliando-a com dados de sedimentos.

Assim, investigou-se as relações existentes entre morfologia e a distribuição de sedimentos superficiais, com o objetivo de estabelecer, preliminarmente, a espacialização potencial dos habitats bentônicos presentes na área de estudo.

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo (91 km²) está localizada na plataforma continental interna entre os municípios de Paulista e Olinda, setor norte do Estado de Pernambuco. Ao norte possui como limite o norte do município de Paulista e ao sul a área portuária Recife (Fig. 13).

As características da plataforma continental pernambucana são reflexo do baixo aporte sedimentar continental, do clima Tropical predominante [13] e tectonismo [14], bem como da baixa taxa de erosão terrestre e sedimentação marinha [15], ao passo que sua profundidade superficial é relacionada à ineficiência dos processos marinhos nos últimos períodos geológicos [16].

Tal plataforma possui 34 km de largura média, apresentando-se rasa até 60m de profundidade, onde inicia-se o talude [17]. Adotando a divisão de [18], a pesquisa a ser

realizada abrange a área da plataforma continental interna pernambucana (até a isobáta de 20m).

Sua topografia inclui tanto feições positivas quanto negativas (bancos recifais de várias origens, canais, entre outros), sendo o micro relevo encontrado, uma resposta direta do fundo marinho às condições hidrodinâmicas reinantes [17].

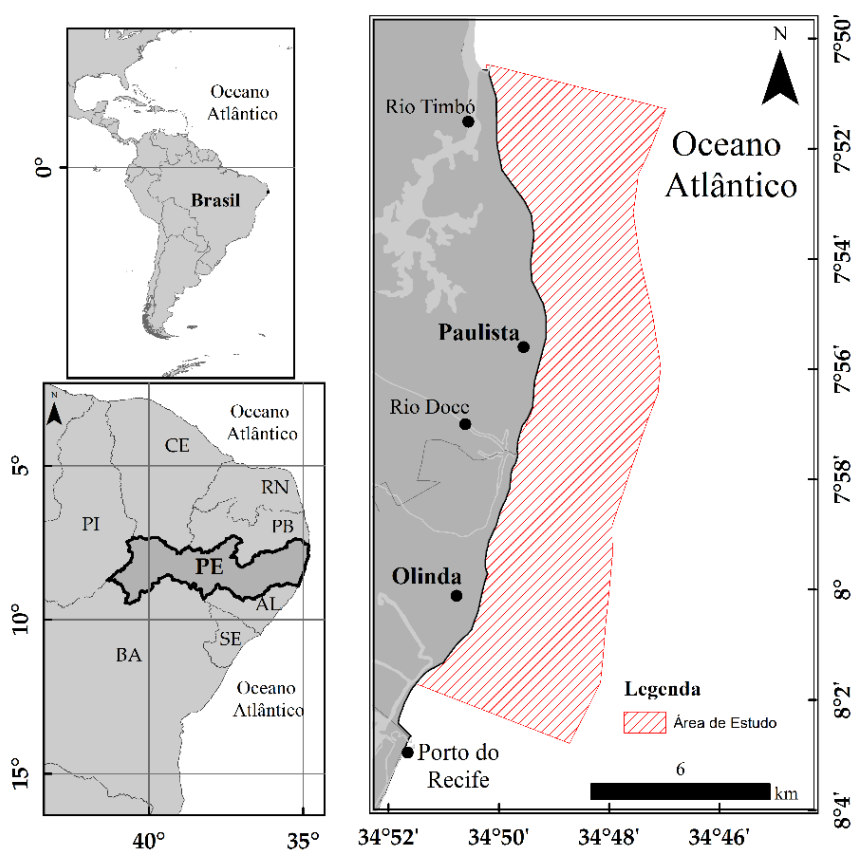


Figura 13 – Localização da área de estudo.

3.3 Material e métodos

A seguir, são descritas as diferentes variáveis topográficas necessárias para classificar a geomorfologia da PCI ao norte do estado de Pernambuco. Dados batimétricos pretéritos, adquiridos no âmbito do Projeto MAI [12], foram utilizados como base para aquisição de atributos de terreno tais como inclinação (*slope*) e o Índice de Posicionamento Bentônico (*Benthic Positioning Index* - BPI). Tais parâmetros são necessários para uma identificação matemática/estatística das classes do fundo marinho (*seabed classes*), aqui analisadas em conjunto com amostras de sedimentos superficiais.

3.3.1 Dados batimétricos

O banco de dados utilizado neste trabalho é composto de dados batimétricos hidroacústicos, adquiridos no âmbito do Projeto MAI. A aquisição do mesmo foi realizada com a utilização de uma ecossonda monofeixe, de 200 kHz (*Garmin 298* com uma antena GPS para navegação e posicionamento), a uma taxa de sondagem de três segundos [12]. Os 110 perfis foram escolhidos para este estudo (Fig. 14) foram coletados desde a linha de costa até a isobáta de 20 m, resultando em 55.102 pontos. Esses perfis são perpendiculares ao eixo principal da costa e possuem espaçamento entre si de 200m [12].

Sabe-se que o uso de ecossondas multifeixe, com maiores taxas de amostragem que as monofeixe, oferece uma maior resolução da morfologia do fundo marinho. Contudo, até o momento, os dados de ecossondas multifeixe não estão disponíveis para esta área.

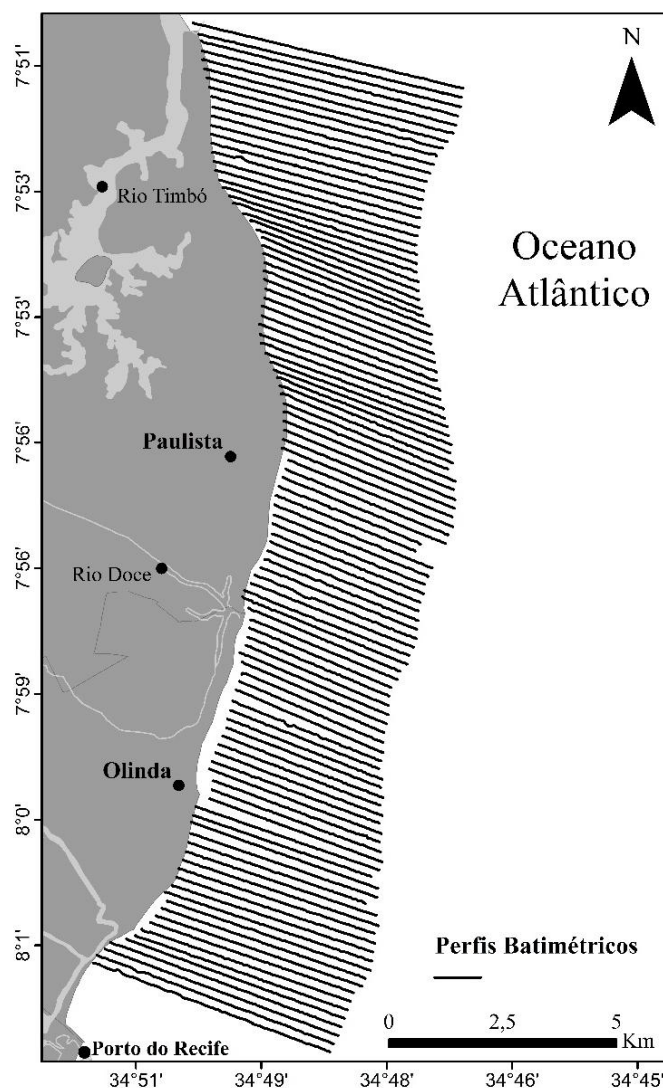


Figura 14 – Localização dos perfis batimétricos utilizados neste estudo.

Neste conjunto de dados foram realizados os devidos tratamentos, incluindo a correção da maré (com base na maré para o Porto do Recife) e a correção da localização do transdutor [12].

Após o tratamento, os dados foram agrupados e submetidos à interpolação pelo método *vizinho natural*. Este interpolador foi utilizado por apresentar bom desempenho quando empregado em bases de dados de densidade de pontos não uniforme [19].

O Modelo Batimétrico Digital (MBD) foi gerado com tamanho de célula de 10m. Este tamanho de célula foi escolhido por ser o que melhor retratou as condições existentes nos perfis batimétricos. Outros testes foram realizados, com células de 20, 40 e 100m, nos quais foi observado perda de resolução, ao se comparar a superfície interpolada aos perfis batimétricos da área. Para confecção do MBD utilizou-se o ArcGIS® v.10.3 (*versão Trial*) como software.

O conjunto de dados foi utilizado, ainda, para escolher os perfis batimétricos representantes dos grupos geométricos de relevo da área [20]. Ao longo destes perfis foram adquiridas amostras sedimentológicas, referidas a seguir.

3.3.2 Variáveis de terreno derivadas dos dados batimétricos

Com base no conjunto de dados batimétricos, foi confeccionado o MBD para a área de estudo. A partir deste modelo foram derivados atributos de terreno (*slope*, BPI em fina e ampla escalas), a partir da extensão *Benthic Terrain Modeler* (BTM) para ArcGIS® (versões 10.x), que compreende um conjunto de algoritmos para classificações dos fundos marinhos com base em dados batimétricos [21].

O BTM foi desenvolvido pelo Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Oregon em colaboração com o Programa de Integração e Desenvolvimento SIG do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) [21,22].

Define-se *slope* como gradiente em direção à inclinação máxima do assoalho oceânico [23]. Expresso em graus, é compreendido como um atributo de terreno fundamental à análise do fundo marinho, já que a inclinação do terreno exerce influência sobre as correntes, influenciando a taxa de erosão em determinada área e possibilitando adequações distintas a distribuição da fauna [24].

Para a classificação morfológica do fundo marinho, o *slope* foi utilizado no dicionário de classificação para distinguir os limiares entre planícies (*flat plains*) (até 1 grau de inclinação), encostas suaves (*gentle slopes*) (1 a 5 graus de inclinação), encostas

íngremes (*steeps slopes*) (maiores que 5 graus de inclinação) e pináculos locais em grandes áreas planas (*local pinnacles on broad flat*) (até 1 grau de inclinação).

O BPI é uma medida de elevação relativa da paisagem marinha geral. Ele calcula, em escalas definidas pelo usuário, um comparativo entre a elevação de uma célula focal do MBD em relação à elevação média do número de células circundantes [10,23].

As grades resultantes, criadas a partir do conjunto de dados batimétricos, pela aplicação de algoritmos que utilizam uma função focal, produzem um raster de saída onde a elevação de uma célula é comparada às células circundantes dentro de uma área definida, em forma de anel, com valores de raios interno e externo [10,22,25].

Assim, valores negativos de BPI significam que células focais apresentam valores menores que as células circundantes, configurando estruturas como vales. Já valores positivos de BPI significam que células focais apresentam valores maiores que suas circundantes, configurando estruturas como cristas. Valores de BPI próximos de zero estão relacionados à áreas planas ou de declive constante [22].

Para obtenção do BPI em ampla e fina escalas, as entradas utilizadas em estudos anteriores [10,23] foram adequadas afim de atender os requisitos da morfologia da PCI ao norte do Estado de Pernambuco. Para escala fina, usou-se um raio interno de 10 m e um externo de 25 m. Já para a escala ampla, utilizou-se um raio interno de 10 m e um externo de 100 m.

Para evitar a autocorrelação espacial, as grades geradas para BPI escalas ampla e escala fina foram standardizadas antes de gerar a classificação final da geomorfologia da área de estudo [10].

3.3.3 Classificação geomorfológica

A classificação da geomorfologia foi baseada na análise conjunta entre batimetria, escala ampla e escala fina do Índice de Posicionamento Bentônico (*Bathymetric Position Index* - BPI), *slope* e um dicionário de classificação contendo definições para entrada dos dados.

O dicionário de classificação necessário à identificação das classes de fundo é apresentado na Tabela 3. Este dicionário baseia-se em dicionários anteriormente utilizados nas publicações de [10,23] e foi adaptado para a área de estudo.

ID	Classificações de fundo marinho	BPI Escala Ampla		BPI Escala Fina		Slope	
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
1	Planícies	-100	100	-100	100		1
2	Depressões	-100	100		-100		
3	Encostas suaves	-100	100	-100	100	1	5
4	Encostas íngrimes	-100	100	-100	100	5	
5	Superfícies planas em encostas	100		-100	100		
6	Topos de afloramentos rochosos	100		100			
7	Pináculos locais em depressões	100			-100		
8	Pináculos locais em grandes áreas planas	-100	100	100			1

Tabela 3 – Dicionário de classificação que resume os fatores utilizados para a definição de classes do fundo marinho na PCI ao norte do Estado de Pernambuco.

As classes do fundo marinho foram identificadas a partir da combinação de quatro rasters de atributos de terreno (batimetria, *slope*, BPIs em escala fina e ampla), de acordo com o Dicionário de Classificação. Esse dicionário tem por função definir as propriedades geomórficas da área. O resultado do BTM descreve, estatisticamente, as classes do fundo marinho, desconsiderando processos geológicos ou biológicos [23].

Cabe salientar que, como a área é delimitada à isobáta de 20 m, as classes de fundo não foram diferenciadas com base na profundidade. Contudo, banco de dados que possuam maiores diferenças no gradiente de profundidade podem ter distinções expressas com base na profundidade [10].

3.3.4 Caracterização sedimentar das classes do fundo marinho

O banco de dados da amostragem dos sedimentos superficiais utilizado neste estudo consiste em 194 amostras (Fig.15). Destas, 133 são oriundas do Projeto MAI [12], 4 do Projeto MAPLAC [26], e 57 foram recentemente adquiridas, em duas campanhas realizadas entre os anos de 2016 e 2017. Destas, 29 estão localizadas em perfis representantes de grupos geométricos do relevo da área [20]. Ambas coletas foram realizadas com amostrador do tipo “*Van Veen*”, entre a linha de costa e a isobáta de 20m, em embarcação propícia à coleta em pequenas profundidades.

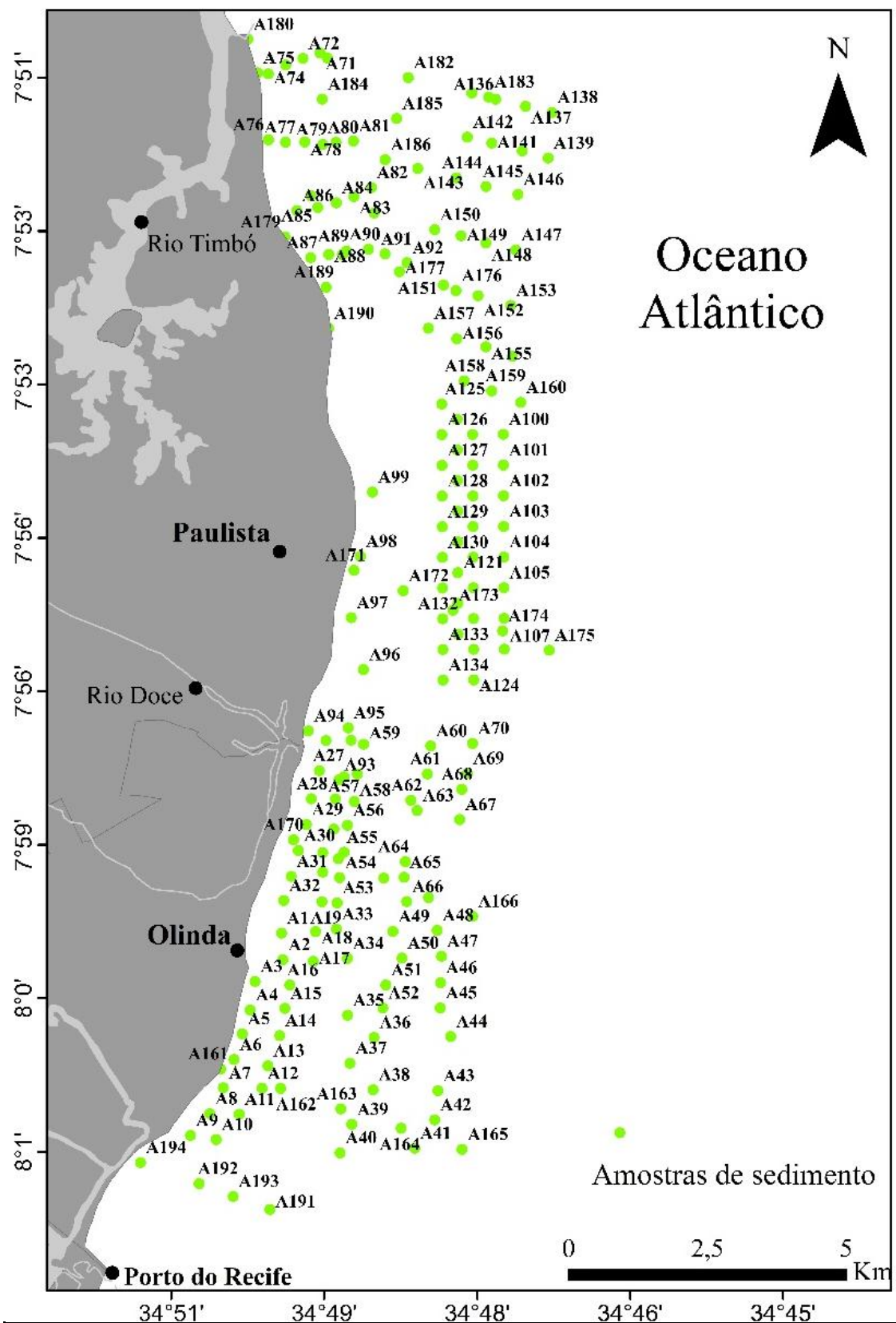


Figura 15 – Localização das amostras de sedimentos superficiais coletadas na área de estudo.

As amostras adquiridas durante os projetos MAI e MAPLAC foram analisadas no Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), bem como no Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha (LGGM) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) [12]. Já as amostras recém-adquiridas foram analisadas apenas no LABOGEO.

Ambas análises seguiram a metodologia proposta por Suguio [27], com peneiramento úmido e seco. Os resultados foram analisados com o auxílio do software SysGran e classificados de acordo com Folk e Ward [28].

Para estipular diâmetro médio dos grãos e os percentuais dos componentes (cascalho, areia e lama) presentes nas amostras adaptou-se os resultados obtidos através do software citado à classificação de Schlacher [29], constante na Tabela 4.

Tipo de Sedimento	Tamanho do Grão
Rocha	> 3mm
Pedregulhos e Cascalhos	3mm – 2mm
Areia Grossa	2mm – 0,5mm
Areia Média	0,5mm – 0,25mm
Areia Fina	0,25mm – 0,062mm
Lama	< 0,062

Tabela 4 - Classificação dos tipos de substratos, adaptado de Schlacher [29].

Com o objetivo de correlacionar as classes do fundo marinho com a composição sedimentar de superfície, foram calculados os percentuais de lama (silte + argila), areia e cascalho de todas as amostras localizadas ao longo dos perfis representantes de grupos geométricos da área de estudo.

3.4 Resultados

3.4.1 Distribuição das classes do fundo marinho

Baseado nos rasters de batimetria (Fig. 16), *slope* (Fig. 17), BPIs escala ampla (Fig. 18) e fina (Fig. 19), e com o auxílio do dicionário de classificação (Tab. 3), foram reconhecidas 8 classes de fundos marinhos na PCI ao norte do Estado de Pernambuco (Fig. 20). Inclui depressões, planícies, pináculos, afloramentos e encostas. Os resultados advindos do processo metodológico empregado neste estudo fornecem um reconhecimento inédito dos padrões do relevo da área de estudo [22].

A partir do modelo batimétrico digital (MBD) é possível observar a grande heterogeneidade que compõe a área de estudo. A alternância nas características geomórficas na área é atribuída à ocorrência de bancos recifais e canais. Na região setentrional da área de estudo observa-se a presença de recifes ligados à costa, com ausência de canais nos primeiros 3.000 m próximos à costa. Já o setor central da área é marcado por expressivas alterações ao longo do gradiente de profundidade, com a presença de dois bancos recifais, não ligados à costa, com ocorrência de canais.

Após estas feições, observou-se um setor com pequenas alterações no gradiente de profundidade, com presença de pequenas manchas de relevos positivos. No setor sul da área de estudo há novamente a ocorrência de bancos recifais, agora com aparência mais descontínua do que os encontrados na porção central da área de estudo.

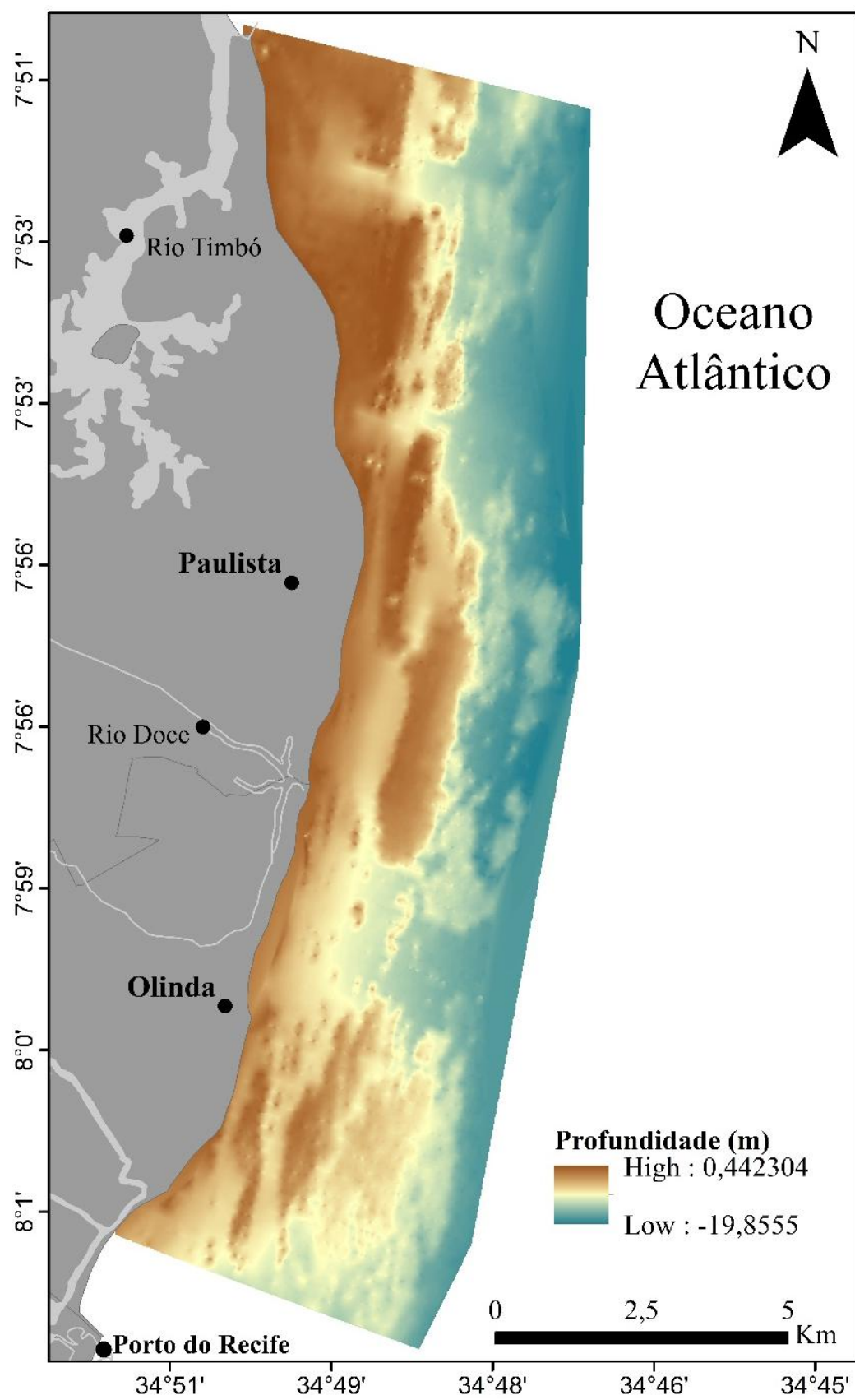


Figura 16 – Modelo batimétrico digital (MBD) para área de estudo.

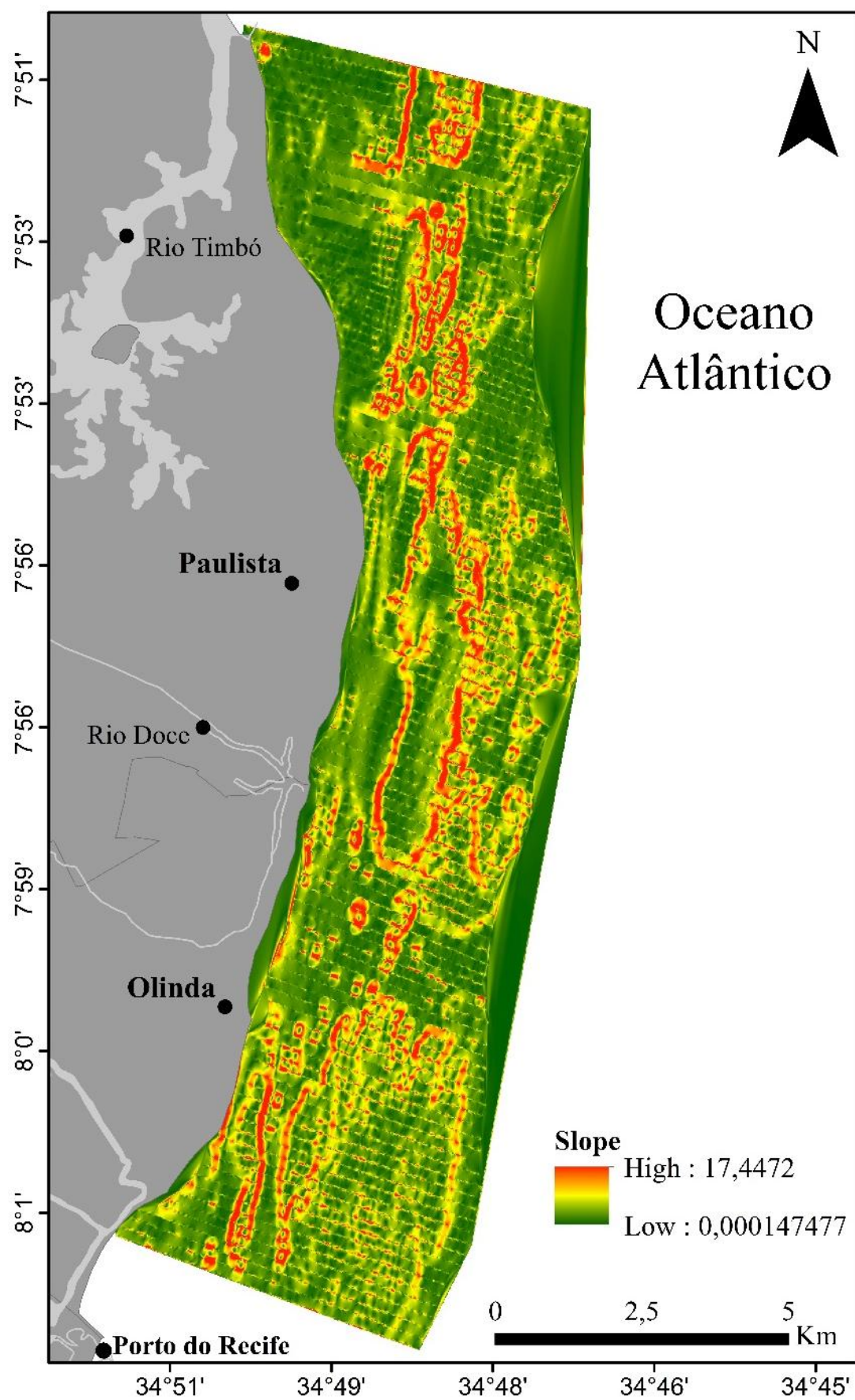


Figura 17 – Slope derivado do MBD para área de estudo.

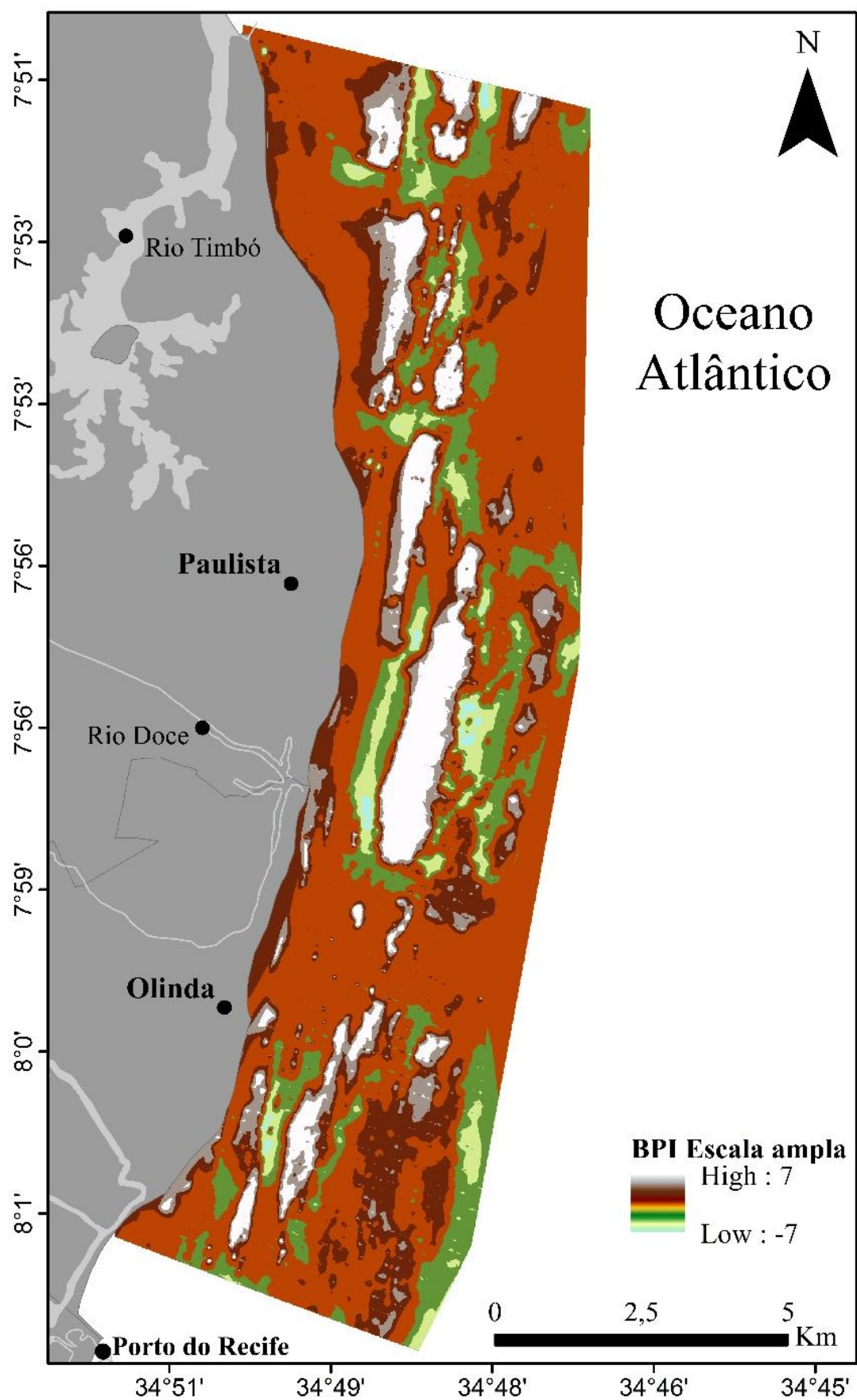


Figura 18 – BPI, escala ampla, derivado do MBD para área de estudo.

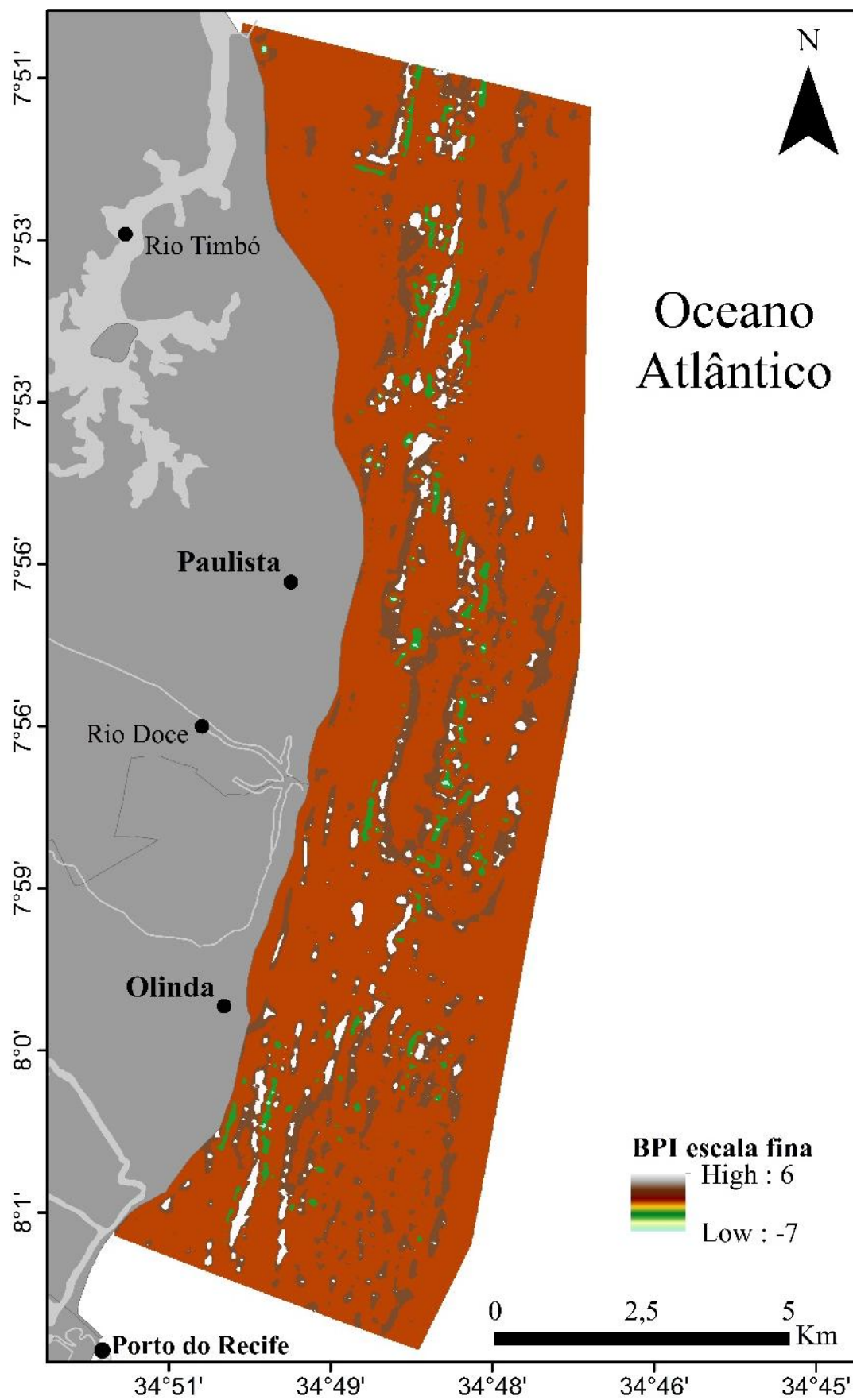


Figura 19 – BPI, escala fina, derivado do MBD para área de estudo.

Observa-se que as mudanças mais acentuadas no *slope* (Fig. 17) ocorrem nas áreas de maiores alternâncias na profundidade, delineando ocorrência dos relevos positivos e negativos.

A partir do BPI escala ampla (Fig.18) são ressaltadas as feições maiores da paisagem marinha da área. Observa-se a demarcação dos recifes e dos canais, onde as diferenças matematicamente mais altas (7) coincidem com os primeiros, enquanto as mais baixas (-7) com os segundos, em comparação à figura 16.

O BPI escala fina (Fig. 19) ressalta as diferenças mais sutis existentes na área de estudo, mostrando os setores circundantes às grandes feições, seja recifes ou canais, demarcando os limites entre estas e os setores planos da paisagem marinha.

A classificação da paisagem marinha (Fig. 20) foi descrita com o auxílio do dicionário de classificação (Tab. 3), do tamanho da área ocupada e da área ocupada por cada classe de fundo marinho em km² (Tab. 5):

1. As depressões (*depressions*), definidas como pontos baixos no terreno, com valores negativos de BPI, ocupam 11% da área de estudo, cerca de 10 km².

2. As planícies (*flat plains*), definidas como pontos planos no terreno, com valores de BPI próximos de zero, que estão dentro do desvio padrão da média, com inclinação suave (até 1 grau de inclinação), ocupam 65% da área de estudo, cerca de 59 km². Estas áreas possuem poucas características ressaltadas pelo BPI de escala fina.

3. As superfícies planas em encostas (*flat ridge tops*) são áreas onde as características de larga escala apresentam-se mais altas que o entorno, em que as estruturas de escala fina são planas ou de inclinação suave. Estes setores ocupam 4% da paisagem total, cerca de 3 km².

4. As encostas suaves (*gentle slopes*) são zonas de relevo mais simples, sem alternância entre áreas côncavas e convexas. Possuem BPI próximo de zero, dentro do desvio padrão da média, com inclinação variando entre 1 e 5 graus. Estes setores ocupam 6% da paisagem total, cerca de 5 km².

5. Os pináculos locais em depressões (*local pinnacles in depressions*) são compreendidos como cristas estreitas dentro de um terreno afundado, representado pelo BPI de escala fina, considerados como pontos altos no terreno com valores de BPI

positivos superiores a um desvio padrão da média na direção positiva. Estas regiões ocupam menos de 1 km² da área de estudo.

6. Os pináculos locais em grandes áreas planas (*local pinnacles on broad flats*) correspondem à cristas estreitas dentro de um terreno plano mais amplo descrito pela BPI de escala fina, e assim como os pináculos locais em depressões são considerados como pontos altos no terreno com valores de BPI positivos superiores a um desvio padrão da média na direção positiva. Tais áreas ocupam 4% da paisagem total, cerca de 3 km².

7. Os topos de afloramentos rochosos (*Rock outcrop highs*), também entendidos como pontos altos no terreno com valores de BPI positivos superiores a um desvio padrão da média na direção positiva, são áreas onde tanto as características de escala fina como ampla no terreno são mais altas do que os arredores. Ocupam 7% da paisagem total, cerca de 6 km².

8. As encostas íngremes (*Steep slopes*) são amplas encostas, de BPI próximo de zero, dentro do desvio padrão da média, com valores de inclinação maior que 5 graus. Estão presentes em pouco mais de 3% da área, cerca de 3 km².

Classes de Fundo	Nº de Amostras	Área (km²)	Área (%)
Depressões	38	10,44	11
Planícies	99	59,05	65
Superfícies planas em encostas	5	3,58	4
Encostas suaves	18	5,30	6
Pináculos locais em grandes áreas planas	11	3,38	4
Topos de afloramentos rochosos	9	6,13	7
Encostas íngremes	14	3,09	3
Pináculos locais em depressões	0	0,0038	0

Tabela 5 – (Coluna 1) Classes de fundo marinho. (Coluna 2) Número de amostras de sedimento por classe de fundo marinho. (Coluna 3) Área ocupada por cada classe de fundo. (Coluna 4) Área ocupada por cada classe de fundo em percentual.

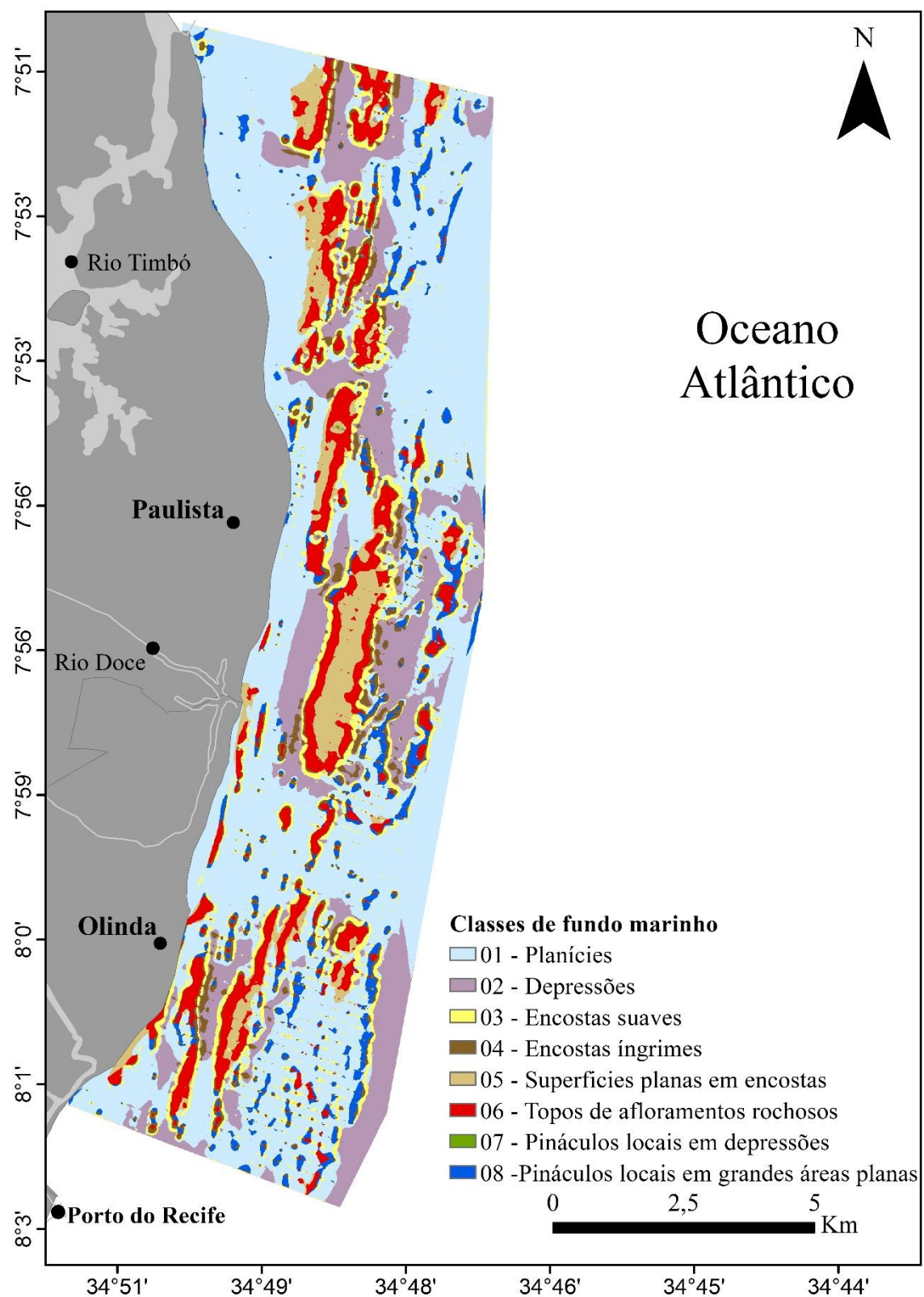


Figura 20 – Mapa da distribuição potencial de habitats marinhos bentônicos para a plataforma continental interna ao norte do Estado de Pernambuco, a partir do *surrogate* abiótico “Classes de fundo marinho”.

3.4.2 Associação entre classes de fundo e composição superficial de sedimentos (diâmetro médio do grão)

Os dados de sedimentos existentes (Fig. 15) foram utilizados para calcular a composição média do sedimento superficial (Fig. 21). As composições resultantes, de acordo com Schlacher [29], foram correlacionadas com as classes do fundo marinho.

Além disso, foram coletadas novas amostras de sedimentos superficiais ao longo dos perfis representantes dos grupos geométricos de relevo presentes na área de estudo, segundo o estudo proposto por Goes *et al.* [20], afim de estipular os teores de cascalho, areia e lama (silte+argila), segundo a classificação de Schlacher [29], ao longo dos perfis.

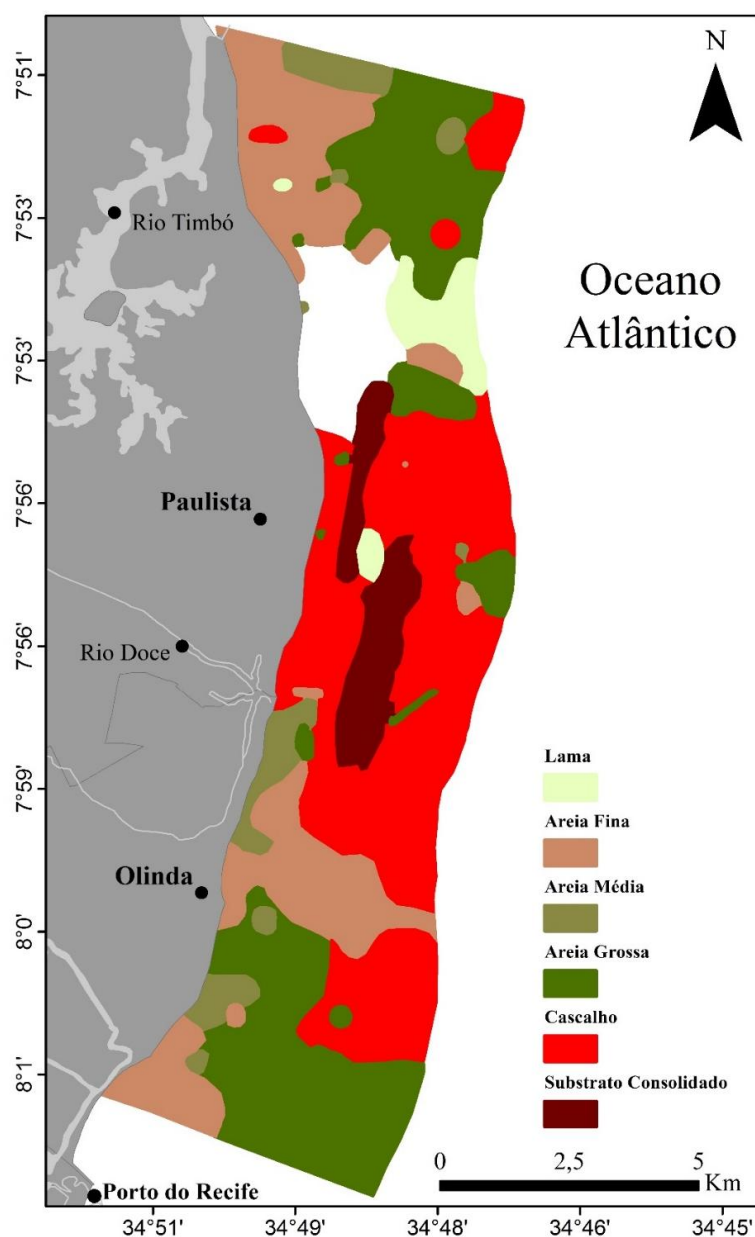


Figura 21 – Mapa de substratos de acordo com o diâmetro médio dos grãos.

Quanto a relação entre o diâmetro médio dos grãos das amostras de sedimentos superficiais e as classes de fundo, é possível observar que nas áreas de depressões estão dispostas 38 amostras (Fig. 22). Destas, 17 correspondem a cascalho, 10 à areia grossa, 5 a areia média, 3 a areia fina e 3 amostras a lama. Nos setores de planície da área de estudo estão dispostas 99 amostras, sendo a maioria, 29 amostras, correspondentes a areia fina. Neste setores encontram-se também amostras de areias grossa (24) e média (10), outras amostras de cascalho (21) e lama (15).

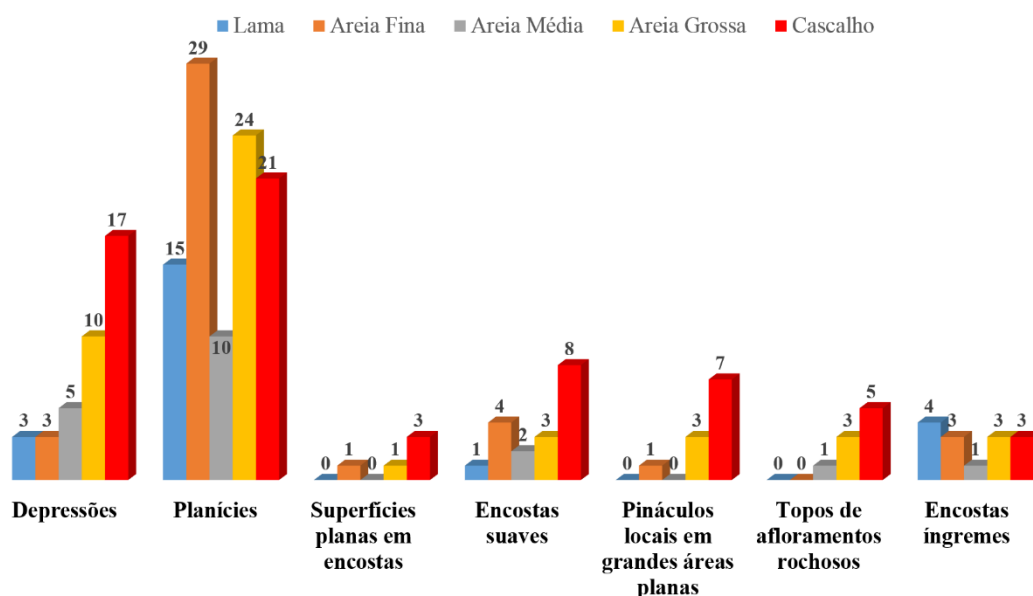


Figura 22 – Relação entre o diâmetro médio do grão e as classes de fundo marinho. O número corresponde ao quantitativo de amostras coletadas.

As superfícies planas em encostas contam 5 amostras, sendo a maioria de cascalho (3), além de 1 amostras de areia grossa e outra de areia fina. Já nas encostas suaves encontram-se 18 amostras de sedimento, compostas por 1 amostras de lama, 4 de areia fina, 2 de areia média, 3 de areia grossa e novamente predominância de cascalho, com 8 amostras.

Os pináculos locais em grandes áreas planas apresentam 11 amostras. Destas 7 são de cascalho, 3 de areia grossa e 1 de areia fina, sem a presença de amostras de lama e areia média.

Nos topos de afloramentos rochosos encontram-se 9 amostras, sendo 5 de cascalho, 3 de areia grossa e 1 de areia média. Já nas encostas íngremes encontram-se

14 amostras, destas, 4 são de lama. Areias fina e grossa contam com 3 amostras cada e 1 amostras corresponde a areia fina. Outras 3 amostras correspondem a cascalho.

A classe de fundo dos pináculos locais em depressões não foi amostrado.

3.4.3 Associação entre classes de fundo e composição superficial de sedimentos (teores dos componentes cascalho, areia e lama)

Além de analisar a relação entre o diâmetro médio dos grãos presente nas amostras existentes e a disposição das classes de fundo, realizou-se a análise qualitativa (Tab. 6) entre os percentuais dos componentes (cascalho, areia e lama) em amostras coletadas sobre perfis representantes de grupos geométricos de relevo (Fig. 23) descritos por Góes *et al.* [20].

	Amostras	Tamanho médio do grão	% Cascalho	% Areia	% Lama	Classe de fundo
Grupo A	A135	Areia Grossa	10,32	89,51	0,17	Encostas suaves
	A136	Cascalho	100,00	0,00	0,00	Planícies
	A137	Areia Grossa	66,60	33,30	0,10	Planícies
	A138	Cascalho	100,00	0,00	0,00	Pináculos locais em grandes áreas planas
	A180	Areia Fina	0	99,66	0,34	Encostas suaves
	A181	Areia Grossa	4,36	94,94	0,70	Planícies
	A182	Areia Média	1,397	97	1,61	Encostas suaves
	A183	Areia Grossa	25,69	74,11	0,20	Planícies
Grupo C	A147	Areia Grossa	44,82	54,11	1,07	Pináculos locais em grandes áreas planas
	A148	Cascalho	100,00	0,00	0,00	Pináculos locais em grandes áreas planas
	A149	Areia Grossa	5,586	94,24	0,17	Depressões
	A150	Areia Grossa	2,931	95,32	1,74	Encostas suaves
	A187	Lama	0,1256	38,64	61,24	Planícies
	A188	Areia Fina	1,939	95,29	2,77	Superfícies planas em encostas
Grupo D	A171	Areia Grossa	19,08	80,67	0,25	Planícies
	A172	Lama	4,386	36,69	58,93	Depressões
	A173	Cascalho	100,00	0,00	0,00	Topos de afloramentos rochosos
	A174	Areia Fina	3,15	63,64	33,21	Depressões
	A175	Areia Grossa	39,45	60,41	0,14	Depressões
Grupo B	A166	Areia Grossa	25,17	74,64	0,18	Planícies
	A167	Lama	0,14	16,85	83,02	Planícies
	A168	Areia Grossa	14,01	85,79	0,20	Topos de afloramentos rochosos
	A169	Lama	0,28	30,80	68,92	Planícies
	A170	Areia Média	1,05	98,20	0,75	Planícies
Grupo C	A161	Areia Média	1,417	97,84	0,74	Topos de afloramentos rochosos
	A162	Areia Grossa	4,66	95,27	0,07	Encostas suaves
	A163	Cascalho	100,00	0,00	0,00	Planícies
	A164	Cascalho	100,00	0,00	0,00	Encostas suaves
	A165	Areia Grossa	0,27	99,47	0,27	Depressões

Tabela 6 – (Coluna 1) Perfis representantes dos grupos geométricos presentes na área de estudo. (Coluna 2) Amostras de sedimentos superficiais em cada perfil representante. (Coluna 3)

Tamanho médio do grão presente nas amostras. (Coluna 4, 5 e 6) Percentuais de cascalho, areia e lama presentes nas amostras. (Coluna 7) Classes de fundo marinho sob cada amostra de sedimento superficial.

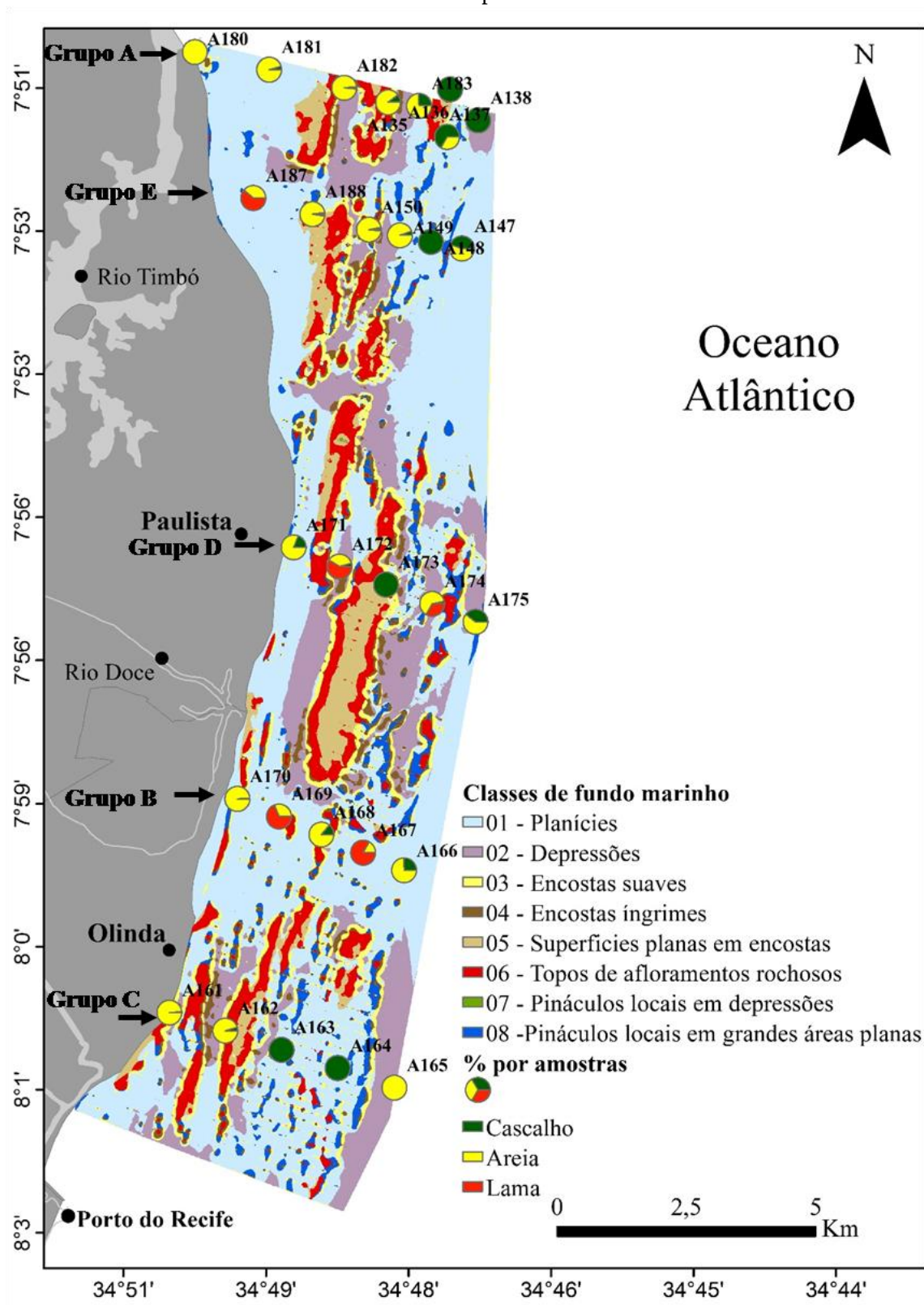


Figura 23 – Amostras de sedimento localizadas ao longo dos perfis representativos dos grupos morfológicos da área de estudo, com percentuais de cascalho, areia e lama.

Observa-se no perfil representante do Grupo A a predominância de areia mais próxima à costa, com aumento gradativo do diâmetro médio para cascalho, à medida em que a profundidade e a distância da costa aumentam (Tab. 6). Este grupo geométrico de relevo apresenta condições homogêneas até os 3.500 m de distância da costa, onde a classe de fundo corresponde à planície (Fig. 24).

Há ausência de amostragem na área de depressão (Fig. 23) entre os 3.500 m e 5.000 m de distância da costa. Logo depois dessa área, observa-se um setor de pináculos em grandes áreas planas (Fig. 23/Fig. 24), cuja amostragem condiz com 100% de cascalho (A138). A partir dos 5.000 m de distância da costa, inicia-se uma alternância entre classes de BPI positivos e negativos, compostas por encostas íngremes e suaves, topo de afloramento, pequena planície e posterior depressão (Fig. 23).

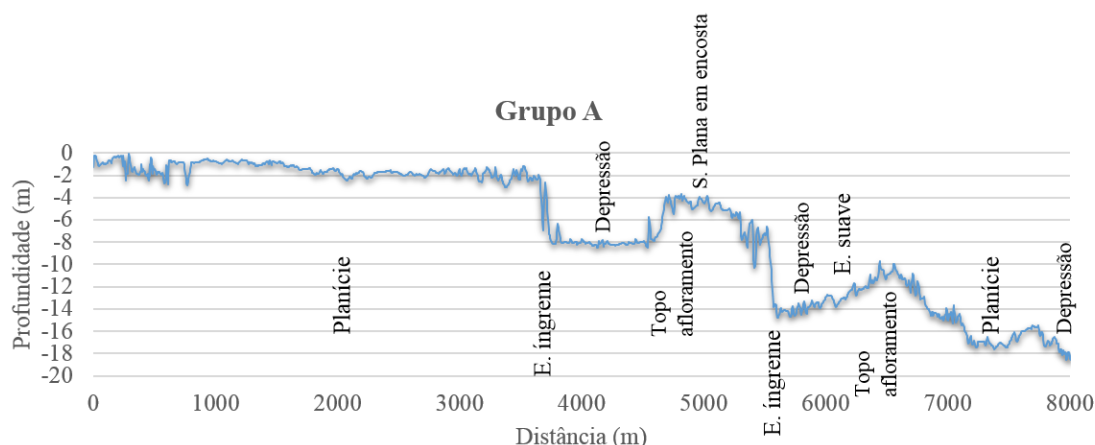


Figura 24 – Grupo geométrico de relevo A e suas classes de fundo.

No perfil representante do Grupo E (Fig. 25), observa-se uma configuração da distribuição de sedimentos parecida com a do grupo anterior (Grupo A). Contudo, a primeira amostra, localizada numa planície um pouco mais profunda que a do Grupo A, possui composição mais fina (A187/Tab. 6), com 61% de teor de lama.

Observa-se também um gradativo aumento do diâmetro médio à medida em que a profundidade e a distância da coata aumentam. Contudo a amostra 147, localizada em área de pináculos em áreas planas, apresenta um decréscimo no teor de cascalho (44%), se comparada a amostra 138 que possui 100% de teor de cascalho.

Neste perfil pode-se observar uma alternância menor de classes de fundo com BPI positivo e negativo que o perfil anterior, sendo os topos de afloramentos rochosos as alternâncias mais proeminentes.

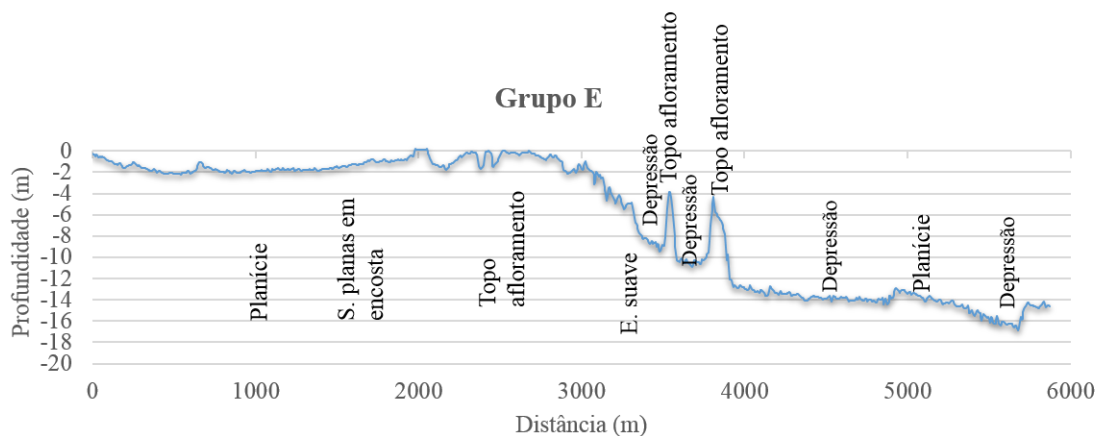


Figura 25 – Grupo geométrico de relevo E e suas classes de fundo.

O perfil representante do Grupo D (Fig.26) conta com configurações na distribuição de sedimentos e na disposição geomorfológica distintas dos grupos anteriores. Apresenta variações entre BPI positivo e negativo desde a costa até os 4.000m de distância da costa. Há, claramente, alternância entre encostas, topos de afloramentos rochosos e depressões (Fig. 26). A amostra A171 apresenta teores de cascalho (19,08%) e areia (80,67%), com localização na classe de fundo planície. A próxima amostra (A172) encontra-se num setor de depressão e apresenta um alto teor de lama (58,91%). A amostra A173, localizada em um topo de afloramento, apresenta 100% de teor de cascalho. Já as demais amostras localizadas no perfil apresentam teores de areia maiores (Tab. 6), ambas localizadas sobre depressões.

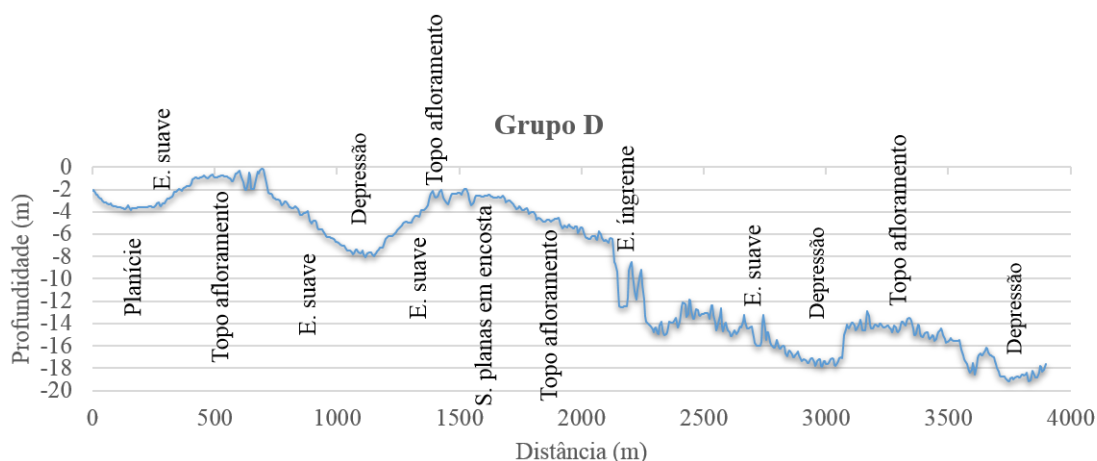


Figura 26 – Grupo geométrico de relevo D e suas classes de fundo.

O Grupo B (Fig. 27) é quase que por completo, classificado em planícies, com poucas exceções nos topos de afloramentos rochosos, ou seja, apresenta pouca alternância entre classes de BPI positivos e negativos. A amostra mais próxima à costa (A166), localizada sobre a classe de planícies, apresenta um alto teor de areia (74%). A amostra A167, também localizada sobre setor de planície, porém de maior inclinação, apresenta um alto teor de lama (83,02%). A próxima amostra (A168), localizada sobre um topo de afloramento, volta a apresentar alto teor de areia (85,79%), com 14% de teor de cascalho. A amostra A170 volta a apresentar alto teor de lama (68,92%), presente sobre a classe de fundo planície. A alternância entre os teores volta a ocorrer na amostra mais distante da costa, onde o teor de areia volta a ser o mais proeminente (98,20%).

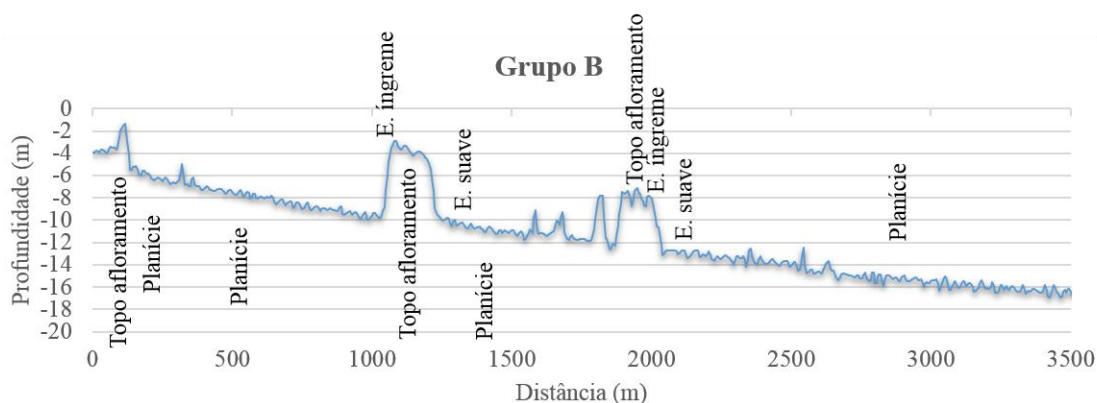


Figura 27 – Grupo geométrico de relevo B e suas classes de fundo.

O grupo geométrico C (Fig.28) apresenta alternância entre os valores de BPI positivos e negativos, apresentando menores alterações na profundidade que os anteriores B e D. Os teores de cascalho, areia e lama de suas amostras variam entre areia e cascalho. A amostra A161, mais próxima à costa, sobre um topo de afloramento apresenta 97% de teor de areia. A próxima (A162), sobre uma encosta suave, apresenta 95,27% de teor de areia. A amostra A163, sobre uma planície mais acidentada que as descritas anteriormente, apresenta 100% de cascalho em sua composição. A A164, localizada sobre a classe encostas suaves, também apresenta 100% de cascalho em sua composição. A A165, mais distante da costa, alocada sobre uma depressão volta a apresentar alto teor de areia (99,47%).

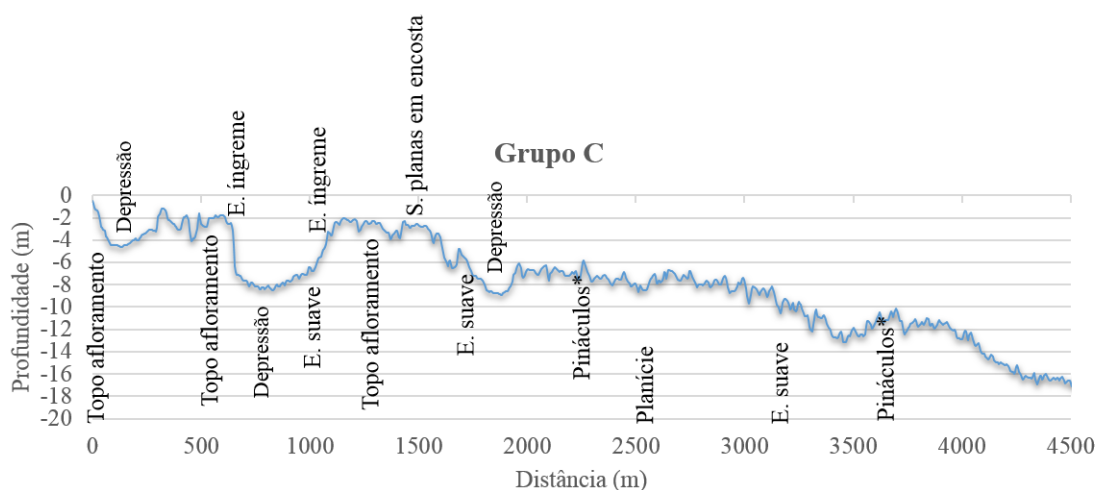


Figura 28 – Grupo geométrico de relevo C e suas classes de fundo. (*) Pináculos locais em grandes áreas planas.

3.5 Discussão

As 8 classes de fundos marinhos (ou estruturas bentônicas) que ocorrem na PCI ao norte do Estado de Pernambuco destacam a heterogeneidade e a diversidade da paisagem bentônica da área de estudo (Fig. 20).

As características geomórficas encontradas são de grande importância, particularmente para estudos ecossistêmicos, uma vez que a morfologia afeta a distribuição das comunidades bentônicas, influenciando fatores ambientais como substrato, erosão ou deposição de sedimentos, correntes e nutrientes disponíveis [23].

Neste sentido, Pereira e Bonetti [6] apresentaram uma análise do relevo de fundo, a partir da extensão BTM, de três unidades de conservação do Brasil: Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha (PARNAMAR Noronha), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (PARNAMAR Abrolhos) e da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo (REBIOMAR Arvoredo). A análise concluiu que estas áreas possuem grande complexidade morfológica do fundo marinho. Na pesquisa sugere-se que os altos índices de biodiversidade, em certo grau, podem estar associados a alta complexidade morfológica do fundo marinho das respectivas áreas.

A análise sistemática entre o diâmetro médio dos grãos dos sedimentos superficiais, teores de cascalho, areia e lama e as estruturas bentônicas classificadas, possibilita uma compreensão mais abrangente dos habitats bentônicos potenciais presentes na área de estudo.

Observa-se nas estruturas classificadas como depressões uma grande quantidade de sedimentos com diâmetro médio dos grãos de cascalho, contrastando com estruturas classificadas como planícies, cujo sedimento possui média predominantemente de areia fina. Já as superfícies planas em encostas, as encostas suaves e os pináculos, são marcados novamente pela predominância de sedimentos cascalhosos.

Neste sentido, comprova-se o descrito por Manso [12], que afirma que a distribuição espacial da dos diâmetros médios dos grãos é controlada pela presença de feições positivas, tais como recifes.

Entre as regiões classificadas como planícies, vê-se pequenas diferenças nos teores de lama, ao comparar-se a estrutura presente no grupo A e a do grupo E. Possivelmente, o pequeno acréscimo de profundidade no segundo grupo, tenha sido responsável por agregar sedimentos mais finos que os constantes na amostra do primeiro grupo.

O grupo D apresenta variação dos teores de cascalho areia e lama em suas amostras. Isto pode estar relacionado à geomorfologia da área. Tal variação dos teores pode indicar que esta área tenha uma maior variação nas comunidades que estão associadas ao setor, uma vez que organismos distintos adequam-se a área a depender de suas particularidades [5,30–33].

Quanto aos teores de cascalho, areia e lama, observa-se que a maior porcentagem de lama são encontradas nas planícies, enquanto que os topos de afloramentos rochosos são marcados por altos teores de cascalho. Igualmente, no setor norte da área, estruturas classificadas como pináculos em grandes áreas planas foram

amostrados com alto teor de cascalho. Esta configuração é observada em análises realizadas no Mar de Weddell, onde tamanhos de grãos mais grossos aparecem em características geomórficas mais expostas, como cristas e afloramentos [23].

Tais padrões indicam possível heterogeneidade na distribuição potencial de habitats bentônicos, uma vez que alterações na profundidade e nos teores de lama estão fortemente correlacionados, e refletem processos distintos de associação de comunidades bentônicas [3].

A classificação estabelecida neste trabalho não oferece uma descrição completa dos habitats bentônicos da região, mas uma visão da distribuição potencial dos mesmos, como proposto por Brown *et al* [30] em sua Estratégia para mapeamento da distribuição de habitats marinhos. Essa, intitulada de “*Estratégia 1 – Substitutos Abióticos (Não-Supervisionada)*”, consiste em analisar os padrões ambientais abióticos para inferir tendências biológicas.

Tal classificação pode ser validada em trabalhos futuros, com o auxílio de dados *in situ* da área, imagens por fotografias e/ou vídeos transectos georreferenciados e imageamento com métodos acústicos, proporcionando o refinamento das análises e identificação de novos padrões ecológicos [6], sendo a análise conjunta com o BPI reconhecida como fornecedora de resultados promissores [22].

3.6 Conclusões

Um mapa da espacialização das classes do fundo marinho da plataforma continental ao norte de Pernambuco derivado do banco de dados batimétricos e amostras de sedimentos superficiais foram utilizados para analisar a relação entre as classes geomorfológicas dos fundos marinhos e a distribuição de sedimentos.

A análise espacial entre BPIs de ampla e fina escalas, *slope*, e MBD, guiados pelo dicionário de classificação (Tab. 3), resultou em um mapa que introduz o primeiro esquema de classificação bentônico para o norte do Estado de Pernambuco. Tal análise permitiu identificar 8 classes de fundo marinho/estruturas bentônicas.

65% da área é composta por planícies, 11% apresentam-se como depressões, 7% como topos de afloramentos rochosos. 6% da área pertence a classificação de encostas suaves, enquanto que 3% como encostas íngremes. 4% da área apresenta-se como superfícies planas em encostas e outros 4% como pináculos em grandes áreas planas. A

classe de fundo dos pináculos locais em depressões representam menos de 1% do total da área de estudo.

Sugere-se, então, os 65% da área formados por planícies, que por sua vez apresentam BPIs próximos a zero, são áreas que tendem a ter uma menor heterogeneidade de organismos associados. Ao passo que 16% da área, formado por encostas íngremes e suaves, que possuem as maiores alternâncias no *slope*, além de topos de afloramentos rochosos, que representam BPIs positivos, tendem a ter uma maior heterogeneidade nos organismos associados.

A maior parte das amostras sedimentológicas são encontradas em áreas de planícies e as menores em superfícies planas em encostas. Poucas amostras são vistas em áreas de cristas, como as de pináculos e os topos de afloramentos rochosos. Isto pode estar relacionado tanto a área total em km² das classes de fundo, sendo a de maior ocupação referentes às planícies, quanto pela dificuldade de se obter amostras nas áreas de crista, muito porque a maioria delas corresponde a frações de corais, com amostragem dificultada.

A alternância entre valores positivos e negativos de BPI, que indicam classes distintas do fundo marinho, indica variação do terreno em uma área, além de estar relacionada a alternância entre os teores de cascalho, areia e lama. Essa variação de composição sedimentológicas pode indicar alternância entre as comunidades bentônicas associadas.

3.7 Referências

1. *Seafloor geomorphology as benthic habitat: GeoHAB atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats*; Harris, P. T., Baker, E. K., Eds.; Elsevier insights; 1st ed.; Elsevier: Amsterdam ; Boston, 2012; ISBN 978-0-12-385140-6.
2. Lecours, V.; Devillers, R.; Schneider, D. C.; Lucieer, V. L.; Brown, C. J.; Edinger, E. N. Spatial scale and geographic context in benthic habitat mapping: review and future directions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **2015**, 535, 259–284.
3. Post, A. L.; Beaman, R. J.; O'Brien, P. E.; Eléaume, M.; Riddle, M. J. Community structure and benthic habitats across the George V Shelf, East Antarctica: trends through space and time. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **2011**, 58, 105–118.

4. Buhl-Mortensen, P. al; Buhl-Mortensen, L.; Dolan, M.; Dannheim, J.; Kröger, K. Megafaunal diversity associated with marine landscapes of northern Norway: a preliminary assessment. *Nor. J. Geol.* **2009**, *89*, 163–171.
5. Verfaillie, E.; Degraer, S.; Schelfaut, K.; Willems, W.; Van Lancker, V. A protocol for classifying ecologically relevant marine zones, a statistical approach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2009**, *83*, 175–185, doi:10.1016/j.ecss.2009.03.003.
6. Pereira, M. L. M.; Bonetti Filho, J. Caracterização geomorfológica do relevo submarino de áreas marinhas protegidas com base em técnicas de análise espacial. *Rev. Bras. Geomorfol.* **2018**, *19*.
7. Lecours, V.; Dolan, M. F. J.; Micallef, A.; Lucieer, V. L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2016**, *20*, 3207–3244, doi:10.5194/hess-20-3207-2016.
8. Lecours, V.; Devillers, R.; Simms, A. E.; Lucieer, V. L.; Brown, C. J. Towards a framework for terrain attribute selection in environmental studies. *Environ. Model. Softw.* **2017**, *89*, 19–30.
9. Pittman, S. J.; Brown, K. A. Multi-scale approach for predicting fish species distributions across coral reef seascapes. *PloS One* **2011**, *6*, e20583.
10. Erdey-Heydorn, M. D. An ArcGIS® seabed characterization toolbox developed for investigating benthic habitats. *Mar. Geod.* **2008**, *31*, 318–358.
11. Gladstone, W. Requirements for marine protected areas to conserve the biodiversity of rocky reef fishes. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* **2007**, *17*, 71–87.
12. FINEP/UFPE Monitoramento Ambiental Integrado - MAI 2009.
13. Goes, E. R.; Ferreira Jr., A. V. Caracterização Morfossedimentar da Plataforma Continental Brasileira. *Rev. Bras. Geogr. Física* **2017**, *10*.
14. Vital, H.; Esteves, L. S.; Araújo, T. C. M.; Patchineelam, S. M. Oceanografia geológica e geofísica da plataforma continental brasileira. *Quaternário Bras. Ribeirão Preto Holos Ed.* **2005**, 153–175.
15. Summerhayes, C. P.; Fainstein, R.; Ellis, J. P. Continental margin off Sergipe and Alagoas, northeastern Brazil: a reconnaissance geophysical study of morphology and structure. *Mar. Geol.* **1976**, *20*, 345–361.
16. Manso, V. A. V.; Valença, L. M. M.; Coutinho, P. N.; Guerra, N. C. Sedimentologia da Plataforma Continental. In *Oceanografia: um cenário tropical*; Bagaço, 2004.

17. Araújo, T. de; Seoane, J. C. S.; Coutinho, P. da N. Geomorfologia da plataforma continental de Pernambuco. *Ça EE Neumann-Leitão Costa MF Oceanogr. Um Cenário Trop. Recife Bagaço* **2004**, 39–57.
18. Coutinho, P. N. Geologia marinha da plataforma continental Alagoas-Sergipe. Recife. 119p, Tese de Livre Docência. Universidade Federal de Pernambuco, 1976.
19. Sibson, R. A brief description of natural neighbor interpolation. *Interpret. Multivar. Data* **1981**, 21–36.
20. Goes, E. R.; Ferreira Jr., A. V.; Araújo, T. C. M. The morphometry of a tropical continental shelf in northeast Brazil. *Geosciences* **2017**, no prelo.
21. Wright, D. J.; Lundblad, E. R.; Larkin, E. M.; Rinehart, R. W.; Murphy, J.; Cary-Kothera, L.; Draganov, K. ArcGIS® Benthic Terrain Modeler [a collection of tools used with bathymetric data sets to examine the deepwater benthic environment]. *Or. State Univ. Davey Jones' Locker Seafloor Mapping Marine GIS Lab. NOAA Coast. Serv. Cent.* **2005**.
22. Lundblad, E. R.; Wright, D. J.; Miller, J.; Larkin, E. M.; Rinehart, R.; Naar, D. F.; Donahue, B. T.; Anderson, S. M.; Battista, T. A benthic terrain classification scheme for American Samoa. *Mar. Geod.* **2006**, 29, 89–111.
23. Jerosch, K.; Kuhn, G.; Krajnik, I.; Scharf, F. K.; Dorschel, B. A geomorphological seabed classification for the Weddell Sea, Antarctica. *Mar. Geophys. Res.* **2016**, 37, 127–141, doi:10.1007/s11001-015-9256-x.
24. Kostylev, V. E.; Courtney, R. C.; Robert, G.; Todd, B. J. Stock evaluation of giant scallop (*Placopecten magellanicus*) using high-resolution acoustics for seabed mapping. *Fish. Res.* **2003**, 60, 479–492.
25. Wright, D. J.; Pendleton, M.; Boulware, J.; Walbridge, S.; Gerlt, B.; Eslinger, D.; Sampson, D.; Huntley, E. ArcGIS® Benthic Terrain Modeler (BTM), v. 3.0, Environmental Systems Research Institute, NOAA Coastal Services Center, Massachusetts Office of Coastal Zone Management. *Esriurl Com5754* **2012**.
26. PROJETO MAPLAC ontribuição do Mapeamento Sonográfico e Batimétrico da Plataforma Continental Interna Adjacente aos Municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes - PE para a Caracterização da Dinâmica Erosiva da Região. 2010.
27. Suguio, K. Introdução à sedimentologia. Edgard Blucher, São Paulo, 317 pp. Watling, L. & EA Norse. 1998. A comparison of mobile fishing gear and forest clearcutting. *Conserv Biol* **1973**, 12, 1180–1197.

28. Folk, R. L.; Ward, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Res.* **1957**, 27.
29. Schlacher, T. A.; Williams, A.; Althaus, F.; Schlacher-Hoenlinger, M. A. High-resolution seabed imagery as a tool for biodiversity conservation planning on continental margins. *Mar. Ecol.* **2010**, 31, 200–221.
30. Brown, C. J.; Smith, S. J.; Lawton, P.; Anderson, J. T. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2011**, 92, 502–520, doi:10.1016/j.ecss.2011.02.007.
31. Post, A. L. The application of physical surrogates to predict the distribution of marine benthic organisms. *Ocean Coast. Manag.* **2008**, 51, 161–179, doi:10.1016/j.ocecoaman.2007.04.008.
32. Beaman, R. J.; Harris, P. J. Geophysical variables as predictors of megabenthos assemblages from the northern Great Barrier Reef, Australia. In; Geological Association of Canada, 2007.
33. McArthur, M. A.; Brooke, B. P.; Przeslawski, R.; Ryan, D. A.; Lucieer, V. L.; Nichol, S.; McCallum, A. W.; Mellin, C.; Cresswell, I. D.; Radke, L. C. On the use of abiotic surrogates to describe marine benthic biodiversity. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **2010**, 88, 21–32, doi:10.1016/j.ecss.2010.03.003.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho cumpriu seu objetivo principal que foi compreender, através da geodiversidade da área, os padrões de distribuição espacial dos habitats marinhos bentônicos. O alcance deste objetivo foi possível através dos artigos apresentados neste documento.

No primeiro artigo, intitulado “*The morphometry of a tropical continental shelf in northeast Brazil*”, através de análises geomorfométricas, numa abordagem qualitativa, foi possível observar e quantificar as diferenças existentes no gradiente de profundidade da área de estudo.

Neste artigo foram também estabelecidas, matematicamente, as distinções geomórficas presentes na área. Identificou-se 5 diferenças latitudinais, que refletem as diferenças geométricas existentes na área, quantificadas pela distância euclidiana.

Dois grupos possuem diferenças bem marcantes. No setor norte da área observa-se o caráter homogêneo do grupo A, enquanto que o setor central da área, é marcado pela heterogeneidade do grupo D conferida pelas feições positivas (bancos recifais) e negativas existentes (canais).

Os resultados obtidos neste artigo possibilitaram uma visão mais detalhada sobre a topografia da área de estudo, sendo o primeiro passo para o cumprimento do objetivo principal deste trabalho.

No segundo artigo, intitulado “*Classificação do fundo marinho em uma plataforma continental tropical do nordeste do Brasil*”, concretizou-se o objetivo principal desta dissertação de mestrado. Nele, foi estabelecida, numa abordagem qualitativa, a distribuição potencial dos habitats bentônicos existentes na área de estudo.

Com o auxílio da extensão BTM para Arcgis 10.x, foram classificados os tipos de fundo (os estruturas bentônicas) existentes na área de estudo. Foram encontradas 8 classes distintas.

Houve alternância planícies (65% da área), depressões (11% da área), topos de afloramentos rochosos (7% da área), encostas suaves (6% da área), superfícies planas em encostas (4% da área), pináculos locais em grandes áreas planas (4% da área), encostas íngremes (3% da área) e pináculos locais em depressões (menos de 1% da área), demonstrando novamente o caráter heterogêneo da região.

A relação entre as classes de fundo citadas e os sedimentos superficiais presentes na área também foi estudada. Observou-se que a distribuição espacial do diâmetro médio dos grãos é controlada pela presença de feições positivas, tais como recifes. Além disso, viu-se que as maiores porcentagens de lama são encontradas em planícies, enquanto que os maiores teores de cascalho são encontrados nos topos de afloramentos rochosos e em pináculos. Concluindo que grãos mais grossos estão relacionados à presença de feições geomorfológicas mais expostas.

Tomou-se como pressuposto, para realização do estudo, que habitats marinhos bentônicos são áreas fisicamente distintas do fundo do mar que estão associadas à espécies, comunidades ou conjuntos específicos de organismos que ocorrem constantemente juntos (Harris e Baker, 2012).

Com as distinções do fundo marinho estabelecidas, identificando as áreas do fundo marinho (geo)estatisticamente distintas de seus arredores (Lecours et al., 2016), estabeleceu-se um dos primeiros mapas de predição de habitats marinhos bentônicos para o nordeste da plataforma continental brasileira.

REFERÊNCIAS

- Beaman, R.J., Harris, P.J., 2007. Geophysical variables as predictors of megabenthos assemblages from the northern Great Barrier Reef, Australia. Geological Association of Canada.
- Brown, C.J., Sameoto, J.A., Smith, S.J., 2012. Multiple methods, maps, and management applications: purpose made seafloor maps in support of ocean management. *J. Sea Res.* 72, 1–13.
- Brown, C.J., Smith, S.J., Lawton, P., Anderson, J.T., 2011. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 92, 502–520. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.007>
- CBD, 2010. Convention on Biological Diversity.
- Erdey-Heydorn, M.D., 2008. An ArcGIS seabed characterization toolbox developed for investigating benthic habitats. *Mar. Geod.* 31, 318–358.
- Ferrier, S., Guisan, A., 2006. Spatial modelling of biodiversity at the community level. *J. Appl. Ecol.* 43, 393–404.
- FINEP/UFPE, 2009. Monitoramento Ambiental Integrado - MAI.
- Freitas, R., Sampaio, L., Oliveira, J., Rodrigues, A.M., Quintino, V., 2006. Validation of soft bottom benthic habitats identified by single-beam acoustics. *Mar. Pollut. Bull.* 53, 72–79.
- Goes, E.R., Ferreira Jr., A.V., Araújo, T.C.M., 2017. The morphometry of a tropical continental shelf in northeast Brazil. *Geosciences* no prelo.
- Greene, H.G., Bizzarro, J.J., O’Connell, V.M., Brylinsky, C.K., 2007. Construction of digital potential marine benthic habitat maps using a coded classification scheme and its application. *Mapp. Seafloor Habitat Charact. Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.* 47, 141–155.
- Greene, H.G., Bizzarro, J.J., Tilden, J.E., Lopez, H.L., Erdey, M.D., 2005. The benefits and pitfalls of geographic information systems in marine benthic habitat mapping. *Wright DJ Sch. AJ Place Matters Geospatial Tools Mar. Sci. Conserv. Manag. Pac. Northwest Or. State Univ. Press Corvallis OR.*
- Harris, P.T., 2012. Biogeography, benthic ecology, and habitat classification schemes. *Seafloor Geomorphol. Benthic Habitat GeoHAB Atlas Seafloor Geomorphic Featur. Benthic Habitats* 61–92.

- Harris, P.T., 2007. Applications of geophysical information to the design of a representative system of marine protected areas in southeastern Australia, in: Mapping the Seafloor for Habitat Characterization. Geological Association of Canada, Special Paper 47, pp. 463–482.
- Harris, P.T., Baker, E.K. (Eds.), 2012. Seafloor geomorphology as benthic habitat: GeoHAB atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats, 1st ed. ed, Elsevier insights. Elsevier, Amsterdam ; Boston.
- Huang, Z., Brooke, B.P., Harris, P.T., 2011. A new approach to mapping marine benthic habitats using physical environmental data. *Cont. Shelf Res.* 31, S4–S16. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.03.012>
- Kostylev, V.E., Hannah, C.G., 2007. Process-driven characterization and mapping of seabed habitats. *Mapp. Seafloor Habitat Charact. Geol. Assoc. Can. Spec. Pap.* 47, 171–184.
- Lecours, V., Devillers, R., Simms, A.E., Lucieer, V.L., Brown, C.J., 2017. Towards a framework for terrain attribute selection in environmental studies. *Environ. Model. Softw.* 89, 19–30.
- Lecours, V., Dolan, M.F.J., Micallef, A., Lucieer, V.L., 2016. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 3207–3244. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3207-2016>
- Lucieer, V.L., 2007. The application of automated segmentation methods and fragmentation statistics to characterise rocky reef habitat. *J. Spat. Sci.* 52, 81–91.
- McArthur, M.A., Brooke, B.P., Przeslawski, R., Ryan, D.A., Lucieer, V.L., Nichol, S., McCallum, A.W., Mellin, C., Cresswell, I.D., Radke, L.C., 2010. On the use of abiotic surrogates to describe marine benthic biodiversity. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 88, 21–32. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.03.003>
- Ministério do Meio Ambiente, 2007. Reconhece como áreas prioritárias para a conservação, utilização sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade brasileira as áreas que menciona.
- Pittman, S.J., Brown, K.A., 2011. Multi-scale approach for predicting fish species distributions across coral reef seascapes. *PloS One* 6, e20583.
- Post, A.L., 2008. The application of physical surrogates to predict the distribution of marine benthic organisms. *Ocean Coast. Manag.* 51, 161–179. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2007.04.008>

- Roff, J.C., Taylor, M.E., Laughren, J., 2003. Geophysical approaches to the classification, delineation and monitoring of marine habitats and their communities. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 13, 77–90.
- Verfaillie, E., Degraer, S., Schelfaut, K., Willems, W., Van Lancker, V., 2009. A protocol for classifying ecologically relevant marine zones, a statistical approach. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 83, 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.03.003>